

AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO II

TOMO VI

INGENIERÍAS

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

PREFACIO

En este compendio se presentan avances de investigación y desarrollo tecnológico logrados en diversas áreas de la ciencia, cuyo objetivo principal es contribuir a la difusión del quehacer científico y tecnológico que se realiza en México, así como promover el trabajo interdisciplinario entre miembros de diferentes disciplinas científicas.

El presente trabajo está organizado en siete tomos los cuales corresponden a las siguientes áreas científicas: I) Biología y química, II) Biotecnología y ciencias agropecuarias, III) Ciencias sociales, IV) Físico matemáticas y ciencias de la tierra, V) Humanidades, ciencias de la conducta y divulgación científica, VI) Ingenierías, así como VII) Medicina y ciencias de la salud.

Octubre de 2025
León, Gto., México

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
Alexandra Monsetrrat García

DECLARACIÓN LEGAL

EDITORES:

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zarate
Alexandra Monsetrrat García

Avances Científicos y Tecnológicos en México II

ISBN GENERAL 978-607-8821-53-2

Fecha de otorgamiento 22/09/2025

Tomo VI Ingenierías

ISBN 978-607-8821-59-4

Fecha de otorgamiento 22/09/2025

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores.

Temacilli Editorial
Lagos de Moreno, Jalisco
http:/temacilli-editorial.com

D.R. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre
C.P. 37150 León, Guanajuato
México
Hecho en México

Avances Científicos y Tecnológicos en México II

Tomo VI

Ingenierías

TABLA DE CONTENIDO

APLICACIÓN DE UN MODELO DEEP LEARNING EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE 7

DESPACHO ECONÓMICO ÓPTIMO EN MICRO-RED DE CD CONSIDERANDO FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y GENERACIÓN CONVENCIONAL 14

INNOVACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE PROGRAMACIÓN CON CIENCIA DE DATOS Y FÓRMULA 1 24

INTERACCIÓN SUELO-ESTRIBO-SUPERESTRUCTURA EN PUENTES SEMI-INTEGRALES ... 33

EVALUACIÓN DEL ÁCIDO ROSMARÍNICO COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN MEDIANTE DINAMICA MOLECULAR 45

PELÍCULAS BIODEGRADABLES A BASE DE ALMIDÓN TERMOPLASTICO Y NANOCELULOSA DE CÁSCARA DE PAPAYA 55

PELÍCULAS DE QUITOSANO: MODULACIÓN DE LA SOLUBILIDAD Y EVALUACIÓN FISICOQUÍMICA 62

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA LIMPIEZA Y SEPARACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON LIMADURA DE HIERRO Y ACEITE PARA BEBÉ CON TÉCNICAS DE SEPARACIÓN FÍSICA 78

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL NIVEL ESTÁTICO Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ABATIMIENTO DEL ACUÍFERO VALLE DE LEÓN 85

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE ORO CON COMPOSITOS SILICE-MAGNETITA (GMS-NX-FE) 98

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INTERFAZ DE USUARIO INTERACTIVA PARA EL CONTROL DE BRAZO ROBÓTICO DIDÁCTICO CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD 110

DISEÑO DE UN SISTEMA ROBÓTICO MODULAR BASADO EN LA MORFOLOGÍA DE UNA SERPIENTE PARA TAREAS DE BÚSQUEDA Y RESCATE 117

ELABORACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA FINES EDUCATIVOS Y DE INCLUSIÓN ... 124

APROVECHAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN REVERSIBLE FOTO-INDUCIDA EN LOS ELASTÓMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS PARA SU POSIBLE USO EN DISPOSITIVOS ACTIVADOS DE MANERA REMOTA 128

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS DE ROBOTS DE COMPETENCIA 134

EVALUACIÓN DE SENSORES DE GAS BASADOS EN NANOTUBOS DE TITANIO DECORADOS CON NANOPARTICULAS METÁLICAS 145

SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO (DDB) A BAJA TEMPERATURA Y PRESIÓN: RUTA ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE 151

DESENTRALIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COMUNIDADES RURALES MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 166

EFECTO DE UN INHIBIDOR NATURAL ELABORADO A BASE DE FLORES DE JACARANDA SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE UN ACERO API 5L GRADO B ENVEJECIDO ARTIFICIALMENTE EN AGUA CONGÉNITA 177

INNOVACIÓN EN EL DISEÑO DE EMPAQUES PARA MATERIALES PELIGROSOS: SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN EL MANEJO DE SOSA CÁUSTICA UTILIZANDO LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL 185

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UN TERMOPAR INALAMBRICO PARA EVALUACION TERMICA DE HORNOS DE CERAMICA 193

SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN VISUAL UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL CON PYTHON 197

OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS DE BETALAÍNAS DE LA PULPA DE PITAYA (*Stenocereus Spp.*) 208

SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS CON TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA 215

SENSOR DE FIBRA ÓPTICA TIPO MACH-ZEHNDER PARA SOLUCIONES DE PH DE 5 A 9 UTILIZANDO LA TÉCNICA DE DESPLAZAMIENTO DEL NÚCLEO 221

INTEGRACIÓN DE LEST Y REBA PARA DISEÑAR ESTACIONES DE TRABAJO SEGURAS Y EFICIENTES EN LA INDUSTRIA METALMECÁNICA 227

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO DE PUENTES SEMI-INTEGRALES EN MÉXICO 238

BIOPLÁSTICOS FÚNGICOS MODIFICADOS CON ETILENGLICOL: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES 250

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS TEXTILES EN LA FABRICACIÓN DE TABIQUES CON MEZCLA DE SEDIMENTO ARCILLOSO 266

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN EL DESEMPEÑO ESCOLAR DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL AL IMPLEMENTAR CURSOS EN LÍNEA MASIVOS Y ABIERTOS (MOOC) PARA ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA 275

MATRICES DE RECONSTRUCCIÓN PARA OBTENCIÓN DE IMAGEN TOMOGRÁFICA POR INFRARROJO 286

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO BIOMÉDICO PORTÁTIL PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL DE PARÁMETROS FISIOLÓGICOS Y AMBIENTALES 290

CHATBOTS TERAPÉUTICOS: APOYO EMOCIONAL PARA LA DEPRESIÓN MEDIANTE MODELOS DE LENGUAJE MULTIMODAL BASADOS EN IA 297

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTRUCTURALES DE ESCORIAS DE ALUMINIO SECUNDARIO: UNA PROPUESTA PARA SU RECICLAJE 310

EVALUACIÓN COSTO-BENEFICO EN LA IMPLEMENTACION DEL PASTEURIZADOR SOLAR CULAGOS EN LA INDUSTRIA LÁCTEA A TRAVÉS DE SU SISTEMA FOTOVOLTÁICO Y SOLAR TÉRMICO 317

FRAGUA DIDÁCTICA PARA TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO AL CARBONO DE BAJA O MEDIA ALEACIÓN, EN GRADOS GR 42, GR 52 Y GR 60 321

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO BAJO EL ENFOQUE NORMATIVO DE LAS NOM'S DE LA STPS 328

POLIETILENO TEREFTALATO Y CAUCHO SINTÉTICO: ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS ECOLÓGICAS 334

DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA DETECCIÓN EN TIEMPO REAL DE MALEZA EN CULTIVOS DE LA REGIÓN 349

DESARROLLO DE UN ELECTRODO MULTIELEMENTO PARA LA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA NO INVASIVA DE LA CÓRNEA HUMANA 360

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO EN LA FORMACIÓN DE CAPAS DE BORURO EN UN ACERO INOXIDABLE 316 L 371

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESCINCIFICACIÓN O CORROSIÓN SELECTIVA DEL ZINC EN ALEACIONES DE LATÓN 384

DISEÑO DE SISTEMAS DE FILTRADO BASE MATERIALES POROSOS MODIFICADOS CON CERÁMICOS HÍBRIDOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES OLEOS 390

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PINÁCULOS UBICADOS SOBRE FACHADAS DE EDIFICIOS DELCENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN 398

INTEGRACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA Y CAD COMO HERRAMIENAS DE APRENDIZAJE ACTIVO 406

REMOCIÓN DE ZINC DE UN EFLUENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DE HIERRO POR ELECTRODIÁLISIS 416

MODIFICACIÓN DE ESTRATEGÍA DE MODULACIÓN SPWM A MODULACIÓN VECTORIAL CON APLICACIONES EN DSP PARA CONVERTIDORES CD-CA 426

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DETERIORO DE FACHADAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE MORELIA 432

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y LUMINISCENTES DEL FÓSFORO $CaAl_2Si_2O_8$ DOPADO CON Tb^{3+} Y Eu^{3+} 443

DESARROLLO DE MODELOS PREDICTIVOS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINATES EN TIEMPO REAL 449

PROTOTIPO DE MÁQUINA DE ESTIRAMIENTO DE PLÁSTICO BIODEGRADABLE REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES 458

ALINEACIÓN AUTOMÁTICA X-Y PARA SISTEMA DE FILTRADO ESPACIAL ÓPTICO, POR MEDIO DE CONTROLADOR NEURODIFUSO 464

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA DESTILACIÓN DE ÉSTER METÍLICO A PARTIR DE ACEITE DE PIRUL UTILIZANDO DWSIM 470

BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y AGRÍCOLAS MEDIANTE LA ACCIÓN DE PLEUROTUS OSTREATUS: EVALUACIÓN DE TRANSFORMACIÓN QUÍMICA Y BENEFICIOS AMBIENTALES 477

DISEÑO DE PROTOTIPO PARA ASISTENCIA PARA LA CONDUCCION INTELIGENTE PARA PERSONAS CON DEBILIDAD MOTRIZ EN EL TREN INFERIOR 483

EVALUCIÓN DEL PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO CON PILAS DE UNA COLUMNA 489

SISTEMA INTELIGENTE DE CONTROL TÉRMICO PARA EL TRANSPORTE DE ASFALTO 500

ANÁLISIS COMPARATIVO DE REGULADORES DE VOLTAJE EN CA CON INTERRUPTORESBIDIRECCIONALES: CATODO COMÚN VS. PUENTE H 507

LA LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON: EL CASO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DE UN AUTOMÓVIL 514

FERRITAS MIXTAS DE Cu2+/Zn2+ DEPOSITADAS EN PET, PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO EN AGUA 521

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMPOSITOS DE POLI(3-HEXILTIOFENO) Y QUITOSANO PARA LA DETECCIÓN DE IONES DE NÍQUEL EN AGUA 532

EFECTO DE LA VARIACIÓN EN LA LONGITUD DEL GRUPO ESPACIADOR SOBRE LA BIRREFRINGENCIA FOTO-INDUCIDA DE AZOPOLÍMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS 547

EL IMPACTO DE IOT Y LAS TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN EN LA TRAZABILIDAD DEL VINO PARA SU AUTENTICIDAD Y ORIGEN 555

DESARROLLO SUSTENTABLE: LA PERSPECTIVA DESDE UN FUTURO INGENIERO INDUSTRIAL 561

ACTIVACIÓN DE INVERSOR MULTINIVEL DE 15 NIVELES MEDIANTE HARDWARE RECONFIGURABLE 566

METODOLOGIA PARA LA DETECCIÓN DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GAS PROPANO EN BASE A LA RESPUESTA ELÉCTRICA DINÁMICA DEL ÓXIDO $CoSb_2O_6$ 572

CARRO AUTOMÁTICO DE SIEMBRA 577

APLICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL EN LA CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN EL CALZADO 582

DETECTOR DE DIOXIDO DE CARBONO FABRICADO EN BASE A LA RESPUESTA ELÉCTRICA DEL OXIDO $NiSb_2O_6$ 587

REDISTRIBUCION Y SIMULACION APLICADOS EN LA MEJORA DE UN PROCESO DE MEZCLADO PARA LA ELABORACION DE EVA 593

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE ENFERMEDADES DERMATOLÓGICAS BASADO EN PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES Y APRENDIZAJE PROFUNDO 601

COMPATIBILIDAD DE CRUDOS PESADOS CON LÍQUIDOS IÓNICOS COMO SURFACTANTES UTILIZANDO EL BALANCE HIDROFÍLICO-LIPOFÍLICO (HLB) 608

EL RIESGO OCULTO DE LOS MUROS ASIMÉTRICOS EN LOS EDIFICIOS DE ESQUINA: ¿PORQUÉ SE CAEN ESTOS EDIFICIOS DURANTE LOS SISMOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO?..... 613

APROVECHAMIENTO DE DESECHOS DE CAFÉ PARA LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO 624

RENDIMIENTO Y SEGURIDAD EN CENTROS DE DATOS: GESTIÓN TÉRMICA Y ORGANIZACIÓN DE SERVIDORES 631

LA FOTOGRAFÍA DIGITAL, TRACKER Y GEOGEBRA EN LA MODELACIÓN DEL ÁREA BAJO LA CURVA PARA LA FORMACIÓN DE INGENIEROS MECÁNICOS EN LA REGIÓN COSTA GRANDE DE GUERRERO 643

MUVA: ASISTENTE VIRTUAL BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL MONITOREO Y RECOMENDACIÓN PERSONALIZADA DE SALUD 650

PROTOTIPO TERAPÉUTICO PARA LA REHABILITACIÓN DE BRAZOS Y MANOS TRAS TRAUMAS POR CAÍDAS: UN ENFOQUE BASADO EN ESTUDIOS ANTROPOMÉTRICOS Y ERGONÓMICOS 654

DETECCIÓN INTELIGENTE DE EXPRESIONES FACIALES: UN ENFOQUE DE VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SIGNOS DE DEPRESIÓN Y MALTRATO 665

SÍNTESIS DE MANGANATO DE LITIO-NÍQUEL DOPADO CON BISMUTO PARA FOTOGENERACIÓN DE HIDRÓGENO: CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL, MORFOLÓGICA Y ELECTROQUÍMICA 675

ESTUDIO DE FALLAS EN PILAS DE MAMPOSTERÍA A COMPRESIÓN EMPLEANDO LA MICROMODELACIÓN Y VARIACIÓN PARAMÉTRICA 685

DAÑOS SÍSMICOS EN EDIFICIOS ORIGINADOS POR UNIR MUROS A LOS MARCOS DE CONCRETO REFORZADO EN MÉXICO 698

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA PLANTACIÓN DE SEMILLAS 708

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEMBRANAS DE CELULOSA/QUITOSANA CON Y SIN MWCNTS…. 722

INFLUENCIA DEL FACTOR DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN LA RESPUESTA SÍSMICA ESPERADA DE PUENTES 737

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE MORELIA 750

EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE EN EL ENLACE DE CD DE UN INVERSOR NPC….. 757

ANÁLISIS BIOMECÁNICO DEL MANEJO MANUAL DE CARGAS A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO Y CON BASE EN LA NOM-036-1-STPS-2018 764

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROLADOR TB6600 PARA SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE ALTA PRECISIÓN..... 770

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MONTURAS ÓPTICAS PERSONALIZADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN BÁSICA..... 778

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DETECTOR ÓPTICO BASADO EN PROGRAMACIÓN GRAFICA PARA SU INTEGRACIÓN EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA . 788

SIMULACIÓN DE LA DETECCIÓN DE FALLAS EN UN INVERSOR PUENTE-H EN CASCADA DE SIETE NIVELES USANDO UNA RED NEURONAL Y EL ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE SALIDA 800

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA DETECTAR Y SEGMENTAR TUMOR MALIGNO EN MUESTRAS INFRARROJAS DE SENO USANDO UN NUEVO MÉTODO BASADO EN CNN 811

DETERMINACIÓN DE LA AFINIDAD TINTÓREA DE MICROPLÁSTICOS DE TYGON™ 44–4X AL COLORANTE ROJO NILO..... 816

CÁLCULO Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS ÓPTICOS EN FIBRAS ÓPTICAS MONOMODALES: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS COMPUTACIONALES Y SOFTWARES COMERCIALES 826

RULA Y OCRAS COMO ALTERNATIVA PARA LA PREVENCIÓN DE LESIONES MUSCULOESQUELÉTICAS EN LA FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES 844

EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN CERÁMICOS SiO2/PDMS PARA MEJORAR LA CAPACIDAD ANTICORROSIVA..... 854

FORTALECIMIENTO EN AGRONEGOCIOS DE MUJERES RURALES MEDIANTE LA MEJORA DE PROCESOS PRODUCTIVOS EN EL NORTE DE SANTANDER 862

DE LO VIRTUAL A LO FÍSICO: EL PAPEL DE GEOGEBRA Y LA IMPRESIÓN 3D EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA COSTA GRANDE DE GUERRERO 871

SISTEMA EMBEBIDO 4.0 MULTITAREA PARA EL MONITOREO DE SEÑALES BIOLÓGICAS Y OTROS SENSORES..... 876

DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA DISTRIBUIR INSUMOS AGRICOLAS MEDIANTE UN DESARROLLADOR CAD..... 882

ANÁLISIS DE CINÉTICAS DE SECADO EN UN DESHIDRATADOR ROTATIVO CON MONITOREO INTELIGENTE DE VARIABLES..... 887

SIMULACIÓN DE ANDAMIOS CON PROPIEDADES MAGNÉTICAS PARA INGENIERÍA DE TEJIDOS EN COMSOL MULTIPHYSICS 896

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO EN EL LABORATORIO DE MANUFACTURA FLEXIBLE DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LA CIÉNEGA 902

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO EN LAS OFICINAS DEL EDIFICIO ADMINISTRATIVO DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LA CIÉNEGA..... 910

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIAL COMPUESTO POLIMÉRICO Y CENIZA VOLCÁNICA DEL POPOCATÉPETL 920

MODELO DE DATOS EN POWER BI PARA LA INTEGRACIÓN Y VISUALIZACIÓN EN LA TOMA DE DECISIONES 925

EVALUACION TERMODINAMICA DE LA INCORPORACION DE UN COLECTOR SOLAR FRESNEL EN EL PROCESO DE CAPTURA DE CO_2 933

DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCULTIVO PARA MAÍZ Y PEPINO..... 942

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA LSEESC Y LA IA EN EL APRENDIZAJE DE VECTORES EN INGENIERÍA..... 948

ÓXIDO DE GRAFENO COMO SOPORTE DE TiO_2 Y TiO_2-N 957

ANALISIS ESTADISTICO SOBRE EL EFECTO DE LA DISOLUCIÓN DE ZINC EN EL SISTEMA O_3/HNO_3/ZnS AL UTILIZAR CINCO DIFERENTES IMPULSORES MECANICOS DE AGITACIÓN……..... 966

PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN UNA COMUNIDAD RURAL 974

DISPOSITIVO DE LOCALIZACIÓN DE BAJO COSTO PARA PERSONAS DE LA TERCERA EDAD CON PADECIMIENTOS MENTALES 980

ANÁLISIS DE LA POSTURA DE CICLISTA POR MEDIO DE VISIÓN COMPUTACIONAL 987

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL PROCESÓ DE FOTOELECTROLISIS UTILIZANDO SEMICONDUCTORES 993

SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA PARA EL MULTISENSADO DE PARÁMETROS FÍSICOS UTILIZANDO UNA REJILLA DE PERIODO LARGO SIMÉTRICA 999

EL ESTADO DE ESFUERZOS UNIAXIAL DEL CONCRETO REFORZADO 1007

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LA CAPILLA DEL SEÑOR DE LA COLUMNA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN 1013

INSTRUMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL EMPLEADA PARA LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS NO INVASIVOS DE IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ROTODINÁMICOS..... 1022

DISEÑO Y ANÁLISIS MODAL DE UN PUENTE PEATONAL EN ARCO DE 45M DE LONGITUD POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO UTILIZANDO SOLIDWORKS 1035

APLICACIÓN DE UN MODELO DEEP LEARNING EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE

Susana Lezama Álvarez, Julio González García, María Teresa Torres Mancera

Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
susana_subc@tesco.edu.mx

RESUMEN

Con la tecnología desarrollada hasta ahora, el ser humano ha demostrado que se puede realizar casi cualquier tarea, en este caso la Inteligencia artificial, cuyo objetivo es la creación de sistemas capaces de realizar tareas que requieren inteligencia humana, avanzando así a pasos agigantados en cuanto a sus aplicaciones y logros. La visión artificial se compone de diferentes ramas y subramas, tales como el aprendizaje automático (Machine Learning) enfocada al desarrollo de algoritmos que permiten que las máquinas aprendan de los datos proporcionados, el aprendizaje profundo que utiliza redes neuronales profundas para aprender representaciones complejas, para ello utiliza grandes volúmenes de datos (Deep Learning). En este trabajo se pretende mostrar un caso de aplicación de la IA, en particular un modelo de Deep Learning que, mediante redes neuronales de visión artificial, aprende, procesa y posteriormente identifica, grandes volúmenes de datos para la detección y clasificación de residuos sólidos urbanos (RSU). El proceso para la detección final de residuos se llevó a cabo de la siguiente manera: Definición de los tipos de (RSU), captura de imágenes, procesamiento de imágenes para entrenamiento, introducción de datos para entrenamiento, Pruebas de conocimiento, determinación de exactitud para su detección y clasificación final. El modelo utilizado mostró buenos resultados para detectar e identificar en tiempo real 5 tipos diferentes de residuos sólidos por medio de una cámara web. El procesamiento de grandes cantidades de datos permitió la clasificación correcta de residuos sólidos urbanos en tiempo real. El modelo fue entrenado con un total de 400 imágenes que fueron procesadas obteniéndose resultados satisfactorios.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se generan alrededor de 1.3 mil millones de toneladas de desechos (semarnat.gob.mx, 2023), en América Latina y el Caribe ronda en 540 mil toneladas al día (unep.org, 2017), en México se estima en más de 103 mil toneladas diarias de desechos doméstica (Cruz Aburto, 2018); el Estado de México se generan 16,187 toneladas de residuos sólidos urbanos (Huerta, 2022), el municipio de Coacalco de Berriozábal genera 300 toneladas (Venegas, 2022), en promedio se estima que una persona produce diariamente 854 gramos de residuos en el hogar (Carranza, 2020). Es alarmante el aumento de la generación de este tipo de residuos domésticos ya que ha incrementado año tras año. En el Estado de México se ha comportado de la siguiente manera según datos de los reportados por los municipios al INEGI en 2010 se produjo una recolección de 8.2 toneladas de desechos diaria, para el 2012 aumento a 12 toneladas, para el 2014 solo aumento una tonelada y para el 2016 disminuyo a la misma cantidad del 2014 y para los años 2018 y 2020 se mantuvo en los mismos indicadores.

El presente trabajo pretende dar una propuesta de solución tomando en cuenta las clasificaciones aceptadas de los RSU, principios de ingeniería verde y de la economía circular que de acceso a formular el reaprovechamiento de los RSU por medio de visión y la inteligencia artificial que permita ayudar a la separación principalmente en los hogares y con ello se facilite la actividad de clasificar y almacenar desde la fuente de generación de los desechos. Existen varias propuestas que ayudan a esta actividad, sin embargo, la propuesta que se hace pretende clasificar mediante el uso de la inteligencia y visión artificial 5 tipos de desechos más común en el hogar.

La investigación inicia determinando la problemática que existe alrededor de la clasificación de los RSU y la existencia de las diferentes propuestas para su clasificación y separación. Si bien es cierto que ya existen diferentes métodos que permiten la clasificación de los RSU, muchos de ellos no

exploran el uso de las nuevas tecnologías como la inteligencia y visión artificial como motor de clasificación, por lo que este trabajo representa una propuesta basada en YOLOv8.

Posteriormente a la determinación de la problemática de la clasificación de los RSU, se hará uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes, además de la implementación de algoritmos de Inteligencia Artificial que permitirán identificar los diversos tipos de residuos y poder así determinar su tipo y clasificación.

Una computadora es capaz de identificar diferentes tipos de residuos dentro del campo de la aplicación de la visión artificial, para lo cual se abordaran los sistemas automáticos de reconocimiento que se desarrollaran por medio de 5 fases que consisten en la adquisición de las imágenes, procesamiento digital de las imágenes para mejorar el área de reconocimiento, la segmentación de ese objeto, extracción de las características de lo segmentado y finalmente se utiliza la inteligencia artificial para el reconocimiento de los residuos.

TEORÍA

La Química Ambiental analiza los procesos químicos que ocurren en distintos espacios del medio ambiente, como el suelo, el agua y la atmósfera. Estudia el impacto de las actividades humanas en el entorno y los problemas derivados de ello. También investiga los vertidos antropogénicos, su reducción y eliminación para minimizar daños. Supervisa los procesos industriales que puedan afectar la conservación ambiental. Busca soluciones para proteger el medio ambiente y garantizar la seguridad de las personas. Aplica principios químicos al estudio de problemas ecológicos. Su objetivo es reducir la contaminación y promover prácticas sostenibles. Es una disciplina clave para la preservación del planeta (Mota Ávila, 2011)

El modelo matemático de la máquina de Turing, desarrollado por Alan Turing, fue clave en la creación de los primeros prototipos de computadoras del siglo XX, estableciendo las bases de la Inteligencia Artificial (IA). Turing y otros científicos abordaron la pregunta sobre si las máquinas pueden pensar, lo que llevó a la necesidad de definir formalmente la inteligencia (Pérez Orozco, 2018). La IA se entiende como una rama de la computación en la que las máquinas imitan funciones cognitivas humanas, como creatividad, aprendizaje y lenguaje. Se clasifica según su aprendizaje en automático y profundo (Rodríguez D., 2023). También puede dividirse por su funcionamiento en sistemas basados en reglas y aprendizaje automático, usados en chatbots, sistemas expertos y recomendaciones.

En la tabla 1 y 2 se pueden ver las características de cada uno de los aprendizajes de la IA, así como sus aplicaciones más comunes.

Tabla 1. Clasificación de la IA por su aprendizaje (automático)

Categoría	Características	Subcategoría	Descripción
Aprendizaje automático o Machine Learning	• permite a los sistemas informáticos aprender automáticamente a partir de los datos. • los algoritmos aprender patrones a partir de los datos • los algoritmos son entrenados a partir de un	Aprendizaje supervisado	se entrenan utilizando datos etiquetados
		Aprendizaje no supervisado	se entrenan utilizando datos no etiquetados,
		Aprendizaje por refuerzo	se entrenan para tomar decisiones a través de la retroalimentación continua de un entorno
		Aprendizaje semi-supervisado	se utiliza una pequeña cantidad de datos etiquetados junto con una gran cantidad de datos no

	conjunto de datos para que puedan generalizar y hacer predicciones precisas sobre nuevos datos		etiquetados para entrenar el modelo.
		Aprendizaje activo	puede elegir qué datos etiquetados se utilizan para entrenar el modelo

Tabla 2. Clasificación de la IA por su aprendizaje (profundo)

Categoría	Características	Aplicaciones
Aprendizaje profundo o Deep Learning	aprendizaje se basa en redes neuronales artificiales se utiliza para tareas que requieren una gran cantidad de datos y una alta capacidad de procesamiento	Reconocimiento de voz Reconocimiento de imágenes Traducción automática Traducción automática Análisis de sentimiento Juegos de estrategia

La Inteligencia Artificial (IA) abarca diversas clasificaciones, tipos y ramas, como señala APD (2023). Entre ellas, destacan el aprendizaje automático (machine learning), que permite a las máquinas mejorar sus capacidades con datos, y la lógica difusa, utilizada en sistemas que manejan incertidumbre. También se incluyen enfoques como la vida artificial, que simula organismos digitales, y los sistemas expertos, diseñados para tomar decisiones basadas en conocimientos específicos. Otras áreas relevantes son la minería de datos (data mining), las redes bayesianas para probabilidades, la ingeniería del conocimiento, las redes neuronales, los sistemas reactivos, los sistemas basados en reglas, el razonamiento basado en casos, las redes semánticas, las técnicas de representación del conocimiento, la lingüística computacional y el procesamiento del lenguaje natural, fundamentales para la interacción entre humanos y máquinas.

PARTE EXPERIMENTAL

El método para desarrollar el modelo de detección de objetos, para obtener el modelo se divide en tres partes: análisis del conjunto de datos, entrenamiento y exportación.
La visión artificial se encarga de reconocer y localizar objetos en el entorno mediante el procesamiento de imágenes. La visión computacional estudia el reconocimiento de objetos para desarrollar máquinas con capacidades similares (Sucar & Gómez, 2024).
De acuerdo con este modelo general, en este trabajo se siguieron los pasos mostrados en la figura 1.

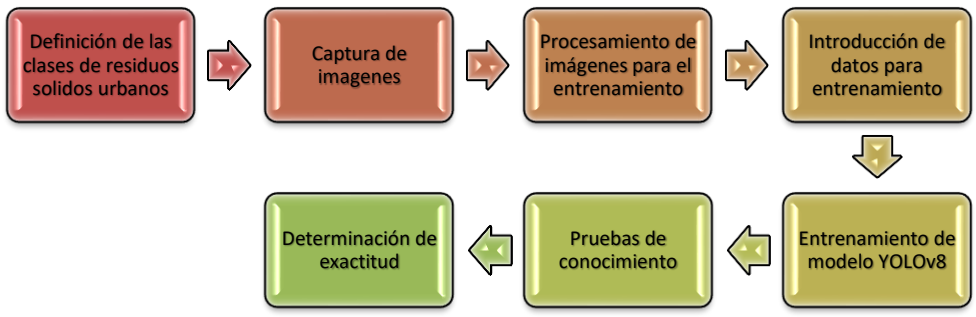


Figura 1. Proceso de entrenamiento para la aplicación de la IA

Las aplicaciones de la visión artificial pueden clasificarse según el tipo de tarea:

- Medición o calibración: Verifica que las mediciones cumplan con el diseño, como asegurar el espesor correcto de un cable.
- Detección de fallas: Identifica defectos en objetos sin una forma o posición predefinida, como imperfecciones en la pintura de un auto.
- Verificación: Confirma la correcta realización de ensamblajes, como comprobar que un teclado tenga todas sus teclas.
- Reconocimiento: Clasifica objetos según características como color y tamaño, útil para distinguir distintos cítricos.
- Identificación: Usa símbolos en objetos para su distinción, como códigos de barras en productos. • Análisis de localización: Evalúa la posición adecuada de un objeto, por ejemplo, al insertar un circuito integrado.
- Guía: Proporciona información posicional para dirigir una actividad, como el uso de visión artificial en robots o vehículos autónomos.

RESULTADOS

De acuerdo con la figura 2, La abundancia de los desechos en los hogares va en el orden que se presenta dividiéndose en 5 grupos.

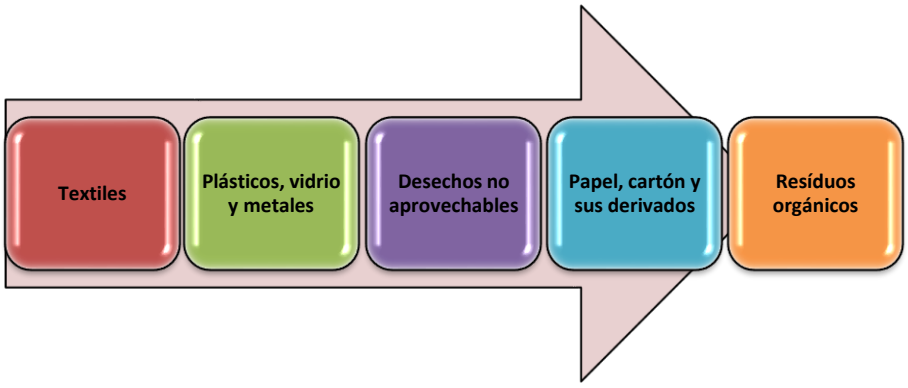


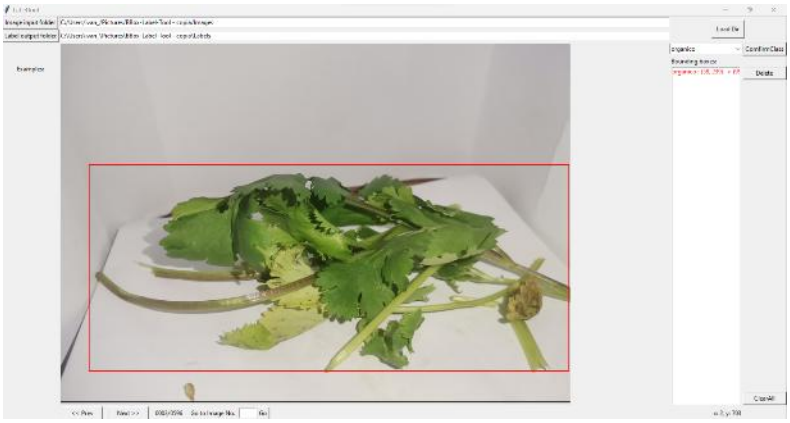
Figura 2. Abundancia de desechos en el hogar

Se tomaron muestras de 400 imágenes de cada grupo, haciendo un total de 2000 imágenes con una resolución de 4160 x 1968 pixeles y una profundidad de 32 bits en formato jpg. Obteniéndose imágenes muestra. Se pueden ver ejemplos en la figura 3



Figura 3. Muestra de imágenes de cada grupo para el entrenamiento del sistema

Posteriormente utilizando La herramienta BBox-Label-Tool permite identificar y clasificar los elementos dentro de una imagen. Genera archivos .txt para cada imagen, almacenados en un directorio específico, donde se registran los vectores y datos de los objetos analizados. El primer número del archivo define la categoría del objeto, mientras que los valores restantes indican su



tamaño y puntos de localización dentro de la imagen. En la figura 4 se puede ver un ejemplo de la manera en que se estructuran estos datos.

Figura 4. Uso de la herramienta BBox-Label-Tool para Python

La primera revisión del modelo detectó los materiales correctamente con una precisión del 80% y fue probado utilizando diferentes tipos de desechos urbanos. Estos ejemplos se muestran en la figura 5.



Figura 5. Revisión del modelo de entrenamiento

Como puede observarse, el modelo puede detectar vidrio, metal, plástico, desechos orgánicos y papel con una precisión superior al 86 %. Sin embargo, en algunos casos, el metal se confunde con el plástico. Se verificó que las clases de plástico y vidrio son correctamente identificadas, mientras que el metal, en ocasiones, es categorizado como plástico. La proximidad de la cámara al objeto metálico mejora su clasificación. Las categorías de papel y desecho orgánico presentan un rendimiento menor, ya que el modelo a veces los identifica erróneamente como plástico o vidrio.

Estas dificultades se deben, en parte, a imágenes desenfocadas o de baja calidad obtenidas de la red.

La tabla 3 presenta datos como precisión, sensibilidad y mAP50, evaluadas con imágenes no utilizadas en el entrenamiento. Se identificaron posibles fallos en la detección y clasificación de objetos de papel y metal, con algunos errores en su reconocimiento. El tiempo requerido para clasificar un desecho humano en la imagen es 51 ms, lo que define la velocidad de procesamiento de cada fotograma capturado por la cámara.

Tabla 3. Resultados del conjunto prueba

Clase	Precisión	Sensibilidad (Recall)	mAP50
Metal	**0.763**	**0.651**	**0.715**
Plástico	**0.874**	**0.641**	**0.826**
Desechos orgánicos	**0.869**	**0.827**	**0.896**
Papel	**0.894**	**0.619**	**0.747**
Vidrio	**0.922**	**0.556**	**0.695**
Total	**0.864**	**0.659**	**0.776**

CONCLUSIONES

- La clasificación y gestión de desperdicios en vertederos han sido ineficaces, generando acumulaciones de basura en océanos y áreas terrestres.
- Los modelos de visión por computadora han demostrado gran eficacia en la clasificación de residuos.
- Se implementó Yolov8, un modelo avanzado de detección y clasificación en tiempo real.
- El modelo fue entrenado con 400 imágenes de papel, vidrio, metal, plástico y basura orgánica.
- Yolov8 alcanzó una precisión superior al 86 %, con una velocidad de inferencia de 50.2 ms por imagen.
- Su aplicación en cámaras web permitiría la detección de residuos en tiempo real con alta precisión.

BIBLIOGRAFÍA

1. semarnat.gob.mx. (29 de enero de 2023). *Residuos*. Obtenido de semarnat.gob.mx: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html

2. Huerta, V. (6 de junio de 2022). *¿A dónde va la basura que generan los municipios del Estado de México?* Obtenido de elsoldetoluca.com.mx: https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/a-donde-va-la-basura-que-generan-los-municipios-del-estado-de-mexico-8390055.html

3. Venegas, P. (19 de febrero de 2022). *Concesión de la basura costará al gobierno de Coacalco 9 millones de pesos mensuales*. Obtenido de elsoldetoluca.com.mx: https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/concesion-de-la-basura-costara-al-gobierno-de-coacalco-9-millones-de-pesos-mensuales-7886358.html

4. Mota Ávila , A. (2011). *Química del Medio A,biente*. Obtenido de www.ugr.es: https://www.ugr.es/~mota/Quimica_Medio_Ambiente.html

5. Pérez Orozco, B. (2018). Inteligencia Artificial. *Oficina de Información científica y tecnológica para el congreso de la unión*, 1-6.

6. Rodríguez, D. (4 de abril de 2023). *Algunas clasificaciones de las inteligencias artificiales*. Obtenido de informacionytic.com: https://informacionytic.com/es_ar/2023/04/04/algunas-clasificaciones-de-las-inteligencias-artificiales/

DESPACHO ECONÓMICO ÓPTIMO EN MICRO-RED DE CD CONSIDERANDO FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y GENERACIÓN CONVENCIONAL

José M. Lozano-García, M. Nahomi Servín-Montenegro, Karla M. Landeros-Salazar, Itzel A Ruelas-Cárdenas, Alejandro Pizano-Martínez, Jesús Martínez-Patiño

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato.
jm.lozano@ugto.mx.

RESUMEN

En sistemas eléctricos el problema de despacho económico óptimo (DEO) consiste en administrar los generadores disponibles para el suministro de energía a los usuarios, a partir de la optimización de sus costos operativos [1]. En las micro-redes (MRs), este tipo de estudios resultan de gran relevancia para controlar su operación. Tradicionalmente las MRs operan en CA, pero debido a la proliferación de cargas electrónicas de CD, cada vez existen más MRs con este tipo de energía. Estas últimas exhiben estructuras más simples y pueden llegar a ser más eficientes debido a que sus objetivos de control se centran en regular los niveles de voltaje [2]. Con esta motivación, en este trabajo se propone un estudio de DEO en una MR de CD, la cual incluye fuentes renovables de energía, además de generadores convencionales. La MR bajo estudio consiste en una red mallada alimentada mediante dos generadores convencionales (GCs) y dos sistemas fotovoltaicos (SFs), los cuales suministran energía a cuatro usuarios, modelados por su consumo de potencia. Además, el modelo matemático considera pérdidas en las líneas de distribución. El estudio se plantea como un problema de minimización que involucra una función objetivo formada por los costos de operación de cada generador, además de un conjunto de restricciones impuestas por las leyes que rigen los sistemas eléctricos, y los límites operativos de los generadores. Las funciones de costo de los generadores son cuadráticas, mientras que los límites de generación para los GCs son constantes, y variantes en el tiempo para los SFs, buscando modelar la variación en la disponibilidad del recurso solar disponible. Para resolver el problema de optimización se utiliza la función *fmincon* contenida en el software Matlab, la cual se utiliza para la solución de problemas no-lineales y se basa en el método del gradiente. Finalmente, para evaluar la efectividad del modelo de optimización desarrollado, y de la herramienta computacional utilizada, se implementan dos casos de estudio. En el primero, se considera que cada usuario modifica su demanda en pasos constantes durante un horizonte de tiempo de 24h. En el segundo, ahora la demanda se modifica en el tiempo de manera aleatoria. Como resultados, en ambos casos de estudio el optimizador determina la potencia que debe aportar cada generador durante las 24h, para abastecer las cargas dinámicas al menor costo. De los resultados se observa que la curva de generación total es igual a la curva de consumo total durante todo el periodo de análisis. Además, el optimizador prioriza la utilización de las energías renovables sobre la generación convencional, debido al costo de ambos, y determina el costo mínimo total de la operación de la micro-red. A partir del estudio de DEO desarrollado se concluye que este tipo de estudios son de gran relevancia para los operadores de las micro-redes, ya que les permite tomar decisiones sobre la administración de las fuentes de energía para maximizar los beneficios económicos sin comprometer el suministro de energía de los usuarios, considerando condiciones reales como las pérdidas por distribución y las cargas dinámicas.

INTRODUCCIÓN

El reciente incremento en la utilización de fuentes renovables de energía (FRE) se debe a la creciente demanda global de energía eléctrica, la escasez de recursos energéticos, y como estrategia para la reducción de la emisión de gases contaminantes [3]. Por otro lado, la utilización de sistemas de generación de energía eléctrica a pequeña escala resulta en una buena opción para asegurar el desarrollo económico de comunidades alejadas [4]. En este contexto, el concepto de micro-red (MR) eléctrica surge como una solución para la integración de FRE distribuidas a lo largo de la red eléctrica principal, así como para electrificar zonas remotas [5]. Las MRs constituyen una porción de la red de distribución y comúnmente incluyen una variedad de unidades de generación de energía (UGE),

basadas principalmente en FRE, además de unidades de almacenamiento de energía (UAE), las cuales se encargan del suministro de usuarios locales, que pueden ser parques industriales, entidades comerciales o edificios residenciales [5]. Asimismo, las MRs pueden operar en conexión con una red eléctrica principal, o, si cuentan con la capacidad suficiente de generación, control y estrategias de operación, pueden operar de manera aislada [6].

Tradicionalmente, las MRs que operan en corriente alterna (CA) deben afrontar una variedad de retos técnicos si se desea lograr el mayor aprovechamiento de las fuentes de generación, tales como: la gestión energética, el manejo de la demanda, los esquemas de protección, los protocolos de comunicación, el control de la frecuencia y voltaje, entre otros [7]. Dentro de estos desafíos, los estudios de gestión energética o despacho económico óptimo (DEO) son fundamentales para asegurar una operación confiable y económica, ya que permiten determinar la cantidad de energía que aportará cada UGE para satisfacer la demanda al menor costo [1]. No obstante, la naturaleza intermitente de las FRE complica la programación del despacho de energía, ya que no se puede predecir con seguridad su nivel de generación, por lo que el operador se ve obligado a utilizar fuentes de energía convencionales como respaldo. En este sentido, la gestión energética dentro de una MR se identifica como el proceso de optimizar los beneficios económicos mediante la minimización de los costos operativos derivados del despacho de energía establecido para satisfacer la demanda total, a partir de las fuentes disponibles. Si bien, la gestión energética óptima en MR en CA ha sido más abordada por diversos autores, y con distintos enfoques, [8]-[11], las MR en CD también han comenzado a recibir atención por parte de investigadores, como se comprueba en [12]-[16], debido a su eficiencia, confiabilidad y flexibilidad.

Las MR de CD se consideran topologías muy atractivas, especialmente en el contexto de los nuevos sistemas inteligentes de distribución de energía. La proliferación de cargas electrónicas en CD dentro de las redes eléctricas ha provocado la aparición de redes eléctricas híbridas, con suministros de energía en CA y CD, para las cuales las MR se posicionan como una excelente solución. Comparadas con las MR de CA, las MR de CD tienen una estructura más simple y sus objetivos de control se centran en los voltajes, sin tener que considerar la regulación de frecuencia y potencia reactiva [13]. Esta simplificación reduce la complejidad operativa e incrementa la eficiencia de la red. En general, entre las principales ventajas operativas de las MR de CD sobre las MR de CA, se pueden mencionar las siguientes: utilización de generadores renovables en CD sin la necesidad de utilizar convertidores, integración directa de sistemas de almacenamiento, utilización de buses de CD para suministro de cargas electrónicas, integración directa de vehículos eléctricos a la red, reducción en problemas de calidad de energía, eliminación de regulación de potencia reactiva, inexistencia de efecto piel en cables de distribución, y mejora en la confiabilidad al operar en modo aislado [12]. Dentro de los principales desafíos que aún requieren de investigación para el desarrollo masivo de MR de CD se encuentran el establecimiento de estándares operativos, el control de MR aisladas sin la incorporación de UAE, el control y la estabilidad, el diseño de esquemas de protección adecuados, y la gestión energética. En este último tema, trabajos como [13]-[16] se han enfocado en la propuesta de algoritmos de optimización para minimizar el costo operativo de la micro-red, el cual puede incluir un costo asociado con la operación de la red principal, las FRE, las UAE y las pérdidas en las líneas de distribución. Adicionalmente, cada trabajo presenta un enfoque distinto, con el objetivo de representar de manera más adecuada la operación práctica de la MR. En [13], por ejemplo, el enfoque del trabajo está relacionado con la operación de los actuadores que realizarán las acciones de control establecidas por el optimizador, reduciendo la frecuencia de muestreo, mejorando la eficiencia de la comunicación y por ende extendiendo la vida útil del sistema. Por su parte, en [15] se incluye la variabilidad del precio de la energía en tiempo real, mientras que en [16] se presenta un estudio de despacho económico donde se consideran distintas tecnologías de baterías, aspecto que resulta determinante en la reducción diaria de pérdidas energéticas.

Algunos de los trabajos mencionados se centran completamente en el desarrollo matemático del algoritmo de optimización, que omiten considerar aspectos prácticos que pueden afectar seriamente la operación de la MR, como lo es el modelar adecuadamente la variabilidad de las UGE. Por esta razón, en el presente trabajo se presenta un estudio de DEO para una MR de CD aislada,

considerando unidades de generación convencionales y renovables. El problema de optimización se resuelve mediante la función *fmincon* contenida en la herramienta computacional Matlab, la cual es fácil de implementar y se utiliza para la solución de problemas no-lineales. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian el impacto económico que se tiene al considerar la intermitencia de las FRE en la gestión energética de la MR.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En esta sección se introduce el modelo matemático de la micro-red eléctrica de CD, y se formula el problema de optimización.

Modelo matemático de la micro-red de CD

El diagrama eléctrico de la MR de CD se muestra en la Figura 1, la cual consiste en una red de arquitectura mallada conformada por cuatro fuentes de generación de energía, dos generadores renovables (GR) fotovoltaicos, y dos generadores convencionales (GC) diésel, los cuales se interconectan a través de cuatro líneas de transmisión de conductancia *g*, para alimentar a cuatro usuarios, I_L.

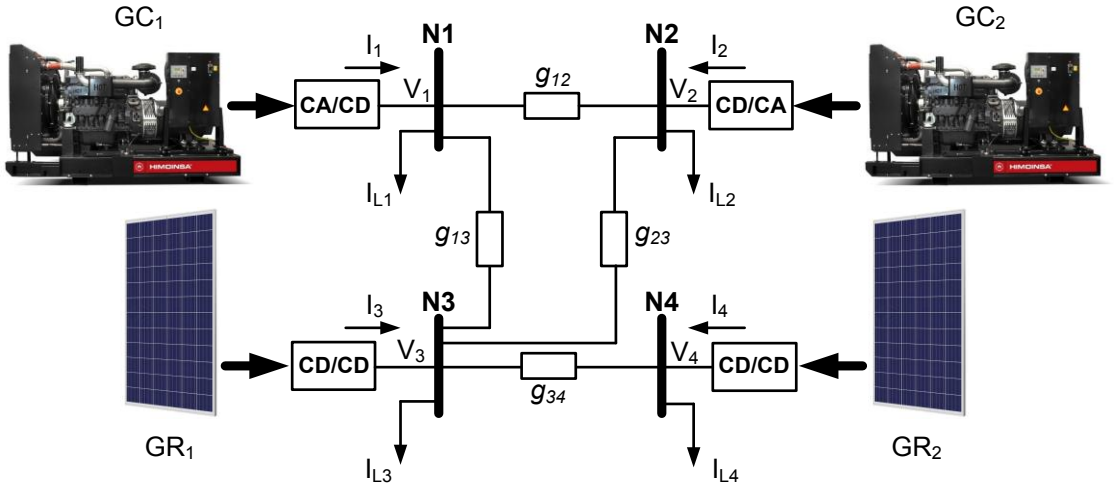


Figura 1. Estructura de la micro-red de CD.

De acuerdo con la Figura 1, los cuatro nodos del circuito se denotan mediante N_i, V_i son los voltajes en los nodos, I_i corresponden a las corrientes inyectadas por cada unidad generadora, e I_{Li} a las corrientes demandadas por los cuatro usuarios.
Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff al circuito de la Figura 1, el modelo matemático resultante se puede expresar como sigue,

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{GV} + \boldsymbol{I_L} \tag{1}$$

donde $I = (I_1, \ldots, I_{ug})^T$ es la corriente aportada por cada unidad de generación, *ug* es el número de unidades de generación, $V = (V_1, \ldots, V_N)^T$ es el voltaje de nodo, *N* es el número de nodos, $IL = (I_{L1}, \ldots, I_{Lu})^T$ es la corriente demandada por cada usuario, *u* es el número de usuarios, y *G* es la matriz de conductancias, definida mediante,

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{g_{11}} & \cdots & \boldsymbol{g_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{g_{N1}} & \cdots & \boldsymbol{g_{NN}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Los elementos de la diagonal principal de la matriz G, corresponden a la conductancia propia total del nodo *i*, esto es, la suma de todas las conductancias conectadas en ese nodo; mientras que los

elementos fuera de la diagonal corresponden con el negativo de la conductancia mutua conectada entre los nodos *i* y *j*.

Problema de optimización

En este trabajo, para el problema de despacho económico óptimo (DEO), se establece como objetivo el minimizar los costos asociados con la operación de las UGE utilizadas para abastecer en todo momento la demanda de los usuarios. Asimismo, el problema se formula como un problema de despacho económico estático, esto es, se plantea determinar la operación de las UGE en función de las condiciones operativas del sistema en cada periodo de tiempo independiente, ya que no se considerarán las velocidades de rampa de los generadores convencionales. En este sentido, para modelar las UGE se consideran funciones cuadráticas con respecto a su potencia como funciones de costo [13]. De esta manera, para los GC se tiene,

$$\boldsymbol{C_{GCi}(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i,\ para\ i = 1, \dots, ngc} \quad (3)$$

donde *ngc* es el número de generadores convencionales, y a_i, b_i y c_i son los coeficientes de costo.

Por su parte, para los GR se tiene una expresión similar [17],

$$\boldsymbol{C_{GRi}(P_i) = d_i P_i^2 + e_i P_i + f_i,\ para\ i = 1, \dots, ngr} \quad (4)$$

donde *ngr* es el número de generadores renovables, y d_i, e_i y f_i son los coeficientes de costo.

Es importante señalar que para este análisis se supondrá que cuando el sistema opera de manera regular, el valor de los voltajes en los nodos siempre será cercano a uno en por unidad (p.u.); por lo tanto, es posible considerar que la potencia de cada unidad generadora tendrá un valor muy aproximado al valor en p.u. de su corriente [13]. En este sentido, las ecuaciones (3) y (4) se pueden reescribir como,

$$\boldsymbol{C_{GCi}(P_i) \approx C_{CGi}(I_i) = a_i I_i^2 + b_i I_i + c_i,\ para\ i = 1, \dots, ngc} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{C_{GRi}(P_i) \approx C_{CRi}(I_i) = d_i I_i^2 + e_i I_i + f_i,\ para\ i = 1, \dots, ngr} \quad (6)$$

De esta manera, la función objetivo para el problema de optimización toma la siguiente forma,

$$\boldsymbol{min\left\{\sum_{i=1}^{ngc} C_{CGi}(I_i) + \sum_{i=1}^{ngr} C_{CRi}(I_i)\right\}} \quad (7)$$

Las siguientes expresiones definen las restricciones del problema de optimización,

$$\boldsymbol{I = GV + I_L} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{0 \le I_j \le I_{LS},\ para\ j = 1, \dots, ngr} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{I_{LI} \le I_j \le I_{LS},\ para\ j = 1, \dots, ngr} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{V_{LI} \le V_j \le V_{LS},\ para\ j = 1, \dots, N} \quad (11)$$

Donde I_{LI} e I_{LS} son los límites inferior y superior de la corriente generada por cada unidad de generación, respectivamente; y V_{LI} y V_{LS}, son los límites inferior y superior de los voltajes en los nodos. Las restricciones impuestas al problema están relacionadas con las leyes que rigen la operación del sistema eléctrico, ecuación (8), y los límites operativos de los equipos, ecuaciones (9)-(11).

CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se implementan un par de casos de estudio en los que el problema de DEO descrito por las ecuaciones (7) – (11), se resolverá utilizando la función *fmincon* contenida en la herramienta computacional Matlab, por su facilidad de implementación. En cada caso de estudio se considera un horizonte de tiempo de 24h, y los parámetros indicados en la Tabla 1. El objetivo del estudio es minimizar el costo operativo de la MR, mientras se satisface la demanda en todo momento, y se cumple con las restricciones operativas del problema.

Caso de estudio 1

Para el primer caso de estudio se consideran condiciones ideales en la generación, similares a las presentadas en [13]; esto es, la capacidad de generación es constante, 1 p.u., tanto para las unidades convencionales como para las renovables. Los valores de la demanda de corriente por parte de los usuarios se presentan en la Tabla 2. En esta tabla se observa como cada usuario modifica su demanda en pasos constantes, pero sin seguir un patrón de consumo tan apegado a la realidad.

Tabla 1. Parámetros para la micro-red de CD

Parámetro del sistema	Valor
Voltaje nominal del nodo (V)	1.0 p.u. (48 V)
Corriente nominal del bus (I)	1.0 p.u. (12 A)
Límite superior de corriente (I_{LS})	1.0 p.u.
Límite inferior de corriente (I_{LI})	1.0 p.u.
Límite superior del voltaje de nodo (V_{LS})	1.05 p.u.
Límite inferior del voltaje de nodo (V_{LI})	0.95 p.u.
a_1, b_1, c_1	0.0185, 0.0832, 0.008
a_2, b_2, c_2	0.0185, 0.0260, 0.006
$d_{1,2}, e_{1,2}, f_{1,2}$	1, -2, 1
$g_{11} = g_{12} = \ldots = g_{NN}$	8.5 S

Tabla 2. Perfil de corriente demandada por los usuarios

Usuario	1 – 3 h	4 – 7 h	8 – 11 h	12 – 15 h	16 – 19 h	20 – 24 h
1	0.0 p.u.	0.20 p.u.	0.15 p.u.	0.00 p.u.	0.00 p.u.	0.00 p.u.
2	0.0 p.u.	0.25 p.u.	0.05 p.u.	0.00 p.u.	0.00 p.u.	0.00 p.u.
3	0.0 p.u.	0.40 p.u.	0.80 p.u.	0.90 p.u.	1.20 p.u.	1.30 p.u.
4	0.0 p.u.	0.20 p.u.	0.70 p.u.	1.00 p.u.	1.10 p.u.	1.20 p.u.
Consumo Total	0.0 p.u.	1.05 p.u.	1.70 p.u.	1.90 p.u.	2.30 p.u.	2.50 p.u.

Caso de estudio 2

Para el segundo caso de estudio, ahora se consideran condiciones más realistas tanto para el consumo de los usuarios, como para la disponibilidad de energía de los generadores renovables. En la Figura 2 (izquierda) se observa la curva de generación utilizada para las unidades renovables, la cual es similar a la presentada en [11]. En cuanto a la demanda total de corriente requerida por los usuarios, se consideran curvas de consumo similares a la determinada en [11], Figura 2 (derecha).

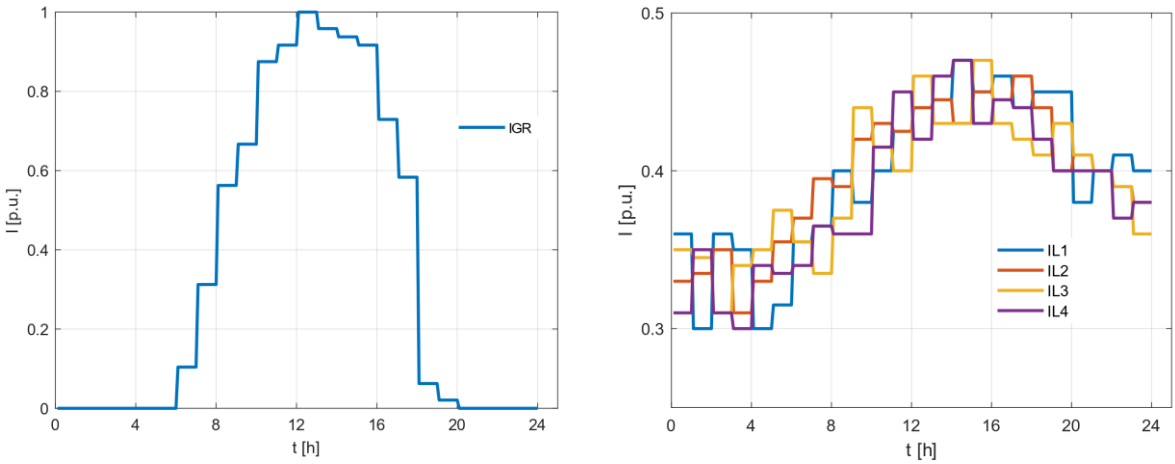


Figura 2. Izquierda: Disponibilidad de corriente para los generadores renovables. Derecha: Perfil de consumo de corriente de los cuatros usuarios.

RESULTADOS

Resultados del caso 1

En las Figuras 3 y 4, se muestran los resultados correspondientes al caso de estudio 1. Primeramente, en la Figura 3 se destaca que la curva de demanda total de los cuatro usuarios es cubierta para las aportaciones de las distintas UGE. Durante los primeros cuatro intervalos de tiempo, desde t = 1 hasta t = 15h, como la demanda total es menor a 2 p.u. de corriente, el optimizador prioriza la utilización de las FRE debido al menor costo, ya que la capacidad combinada de los generadores GR_1 y GR_2 es mayor a la demanda. Al tener funciones de costo iguales, la aportación de cada fuente renovable es la misma. A partir de la hora 16, como la demanda se incrementa por arriba de la capacidad total de las FRE, es necesaria la operación de las unidades convencionales. En este caso, el generador GC_2 al tener un costo menor que el GC_1, es quien aporta la corriente que hace falta para cubrir la demanda. Para este caso de estudio, el optimizador decide no utilizar al generador GC_1.

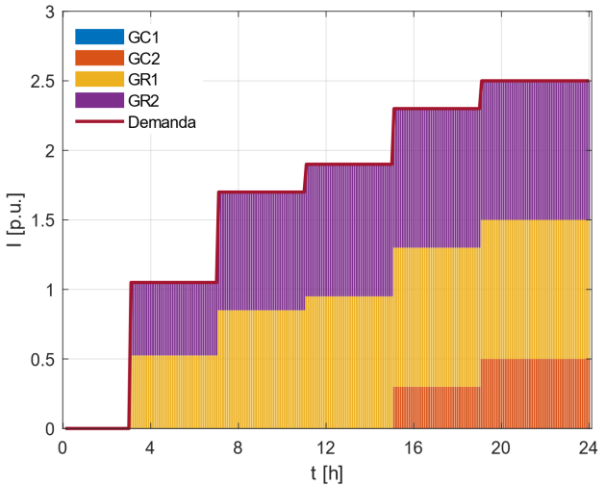


Figura 3. Resultados del despacho óptimo de energía de las fuentes de generación de la micro-red, caso 1

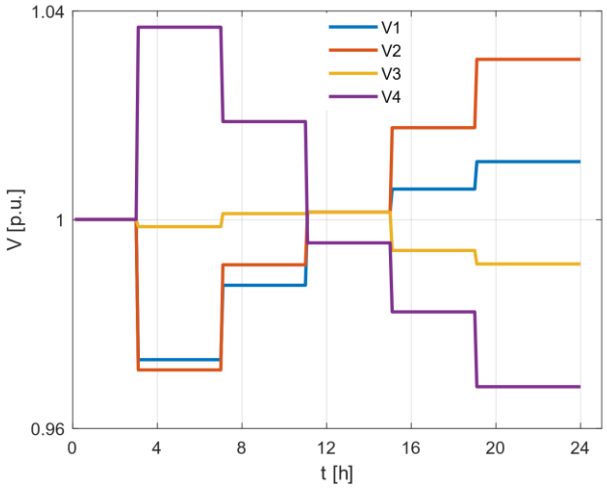


Figura 4. Voltajes en los nodos de la micro-red, caso 1.

Por otro lado, en la Figura 4 se observa como los voltajes en los nodos se mantienen dentro de los límites establecidos, y cercanos a la unidad, lo que asegura una adecuada operación del sistema.

Finalmente, la función fmincon determinó que el costo mínimo de la función objetivo durante todo el horizonte de análisis (24h) es de $8.467 unidades monetarias. Sobre este resultado es importante señalar que, aun cuando las UGE no aportan energía, por ejemplo, durante las primeras 3 horas del estudio, existe un costo asociado con su operación, el cual es determinado por los términos constantes de la función de costo.

Resultados del caso 2

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados obtenidos para el caso de estudio 2. En la Figura 5 se aprecia como la participación de los GCs es más necesaria para cubrir la demanda total de corriente, sobre todo en los periodos donde no existe disponibilidad de energía solar para las FRE. Esta intermitencia en la generación es la que obliga a los operadores de la micro-red a contar con generadores de respaldo o con UAE. No obstante, el optimizador es capaz de cubrir la demanda en todo momento, y se observa como en los periodos donde si hay disponibilidad de energía solar, alrededor de las 13h (Figura 2), se tiene un mayor aprovechamiento de las fuentes renovables. La aportación de los generadores GR_1 y GR_2 sigue siendo la misma, a diferencia de los generadores GC_1 y GC_2, debido a que estos últimos no comparten la misma función de costo. Tal como en el caso de estudio anterior, el generador GC_2 tiene una mayor participación, aunque ahora, debido a la alta demanda durante casi todo el tiempo de análisis, el optimizador también tiene que programar la operación del generador GC_1.

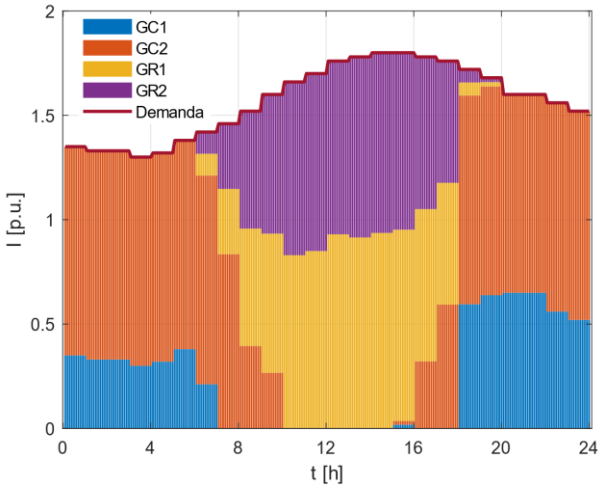


Figura 5. Resultados del despacho óptimo de energía de las fuentes de generación de la micro-red, caso 2

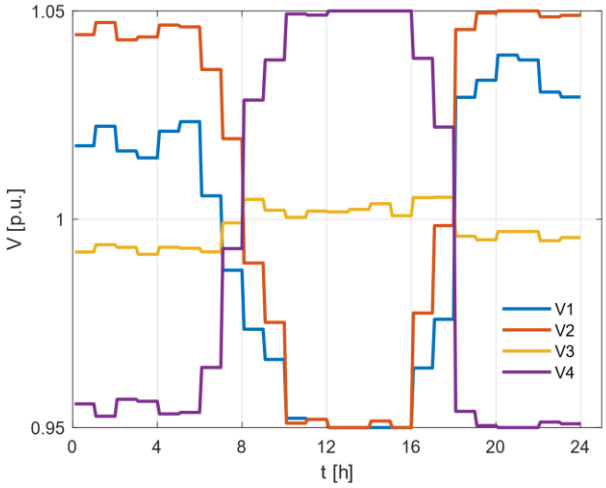


Figura 6. Voltajes en los nodos de la micro-red, caso 2

Por su parte, la Figura 6 sigue confirmando que la operación del sistema no se ve comprometida, ya que los voltajes en los nodos se mantienen dentro de sus límites establecidos. Aunque en este caso, debido al mayor flujo de corriente en el sistema, las variaciones de voltaje son un poco más pronunciadas que en el caso anterior.

En relación con el análisis económico, el costo mínimo de la función objetivo para las 24h de operación de la MR es de $29.077 unidades monetarias, para cubrir una demanda total de 37.73 p.u. de corriente.

A manera de comparativa, si se consideraran condiciones ideales como en el caso de estudio 1, es decir, límites constantes de 1 p.u. para los generadores GR_1 y GR_2, para satisfacer la demanda definida en la Figura 2 no sería necesario utilizar los generados GC_1 y GC_2 ya que la demanda total de corriente nunca sobrepasa los 2 p.u. Bajo estas condiciones, el optimizador determina un costo operativo total de $2.916 unidades monetarias, valor que es muy distante al calculado bajo condiciones más realistas. De esta manera, se verifica el impacto que se tiene al incluir modelos lo más precisos posible, dentro de este tipo de estudios.

CONCLUSIONES

Los estudios de gestión energética en micro-redes eléctricas son fundamentales para determinar la operación de los elementos que las conforman, principalmente de las UGE, y el costo que esto implicará. Por esta razón, en este trabajo se presentó la implementación de un estudio de despacho económico para una micro-red de CD conformada por generadores convencionales, generadores renovables, cuatro usuarios locales y considerando las conductancias de las líneas de distribución de energía. El estudio de DEO se formuló como un problema de despacho económico estático, ya que se determinaron las condiciones operativas de los generadores para cada periodo de tiempo de 1 h, de manera independiente. Los resultados obtenidos mostraron que el optimizador prioriza la participación de los generadores de acuerdo con su función de costo, en este caso favoreciendo el aprovechamiento de las fuentes renovables. De igual manera, los casos de estudio implementados contribuyeron a clarificar la importancia que tiene el utilizar tanto modelos de elementos, como perfiles de generación y consumo precisos, en la obtención de resultados veraces, que puedan resultar útiles para los operadores de las micro-redes. Por otro lado, a pesar de la sencillez del modelo matemático utilizado, la herramienta computacional considerada para la solución del problema de optimización resultó adecuada para el estudio realizado, principalmente por su facilidad de implementación, y la calidad de los resultados arrojados. Finalmente, se concluye que este trabajo será el punto de partida para profundizar más en la gestión energética de micro-redes de CD, ya que existen una gran variedad de condiciones operativas que deben ser analizadas y que serán adicionadas a este estudio para enriquecer los resultados hasta ahora obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. N. I. Nwulu and X. Xia, “Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response”, Renewable Energy, vol. 101, pp. 16- 28, Feb. 2017.
2. G. Mirzaeva, D. Miller, “DC and AC Microgrids for Standalone Applications”. IEEE Trans. Ind. Appl., 59, pp. 7908‑7918, 2023.
3. D. E. Olivares et al., "Trends in Microgrid Control," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, July 2014.
4. Organización de las Naciones Unidas, “Objetivos de Desarrollo Sostenible”, https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/.
5. F. Katiraei, I. Reza, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids management”, IEEE Power & Enery Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May-June 2008.
6. J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011.
7. A. Cagnano, E. De Tuglie, and P. Mancarella, “Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation,” *Appl. Energy*, vol. 258, p. 114039, Jan. 2020.
8. H. Karimi and S. Jadid, “Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework”, Energy, vol. 195, pp. 1-13 Mar. 2020.
9. L. Luo, S. S. Abdulkareem, A. Rezvani, M. Reza, S. Samad, Nahla Aljojo, M. Pazhoohesh, “Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty”, Journal of Energy Storage, vol. 28, pp. 1-12, Apr. 2020.
10. F. Nazari-Heris, B. Mohammadi-ivatloo, D. Nazarpour, “Network constrained economic dispatch of renewable energy and CHP based microgrids”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 110, pp. 144-160, Sep. 2019.
11. H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, F. D. Santillan-Lemus, A. Valderrabano-Gonzalez, R. I. Samper-Torres, “Economic Dispatch in Micro-Grids with Alternative Energy Sources and Batteries”, IEEE Latin America Transactions, Vol. 21, no. 1, Jan 2023.
12. V.F. Pires, A. Pires, A. Cordeiro, “DC Microgrids: Benefits, Architectures, Perspectives and Challenges”, in Energies, vol. 16, no. 1217, 2023.
13. W. Shi, X. Lv, and Y. He, “Distributed event-triggered optimal algorithm designs for economic dispatching of DC microgrid with conventional and renewable generators: Actuator-based control and optimization”, in Actuators, vol. 13, no. 290, pp. 1-17, 2024.

14. A. Garces, “Convex optimization for the optimal power flow on DC distribution systems”, in Handb. Optim. Electr. Power Distrib. Syst, vol. 10, pp. 121–137, 2020.
15. X. Qian, Y. Yang, C. Li and S. -C. Tan, "Economic Dispatch of DC Microgrids Under Real-Time Pricing Using Adaptive Differential Evolution Algorithm," 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), Nanjing, China, pp. 1114-1120, 2020.
16. M. Zaery, S. I. Abouzeid, S. M. Suhail Hussain, M. A. Abido, “Consensus-based economic dispatch for DC microgrids incorporating realistic cyber delays”, Alexandria Engineering Journal, vol. 107, pp. 972-984, 2024.
17. Z. Wang, W. Wu, B. Zhang, “A distributed control method with minimum generation cost for DC microgrids”, in IEEE Trans. Energy Convers, vol. 31, pp. 1462‑1470, 2016.

INNOVACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE PROGRAMACIÓN CON CIENCIA DE DATOS Y FÓRMULA 1

Alondra Pérez Chávez, César Manuel Hernández Mendoza, Juan Pablo Serrano Rubio

TECNM/ ITS de Irapuato.
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La Ciencia de Datos es una de las ciencias que, al día de hoy, es sumamente requerida en la industria e incluso es uno de los pilares que conforma la Industria 4.0, básicamente es el paso previo a la Inteligencia Artificial, ya que permite el análisis, interpretación y uso estratégico de grandes volúmenes de información. El presente proyecto considera la aplicación de la Ciencia de Datos en la materia "Programación Básica" del Ingeniero en Sistemas Automotrices, por lo que se integra un lenguaje de programación en consola como Python, de esta manera, los estudiantes pueden comprender fundamentos básicos de programación como tipos de datos, variables, funciones, estructuras de control, condiciones, entre otras, aplicadas en el uso de librerías como "*pandas*" y "*matplotlib*", cuyo propósito, es la lectura, tratamiento y análisis de grandes cantidades de datos. Por otra parte, los estudiantes de Sistemas Automotrices cuentan con pocas materias de programación en su retícula, por lo que se ha identificado una falta de motivación e interés por parte de los estudiantes en aprender la secuencia, lógica y estructura de un programa de cómputo, además de que la enseñanza clásica de programación suele ser en programas de consola como C o C++, cuyos ejercicios de programación muchas veces no parecen tener una aplicación clara en su futuro profesional. Para abordar este desafío, se implementó una estrategia de innovación educativa basada en el análisis de datos de la Fórmula 1 como un caso de aplicación real y de interés para los estudiantes, facilitando su aprendizaje y conexión con la Ciencia de Datos. Este proyecto se enfocó en el análisis de datos de la temporada 2023, en donde los estudiantes lograron obtener resúmenes estadísticos y gráficos de cajas (boxplots) para visualizar los resultados de las carreras, la posición de las escuderías, el puntaje de los pilotos, entre otros. Además, se trabajó en la interpretación de insights (revelaciones y hallazgos significativos obtenidos del análisis de datos), lo que permitió a los estudiantes comprender la relevancia de estos métodos en el análisis de información. Esta estrategia logro fortalecer habilidades clave en los estudiantes, como el pensamiento analítico, la interpretación de datos y la aplicación de conceptos de estadística descriptiva, lo que les proporciona una base sólida para abordar problemas reales en la industria automotriz. El proyecto permitió a los estudiantes, incrementar sus conocimientos en otras áreas que le abonan a su crecimiento curricular, ya que la Ciencia de Datos, también requiere que el estudiante recuerde o aplique conocimientos de estadística descriptiva. Finalmente, el uso de Ciencia de Datos no solo mejoró la enseñanza de la programación, también contribuye en preparar a los estudiantes para enfrentar desafíos en la industria automotriz**,** donde la capacidad de analizar y tomar decisiones basadas en datos es cada vez más valorada, es por eso que al trabajar temas relacionados con sus intereses, como estadísticas de fútbol, autos deportivos, formula 1, permiten tener una conexión emocional para motivarlos a continuar estudios más avanzados y entender la información visual generada.

INTRODUCCIÓN

La ciencia de datos es un campo interdisciplinario que combina matemáticas, estadística, informática y programación para extraer información relevante de grandes volúmenes de datos. Su aplicación abarca diversas áreas como la salud, las finanzas, el comercio y, por supuesto, la industria, por lo que este proyecto se enfoca en contribuir a que los estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices puedan fortalecer sus competencias y habilidades en esta ciencia para que puedan proponer soluciones en la empresa y como parte del cumplimiento del perfil de egreso de la carrera. En este contexto, la ciencia de datos se ha convertido en una herramienta esencial para la toma de decisiones informadas, optimizando procesos, mejorando diseños y prediciendo fallas o

comportamientos en sistemas complejos como la automatización, el seguimiento de control en una línea de producción, entre otros.

En base al desarrollo científico y tecnológico actual, podemos determinar que la inteligencia artificial y la ciencia de datos juegan un papel clave en el desarrollo de vehículos autónomos, el análisis del desempeño de motores y otros componentes además de la gestión de datos generados por sensores en tiempo real que se utilizan en estos procesos. Empresas líderes en el sector, como Tesla, Mercedes-Benz y Ferrari, utilizan estas tecnologías para mejorar la eficiencia, seguridad y experiencia del usuario en sus vehículos (Smith, 2022). La ciencia de datos no siempre tiene fines industriales o científicos, incluso ya ha sido considerada en eventos de entretenimiento, deportivos o competiciones profesionales como la Fórmula 1, ya que el análisis de datos ha sido fundamental para evaluar el desempeño de los pilotos, optimizar estrategias en la carrera o perfeccionar diseños aerodinámicos de los vehículos. Por esta razón, se determina que la relación entre la ciencia de datos y las materias de programación en la formación de estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices es importante y necesaria, ya que la enseñanza y desarrollo de esta ciencia en materias como Programación Básica o Programación Aplicada, permite a los estudiantes desarrollar habilidades para manipular, analizar y visualizar datos que le ayuden a tomar decisiones informadas. De esta manera, los futuros ingenieros adquieren las herramientas necesarias para resolver problemas reales.

El presente proyecto busca acercar a los estudiantes al mundo de la ciencia de datos mediante ejemplos prácticos y atractivos, como el análisis de datos en la Fórmula 1. Al trabajar con datasets reales sobre tiempos de vuelta, consumo de combustible, estrategias de neumáticos y desempeño de los pilotos, los estudiantes podrán comprender cómo los datos impactan en la toma de decisiones en un entorno competitivo. De esta manera los estudiantes comprenden y se concientizan sobre la relevancia de estas herramientas en su futuro profesional dentro de la industria automotriz. Finalmente, con el desarrollo de este proyecto se espera fomentar el interés de los estudiantes por la ciencia de datos, considerando que les puede abrir nuevas oportunidades en el diseño y desarrollo de sistemas automotrices inteligentes y eficientes.

Con esta estrategia se pretende que el estudiante pueda comprender el para y por qué programan, además de cómo se aplican estos conocimientos en problemáticas reales de una manera en la que se motivan por medio de una conexión emocional a sus gustos o pasiones. Por otra parte, hacen uso de herramientas tecnológicas y software especializado alineados con las demandas y tendencias de la industria actual como Python y Pandas. En cuanto a la parte estadística, el estudiante es capaz de comprender sistemas complejos para interpretar métricas y parámetros de rendimiento para evaluar posibles toma de decisiones informadas.

TEORÍA

La ciencia de datos es una disciplina que se basa en la recolección, organización, análisis e interpretación de datos para generar conocimiento útil y tomar decisiones informadas (Provost & Fawcett, 2013). Dentro de esta disciplina, el concepto de "*dataset*" es fundamental, ya que representa una colección de datos estructurados utilizados para el análisis estadístico y aprendizaje de máquina (eventualmente su aplicación en inteligencia artificial). Un dataset comúnmente se visualiza y observa como un archivo compatible con el programa de ofimática "Excel" el cual se guarda en formato .CSV, este archivo contiene básicamente grandes cantidades de datos que fueron almacenados y separados por comas, como una base de datos, el tamaño de cada dataset es variable, puede llevarse desde decenas de datos hasta *n* cantidad finita de filas y columnas, de ahí la importancia de que puedan ser analizados con facilidad en equipos de cómputo a través de programas especializados como Python.

Python se ha convertido en uno de los lenguajes de programación más utilizados en ciencia de datos debido a su facilidad de uso y a la gran cantidad de bibliotecas disponibles, como Pandas para manipulación de datos y Matplotlib para visualización de datos (McKinney, 2017). Cabe destacar que

Python, es como tal un lenguaje de programación, pero existen al menos 10 IDE´s para su desarrollo, es decir, un IDE es un entorno de programación, es la ventana o la interfaz que se abre y utiliza para generar código en este lenguaje. En este caso el proyecto presentado utiliza tanto el IDE titulado “Spyder” y “Google Colab”.

Entre las técnicas de análisis de datos que se han generado, se destaca el uso de gráficas como el boxplot, que permite visualizar la distribución de los datos y detectar valores atípicos dentro de un rango de valores, de modo que este grafico representa información visual que ayuda a entender e identificar fallas, errores, ausencias, mejoras o en contraparte aciertos y valores destacados, para que los estudiantes puedan explicar las causas de estos acontecimientos.

En el contexto de la ingeniería automotriz, la estadística descriptiva desempeña un papel clave en el análisis del desempeño vehicular y la optimización de procesos de fabricación (Montgomery, 2020). Además, la comunicación visual a través de gráficas facilita la interpretación de datos complejos y su aplicación en la toma de decisiones en la industria manufacturera (Tufte, 2001). Investigaciones recientes han demostrado que la enseñanza de la ciencia de datos en estudiantes de ingeniería mejora su capacidad de análisis y resolución de problemas, promoviendo un enfoque basado en datos para la toma de decisiones (Berkeley et al., 2021). Asimismo, en la industria manufacturera, la aplicación de ciencia de datos permite optimizar la cadena de suministro, mejorar la calidad de los productos y reducir costos operativos (Davenport & Harris, 2017).

PARTE EXPERIMENTAL

La estructura con la que se desarrollaron los códigos de Python en Spyder, se divide en tres partes fundamentales, observe la Figura 1, y cuya descripción y es la siguiente:



Figura 1. Código generado en Spyder de Python para generar un gráfico de puntos

1. Importación de Bibliotecas

En la primera sección del código se importan dos bibliotecas esenciales para la manipulación de datos y la visualización de gráficos:

- import **pandas** as pd: Pandas es una biblioteca de Python utilizada para el análisis y manipulación de datos en estructuras como DataFrames, un DataFrame, se puede representar como la estructura en la que se guardan los datos (base de datos) en Python, es decir se puede leer el archivo CSV y posteriormente convertirlo a un DataFrame para su tratamiento en Python.

- import **matplotlib.pyplot** as plt: Matplotlib es una biblioteca utilizada para la creación de gráficos, en este caso, la sub biblioteca pyplot permite generar visualizaciones de datos de manera sencilla y es la biblioteca con la que se pueden generar una gran cantidad de gráficas y bloxpot.

2. Creación y Organización de Datos

En esta sección del código, se estructura la información que se va a analizar, aquí se puede trabajar de dos maneras, cuando la información es pequeña puede transcribirse directamente en Spyder para convertir cada fila del documento en una lista y luego se organiza en un DataFrame de Pandas, o la segunda opción, cuando la información ya tiene cientos o miles de datos, se puede leer directamente el archivo CSV con una simple instrucción.

Observe por ejemplo el siguiente código, en donde se trascribieron los resultados de las posiciones en la Formula 1, definiendo 22 listas, es decir, la tabla de posiciones tenía 22 renglones, en los que se destaca la existencia de las siguientes columnas:

- **Posición** en la clasificación general.
- **Nombre del piloto**.
- **Equipo** en el que compite.
- **Puntos** acumulados en la temporada.
- **Carreras ganadas**.
- **Número de podios** obtenidos.
- **Cantidad de carreras en las que ha obtenido puntaje**.
- **Nacionalidad** del piloto.

Posteriormente, se realizan los siguientes ajustes en el código:

1. Todas estas listas se agrupan dentro de una lista principal llamada listavariables.
2. Se crea un DataFrame de Pandas utilizando pd.DataFrame, asignando nombres a las columnas como Posicion, Piloto, Equipo, Puntos, Ganados, Podiums, Scores, Nacionalidad.
3. Se redefine la columna Piloto para asegurarse de que los nombres sean correctos y no haya errores en su asignación.

3. Generación y Configuración del Gráfico

Esta sección del código utiliza la biblioteca Matplotlib para generar una visualización de los datos, existe una gran cantidad de graficos que se pueden generar, sin embargo, en el ejemplo de la Figura 1, se ha utilizado un gráfico de dispersión, en donde se establece:

- En el eje **X**: El número de podios obtenidos por cada piloto.
- En el eje **Y**: Los puntos acumulados en la temporada.
- Color de los puntos: Morado (color='purple').

Se utiliza plt.annotate() para añadir el nombre del piloto en la posición correspondiente de la gráfica.

Se configuran etiquetas y el título del gráfico:

- plt.xlabel(): Etiqueta para el eje X indicando "Número de Podios que ha logrado cada piloto".
- plt.ylabel(): Etiqueta para el eje Y indicando "Puntos por cada piloto en la temporada".
- plt.title(): Título del gráfico "Relación entre Podios y Puntos por cada piloto".
- plt.grid(True): Se habilita una cuadrícula para facilitar la lectura del gráfico.
- Finalmente, se muestra el gráfico en pantalla con plt.show().

El resultado obtenido, se presenta en la Figura 2. Observe los elementos visuales que se han añadido en la sección 3 del código:

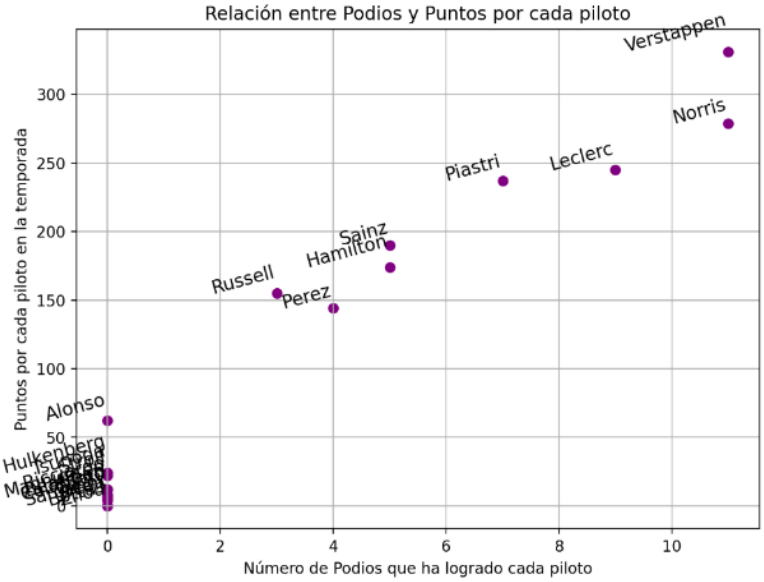


Figura 2. Gráfico de dispersión generado con el código ejemplo

Uso de Kaggle para obtener dataset´s públicos

En el desarrollo del proyecto se utilizaron archivos de datos provenientes de Kaggle (observe la Figura 3). Kaggle es una plataforma en línea especializada en Ciencia de Datos y Machine Learning, que contiene archivos a la que todo el mundo puede acceder para buscar y descargar datasets para análisis, publicar sus propios datasets e incluso publicar o descargar código generado en Python o R. Ha sido una herramienta útil, para estudiantes investigadores y profesionales que desean aprender temas relacionados con I.A., en este caso el equipo de investigación, obtuvo de esta plataforma un dataset con información relacionada a los resultados obtenidos de la fórmula 1 en la temporada 2023.

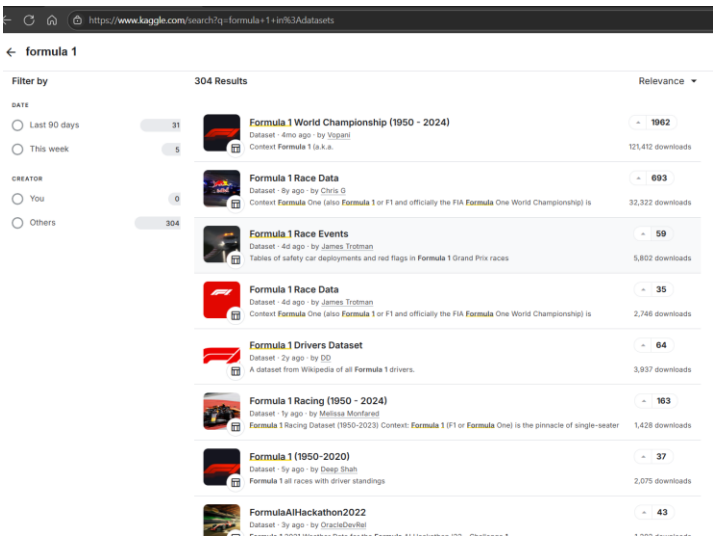


Figura 3. Filtro realizado con la palabra “Formula 1” en la plataforma Kaggle

Cuando los estudiantes están familiarizados con el entorno de spyder y han generado graficas para presentar información, se procede a trabajar con dataset´s provenientes de Kaggle. La lectura de datos puede ser de dos maneras diferentes, extrayendo el dataset por medio de instrucciones, o si no existe uno, el usuario tendrá que generar el propio o incluso, escribirlo directamente en el software, tal como se observa en la Tabla 1.

Código para generar gráfica de barras

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

ver = [1, 'Verstappen', 'Red-bull', 331, 7, 11, 17, 'Holanda']
nor = [2, 'Norris', 'McLaren', 279, 3, 11, 17, 'Reino_unido']
lec = [3, 'Leclerc', 'Ferrari', 245, 2, 9, 15, 'Monaco']
pia = [4, 'Piastri', 'McLaren', 237, 2, 7, 17, 'Australia']
sai = [5, 'Sainz', 'Ferrari', 190, 1, 5, 15, 'España']
ham = [6, 'Hamilton', 'Mercedes', 174, 1, 5, 15, 'Reino_unido']
rus = [7, 'Russell', 'Mercedes', 155, 1, 3, 15, 'Reino_unido']
per = [8, 'Perez', 'Red_bull', 144, 0, 4, 14, 'México']
alo = [9, 'Alonso', 'Aston_Martin', 62, 0, 0, 12, 'España']
hul = [10,'Hulkenberg', 'Haas_F1_Team', 24, 0, 0, 6, 'Alemania']
lan = [11, 'Stroll', 'Aston_Martin', 24, 0, 0, 6, 'Canada']
tsu = [12, 'Tsunoda', 'RB_F1_Team', 22, 0, 0, 7, 'Japon']
alb = [13, 'Albon', 'Williams', 12, 0, 0, 3, 'Thailandia']
ric = [14, 'Ricciardo', 'RB_F1_Team', 12, 0, 0, 3, 'Australia']
gas = [15, 'Gasly', 'Alpine_F1_Team', 8, 0, 0, 5, 'Francia']
bea = [16, 'Bearman', 'Haas_F1_Team', 7, 0, 0, 2, 'Reino_unido']
mag = [17, 'Magnussen','Haas_F1_Team', 6, 0, 0, 3, 'Dinamarca']
oco = [18, 'Ocon', 'Alpine_F1_Team', 5, 0, 0, 4, 'Francia']
col = [19, 'Colapinto', 'Williams', 4, 0, 0, 1, 'Argentina']
zho = [20, 'Zhou', 'Sauber', 0, 0, 0, 0, 'China']
sar = [21, 'Sargeant', 'Williams', 0, 0, 0, 0, 'EUA']
bot = [22, 'Bottas', 'Sauber', 0, 0, 0, 0, 'Finlandia']
```

```
listavariables =[ver, nor, lec, pia, sai, ham, rus, per, alo, hul, lan, tsu,
            alb, ric, gas, bea, mag, oco, col, zho, sar, bot]


mi_df= pd.DataFrame (listavariables, columns = ['Posicion', 'Piloto',
        'Equipo', 'Puntos', 'Ganados', 'Podiums', 'Scores',
        'Nacionalidad' ])


mi_df['Piloto'] = ['Verstappen', 'Norris', 'Leclerc', 'Piastri', 'Sainz',
            'Hamilton', 'Russell', 'Perez', 'Alonso', 'Hulkenberg',
            'Stroll', 'Tsunoda', 'Albon', 'Ricciardo', 'Gasly',
            'Bearman', 'Magnussen', 'Ocon', 'Colapinto', 'Zhou',
            'Sargeant','Bottas']

#Gráfica 1, de ejercicio
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.bar(mi_df['Piloto'], mi_df['Puntos'], color='orange')
plt.xticks(rotation=70)
plt.xlabel('Piloto')
plt.ylabel('Puntos')
plt.title('Puntos por Piloto en la Temporada de Fórmula 1')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Tabla 1. Datos escritos directamente en el software de spyder.

A partir de este pequeño código, los estudiantes pueden generar graficas para presentar la información de una manera visual y atractiva, observe por ejemplo la Figura 4 en donde se logra visualizar la cantidad de puntos por piloto, además de que se ha ajustado la lectura de datos en el eje X, para que la letra tenga una rotación de 70 grados.

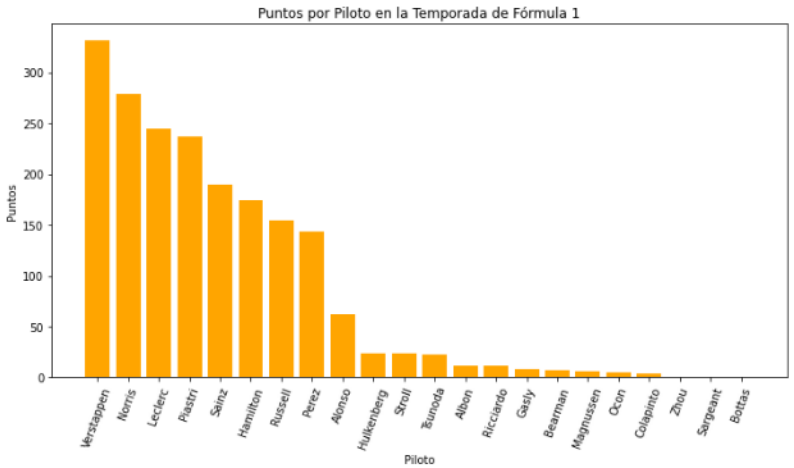


Figura 4. Grafica de puntos por piloto en competencia de Fórmula 1 del 2023

El dataset con el que se trabajo tiene las siguientes características, 9 columnas, 74 líneas, con las siguientes columnas: id_circuito, circuito_ref, location, country, lat, lng, alt, url. La descripción que

tiene el dataset es el siguiente: “Este conjunto de datos contiene información desde 1950 hasta la temporada 2017 y consta de tablas que describen constructores, pilotos de carreras, tiempos de vuelta, paradas en boxes y más”.

Con esta información los estudiantes generan el siguiente código y la siguiente gráfica de tipo boxplot, la cual puede observar en la Figura 5:

```
plt.figure(figsize=(6, 6))
plt.boxplot(mi_df['Puntos'])
plt.title('Distribución de Puntos de los Pilotos')
plt.ylabel('Puntos')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.show()
```

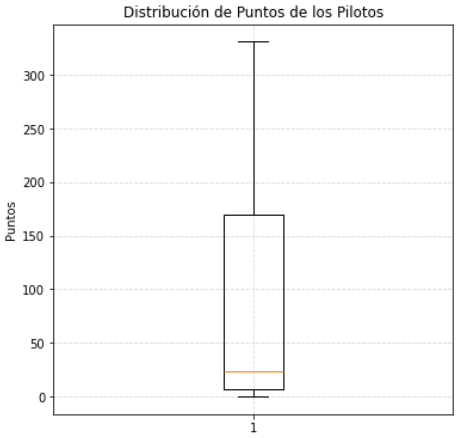


Figura 5. Grafica de boxplot obtenida a partir la información de la temporada 2023 de Fórmula 1.

En donde, la mediana (línea naranja dentro de la caja) se sitúa por el número 25, el rango del cuartil va desde el 0, hasta el 170, y en este caso no existen valores atípicos, cabe destacar que un valor atípico sería colocado como un pequeño circulo por fuera de la caja del rango.

RESULTADOS

Como parte de los resultados generados en este trabajo, se considera la implementación de una estrategia innovadora para la enseñanza de programación dirigida a estudiantes de Ing. en Sistemas Automotrices, logrando integrar ciencia de datos con información que proviene de uno de sus temas de mayor interés como la Formula 1. La constante generación de actividades prácticas y la inmersión a conocimientos generales como la estadística, les permitió manipular dataset´s para generar información visual haciendo uso de Python y de las bibliotecas pandas y matplotlib.

Concretamente los estudiantes lograron:

1. Construir bases de datos estructuradas a partir de instrucciones propias de la ciencia de datos y utilizando comandos según la sintaxys del lenguaje de programación Python. Por lo que pudieron manipular la información según sus propios intereses, por ejemplo, ordenar a los pilotos según los podios obtenidos.

2. Por medio de este proyecto, lograron comprender conceptos estadísticos aplicados a eventos reales, lo cual facilita su inmersión a estudios provenientes de la industria automotriz de la región, generando gráficas de barras, dispersión, boxplot, entre otras.

3. En base al dataset con el que se trabajó, se tuvo un “insight/hallazgo” el cual fue que existe una distribución desigual entre el rendimiento de las escuderías.

Así mismo, este proyecto logro que los estudiantes tuvieran una participación activa durante las clases, algunos de ellos incluso optaron por herramientas especificas como Google Colab para agregar imágenes y enlaces a otros sitios relacionados con la información que se presentaba.

CONCLUSIONES

La integración de ciencia de datos, formula 1 y programación permitió que los estudiantes desarrollarán el pensamiento lógico, el pensamiento crítico y analíticos para resolver problemas reales, tal como sucedió en generar código para presentar resultados con los filtros necesarios. Integrar tecnologías propias de la industria 4.0, no como un fin, sino como un medio para desarrollar sus habilidades y competencias profesionales. Además, lograron comunicar resultados a través de presentaciones visuales, interpretando de manera correcta los datos, se valida esta premisa de acuerdo a las explicaciones y razonamiento que daban a las gráficas de boxplot. Finalmente, se recomienda aplicar esta estrategia a otras asignaturas que involucren a la programación como parte de un modelo integral, significativo y que este alineado a objetivos propios de la demanda del sector industrial de la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. Berkeley, J., Smith, A., & Johnson, M. (2021). *Teaching Data Science in Engineering Education*. Engineering Education Press.
2. Davenport, T. H., & Harris, J. G. (2017). *Competing on Analytics: The New Science of Winning*. Harvard Business Review Press.
3. McKinney, W. (2017). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly Media.
4. Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
5. Provost, F., & Fawcett, T. (2013). *Data Science for Business: What You Need to Know about Data Mining and Data-Analytic Thinking*. O'Reilly Media.
6. Tufte, E. R. (2001). *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press.

INTERACCIÓN SUELO-ESTRIBO-SUPERESTRUCTURA EN PUENTES SEMI-INTEGRALES

Eduardo Reyes Negrete, Bertha Alejandra Olmos Navarrete, José Manuel Jara Guerrero, Juan Ignacio López Pérez, Abel Martínez Silva

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
eduardo.negrete@umich.mx

RESUMEN

Desde hace ya varias décadas se ha planteado a nivel mundial el cambo de la concepción estructural de puentes simplemente apoyados (PSA) por propuestas innovadoras, como consecuencia del continuo progreso que se tiene en las áreas de tecnología de materiales, herramientas computacionales, métodos numéricos implementados para el desarrollo de análisis estructural y la normatividad vigente. Uno de los principales cambios que se ha observado es la construcción de tableros continuos que permitan reducir los costos de mantenimiento que se tienen en la vida útil de los puentes, además de brindar una mejor protección a los elementos estructurales de la subestructura, ya que el mal funcionamiento de las juntas de dilatación permite infiltraciones de materiales y agua, las cuales pueden generar corrosión en el acero, humedades, induciéndose degradación de resistencia y rigidez en los materiales que conforman los puentes. La construcción de tableros continuos es un problema complejo de análisis estructural, ya que las acciones sísmicas inducen fuerzas de inercia que se trasmiten directamente a los estribos, generándose presiones pasivas y activas que afectan el comportamiento del suelo de relleno que se encuentra detrás de estos elementos, afectando el comportamiento global del puente. Por lo que, el objetivo de esta investigación es estudiar algunos modelos constitutivos propuestos en la literatura para evaluar tanto el efecto de interacción suelo-estribo como sus efectos en los desplazamientos horizontales en los estribos y pilas de un puente semi-integral (PSI) de concreto reforzado, así como estudiar la variación de los elementos mecánicos que presentan los elementos estructurales. El análisis de resultados se basa en comparar las demandas esperadas utilizando modelos de puentes que consideren el efecto de interacción-suelo-estribo mediante diferentes modelos constitutivos, lo cual permite evaluar la contribución que tienen los estribos en el comportamiento integral de los puentes. Los resultados permiten concluir que se debe considerar ante acciones sísmicas la contribución de los estribos en el comportamiento y desempeño de puentes semi-integrales, de lo contrario, crece la probabilidad de que los estribos presenten daños severos y en consecuencia un mal funcionamiento del puente, lo que implica un incremento en los costos directos e indirectos del manteamiento de los puentes a largo plazo.

INTRODUCCIÓN

Los puentes semi-integrales (PSI) se han construido particularmente en países desarrollados como Estados Unidos y países del continente europeo, y recientemente en China. Debido a que tienen una economía creciente y mayor disponibilidad de recursos, estos países han invertido en el desarrollo de equipos computacionales y programas de análisis estructural muy sofisticados, así como en la creación de laboratorios y centros de investigación donde se realizan experimentos a escala sobre el comportamiento de diversas estructuras ante diversas solicitaciones externas, en consecuencia existe una mejor reglamentación y mayores requisitos por cumplir en los procesos de diseño y construcción que garantizan un excelente desempeño estructural de los puentes en su vida útil. Los PSI presentan variables que deben ser consideradas en su proceso de análisis y diseño estructural, como son los efectos por temperatura, solicitaciones sísmicas, frenado vehicular, solicitaciones por viento entre otras. Se generan presiones pasivas en los estribos a causa del desplazamiento de la superestructura, como efecto de diversas solicitaciones externas, por lo que el suelo detrás de los estribos experimenta deformaciones que se van acumulando, estas deformaciones generan oquedades que dañan a las losas de acceso, lo cual es un problema muy común en varios países. Mourad y Tabsh (1999) compararon el comportamiento de las losas de acceso en PSA y puentes con estribo integral, concluyendo que los estribos integrales distribuyen más uniformemente los

esfuerzos en las losas de acceso por la continuidad que se tiene entre la losa de acceso y el estribo. Los esfuerzos en la losa de acceso presentan una disminución del 25% aproximadamente con respecto de estribos integrales con respecto a estribos de PSA, lo representa una ventaja en la construcción de PSI.

Como se puede observar, en PSI es importante considerar las presiones pasivas a que pueden estar expuestos los estribos, este fenómeno se presenta cuando el estribo empuja al suelo detrás del mismo, ejerciendo esfuerzos de compresión y deformaciones, las cuales se van acumulando con cada ciclo de carga. Si la deformación en el suelo es muy grande, este dejará de contribuir a la respuesta global del puente, ya que existirá una separación entre el estribo y el suelo. En puentes simplemente apoyados generalmente no se considera la contribución del sistema suelo-estribo, ya que solamente se coloca en el modelo un apoyo fijo, simulando un estribo que no se puede desplazar longitudinalmente, en algunos casos de coloca apoyos empotrados, con el cual se simula un estribo que no puede rotar, ni desplazarse horizontalmente en su parte superior. En consecuencia, solo se calcula la presión activa de reposo del suelo y se desprecian las presiones pasivas y activas. Para esta investigación solamente se consideran los efectos sísmicos ya que sus efectos corresponden a las mayores demandas, y por lo tanto, corresponden los mayores esfuerzos esperados en el sistema suelo-estribo.

Cuando un PSI se encuentra sometido a una excitación dinámica del suelo efecto de un terremoto, se generan fuerzas de inercia que son función de la masa del puente, de acuerdo con el principio de D´Alembert. Dichas fuerzas de inercia se transfieren a los estribos, originándose las presiones pasivas que inducen desplazamientos horizontales en los estribos. Wilson y Elgamal (2010) mencionan que la contribución de los estribos depende del tipo de suelo que se tenga detrás de los mismos, durante un sismo, la superestructura puede impactar contra el estribo, donde el muro de respaldo pudiese colapsar, en este caso, la resistencia provendría directamente del suelo, por lo que resulta muy importante el grado de compactación del suelo detrás de los estribos, ya que a mayor compactación se tendrá mayor rigidez.

Es importante considerar la contribución de los estribos en la respuesta global de PSI, esto generalmente se desprecia en el caso de PSA. Representar el comportamiento del estribo ante solicitaciones estáticas y dinámicas es complejo por la interacción que existente entre el suelo y el estribo, así como la diferencia que se tiene entre los módulos de elasticidad de ambos materiales. Generalmente, los estribos se construyen de concreto reforzado con diferentes tipologías estructurales y con suelo de relleno granular detrás de estos. Wilson y Elgamal (2010) indican que los modelos constitutivos actuales que consideran la contribución de los estribos se fundamentan en representaciones bilineal de la relación esfuerzo-deformación, además, que estas propuestas provienen de un número limitado de pruebas experimentales a escala, por lo que es necesario contar con más investigaciones en este tema, esto con la finalidad de contar con modelos más aproximados al comportamiento real del sistema suelo-estribo.

Otra variable importante por considerar es el tipo de suelo de desplante, ya que el tipo de cimentación es función de la capacidad de este suelo. Para suelos con velocidad de propagación de las ondas sísmicas secundarias mayor que 720 m/s, generalmente es suficiente con una cimentación superficial para transferir las cargas al suelo por su baja deformabilidad y compresibilidad: sin embargo, en suelos con velocidad de ondas de corte menor que 180 m/s, es necesario transferir las cargas mediante cimentaciones a base de pilotes, debido a una alta compresibilidad y deformabilidad del suelo, dando lugar a un comportamiento más complejo de la interacción suelo-estribo. Callisto y Rampello (2013) mencionan que generalmente en puentes con estribos con cimentaciones a base de pilotes ante acciones sísmicas severas, la flexión que experimentan los pilotes limita la capacidad de la cimentación. Por lo que recomiendan diseñar asumiendo la formación de articulaciones plásticas en los pilotes con el objetivo de que los elementos mecánicos en la superestructura sean menores. Lograr el desarrollo de articulaciones plásticas en pilotes de cimentación de estribos es muy difícil, debido a alta resistencia a flexión.

Sin importar la complejidad del análisis estructural en los PSI, es importante garantizar su buen desempeño en su vida útil, además se debe garantizar que no presenten inestabilidades estructurales que pueden ser causa de colapso ante ningún tipo de acciones, es decir, los PSI deben diseñarse para una probabilidad de colapso muy pequeña en su vida útil. Callisto y Rampello (2013) indican que en la actualidad se exige en varios reglamentos del mundo que las estructuras no colapsen ante la ocurrencia de terremotos, lo cual solamente se puede cumplir incluyendo dispositivos disipadores de energía. Los autores mencionan que es muy difícil detectar daño estructural en pilotes, así como repararlos, por su ubicación. Por lo que recomiendan diseñar adecuadamente los pilotes que garantice un desempeño sísmico satisfactorio, lo cual se puede lograr aumentando el radio de los pilotes y reduciendo las filas.

Determinar la contribución de los estribos en la resistencia de PSI sujetos a acciones sísmicas es complejo, ya que debido a los movimientos horizontales que experimenta la superestructura, ambos estribos no contribuyen simultáneamente en la respuesta global del puente. Kozak y Col. (2018) realizaron análisis estático y dinámico no lineal de un puente con estribos integrales localizado en Illinois, donde estudiaron la contribución de los estribos a la respuesta global del puente, en su trabajo observaron que ante la excitación sísmica los estribos no contribuyen en igual proporción, cuando el puente se mueve hacia un lado, comprime al estribo y al suelo detrás del mismo, alejándose la superestructura del estribo contrario, por lo que este último contribuye muy poco en la respuesta. Respecto al sentido transversal del movimiento, ambos estribos contribuyen, en menor proporción que en el sentido longitudinal. Este fenómeno cíclico ocasiona que el suelo detrás de los estribos acumule deformaciones, y por lo tanto, a mayor número de ciclos se tiene menor contribución en la respuesta, debido a la separación que se va generando entre el suelo y el estribo, lo que implica un desempeño inadecuado del puente.

MODELOS CONSTITUTIVOS INTERACCIÓN SUELO-ESTRIBO

Existen los modelos constitutivos que representan adecuadamente la contribución del sistema suelo-estribo a la respuesta global de puentes, tanto para PSA como PSI, principalmente por el auge e interés que se tiene en modelar el comportamiento de estructuras semi-integrales, así como la curiosidad de entender con mayor precisión el comportamiento y contribución de los estribos ante diferentes solicitaciones dinámicas, principalmente las sísmicas. La interacción suelo-estribo es una variable importante a considerar debido a que es un medio importante de disipación de energía. En el caso de los PSI, el movimiento de la superestructura no se puede considerar independiente de los estribos, como generalmente se asume para PSA. Nilson (2005) menciona que se ha demostrado la importancia de la contribución de los estribos en la respuesta global de los puentes, principalmente ante acciones sísmicas, por lo que ha reconocido la necesidad de desarrollar modelos constitutivos, modelos numéricos y experimentales que permitan entender mejor su comportamiento e implementarlo en el análisis de puentes.

Para el desarrollo de este estudio, se considera una cimentación superficial sin pilotes en los estribos, se asume un suelo poco compresible y poco deformable con velocidad de onda de corte mayor a 720 m/s, por lo que solamente se considera la contribución del suelo-estribo en la respuesta del puente. Generalmente se recomienda colocar suelo del tipo granular detrás de los estribos, dado que se puede predecir mejor su distribución de esfuerzos; además, se desprecia la presión hidrostática, ya que el agua infiltrada se puede canalizar fuera del volumen del suelo mediante la colocación de drenes. Este tipo de suelo no desarrolla fuerzas de cohesión, lo que complica el análisis debido a las incertidumbres asociadas a su comportamiento ante la demanda sísmica. La norma AASHTO (2024) menciona que es preferible utilizar material granular como relleno detrás de los estribos, en caso de utilizar suelos cohesivos se debe saber que muros de contención y estribos han fallado por causa de desplazamientos horizontales excesivos y pésimas condiciones de drenaje, por lo que la presión hidrostática se incrementa bastante.

Uno de los modelos constitutivos que mejor representa la contribución de los estribos asume que cualquier tipo de suelo detrás de los estribos no contribuirá cuando alcance una presión última de 3.773 kg/cm^2. Nilson (2005) propone un modelo constitutivo para representar el comportamiento del

estribo con el suelo basándose en un sistema cuadrilineal, donde se proporciona una rigidez inicial de 11726.6 kg/cm, que corresponde a suelos granulares, considerando un porcentaje de deformación última del estribo que es función del tipo de suelo. En este trabajo se asume un suelo granular, por lo que el desplazamiento último esperado del estribo es de 18.15 cm. El modelo no lineal de Nilson se describe en la Figura 1, donde se representa el comportamiento del suelo detrás de los estribos ante el efecto de las presiones pasivas. En la figura se observa como el suelo incrementa su resistencia proporcionalmente al incremento de las presiones pasivas, así como que el estribo se desplaza horizontalmente, cambiando su rigidez a medida que se incrementa el desplazamiento hasta llegar a su máxima resistencia, donde el suelo se deforma sin incremento de carga, en este punto se dice que el suelo alcanzó su capacidad última, y por lo tanto no contribuye más con la respuesta global del puente.

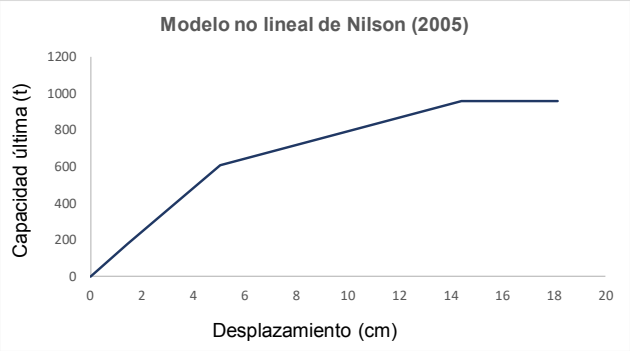


Figura 1 – Modelo no lineal del suelo ante el efecto de las presiones pasivas en puentes.

La Figura 2 muestra uno de los modelos más representativos en la actualidad para considerar la contribución de los estribos en la respuesta global del PSI, este es propuesto por el Departamento de Transporte de California (CALTRANS, 2019). Este modelo proviene de varias simulaciones en laboratorio del comportamiento de estribos tipo U ante las presiones pasivas, y es del tipo bilineal elastoplástico, donde suelo al alcanzar el suelo su punto de fluencia presenta deformación sin incremento de la presión pasiva, por lo que presenta acumulación de deformaciones, efecto que hace que el suelo se encuentre separado del estribo, y por lo tanto, este no contribuya más con la resistencia.

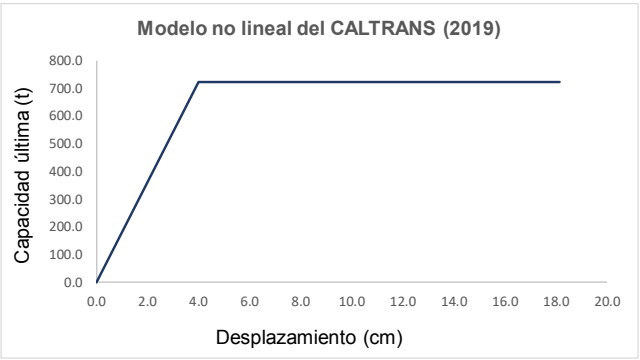


Figura 2 – Modelo no lineal elastoplástico del suelo ante el efecto de las presiones pasivas en puentes.

En los modelos descritos se asume que ante un desplazamiento del estribo de 18.2 cm, el suelo de relleno no contribuye más en la respuesta global del puente. Siendo el modelo propuesto por Nilson el que mayor resistencia aporta a la acción pasiva, la cual es aproximada al 30%. El modelo de

CALTRANS (2019) ha sido mejorado con ayuda de pruebas experimentales en estribos a escala real.

DEMANDA SÍSMICA

Es indispensable considerar las acciones sísmicas en los PSI, ya que se generan presiones pasivas que pueden ocasionar la fluencia del suelo detrás de los estribos que puede ser que estos dejen de aportar resistencia a la respuesta global del puente. Además, debido a la acumulación de deformaciones a que está sujeto el suelo por fuerzas cíclicas, se presentan oquedades bajo las losas de acceso, generando daños e incomodidades a los usuarios. México es un país que se encuentra localizado en una región altamente sísmica, ya que forma parte del cinturón del fuego, lugar donde ocurren la gran mayoría de terremotos que han ocasionado severos daños a la infraestructura mundial. Lo cual se debe a la interacción de las placas tectónicas. La República Mexicana se regionaliza en cuatro zonas sísmicas (Figura 3), siendo la zona D la de mayor intensidad sísmica.

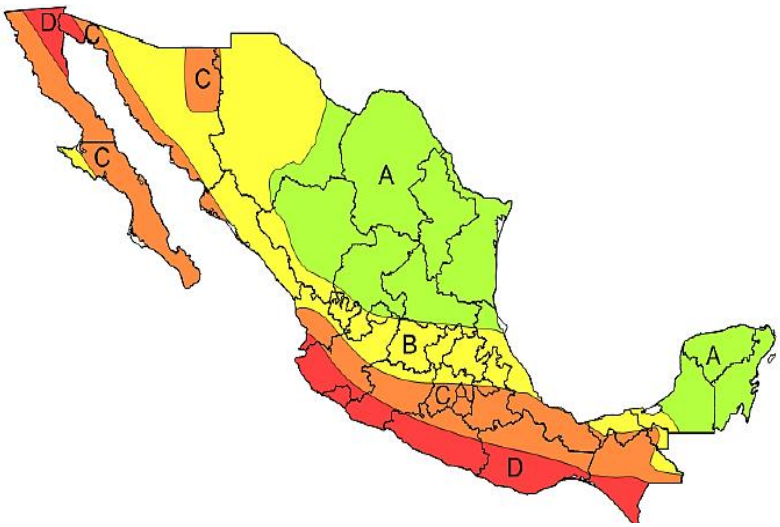


Figura 3 – Regionalización sísmica de la República Mexicana (Tomada de MDOC de la CFE, 2015).

Para la presente investigación se asume la demanda sísmica a que pudiese verse expuesto el municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán, por su localización sísmica, zona D. La Figura 4 presenta el espectro de diseño, demanda sísmica, el cual está definido por el Programa de Diseño Sísmico PRODISIS (MDOC, 2015). Se considera que el caso de estudio está desplantado en un suelo rígido con una velocidad de onda de cortante de 720 m/s. El espectro de diseño considera la disipación energía a través del comportamiento inelástico de la estructura.

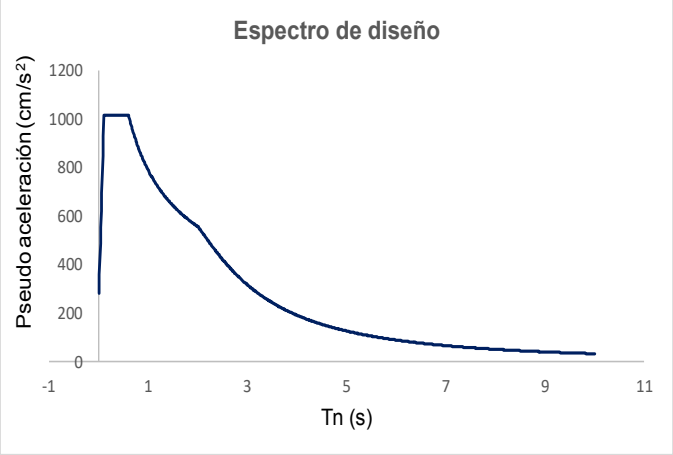


Figura 4– Espectro de diseño correspondiente a municipio de Lázaro Cárdenas, Michoacán (MDOC, 2015).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NÚMERICO

La Figura 5 muestra el modelo numérico del PSI desarrollado y analizado en este trabajo mediante el programa SAP2000. El puente consta de cinco claros con longitud de 30 m, lo que lleva a un puente con longitud total de 150 m, conformado por un tablero de 10.6 m de ancho soportado por siete vigas AASHTO tipo IV localizadas a 1.4 m, medido centro a centro, y longitud de 30 m ya que se encuentran simplemente apoyadas sobre apoyos de neopreno entre los claros. La losa es continua de concreto reforzado y espesor de 0.2 m. Con respecto a la subestructura, está se conforma por pilas tipo marco de 5.3 m de altura, formado por cuatro columnas circulares de CR y diámetro de 1.1 m. La infraestructura es a base de una cimentación superficial conformada por losas de CR con peralte de 1 m. Los estribos se modelan mediante elementos tipo link que incorporan el modelo constitutivo propuesto por Nilson (Nilson, 2005). La Figura 6 muestra el modelo constitutivo que sigue la respuesta no lineal del suelo ante el efecto cíclico de las presiones pasivas, donde el área dentro de los ciclos histeréticos corresponde a la disipación de energía y a la acumulación de deformaciones permanentes del suelo detrás de los estribos.

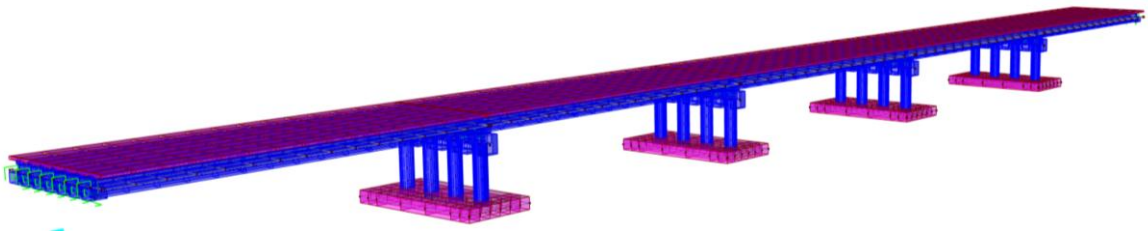


Figura 5– Modelo numérico del caso de estudio en el programa SAP2000 V26 (CSI,2000).

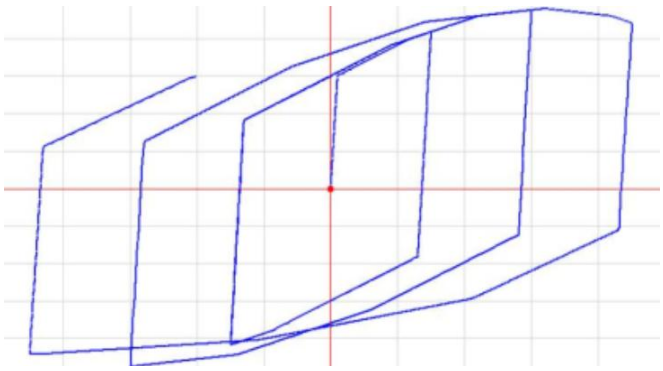


Figura 6– Simulación de la interacción suelo-estribo implementada para el caso de estudios de acuerdo con las propuestas de Nilson (Nilson, 2005) y CALTRANS (CALTRANS,2019).

RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los PSI en México a lo largo de su vida útil se encuentran sometidos a excitaciones dinámicas inducidas por terremotos, por lo que se generan fuerzas de inercia debido a la masa de la superestructura y son transferidas a los estribos. Dada la ausencia de las juntas de dilatación, se presentan presiones pasivas que comprimen al estribo y al suelo detrás del mismo, dado que es un fenómeno cíclico, el suelo acumulará deformaciones volumétricas y dependiendo de la magnitud de los desplazamientos horizontales de los estribos, el suelo se alejará del estribo y no contribuirá a la respuesta global del PSI. En las Tablas 1 y 2 se reportan las propiedades que definen las leyes constitutivas para representar los modelos de Nilson (Nilson, 2005) y CALTRANS (CALTRANS, 2019), respectivamente.

Tabla 1– Propiedades del modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005).

Fuerza (kg)	Desplazamiento horizontal (cm)	Rigidez efectiva (kg/cm)
-90576	-18.15	11730
-90576	-14.4	
-57417.84	-5.04	
-16891.2	-1.44	
0	0	

Tabla 2– Propiedades del modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019).

Fuerza (kg)	Desplazamiento horizontal (cm)	Rigidez efectiva (kg/cm)
-724250	-18.15	181061.90
-724250	-4	
0	0	

La Figura 7 muestra la numeración de las pilas que se utiliza para identificar los resultados del análisis, correspondientes a los puntos de control para el análisis de desplazamientos horizontales que experimentan estos elementos al estar sujetos a una excitación dinámica del suelo, así como los desplazamientos que experimentan los estribos, tanto para ambos modelos constitutivos.

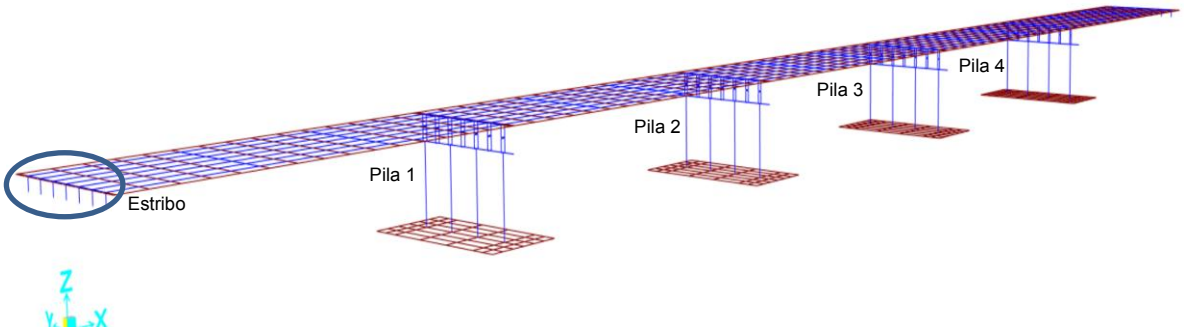


Figura 7– Localización de los puntos de control del puente en estudio.

La Figura 8 resume los resultados referentes a los desplazamientos horizontales a que están sujetas las pilas, donde se observa que estos son menores a 2 cm, y generalmente las columnas del extremo sufren menor desplazamiento que las columnas centrales, lo cual es debido a que las columnas del centro están expuestas a una mayor descarga por parte de la superestructura, con respecto de la descarga a que están sujetas las columnas externas. Por otro lado, la Figura 9 reporta los desplazamientos horizontales a que están sujetos los estribos, los cuales son significativos debido a que los estribos se desplazan aproximadamente 67 mm, lo que ocasiona que se generen presiones pasivas, las cuales deben ser consideradas en el diseño estructural de los estribos. Es importante mencionar que la magnitud de los desplazamientos horizontales en las pilas y estribos es función de la demanda sísmica que se presente en el lugar de construcción del PSI.

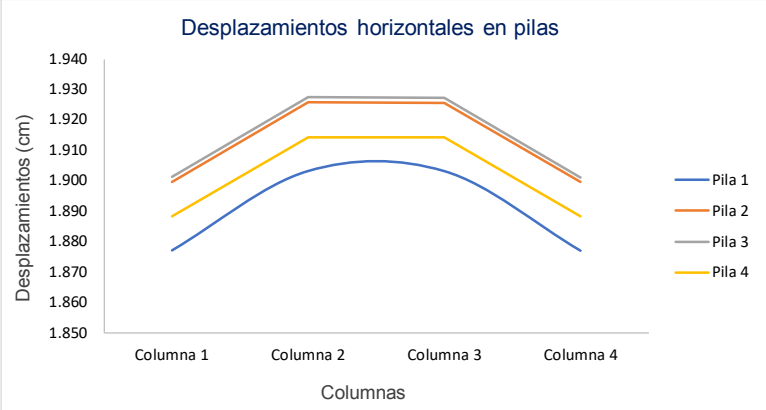


Figura 8– Desplazamientos horizontales en las pilas empleando el modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005).



Figura 9– Desplazamientos horizontales en los estribos utilizando el modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005).

En las Figuras 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos con el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019), desplazamientos horizontales en pilas y estribos, estos alcanzan valores menores a 1 cm. Este resultado se debe a que el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019) presenta mayor rigidez efectiva, y en consecuencia el suelo detrás de los estribos limita las deformaciones longitudinales del PSI en estudio, observándose un mejor comportamiento de la estructura. En consecuencia, las presiones pasivas en los estribos son mucho menores que las estimadas empleando el modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005), Figura 8 y 9. En la Figura 12 se comparan los desplazamientos horizontales en los estribos ante ambos modelos constitutivos, los resultados muestran que le modelo de Nilson (Nilson, 2005) tiende a mayores desplazamientos longitudinales en los estribos, por lo que resalta la importancia de tener cuidado en la selección del modelo constitutivo para modelar el comportamiento de los estribos en PSI ante demandas sísmicas, ya que la respuesta global del puente se encuentra influenciada por la contribución de los estribos y estos modelos podrían subestimar o sobreestimar la respuesta.

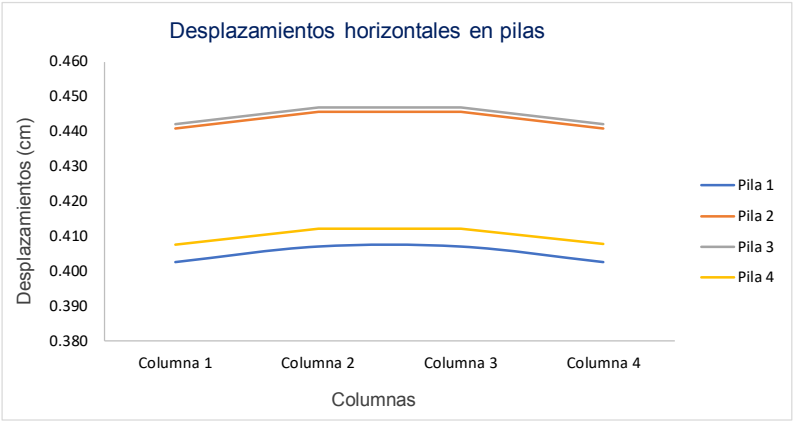


Figura 10– Desplazamientos horizontales en las pilas utilizando el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019).

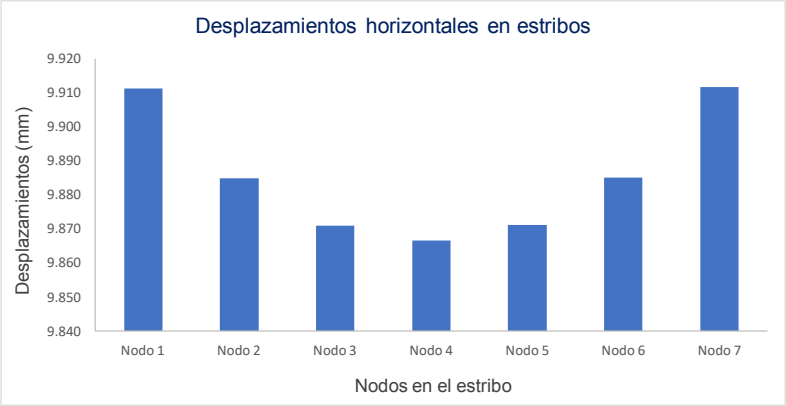


Figura 11– Desplazamientos horizontales en estribos utilizando el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019).



Figura 12– Comparación de las demandas de desplazamientos horizontales en estribos implementando los modelos constitutivos de Nilson (Nilson, 2005) y CALTRANS (CALTRANS, 2019).

Las Figuras 13 y 14 resumen los momentos flexionantes a que están sujetas las columnas de la pila 1 del puente en estudio, donde se observan mayores momentos flexionantes para el modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005) que con el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019). Este comportamiento se debe a que el PSI presenta mayores desplazamientos longitudinales, al igual que los estribos empleando esta ley constitutiva. En consecuencia, el diseño de las pilas será significativamente diferente con respecto a las dimensiones y la cuantía de acero de acuerdo con el modelo constitutivo que se emplee.

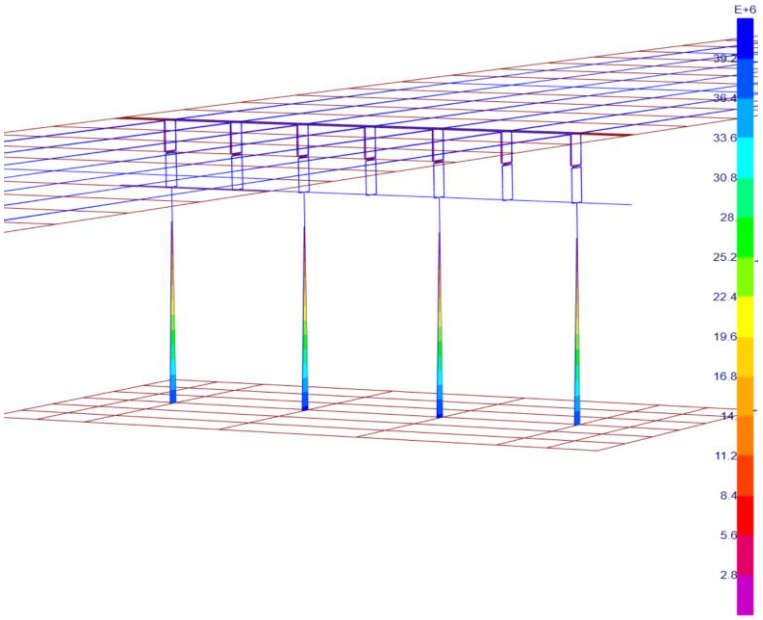


Figura 13– Momentos flexionantes en la pila 1 del puente en estudio considerando el modelo de Nilson (Nilson, 2005).

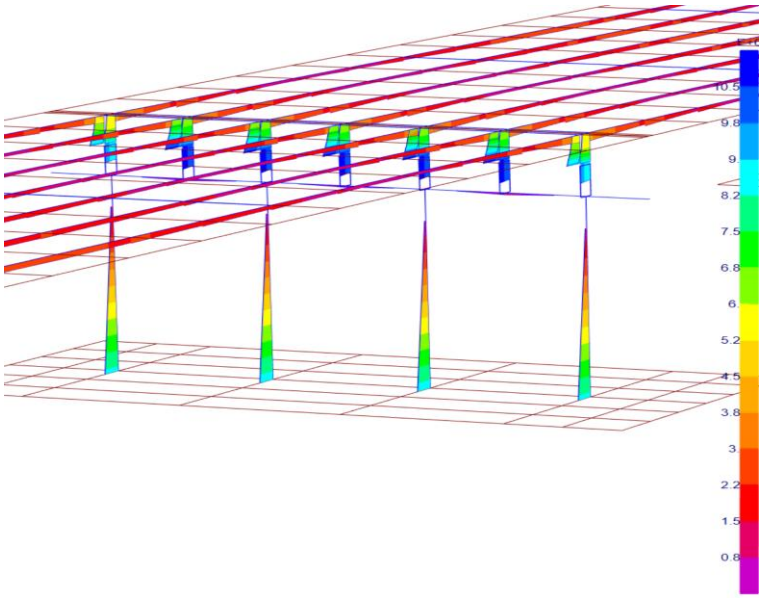


Figura 14– Momentos flexionantes en la pila 1 del puente en estudio considerando el modelo de CALTRANS (CALTRANS, 2019).

CONCLUSIONES

Se observa la importancia de considerar la contribución de los estribos en la respuesta global de los PSI, ya que, de no hacerlo, se podrían estar diseñando mal los estribos y/o columnas, lo cual puede ser causa de la presencia de daños estructurales, cuyo nivel es función de la intensidad sísmica a que pueda estar expuesto un puente. Los modelos constitutivos para modelar la interacción suelo-estribo propuestos por Nilson (Nilson, 2005) y CALTRANS (CALTRANS, 2019), representan

adecuadamente el comportamiento y contribución del sistema suelo-estribo-superestructura; sin embargo, existen claras diferencias en los modelos y tendencias del comportamiento no lineal, principalmente en la rigidez efectiva, la cual es mucho mayor para el modelo de CALTRANS (CALTRANS, 2019), en consecuencia, se estiman menores desplazamientos horizontales en pilas y estribos, y como como consecuencia menores momentos flexionantes en las pilas. Por otro lado, el modelo constitutivo de Nilson (Nilson, 2005) permite mayores desplazamientos horizontales en los estribos, lo que da lugar a mayores presiones pasivas, lo que muestra la posibilidad de daños estructurales en estribos en caso de no estimar adecuadamente el desplazamiento longitudinal de acuerdo con el tipo de suelo de relleno. Es importante resaltar que el fenómeno sísmico es cíclico, es decir, corresponde a fuerzas repetidas que actúan en dos direcciones durante la ocurrencia de un terremoto, a las que están sujetos los PSI en muchas ocasiones a lo largo de su vida útil, por lo que, debido al constante desplazamiento lateral a que están expuestos los estribos, se genera acumulación de deformaciones volumétricas en el suelo detrás del estribo, ocasionando que su contribución sea cada vez menor a la respuesta global del puente, además, de que este efecto puede llevar a los PSI a presentar daños estructurales en los estribos y en las losas de acceso. Utilizar el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019) conduce a estimar desplazamientos laterales en estribos y pilas menores a 1 cm, por lo que los momentos flexionantes en las pilas son mucho menores, sin embargo, es necesario diseñar el estribo ante presiones pasivas mayores, ya que, ante excitaciones sísmicas, la superestructura transferirá mayores esfuerzos a los estribos. Se recomienda utilizar el modelo constitutivo de CALTRANS (CALTRANS, 2019), ya que este considera mejor la contribución del sistema suelo-estribo-superestructura a la respuesta global del PSI, además de que ha sido calibrado mediante pruebas de laboratorio a escala real recientemente. Es recomendable utilizar suelos granulares como material de relleno, debido a que se puede calcular con mayor precisión su distribución de presiones. Es importante mencionar que se deben diseñar los estribos ante el efecto de mayores presiones pasivas y no se deben modelar como apoyos fijos o empotrados, ya que realmente, los estribos de PSI sí experimentan desplazamientos laterales y rotaciones ante el efecto de las solicitaciones sísmicas. Se incentiva a realizar una mayor investigación y construcción de este tipo de estructuras en la República Mexicana, con la finalidad de modernizar la infraestructura de puentes en el país.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO, “LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS”, American Association of State Highway and Transportation Official., 10th Edition. 2024, pp. 25-95.
2. B. G. Nilson, “Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones”, School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology., 2005, pp. 300-312.
3. CALTRANS, “SEISMIC DESIGN CRITERIA 2.0”, State of California-Department of Transportation., 2019, pp. 133-147.
4. CFE, “Manual de Diseño de Obras Civiles”, Comisión Federal de Electricidad., 2015.
5. D.L. Kozak, J.M. LaFave, L.A. Fahnestock, “Seismic modeling of integral abutment bridges in Illinois”, Engineering Structures., Vol. 165.2018, pp. 170-183.
6. L. Callisto, S. Rampello, “Capacity Design of Retaining Structures and Bridge Abutments with Deep Foundations”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., Vol.139.7.2013, pp. 1086-1095.
7. P. Wilson, A. Elgamal, “BRIDGE-ABUTMENT-BACKFILL DYNAMIC INTERACTION MODELING BASED ON FULL SCALE TESTS”, Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering., 2010.
8. S. Mourad, S. Tabsh, “DECK SLAB STRESSES IN INTEGRAL ABUTMENT BRIDGES”, Journal of Bridges Engineering., Vol.4, 1991, pp. 123-130.

EVALUACIÓN DEL ÁCIDO ROSMARÍNICO COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN MEDIANTE DINAMICA MOLECULAR

Francisco Javier Pérez Ramírez[1,2], María de la Luz Delgadillo Torres[1], Consuelo Martínez Ruiz[1], Víctor Augusto Castellanos Escamilla[2] y Mariana Bárcenas Castañeda[1]

[1]TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, [2]TecNM: Instituto Tecnológico de Tlalnepantla.

francisco.pr@tlalnepantla.tecnm.mx

RESUMEN

La corrosión es un fenómeno electroquímico que representa un problema significativo en múltiples industrias, afectando la integridad estructural de materiales metálicos y generando costos elevados de mantenimiento y reemplazo. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas estrategias para mitigarla, incluyendo recubrimientos protectores y el uso de inhibidores de corrosión. Sin embargo, muchos de estos tratamientos presentan desventajas como toxicidad, impacto ambiental negativo y altos costos. En este contexto, la búsqueda de inhibidores de corrosión ecológicos y eficaces se ha convertido en una prioridad en la ciencia de materiales y la ingeniería de superficies. Los inhibidores de corrosión de origen natural han demostrado ser una alternativa prometedora debido a su biodegradabilidad y menor impacto ambiental. Entre estos compuestos, el ácido rosmarínico, un polifenol con propiedades antioxidantes ha sido identificado como posible inhibidor de la corrosión. Su mecanismo de acción se basa en la adsorción sobre la superficie metálica formando una barrera protectora que reduce la interacción del metal con el medio corrosivo. En este trabajo, se evaluó la eficiencia del ácido rosmarínico como inhibidor de corrosión mediante simulación de dinámica molecular. Para el estudio computacional, se generó el modelo estructural del ácido rosmarínico en conjunto con una superficie metálica de hierro (Fe110) utilizando agua como electrolito. Se reportan propiedades indicativas de la eficiencia del inhibidor sobre la superficie ferrosa.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, los materiales metálicos han sido utilizados por industrias en diversas áreas, tales como ciencia, tecnología y de forma general para cubrir necesidades de la vida diaria. Estos materiales tienen amplio uso enfrentándose a diversas condiciones climáticas, condiciones de operación o siendo expuestos a la corrosión y el desgaste, esta exposición ha hecho que la vida útil de los materiales disminuya más notablemente, algunos ejemplos puede ser el uso o aplicación en herramientas de trabajo, instrumentos, equipos, etc. Los materiales metálicos en la mayoría de los casos están en contacto con medios abrasivos o de desgaste y esto hace que las propiedades superficiales se vean deterioradas dando paso a la corrosión. La corrosión puede provocar pérdidas significativas en la economía de las industrias, esto por fallas del material lo cual conlleva a remplazos de piezas o paros totales de producción. Se han implementado el uso de nuevas técnicas que ayudan a retrasar la corrosión en los materiales, estas técnicas van desde los tratados termoquímicos hasta el uso de inhibidores de corrosión.

El cambio climático y el calentamiento global ha ido afectando en mayor medida, por eso buscar una forma de mejorar la vida útil ha sido una tarea diaria, los inhibidores son una técnica que puede ser utilizada para retrasar la abrasión en los materiales. Estas moléculas se componen a través de un proceso químico, las cuales por su estructura tienden a adsorberse sobre la superficie metálica y así retrasar en gran medida las reacciones redox que originan la corrosión. La principal función de las moléculas inhibidoras es generar una capa protectora sobre la superficie metálica, la cual funcione como protección ante la corrosión y de esta forma pueda alargar la vida útil del material. Los inhibidores han ido cambiando con el tiempo, pues estos pueden ser orgánicos, inorgánicos, naturales o sintéticos, elegir cual es el más conveniente depende en gran medida del medio en el cual estará inmerso, así como las condiciones de operación.

Las moléculas orgánicas, por sus propiedades logran ser inhibidores adsorbiéndose sobre la superficie metálica, inhibiendo la corrosión. En estudios realizados en las últimas décadas se ha demostrado que los inhibidores sintéticos logran un buen funcionamiento, sin embargo, estos mismos estudios han demostrado que algunos de estos inhibidores puedes ocasionar toxicidad (Marzorati et al. 2019). Debido a la toxicidad que pueden presentar estos inhibidores, limita su uso en algunas industrias alimenticias o farmacéuticas. Por lo cual se a generado una necesidad de desarrollar inhibidores que satisfagan las necesidades de las industrias, así como las políticas federales y sociales de implementar materiales que sean amigables con el ambiente, tales como biomoléculas o moléculas de origen natural, dando paso a investigaciones de inhibidores de origen natural (Alrefaee et al. 2021; Mozarati et al. 2019).

Los estudios se han enfocado en la eficiencia de una gran variedad de inhibidores desde el punto de vista experimental (Rani et al., 2011; Chigondo y Chigondo, 2015, Abdallah et al., 2018; Khan et al., 2015; Alrefaee et al., 2021; Marzorati et al., 2019), teniendo como resultado que son seguros, biodegradables, ecológicamente aceptables y renovables. Se han realizado estudios más particulares que demuestran la eficiencia del inhibidor depende de la estructura del ingrediente activo (Chigindo et al. 2015).

La facilidad de la adsorción de las moléculas inhibidoras puede atribuirse a su contenido de nitrógeno, oxigeno, átomos de sulfuro y enlaces múltiples (Lgaz et al 2018). Por ello que los extractos de frutos, semillas o plantas son una alternativa viable para la obtención de moléculas inhibidoras de la corrosión. Estos inhibidores han sido expuestos a medios ácidos y alcalinos obteniendo resultados positivos

La presencia de taninos, fenoles y flavonoides son los responsables del efecto inhibitorio de los extractos naturales. El Romero posee en su contenido fenoles, principalmente ácido rosmarínico (AR), el cual es una alternativa como inhibidor de origen natural. El AR ha sido aplicado con diferentes fines, tal como el estudio realizado por Lu et al 2021, quienes utilizar al AR como un agente de control de crecimiento de bacterias, dejando precedente de la funcionalidad de la molécula.

Aunque diversos estudios han señalado el potencial del ácido rosmarínico (AR) como inhibidor de la corrosión, mostrando su capacidad para disminuir la tasa de ataque en medios agresivos (Ren et al., 2020; Qu et al., 2018), aún queda mucho por comprender sobre su comportamiento. La mayoría de estas investigaciones se han centrado en analizar su desempeño bajo condiciones operativas industriales específicas, como la temperatura, el pH y la concentración del electrolito, variables que presentan importantes retos experimentales debido a la complejidad y los recursos que requiere su control en laboratorio. Por ello, cobra relevancia la incorporación de enfoques computacionales, como la dinámica molecular, que permiten simular estas condiciones de manera más accesible y ofrecen herramientas para profundizar en los mecanismos de inhibición a nivel atómico. Este tipo de aproximaciones abre nuevas oportunidades para optimizar y diseñar de forma racional inhibidores de origen natural.

La eficiencia del inhibidor se relaciona con la adsorción de sus moléculas sobre la superficie metálica y su interacción con el medio circundante, aspectos que pueden analizarse mediante métodos computacionales. En este sentido, herramientas de simulación como Monte Carlo y Dinámica Molecular representan una alternativa prometedora para describir el mecanismo de inhibición del ácido rosmarínico (AR) (Verma et al., 2018). A lo largo del tiempo, los estudios computacionales han proporcionado información valiosa sobre las interacciones intermoleculares, el movimiento y otras propiedades relevantes de la molécula inhibidora sobre la superficie metálica. Estos conocimientos permiten predecir el comportamiento del inhibidor y evaluar su efectividad en el control de la corrosión (Verma et al., 2018; Rodi et al., 2025).

Las herramientas de simulación molecular permiten evaluar la eficiencia de inhibidores de corrosión a través de estudios de adsorción (Nabilah-Haris et al., 2020; Verma et al., 2018; Saha et al., 2015). En este trabajo, se analiza computacionalmente el ácid

o rosmarínico, un compuesto fenólico de origen natural, como inhibidor potencial debido a su capacidad antioxidante y su afinidad con superficies metálicas.

TEORÍA

DINAMICA MOLECULAR

La simulación molécula es una herramienta que ocupa métodos numéricos y estadísticos, los cuales permiten estudiar y entender el fenómeno físico y químicos de las moléculas, esto con el objetivo de predecir, representar y modelar comportamientos de sistemas rales a condiciones que son difíciles de alcanzar en un laboratorio.

La simulación molecular puede abarcar diversas técnicas, estas pueden clasificarse como se muestra en la figura 1.

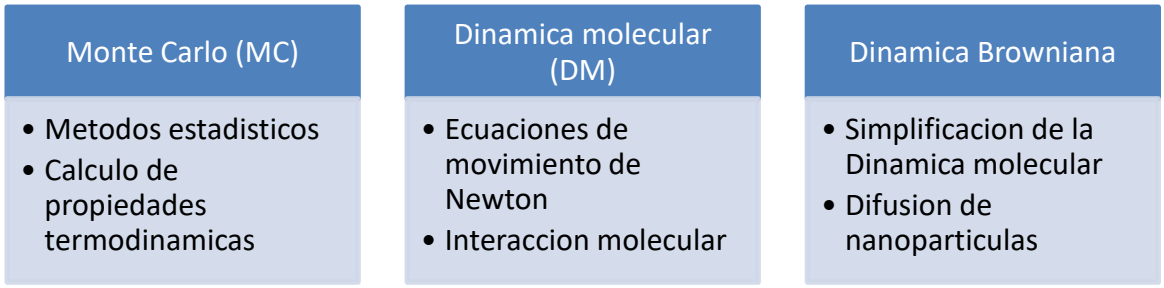


Figura 1. Clasificación de Simulación Molecular (Autoría propia)

Las técnicas de simulación molecular son utilizadas acorde a las necesidades que se deban cubrir. Monte Carlo genera una serie de pasos con base en movimientos aleatorios que se aceptan o rechazan de acuerdo con una probabilidad, la diferencia entre MC y DM es el método dinámico, este se basa en resolver las ecuaciones de movimiento de Newton para el sistema de estudio (Frenkel, 2002), de esta forma se puede obtener información de trayectorias y propiedades de transporte.

La Dinámica molecular comienza con las macromoléculas que componen el sistema, estas son colocadas de forma aleatoria en una caja de simulación con un determinado tamaño y forma, esta puede ser rectangular, cubica, esférica, etc. Al principio de la simulación los componentes tienen una posición y velocidad inicial, con el paso de la simulación se hacen los cálculos de propiedades del sistema como la energía potencial, la cual es producto de las fuerzas que actúan sobre cada átomo debido a los vecinos que lo rodean. Una vez calculada la energía, se procede al cálculo de las ecuaciones de movimiento de Newton para calcular la aceleración de los átomos y de esta forma predecir las nuevas coordenadas para cada uno de ellos. Y esto puede ser repetido a un numero de pasos dados, lo cual describirá la configuración del sistema.

INHIBIDOR DE CORROSION

Los inhibidores han ido evolucionando con el tiempo, a estos se les puede definir como una sustancia que se agrega en bajas concentraciones en un medio corrosivo para retardar o controlar el fenómeno de la corrosión, esto puede ser posible al disminuir o reducir las reacciones redox, lo cual retarda la velocidad de corrosión. El retardo en la velocidad de la corrosión se debe a que la molécula inhibidora se adsorba sobre la superficie ferrosa, esto a través de un proceso físico o químico o una combinación de ambos, esta molécula puede adsorberse debido a su conformación el cual cuenta con un grupo hidrofílico. Usualmente también contiene una parte hidrofóbica la cual forma una capa estérica que inhiba la interacción entre el electrolito y la superficie del hierro como se muestra en la figura 2.

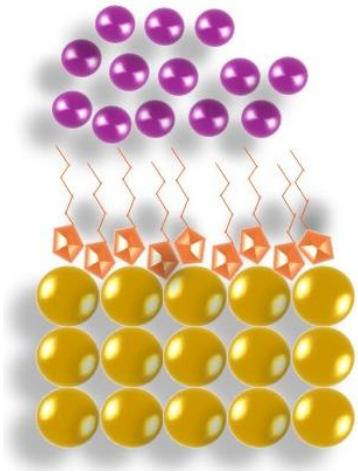


Figura 2. Representación esquemática del proceso de adsorción (Autoría propia)

Los inhibidores están diseñados para una acción especifica, esto para actuar sobre un metal o medio ya especificado (Tejeda. Benitez et al. 2014). Los inhibidores se pueden clasificar desde distintos enfoques: por su origen, mecanismo de acción, naturaleza química, etc. Una clasificación comúnmente usada en estudios que comparan el desempeño e impacto ambiental de los inhibidores de corrosión, los divide en tres grandes grupos según su origen, tal como se muestra en la figura 3 (Alrefaee et al. 202, Tejeda-Benitez et al. 2014).

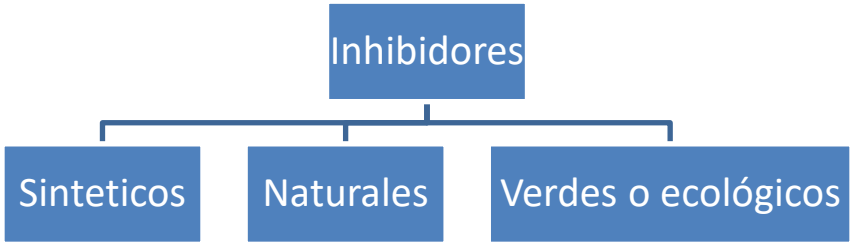


Figura 3. Clasificación de inhibidores (Autoría propia)

Hablar de los inhibidores sintéticos se relaciona a los compuestos orgánicos e inorgánicos, de los cuales la mayoría suelen ser tóxicos, y su degradación es compleja, sus residuos tienden a ser lodosos y esto ha sido considerado como no amigable con el ambiente. Por otra parte, los inhibidores naturales son aquellos cuyo origen viene de animales, plantas o minerales, suelen ser biodegradables, menos tóxicos y más sostenibles. Los inhibidores ecológicos a veces se agrupan con los naturales, sin embargo, su clasificación radica en el impacto ambiental más que en su origen. Estos han sido de gran relevancia para el estudio debido a que no son tóxicos y también son amigables con el ambiente. Los extractos de plantas como inhibidores muestran gran potencial para tomar lugar como el inhibidor más utilizado, desplazando a los inhibidores sintéticos (Alrefaee et al. 2021). La limitación encontrada en estos inhibidores es su solubilidad en electrolitos polares y su fácil descomposición por efecto de variables como la temperatura.

METODOLOGIA

Los cálculos de dinámica molecular se desarrollan de acuerdo con la figura 4. El procedimiento común del desarrollo de una simulación de dinámica molecular consiste en cuatro etapas principales: inicialización, construcción, equilibrio y cálculos de dinámica (descripción de propiedades). La figura 4 detalla los diferentes pasos que constituyen a las etapas de la simulación.

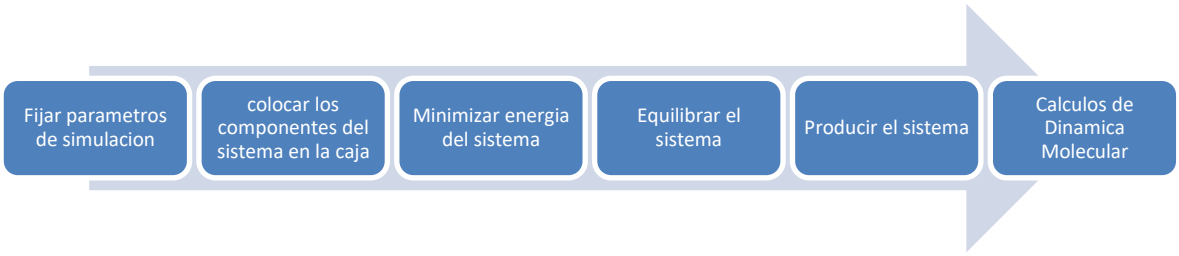


Figura 4. Algoritmo para simulación molecular (Autoría propia)

En la primera etapa (inicialización), se construyó la estructura metálica tomando como base el modelo cristalino Fe110. La estructura de hierro se generó utilizando AVOGADRO, esta estructura se colocó en una caja cubica con medidas de 8 x 8 x 8 nm, como se muestra en la figura 5, Esta estructura sirve como sustrato metálico para simular la interacción con el inhibidor. La orientación (110) es reconocida por su alta densidad atómica y relevancia en estudios de adsorción.

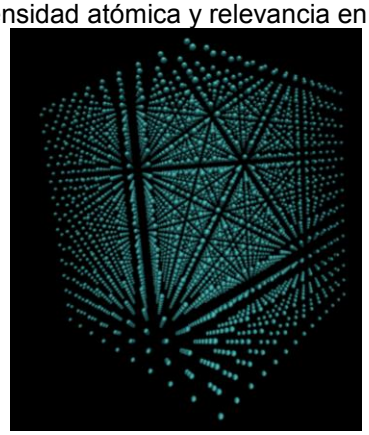


Figura 5. Estructura de Hierro Fe110 (Autoría propia).

La molécula de ácido rosmarínico se construyó con ayuda de Avogadro para convertir el archivo a un formato compatible con Gromacs. Se utilizo la topología CGenFF como apoyo para optimizar la molécula de ácido rosmarínico que se muestra en la figura 6. Representa el inhibidor natural que, por su contenido en grupos fenólicos, tiene alta afinidad para adsorberse en superficies metálicas, actuando como barrera frente a procesos corrosivos

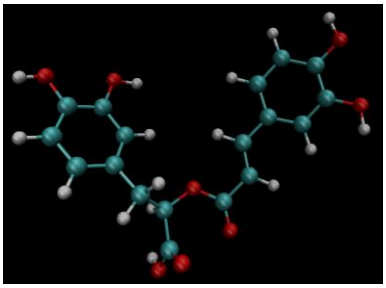


Figura 6. Molécula de Ácido Rosmarínico (Autoría propia).

La estructura de Fe fue colocada en el centro de la caja de simulación, se utilizó un campo de fuerza CHARMM para todo el sistema. La topología del sistema se construyó para que fuera funcional al momento de insertar la molécula de Ácido Rosmarínico y solvatar con el campo de fuerza ITP3 como se muestra en la figura 7 (se usó una sola molécula de ácido debido a su tamaño).

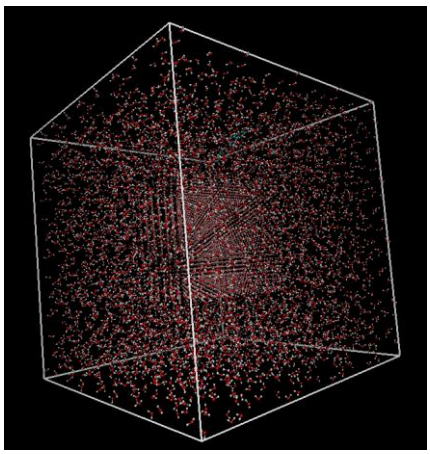


Figura 7. Fe110+Acido Rosmarínico+H_2O (Autoría propia).

Se realizo el proceso de Minimización de energía, Equilibrio del sistema y Producción. Posteriormente a esto, se realizaron los cálculos de simulación para el reporte de resultados.

RESULTADOS

El sistema estudiado está compuesto por una superficie metálica de hierro orientada en el plano 110, un inhibidor ecológico y un medio electrolítico simulado con agua ITP3: Fe + $\boldsymbol{Fe + AR + H_2O}$. Diversos estudios han demostrado que los inhibidores de origen natural y ecológico pueden ser eficaces en el control de la corrosión, gracias a la presencia de compuestos activos como fenoles, taninos y flavonoides, los cuales favorecen la adsorción sobre superficies metálicas debido a la presencia de grupos funcionales ricos en electrones (Saha et al., 2015; Verma et al., 2018).

En particular, el ácido rosmarínico contiene varios grupos fenólicos que promueven interacciones con la superficie de hierro mediante enlaces de coordinación o fuerzas de van der Waals, lo cual ha sido respaldado por estudios computacionales y experimentales. En la figura 8 se muestra la configuración inicial del sistema, en la que el inhibidor se encuentra alejado de la superficie metálica. Esta disposición inicial es clave para observar el proceso de adsorción espontánea durante la simulación.

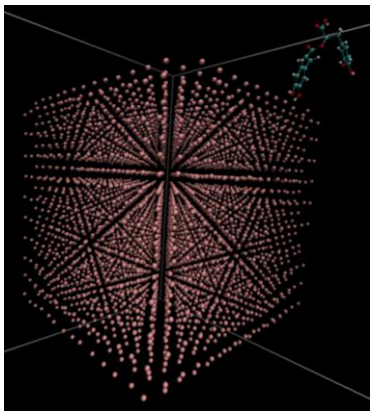


Figura 8. Acercamiento a la caja de simulación antes de los cálculos (Autoría propia).

El AR es una molécula de gran tamaño, por lo tanto, se utilizó una única molécula AR que permitiera analizar su movilidad, orientación y dinámica de adsorción sobre la superficie de hierro. Todos los cálculos de dinámica molecular realizados demuestran que el ácido rosmarínico tiende a adsorberse sobre la superficie metálica, tal como se muestra en la figura 9. Lo anterior sugiere una afinidad favorable entre el inhibidor y el metal.

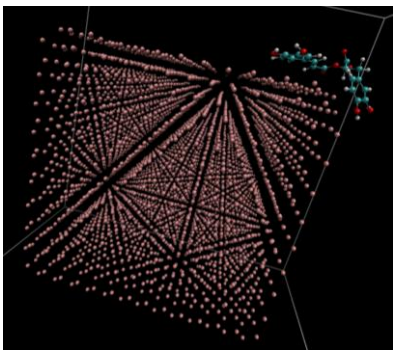


Figura 9. Acercamiento a la caja de simulación, adsorción del inhibidor sobre la superficie (Autoría propia)

El comportamiento observado en la figura 9 puede respaldarse mediante el cálculo de propiedades termodinámicas y estructurales del sistema, como la energía total, el desplazamiento cuadrático medio y la función de distribución radial. En la figura 10 se presenta la energía total del sistema a lo largo de la simulación. Se observa una evolución estable con oscilaciones naturales entorno a un valor promedio constante, lo cual indica que el sistema ha sido minimizado y equilibrado correctamente, validando la confiabilidad del entorno simulado. Este resultado respalda la adecuación del modelo computacional empleado.

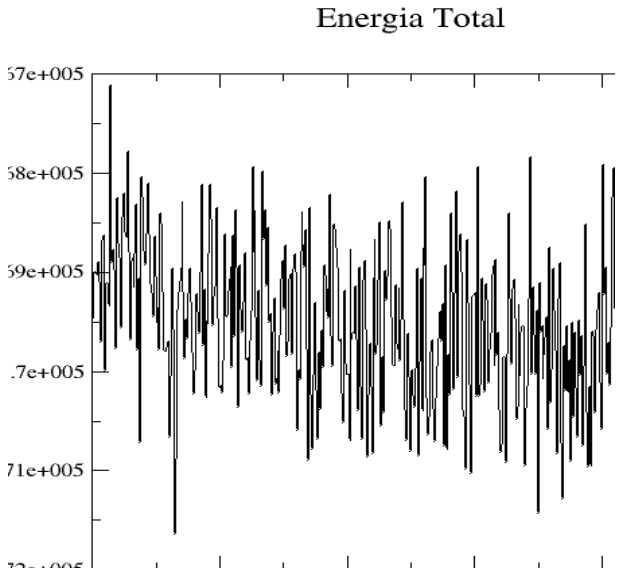


Figura 10. Energía total del sistema (Autoría propia)

Otra propiedad fundamental para comprender la interacción entre el inhibidor la superficie metálica es la función de distribución radial (RDF por sus siglas en inglés), que describe la probabilidad de encontrar una molécula a una cierta distancia de referencia, en este caso entre el AR y los átomos de hierro. En la figura 11 se muestra la RDF del caso de estudio, y se observa un pico pronunciado en el intervalo de 0.2 a 0.5 nm, lo cual indica una fuerte tendencia del inhibidor a ubicarse en la proximidad inmediata de la superficie metálica. Este comportamiento sugiere una adsorción efectiva y estructurada del AR sobre el Fe, lo cual es coherente con lo mostrado en las visualizaciones de las imágenes instantáneas de las figuras 8 y 9.

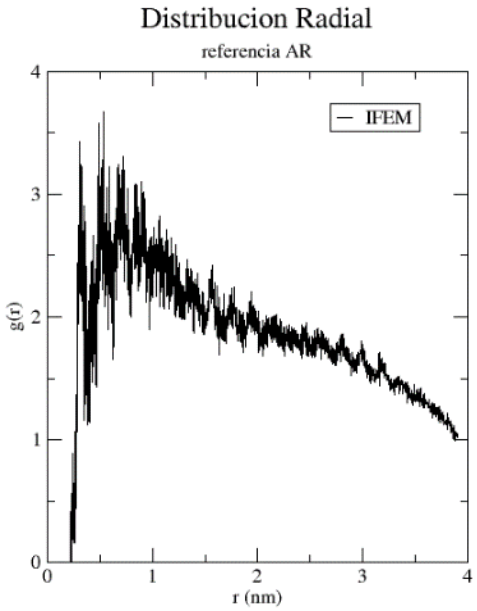


Figura 11. Función de Distribución Radial (RDF) (Autoría propia).

Finalmente, en la figura 12 se presenta el desplazamiento cuadrático medio (MSD por sus siglas en inglés) del AR, donde se puede observar un incremento sostenido del MSD alcanzando valores superiores a los 8 nm², lo cual demuestra una movilidad considerable de la molécula en el medio. Este comportamiento es característico de un mecanismo de difusión libre en solución, donde la molécula de inhibidor no permanece fuertemente adsorbida de forma constante, sino que mantiene un desplazamiento activo, es decir u movimiento dinámico. Esta característica de movilidad es deseable, ya que prmit al inhibidor explorar distintas regiones de la superficie metálica, facilitando una cobertura más uniforme y efectiva, especialmente en superficies expuestas o con irregularidades superficiales.

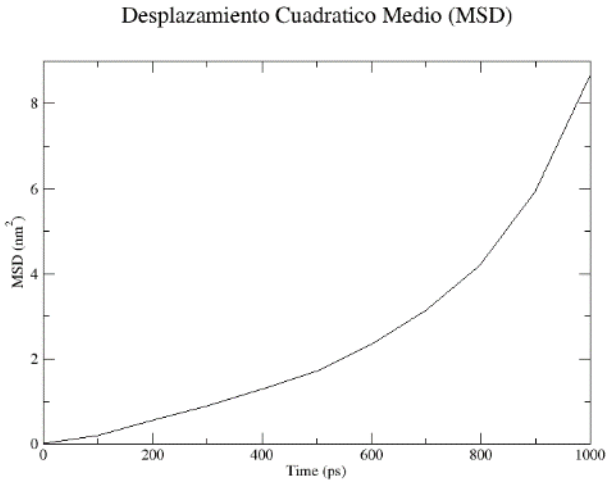


Figura 12. Desplazamiento Cuadrático Medio (MSD) (Autoría propia).

El análisis combinado del MSD con los resultados de energía total y función de distribución radial permite inferir que el ácido rosmarínico posee un equilibrio funcional entre adsorción efectiva y libertad de movimiento, lo cual lo posiciona como un inhibidor ecológico con gran potencial para el control dinámico de la corrosión en medios acuosos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante simulaciones de dinámica molecular evidencian que el ácido rosmarínico presenta un comportamiento favorable como inhibidor de la corrosión en superficies metálicas de hierro orientadas en el plano 110. La gráfica de energía total mostró una evolución estable a lo largo de la simulación, lo cual indica que el sistema fue correctamente equilibrado y permite el análisis relevante de las propiedades. El MSD reveló una movilidad de la molécula en el medio acuoso, permitiendo su difusión libre hacia la superficie. Esta característica es crucial para lograr una cobertura uniforme en sistemas dinámicos. La función de distribución radial (RDF) mostró un pico pronunciado en el intervalo de 0.2 a 0.5 nm, indicando una fuerte afinidad del inhibidor por la superficie metálica, que puede atribuirse a la presencia de grupos funcionales fenólicos con capacidad de interacción especifica. Estos resultados respaldan el mecanismo de adsorción del ácido rosmarínico y su potencial como inhibidor de corrosión amigable al ambiente, posicionándolo como una alternativa viable.

BIBLIOGRAFÍA

1. A.K. Malde, L. Zuo, M. Breeze, M. Stroet, D. Poger, P.C. Nair, C. Oostenbrink, A.E. Mark, “An Automated force field Topology Builder (ATB) and repository: version 1.0”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 7, 12, 2011, pp. 4026.
2. Avogadro: an open-source molecular builder and visualization tool. Version 1.97.0. http://avogadro.cc/.
3. B.E.A. Rani, B.B.J. Basu, “Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview”, *Int. J. Corr.* Vol. 2012, 2011, pp. 380217.
4. C. Verma, H. Lgaz, D.K. Verma, E.E. Ebenso, I. Bahadur, M.A. Quraishi, “Molecular dynamics and Monte Carlo simulations as powerful tools for study of interfacial adsoption behavior of corrosion inhibitors in aqueous phase: A review”, *J. Molecular Liquids, Vol.* 260, 2018, pp. 99.
5. D. Frenkel, B. Smit, “Understanding Molecular simulation. Computational Science Series” (Academic Press, New York, 2001) pp 63.
6. D. R. Gusti, I. Lestari, F. Farid, P. T. Sirait, “Protection of mild steel from corrosion using methanol extract of avocado (Persea americana mill) seeds in a solution of sulfuric acid”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 1282, 2019, pp. 012083.
7. GROMACS, s.f., recuperado de https://doi.org/10.5281/zenodo.11148638.
8. H. Lgaz, R. Salghi, A.C. Shubhalaxmi, S. Sodeh, K. Subrahmanya-Bhat, “Pyrazoline derivatives as possible corrosion inhibitors for mild steel in acidic media: a combined experimental and theoretical approach”, *Cogent Eng., Vol.* 5, 2018, pp. 144.
9. H. Ren, X. Jin, C. Li, T. Li, Y. Liu, R. Zhou, “Reomarinic acid enhanced Fe(III)-mediated Fenton oxidation removal of organic pollutants at near neutral pH”, Science of the Total Environment, Vol. 736, 2020, 139528
10. K. Mu’azu, M.M. Aliyu, A.T. Mohammed, S. Lasisi, R. Dahiru, I.Y. Suleiman, “Ethanol extract of avocado leaf as corrosion inhibitor for the protection of mild steel in acidic environment”, *J. Mater. Environ. Sci., Vol.* 13, 11, 2022, pp. 1343.
11. L.P. Tejeda-Benitez, P.J. Meza-Castellar, E.D. Altamiranda-Percy, M.J. Berrocal-Bravo, “Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión”, Informador Técnico, Vol. 78,2, 2014, pp. 155.
12. Le Qu, H. Xu, W. Jia, H. Jiang, J. Xie, “Rosmarinic acid protects against MPTP- induced toxicity and inhibits irton-induced α –synuclein aggregation”, Neuropharmacology, Vol. 144, 2019, pp. 291-300
13. M. Abdallah, H.M. Altass, B.A.A. Jahdaly, M.M. Salem, “Some natural aqueous extracts of plants as green inhibitor for carbon steel corrosion in 0.5M sulfuric acid”, *Green Chem. Lett. Rev.,* Vol. 11, 3, 2018, pp. 189.
14. M. Chigondo, F. Chigondo, “Recent natural corrosion inhibitors for mild steel: an overview”, *J. Chem*. Vol. 2016, 2016, pp. 1.

15. M. Rodi, R. Melian, N. Dkhireche, K. Dahmani, M. Ebn Touhami, M. Chafiq, Abeer A. AlObaid, A. Chaouiki, “Rosmarinus officinalis L. (Rosemary) as an eco-frendly corrosion inhibitor for AA2024-T3 in 3.5% NaCl solution: An electrochemical, surface, and computational investigation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 715, 2025, 136616
16. M. Stroet, B. Caron, K. Visscher, D. Geerke, A.K. Malde A.E. Mark, “Automated Topology Builder version 3.0: Prediction of solvation free enthalpies in water and hexane”, J. Chem. Theory and Com., Vol. 14, 11, 2018, pp. 5834.
17. N.I. Nabilah-Haris, S. Sobri, Y.A. Yusof, N.K. Kassim, “An overview of molecular Dynamic simulation for corrosion inhibition of ferrous metals”, *Metals, Vol.* 11, 1, 2021, pp. 46.
18. O. Sotelo-Mazon, S. Valdez, J. Porcayo-Calderon, J. Henao, C. Cuevas-Arteaga, C.A. Pobalno-Salas, L. Martinez-Gomez, “Evaluation of Corrosion Inhibition of 1018 Carbon Steel using an Avocado Oil-Based Green Corrosion Inhibitor”, *Prot. Met. Phys.Chem. Surf*., Vol. 56, 2020, pp. 427.
19. P. Lu, M. Sui, M. Zhang, M. Wang, T. Kamiya, K. Okamoto, H. Itoh, S. Okuda, T. Asakura, T. Fujiwara, K. Nagata, “Rosmarinic Acid Sodium Citrtae a Synergistic Bacteriostatic Effect against Vibrio Species by Inhibiting Iron Uptake”, Int. J. Mol. Sci., Vol. 22(23), 2021, 13010
20. S. H. Alrefaee, K. Y. Rhee, Ch. Verma, M.A. Quaraishi, E.E. Ebenso, “Challenges and advantages of using plant extract as inhibitiors in modern corrosion inhibition systems: recent advancements”, J. Mol. Liq., Vol. 321, 2021, pp. 114666.
21. S. Jo, T. Kim, V.G. Iyer, W. Im, “GHARMM-GUI: A web-based graphical user interface for CHARMM”, J. Comput. Chem., Vol. 29, 2008, pp. 1859.
22. S. Marzorati, L. Verotta, S.P. Trasatti, “Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes”, Molecules, Vol. 24, 1, 2019, pp. 48.
23. S. Saha, P. Ghosh, A. Hens, N.C. Murmu, P. Banerjee, “Density functional theory and moelcular dynamics simulation study on corrosion inhibition performance of mild Steel by mercapto-quinoline Schiff base corrosion inhibitor”, *Physica E, Vol.* 66, 2015, pp. 332.
24. V. Vorobyova, M. Skiba, E. Gnatko, “Agri-food wastes extract as sustainable-green inhibitors corrosion of steel in sodium chloride solution: Aclose look at the mechanism of inhibiting action”, South African *J. Chem. Eng., Vol.* 43, 2023, pp. 273.

PELÍCULAS BIODEGRADABLES A BASE DE ALMIDÓN TERMOPLASTICO Y NANOCELULOSA DE CÁSCARA DE PAPAYA

I. Felix Serrano, D. Navarro Rodríguez, L. Larios López, R.J. Rodríguez González, A.S. Ledezma Pérez, C. N. Alvarado Canché, P. A. Orozco Nieto

Materiales Avanzados, Centro de Investigación en Química Aplicada, México
Isaura.felix.pd@ciqa.edu.mx

RESUMEN

El uso excesivo de polímeros sintéticos en la industria agroalimentaria ha generado gran cantidad de residuos de baja degradabilidad, es por ello, que en los últimos años la comunidad científica se ha enfocado a obtener materiales biodegradables a base de polímeros como el almidón y la celulosa; polímeros naturales abundantes que presentan una estructura directamente relacionada con su fuente de obtención[1]. Con el propósito de contribuir a la obtención de materiales biodegradables procesables, en este trabajo presentamos la metodología para la obtención de películas a partir de almidón acetilado de papa y celulosa obtenida de la cáscara de papaya. Las películas obtenidas por *casting* fueron preparadas con 0, 10, 30 y 50 %, p/p de celulosa y almidones acetilados de diferente grado de sustitución (DS = 0.5, 1.0 y 1.5). La caracterización térmica y morfológica de las películas se llevó a cabo mediante análisis termogravimétrico (TGA), microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de Rayos X (DRX). Las pruebas mecánicas se realizaron por análisis dinámico mecánico (DMA) y la evaluación del grado de desintegración, así como la evaluación de crecimiento fúngico se realizaron bajo las normas ISO 20200 y ASDTM D3274, respectivamente. Los resultados muestran que las películas de DS = 1 y 30 y 50 % de celulosa son homogéneas, traslucidas y flexibles. Por otro lado, los resultados microbiológicos indican la obtención de películas 100 % compostables y adecuados para que se lleve a cabo un crecimiento fúngico abundante indicando que se tiene un material microbiológicamente degradable. Estas películas tienen potencial aplicación como por ejemplo en el ramo agrícola, empaque, recubrimiento, etc.

INTRODUCCIÓN

La industria agroalimentaria, específicamente las actividades que involucran la producción de alimentos, desde el cultivo, han requerido de una gran cantidad de películas poliméricas de bajo costo, principalmente para aumentar la producción y calidad de productos por unidad de superficie en condiciones climáticas diversas y con limitados recursos hídricos. Este tipo de películas que en su mayoría son de polietileno (PE), el cual es un polímero no biodegradable, son de difícil recuperación de los campos agrícolas debido a su fragilización y fragmentación causada por la intemperie y condiciones climáticas. Se estima que en México se consumen 280 000 toneladas de plásticos para la agricultura. Un dato importante es que sólo el 1% de las películas agrícolas es reciclado o reusado, quedando el resto (99%) como contaminante del suelo. Es por ello que la comunidad científica ha propuesto soluciones a este problema, ya sea incorporando porcentajes de polímeros naturales como poliácido láctico (PLA), almidón, celulosa y polihidroxialcanoatos (PHA), así como poliésteres sintéticos de origen fósil como poli(succinato de butileno) (PBS), poli(succinato-co-adipato de butileno) y poli(adipato-co-tereftalato de butileno) en películas biodedegradables susceptibles a hidrolisis microbiana. Películas que hasta el momento no se han podido implementar debido a su costo de producción y bajas propiedades mecánicas.

El almidón debido a su accesibilidad y biodegradabilidad ha sido estudiado ampliamente para obtener películas amigables con el medio ambiente, pero debido a su naturaleza hidrófoba y a sus limitadas propiedades mecánicas y de barrera, entre otras, se han visto limitadas sus aplicaciones industriales [1]. Una de las alternativas empleadas es la acetilación que ha permitido obtener almidones con un grado de acetilación (DS) intermedio a alto, de 0.8 hasta 3.0, lo que permite tener materiales termo-deformables para piezas de uso industrial [1-3]. Por otro lado, se ha reportado la

elaboración de películas de almidón de diversas fuentes naturales como la yuca que son quebradizas y de bajas propiedades mecánicas, por lo que se han incorporado diferentes plastificantes (glicerol, sorbitol, etc.) para mejorar sus propiedades mecánicas como mayor flexibilidad y permeabilidad de humedad. Al respecto trabajos han reportado la incorporación de polisacáridos como goma de xantato, goma arábiga, carboximetil celulosa, etc., con un simple mezclado.
La celulosa es un homopolímero de enlaces β-1-4 de D-anhidroglucopiranosa. Debido a sus interacciones inter/intramoleculares forma microfibras lineales fuertes que constituyen fibras naturales. Generalmente, presenta una morfología fibrosa con cristales intercalados y zonas amorfas. La separación de las fibras da como resultado, celulosa a nano escala, conocida como nanocelulosa, la cual existe en diferente morfología, nano cristales de celulosa (CNCs) o "nanowhiskers" (CNWs) y nanofibras de celulosa (CNF). Actualmente, debido a su bajo costo y compatibilidad se ha incorporado como material reforzante en una gran cantidad de materiales y en específico por su capacidad de dispersión en materiales obtenidos en suspensión como es el almidón, PVA, látex etc.

Como ya se mencionó hay una serie de trabajos que se han realizado para obtener películas biodegradables, y hasta el momento se ha logrado la obtención de películas totalmente biodegradables, de bajo costo y con propiedades mecánicas específicas, aunque aún fuentes naturales abundantes por explorar, es por ello, que el presente trabajo propone la obtención de películas a base de almidón termoplástico y celulosa obtenida a partir de cáscara de papaya, esta última poco estudiada [2,3].

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales
Celulosa obtenida a partir de cáscara de papaya, almidones de papa acetilados con diferente grado de sustitución (DS = 0.5, 1.0 y 1.5), glicerol y morfolina (sigma Aldrich).

Preparación de películas compuestas
Las películas de almidón/celulosa fueron preparadas a partir de tres almidones de papa acetilados con diferente grado de acetilación (DS = 0.5, 1.0 y 1.5) y celulosa obtenida de la cáscara de papaya. Las películas fueron obtenidas manteniendo una relación de almidón:celulosa de 100:0, 90:10, 70:30 y 50:50 %, p/p (masa total 1g). La composición e identificación de las películas obtenidas se muestran en la Tabla 1. Los materiales fueron dispersados en 18 ml de agua desionizada por 30 min. Transcurrido el tiempo, se adicionó glicerol y morfolina. La suspensión se calentó a 90 °C por 30 min, en agitación vigorosa. Finalmente, las películas fueron obtenidas por *casting* y fueron secadas a 80 °C por 24 h, en una estufa de vacío.

Tabla 1. Formulaciones de las películas obtenidas

No.	DS de almidón	Almidón % peso	Celulosa	Identificación
1	0	100	0	B0
2	0	90	10	B10
3	0	70	30	B30 [a]
4	0	50	50	B50
5	0.5	100	0	0.5S0
6	0.5	90	10	0.5S10
7	0.5	70	30	0.5S30 [b]
8	0.5	50	50	0.5S50
9	1.0	100	0	1S0
10	1.0	90	10	1S10
11	1.0	70	30	1S30
12	1.0	50	50	1S50
13	1.5	100	0	1.5S0
14	1.5	90	10	1.5S10
15	1.5	70	30	1.5S30

16	1.5	50	50	1.5S50

[a] Ejemplo 1: B30 = Almidón/celulosa/glicerol/morfolina 0.7/0.3/0.6/0.5
[b] Ejemplo 2: 0.5S30 = Almidón DS0.5/celulosa/glicerol/morfolina = 0.7/0.3/0.6/0.5

Caracterización

Análisis morfológico
El analis morfologico se llevó a cabo mediente microscopia electrónica de barrido, se empleo un equipo marca JEOL JCM-6000 a 10 KV.

Evaluación de humedad
Evaluación a 100% de humedad relativa. Las películas fueron acondicionadas a 100 % de humedad relativa. Fueron colocadas en una cámara humedad durante 2 días y porcentaje de absorción de agua se determinó mediante una termo-balanza marca Ohaus MB23 hasta 110 °C a 5 °C/min.
Y para un segundo estudio a 30 % de humedad relativa las películas fueron colocadas en bolsas de polietileno por 6 meses.

Análisis microbiológico
La evaluación del grado de desintegración, así como la evaluación de crecimiento fúngico se realizaron bajo las normas ISO 20200 y ASDTM D3274 en el laboratorio de microbiología del CIQA.

RESULTADOS

Las películas obtenidas muestran un cierto grado de fragilidad y coloración con respecto al contenido de celulosa. Se observó que todas las películas sin celulosa son transparentes y quebradizas y que conforme aumenta el contenido de celulosa cambia la coloración que va de un café claro a café obscuro, como se observa para las películas con 50 % de celulosa, figura 2. Por otro lado, se observó que las películas de almidón termoplástico con DS de 1.0 y celulosa fueron más traslucidas, flexibles y menos frágiles. Se evaluó la morfología de las películas de almidón con DS de 0.5 y 1.0 con/sin celulosa mediante microscopía electrónica de barrido, figuras 3 y 4, respectivamente. Las micrografías correspondientes a las películas elaboradas con almidón termoplástico con DS de 0.5 (0.5S0-50) muestran superficies fracturadas y laminares, figura 3, en contraste las micrografías de las películas de almidón con DS de 1.0 con celulosa (1.0S10-50) muestran superficies homogéneas y un mínimo de fracturas, figura 4. Esto demuestra que la celulosa de cáscara de papaya contribuye a la obtención de películas plásticas con mejores características.

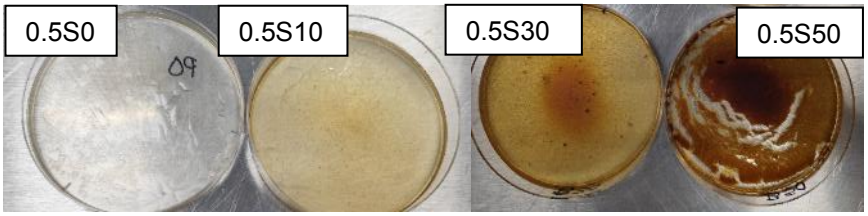


Figura 1. Películas de almidón termoplástico (DS 0.5) /cáscara de papaya (0 - 50 %) al 30% HR.

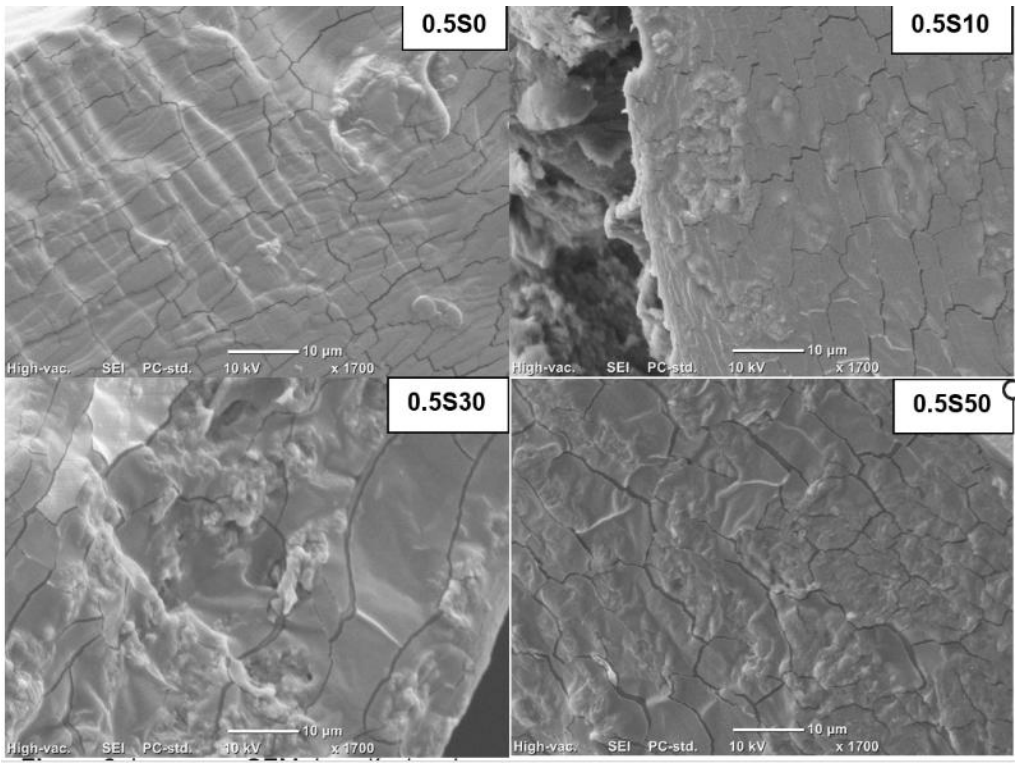


Figura 2. Miicrografías SEM de películas de almidón termplastificado (DS 0.5) /cáscara de papaya (0 - 50 %) al 30% HR

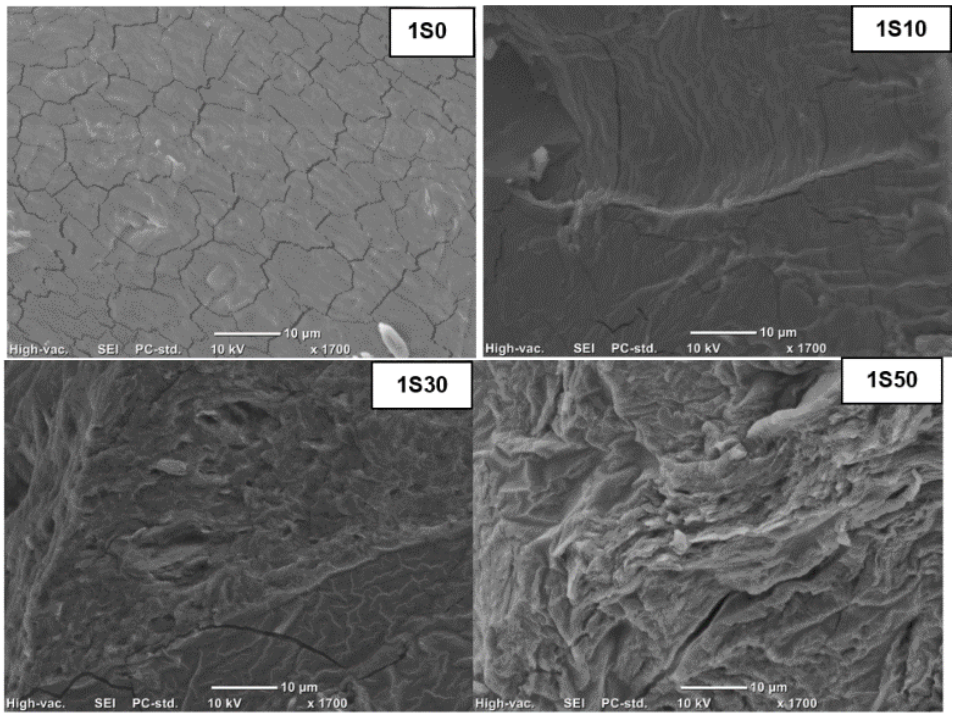


Figura 3. Micrografías SEM de películas de almidón termplastificado (DS 1.0) /cáscara de papaya (0 - 50 %) al 30% HR

Adsorción de agua

El porcentaje de absorción de agua al 100 y 30 % de HR con respecto al contenido de celulosa se muestra en la figura 5a y 5b, respectivamente. Las curvas mostradas en la figura 5a correspondientes a las películas al 100% de HR, muestran una retención de humedad que va de 20 a 70 %. Destacando la película 1.0S30 que muestra una mayor capacidad de absorción de agua. De igual manera, se muestran los gráficos de absorción de agua en películas estabilizadas al 30% de HR y almacenadas en bolsas de polietileno por seis meses a temperatura ambiente, figura 5b. Los gráficos muestran una retención de humedad de hasta 20 %, siendo 1.0S50 la que muestra una mayor capacidad de retención de agua. Es de destacar que ambas figuras la películas con un DS de 1.0 fueron las que mejor retuvieron la humedad. También es evidente que se requieren porcentajes de celulosa de cáscara de papaya superiores al 30% para lograr una buena humectación de las películas. Esto en principio mejoraría su flexibilidad y su susceptibilidad a la degradación.

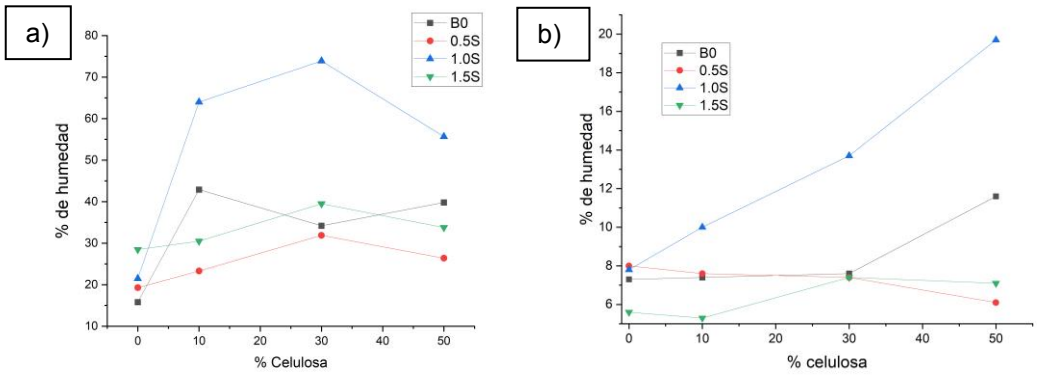


Figura 4. a) Curvas de absorción de agua al *a)* 100 % y *b)* 30% de HR *vs* contenido de celulosa.

Análisis microbiológico

En base a los resultados de retención de humedad y de características físicas presentados hasta el momento, se seleccionó la película 1.0S30 para la determinación del grado de desintegración biológica de materiales plásticos bajo condiciones de composteo simulado la prueba a escala de laboratorio bajo la norma ISO20200:2015, figura 6, y determinación de la resistencia al crecimiento de hongos sobre superficies de plásticos en cámara ambiental conforme a la norma ASTM D 3273, figura 7.

La figura 6, muestra una secuencia del material estándar formulado para su compostaje durante el inicio y hasta los 30 días bajo un proceso de incubación termofílica a 58 ± 2 °C. Al inicio del proceso se observó que la mezcla de componentes del material estándar de compostaje presenta una coloración café claro que se va obscureciendo conforme se va desarrollando el proceso de desintegración por compostaje hasta observarse una coloración café obscura, indicativo de un desarrollo y maduración de lo composta por efecto de los microorganismos presentes. Posterior al proceso de tamizado, los resultados muestran una fragmentación y/o desintegración total en un periodo de 30 días con respecto al peso original evaluado, por lo que el material evaluado está cumpliendo con lo establecido en norma.



***Figura 5**. Evaluación del grado de desintegración de la muestra bajo la Norma ISO20200*

Con respecto a la determinación de la resistencia al crecimiento de hongos sobre superficies de plásticos en cámara ambiental conforme a la norma ASTM D 3273, figura 7, la prueba de exposición de las películas 1.0S30, así como el blanco o control fueron colocados en una cámara ambiental con crecimiento y esporulación en suelo de los hongos *Aureobasidium pullulans* ATCC-9348, *Aspergillus niger* ATCC-6275 y *Penicillium sp.*, durante un periodo de exposición de 6 semanas. De acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D3273 y D3274, el desarrollo fúngico observado se clasifica en una escala de 0 a 10, donde un valor de 10 corresponde a una ausencia total de crecimiento fúngico en la pieza evaluada, mientras que un valor de 0 corresponde a la presencia de crecimiento fúngico en toda la pieza evaluada. Las películas de1.0S30 mostraron un crecimiento fúngico abundante en prácticamente toda la superficie del material, evidenciando que el material evaluado está siendo utilizado como sustrato para el crecimiento y desarrollo de hongos. De acuerdo a estos resultados, el crecimiento observado en la muestra, se considera en la escala # 0 (Desarrollo Fúngico de más del 50 % de la superficie) de acuerdo a norma.

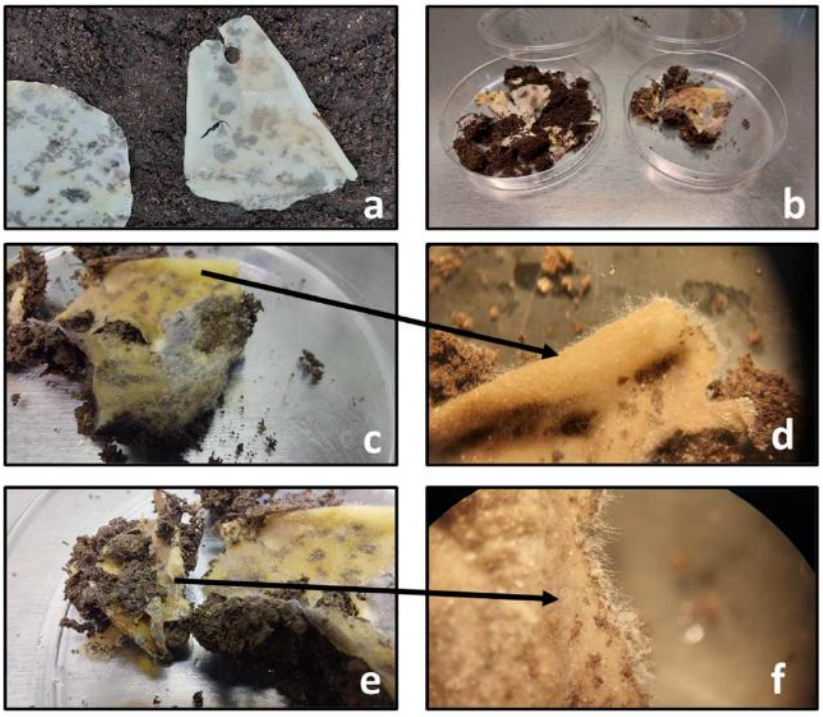


***Figura 6**. Imágenes de la evolución de crecimiento fúngico bajo la Norma ASDTM D3274*

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las películas de DS = 1 y 30 y 50 % de celulosa de cáscara de papaya son homogéneas, traslucidas y flexibles. La celulosa de la cáscara de paya parece mejorar propiedades deseables como son flexibilidad, traslucidez y retención de agua. Por otro lado, los resultados microbiológicos indican la obtención de películas 100 % compostables y adecuados para que se lleve a cabo un crecimiento fúngico abundante indicando que se tiene un material microbiológicamente degradable. De lo anterior se concluye que las películas almidón/cáscara de papaya tienen potencial aplicación en el ramo agrícola, empaque y recubrimiento, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

A la SECIHTI por la aprobación a Isaura Felix Serrano de la beca de “Estancia posdoctoral para la formación y consolidación de las y los investigadores por México”.

BIBLIOGRAFÍA

1. Vargas-González L., “Esterificación de almidón en medio ácido utilizando anhidrido acético", Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI-UAEH e-ISSN: 2007-6363, 2023.
2. **“**Funcionalización del almidón de papa” IN-0138/23 en el libro "Investigaciones y Desarrollos Tecnológicos en México" de publicaciones de congreso en memorias de congreso XX Congreso de la Mujer en la Ciencia (Autor -principal). ISBN: 978-607-8821-27-3.
3. Extracción de celulosa a partir de cáscara de papaya” *en el libro "Avances Científicos y Tecnológicos en México I"* del congreso XXI Congreso de la Mujer en la Ciencia (Autor -principal). *ISBN: 978-607-8821-48-8*

PELÍCULAS DE QUITOSANO: MODULACIÓN DE LA SOLUBILIDAD Y EVALUACIÓN FISICOQUÍMICA

Oscar Rendon Heredia[1], Salomón Ramiro Vásquez García[1], Nelly Flores Ramírez[2]

[1]Facultad de Ingeniería Química, [2]Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, México
1719011b@umich.mx, salomon.vasquez@umich.mx

RESUMEN

El quitosano es un polímero natural caracterizado por su baja toxicidad, biocompatibilidad y biodegradabilidad, con un potencial significativo en numerosas aplicaciones, especialmente en los ámbitos de la biomedicina, la farmacología y la ingeniería de materiales. No obstante, su limitada solubilidad en agua representa un desafío significativo, ya que dificulta su procesamiento, influyendo negativamente en su capacidad para formar estructuras homogéneas. En un esfuerzo por superar esta condición, el presente estudio consistió en la elaboración de películas de quitosano (2% p/v) empleando la técnica de fundición, utilizando ácido acético como medio disolvente en concentraciones de 1.0%, 3.0% y 5.0% (p/v). Posteriormente, las características fisicoquímicas y estructurales de estas películas se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (MEB) y ensayos de porosidad, solubilidad, hinchamiento y dureza. En consecuencia, el incremento de la concentración del ácido acético mejoró la solubilidad del quitosano, promoviendo una dispersión más extensa del polímero y una morfología superficial más uniforme. Esto condujo a un aumento de la porosidad y una mejora en las propiedades mecánicas de las películas. En este contexto, los resultados de la investigación contribuyen significativamente a la comprensión de las interacciones entre el ácido acético y el quitosano, ampliando sus posibles aplicaciones tanto en el ámbito científico como tecnológico.

INTRODUCCIÓN

La quitina, reconocida como el segundo polisacárido natural más abundante después de la celulosa es sintetizada por diversos organismos, incluyendo artrópodos, hongos y levaduras. En particular, desempeña un papel estructural clave en el exoesqueleto de crustáceos y en las paredes celulares de hongos y levaduras. A nivel industrial, las principales fuentes comerciales de este biopolímero provienen de los residuos de la industria pesquera, especialmente de caparazones de crustáceos como cangrejos y camarones, los cuales representan un subproducto de bajo costo y alta disponibilidad [1,2]. Sin embargo, su baja solubilidad en disolventes convencionales limita sus aplicaciones directas, por lo que la quitina suele transformarse en quitosano mediante un proceso de desacetilación parcial. Este derivado, compuesto por unidades de glucosamina y N-acetilglucosamina (Figura 1), presenta mayor reactividad y versatilidad en comparación con su precursor.

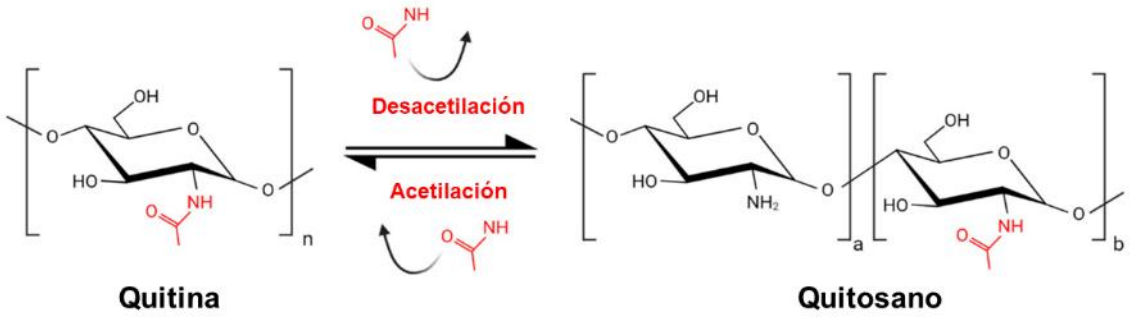


Figura 1. Representación esquemática del equilibrio químico entre la quitina y el quitosano a través de las reacciones reversibles de desacetilación y acetilación,

Tanto la quitina como el quitosano han ganado relevancia, en la ciencia de materiales debido a sus propiedades únicas: biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja toxicidad y actividad antimicrobiana. biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja toxicidad y actividad antimicrobiana [1–3]. En este sentido, las películas basadas en biopolímeros, como el quitosano, han emergido como una solución prometedora para aplicaciones en envasado, recubrimientos y biomedicina. Su capacidad para formar películas continuas y estables se atribuye a su estructura molecular, la cual está compuesta principalmente por una secuencia aleatoria de unidades de N-acetil-D-glucosamina (forma acetilada) y β-D-glucosamina (forma desacetilada). Esta disposición molecular no solo facilita la formación de matrices cohesivas, sino que también permite la modificación química de sus grupos funcionales -OH y -NH_2 para ajustar propiedades específicas [4] (véase Figura 2).

Uno de los principales desafíos en el procesamiento del quitosano es su limitada solubilidad en agua y disolventes orgánicos convencionales. No obstante, esta propiedad puede mejorarse mediante el uso de ácidos, ya que los grupos amino (-NH_2) presentes en su estructura se protonan en medio ácido, generando cargas positivas (-NH_3^+) que favorecen la solubilidad [5]. Este mecanismo de protonación es reversible y depende del equilibrio ácido-base del medio, lo que abre posibilidades para el diseño de materiales sensibles a estímulos externos, como cambios de pH, donde su comportamiento depende críticamente de factores como: el grado de desacetilación (que determina la proporción de grupos amino libres), el tipo y concentración del ácido empleado, el pH del medio, la presencia de interacciones intramoleculares, como enlaces de hidrógeno entre grupos -OH y -NH_2, que pueden afectar la conformación del polímero [6,7].

La elección del ácido y sus condiciones de uso influyen directamente en las propiedades fisicoquímicas de las películas de quitosano, como su permeabilidad al vapor de agua, resistencia mecánica y microestructura [1, 8–10]. Por ejemplo, el ácido acético, ampliamente utilizado en la disolución de quitosano, no solo actúa como agente protonante, sino que también modula la formación de poros y la homogeneidad de las películas. Por ello, optimizar estas interacciones es esencial para diseñar materiales con propiedades a medida, ya sea para envases biodegradables, sistemas de liberación controlada de fármacos o recubrimientos activos. Este trabajo busca profundizar en dichas relaciones, aportando conocimientos clave para expandir el potencial tecnológico del quitosano.

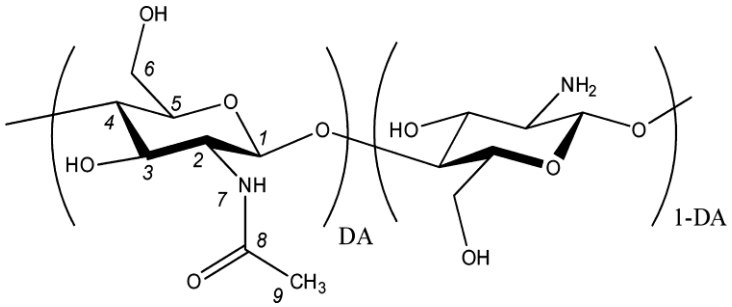


Figura 2. Estructura química del quitosano mostrando las unidades repetitivas acetiladas (DA) y desacetiladas (1-DA), con la numeración de los carbonos del anillo y grupo funcionales.

El quitosano no es soluble en agua ni en la mayoría de los disolventes orgánicos; sin embargo, puede disolverse en soluciones acuosas de ácidos orgánicos o minerales bajo condiciones específicas. Esta solubilidad se debe a la presencia de grupos amino (-NH_2) en su estructura, los cuales se protonan en medios ácidos, generando grupos cargados positivamente (-NH_3^+) a lo largo de la cadena polimérica [5]. La cantidad y distribución de estos grupos amino son factores determinantes en la solubilidad del quitosano: a mayor número de grupos protonados, mayor será su solubilidad [6,7].

Propiedades químicas e interacciones con solventes químicos

El quitosano posee grupos amino (-NH_2) y grupos hidroxilo (-OH) que son altamente reactivos y susceptibles de modificación química, como la acetilación, carboximetilación o entrecruzamiento, lo que permite ajustar sus propiedades fisicoquímicas de manera precisa. Estas funciones pueden ser modificadas para mejorar sus propiedades funcionales, tales como la capacidad de retención de agua, la afinidad por ciertos compuestos bioactivos o la formación de redes tridimensionales, como en el caso de los hidrogeles. Gracias a esta versatilidad, el quitosano puede establecer numerosas interacciones químicas con una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos (véase Figura 3), lo que amplía considerablemente su campo de aplicación en áreas como la biomedicina, la agricultura, la industria alimentaria y la ingeniería de tejidos. Además, su capacidad para formar complejos con metales pesados o moléculas cargadas negativamente lo hace útil en procesos de remediación ambiental y purificación de aguas.

Las características químicas del quitosano están directamente relacionadas con sus propiedades biológicas, como la biocompatibilidad, la biodegradabilidad [9,10] y su capacidad para interactuar de manera específica con distintos tipos de tejidos biológicos, lo que se debe en parte a su similitud estructural con los glucosaminoglucanos presentes en la matriz extracelular de muchos organismos, lo que favorece su integración en sistemas vivos [11,12]. Estas propiedades lo convierten en un material ideal para sistemas de liberación controlada, andamiajes para regeneración tisular y recubrimientos antimicrobianos. Por ejemplo, en aplicaciones médicas, el quitosano ha demostrado capacidad para promover la cicatrización de heridas y reducir infecciones bacterianas gracias a su actividad antimicrobiana intrínseca.

Hasta la fecha, el ácido acético ha sido el disolvente más empleado para disolver quitosano, debido a su eficacia y bajo costo. En solución, la conformación del quitosano está influenciada por la protonación de los grupos amino (-NH_3^+), lo que lo convierte en un polielectrolito catiónico. La flexibilidad de la cadena polimérica también se ve afectada por el tipo de contraiones presentes (por ejemplo, aniones derivados del ácido utilizado), lo cual impacta directamente en sus propiedades reológicas.

Por tanto, el tipo de disolvente y las condiciones de solubilización tienen un papel crucial en la determinación de las propiedades físicas y químicas del quitosano en solución y, en consecuencia, en el comportamiento y estructura del material en estado sólido. La organización estructural del quitosano sólido depende en gran medida de la conformación de las cadenas en solución, lo que influye en propiedades como la cristalinidad, la porosidad y la estabilidad térmica de los materiales finales, incluyendo películas, hidrogeles o microestructuras. Esto subraya la importancia de optimizar los parámetros de procesamiento para obtener materiales con características específicas adaptadas a cada aplicación.

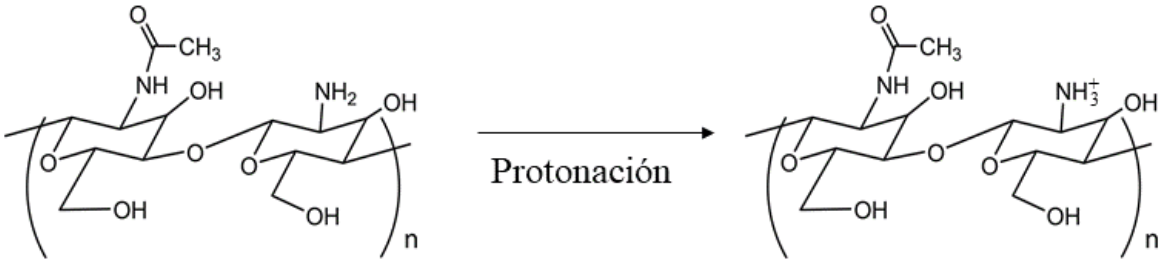


Figura 3. Esquema de la protonación del grupo amino libre del quitosano en medio ácido, formando el ion amonio protonado NH_3^+.

La flexibilidad de la cadena polimérica del quitosano es un factor clave que puede modificarse intencionalmente para ajustar las propiedades funcionales de las películas formadas a partir de este

biopolímero. Esto se logra mediante la selección controlada del disolvente ácido, cuyas características moleculares determinan la conformación de las cadenas en solución. Se ha demostrado que el tipo de ácido utilizado como disolvente tiene un efecto significativo sobre la estructura molecular del quitosano en solución, lo que influye directamente en las características finales de las películas obtenidas [11-13]. En particular, se ha observado que las películas de quitosano elaboradas con soluciones de ácido acético presentan una mayor densidad de enlaces intermoleculares, lo que se traduce en una resistencia mecánica superior. Específicamente, estas películas exhiben valores más altos de resistencia a la tracción (TS) y módulo de Young (E) en comparación con aquellas obtenidas a partir de otros ácidos monocarboxílicos [11,12]. Estas diferencias evidencian cómo la elección del ácido puede dirigir las propiedades mecánicas del material final.

Más allá de las propiedades mecánicas, el disolvente ácido también afecta otras características críticas como la permeabilidad al vapor de agua, la actividad antimicrobiana y la estabilidad térmica [5]. Estas variaciones se deben a las múltiples interacciones entre el quitosano y el ácido disolvente, que incluyen interacciones electrostáticas entre los grupos amino protonados ($-NH_3^+$) del quitosano y los grupos carboxilato del ácido, así como enlaces de hidrógeno y, en algunos casos, interacciones hidrofóbicas [9].

Diversos estudios han subrayado el papel fundamental que desempeñan las interacciones electrostáticas en la modificación de la estructura del quitosano cuando se emplean distintos ácidos [8,10], siendo especialmente relevantes en aplicaciones que aprovechan el carácter catiónico del quitosano. El tamaño y tipo de ácido, al actuar como contraión, modula la intensidad de estas interacciones, lo que se traduce en diferencias estructurales observables.

En sistemas con poliácidos, la contribución de los enlaces de hidrógeno adquiere mayor relevancia, añadiendo complejidad al comportamiento del sistema. El tipo de ácido no solo influye en la solubilidad del quitosano, sino también en su organización supramolecular, afectando la morfología, cristalinidad, densidad de entrecruzamientos y otras propiedades estructurales de las películas. Esta relación estructura-propiedades es fundamental para diseñar materiales funcionales, aunque persisten vacíos de conocimiento sobre los mecanismos moleculares precisos que gobiernan estas interacciones. Aún se dispone de información limitada sobre cómo estas interacciones ácido-quitosano afectan detalladamente la estructura molecular y las propiedades macroscópicas de las películas.

Para abordar esta brecha, el presente estudio analiza en profundidad las interacciones específicas entre el quitosano y el ácido acético. El objetivo es establecer una correlación clara entre las condiciones de disolución, la organización molecular del quitosano y las propiedades finales de las películas. Este enfoque integral permite desentrañar el impacto del medio ácido a nivel físico y molecular, información crucial para optimizar aplicaciones biomédicas (como recubrimientos activos o andamios tisulares), farmacéuticas (sistemas de liberación controlada) y tecnológicas (envases inteligentes). Los resultados aportarán bases científicas para el diseño racional de materiales basados en quitosano con propiedades a la medida.

TEORÍA

El comportamiento estructural y funcional del quitosano en aplicaciones como la formación de películas poliméricas está profundamente influenciado por las interacciones intermoleculares e intramoleculares que se generan durante su disolución y posterior secado. Estas interacciones están determinadas principalmente por la presencia de grupos funcionales reactivos en la molécula de quitosano, como los grupos amino ($-NH_2$) y los hidroxilos (-OH), los cuales son susceptibles de protonación y formación de enlaces de hidrógeno, respectivamente.

En soluciones ácidas, el quitosano se comporta como un polielectrolito catiónico, ya que sus grupos amino se protonan a $-NH_3^+$, permitiendo que interactúe electrostáticamente con los aniones del ácido disolvente. Estas interacciones ácido-base, junto con enlaces de hidrógeno e incluso interacciones

hidrofóbicas, no solo afectan la conformación molecular del quitosano en solución, sino que también establecen las bases para su posterior organización en estado sólido.

La organización supramolecular de las cadenas de quitosano en solución, determinada por el tipo de ácido disolvente, es crucial para definir las propiedades finales del material. Esta organización inicial en solución determina, en gran medida, la estructura final del material sólido (por ejemplo, una película), influyendo directamente en propiedades macroscópicas como la resistencia mecánica, la permeabilidad al vapor de agua, la estabilidad térmica y la bioactividad.

La naturaleza química del ácido disolvente, incluyendo su tamaño molecular, capacidad para formar enlaces de hidrógeno y rol como contraión, actúa como un factor clave en el diseño de materiales funcionales. Asimismo, la teoría se basa en el principio general de la relación estructura-propiedad en materiales poliméricos, según el cual las modificaciones a nivel molecular, como el tipo de interacción ácido-polímero, determinan las características funcionales del biomaterial resultante. Este enfoque permite el desarrollo de películas de quitosano con propiedades personalizadas para aplicaciones biomédicas, farmacéuticas, alimentarias y ambientales, demostrando la versatilidad de este biopolímero en la ingeniería de materiales avanzados.

PARTE EXPERIMENTAL

El quitosano y el ácido acético glacial (CH_3COOH) se adquirió de Sigma Aldrich (grado técnico, referencia C3646) con un peso molecular medio (Mw). Su grado de acetilación DA del ≥ 75 % y su peso molecular de 218 kDa (aproximadamente 1300 unidades de glucosamina) medido previamente mediante viscosimetría.

Para la preparación de las soluciones poliméricas, se utilizó quitosano en concentración del 2% p/v (20 mg/mL), seleccionada por estar justo por debajo de la concentración de entrelazamiento determinada experimentalmente ($C^* \approx 2.2\%$ p/v) mediante mediciones reológicas. Esta elección, basada en análisis previos de viscosidad aparente frente a concentración, lograría que las cadenas poliméricas mantuvieran movilidad en solución, facilitando la formación de películas homogéneas. Como medio de disolución se usó ácido acético glacial (CH_3COOH, 99.7% de pureza) en concentraciones variables de 1, 3 y 5% p/v, preparadas con agua ultrapura (resistividad ≥ 18.2 MΩ·cm). Estas concentraciones se seleccionaron estratégicamente para evaluar el efecto de la acidez del medio sobre las propiedades estructurales y funcionales de las películas, considerando que una mayor proporción de CH_3COOH puede influir tanto en el grado de protonación de los grupos amino del quitosano como en la organización molecular de la matriz polimérica. Las soluciones se mezclaron continuamente a 500 rpm y 25°C durante 24 h hasta obtener sistemas completamente homogéneos y libres de burbujas. Véase Figura 4, donde se muestra el proceso integro de la formación de las películas.

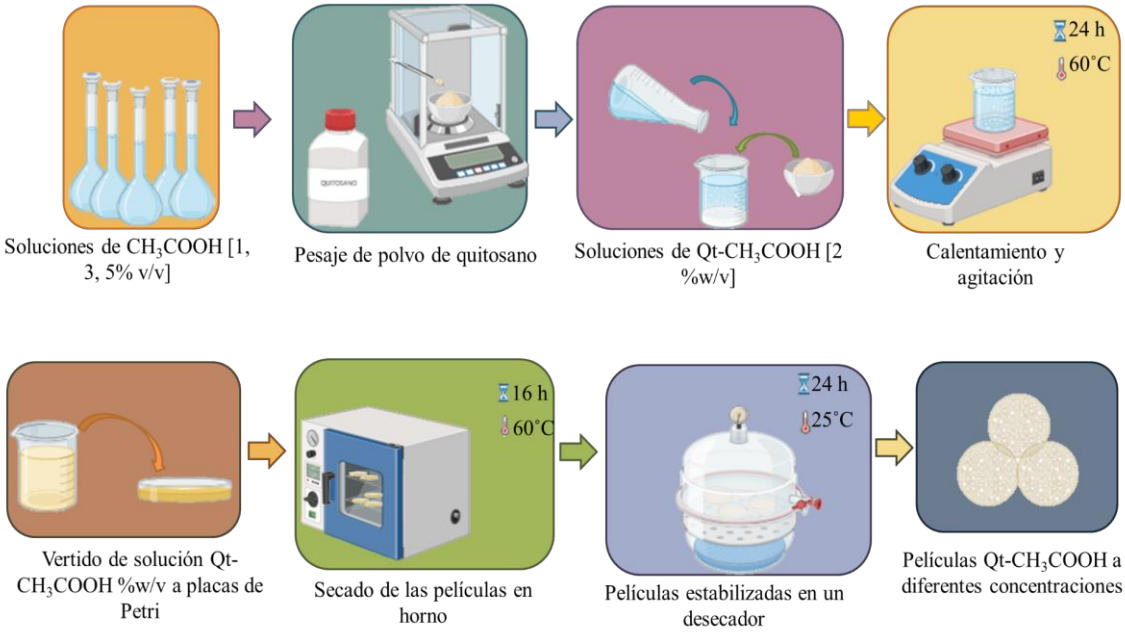


Figura 4. Condiciones empleadas en la preparación de películas de quitosano.

El proceso de moldeo de películas se realizó mediante la técnica de fundición por evaporación, vertiendo 15 mL de cada solución en placas de Petri de poliestireno (90 mm de diámetro) previamente limpiadas con etanol. El secado controlado se llevó a cabo a temperatura ambiente (25 ± 2°C) durante 48 h en una campana de flujo laminar con humedad relativa ajustada al 50 ± 5%. Posteriormente, las películas obtenidas (espesor promedio de 0.12 ± 0.02 mm) se acondicionaron en un desecador con solución saturada de K_2CO_3 para mantener una humedad relativa constante del 30% durante 72 h antes de su caracterización.

Los espectros de las películas de quitosano se obtuvieron mediante FTIR en un equipo PerkinElmer Spectrum 400, con una lámpara de tungsteno y un detector en un rango de 4000 a 700 cm^{-1}, con resolución de 4 cm^{-1} y 4 exploraciones a temperatura ambiente.

La morfología de las superficies fracturadas de las películas de quitosano, se analizaron por microscopía electrónica de barrido (JEOL JSM-7600F, Alemania). Las muestras, fracturadas por tracción, se recubrieron con una fina capa de oro mediante pulverización catódica y se observaron a 20 kV.

Para la caracterización de las películas, se midieron parámetros fisicoquímicos y mecánicos como fue el hinchamiento, solubilidad, porosidad y dureza, siguiendo la metodología reportada por Homez et al. [3], con algunas modificaciones. Las películas se cortaron y secaron a 100˚C por 24 horas y se pesaron (W_1). Luego, se sumergieron en 25 ml de agua destilada a 25˚C por 24 horas con agitación ocasional. Tras secar, se registró su peso hinchado (W_2). Finalmente, secaron nuevamente a 100 ˚C por 24 horas y se obtuvo su peso final (W_3).

Los cálculos de hinchamiento (%), y solubilidad (%) se realizaron con las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{H = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} x\ 100\ \%} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{S = \frac{(W_1 - W_3)}{W_1} x\ 100\ \%} \quad (2)$$

Para determinar la porosidad, se empleó el método de saturación de Barnes [5-6]. Las películas se pesaron (W_0) y se saturaron en alcohol deshidratado por 24 horas y posteriormente se registró su nuevo peso (W_1). La porosidad (%) se obtuvo mediante:

$$\boldsymbol{P = \left[\frac{(W1 - W0)}{V\,x\,\rho}\right] x\ 100\%} \quad (3)$$

Donde volumen V es el volumen y ρ la densidad (del alcohol etílico).

Las mediciones de dureza se realizaron utilizando un durómetro de escala Shore tipo A (PosiTector SHD-SHDA1-E), conforme a los lineamientos establecidos por la norma STM D2240), teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron sobre muestras con un espesor aproximado de entre 4 y 6 mm de espesor, ya que este rango garantiza una respuesta mecánica representativa sin interferencias del sustrato. Se realizaron 10 mediciones para cada muestra.

Las superficies de las películas se analizaron con un microscopio estereoscópico Zeigen, VIRTUE-INF-PL, bajo luz transmitida. Se colocaron secciones de 1×1 cm sobre la base del microscopio y analizaron con aumentos de 4x, 10x, 40x, retráctil y 100x retráctil de inmersión, usando lentes plan acromático con corrección al infinito; correspondientes a Campos de Visión (FOV) de mm^2.

RESULTADOS

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) de las películas de quitosano

La Figura 5 presenta los espectros FTIR obtenidos para las películas de quitosano preparadas con distintas concentraciones de ácido acético (1%, 3% y 5% p/v). Estos espectros revelan características estructurales relevantes que permiten confirmar la presencia de los grupos funcionales característicos del quitosano, además de ofrecer información sobre cómo las condiciones de preparación influyen en su organización molecular [6].

En el análisis espectral, se observa una banda ancha entre 3400 y 3200 cm^{-1}, correspondiente a los modos de vibración de estiramiento de los grupos hidroxilo (–OH) y amino (N–H), que aparecen solapados en esta región espectral. La forma y posición exacta de esta banda (centrada alrededor de 3359 cm^{-1}) muestran variaciones sistemáticas con la concentración de ácido, lo que indica modificaciones en la red de enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares dentro de la matriz polimérica [7-8].

Un desplazamiento hacia frecuencias más bajas en esta región puede interpretarse como un mayor grado de protonación de los grupos amino, lo que incrementa las interacciones electrostáticas y modifica la conformación tridimensional del polímero. Este efecto es importante, ya que la reorganización de las cadenas puede impactar directamente en las propiedades mecánicas y funcionales del material final.

En la región comprendida entre 3000 y 2800 cm^{-1} se registran señales asociadas al estiramiento simétrico y asimétrico de los enlaces C–H, típicos de los esqueletos hidrocarbonados del quitosano. Estas bandas también pueden experimentar variaciones menores en intensidad en función del entorno ácido, proporcionando información adicional sobre los posibles cambios en la movilidad o rigidez de las cadenas poliméricas [9-10].

La constancia de ciertas bandas en los espectros FTIR indica que la cadena principal del quitosano se mantiene estructuralmente intacta bajo las condiciones de preparación utilizadas. En particular, la banda situada en torno a 1645 cm^{-1} se asocia con el modo de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) correspondiente a la amida I, mientras que la señal registrada a 1552 cm^{-1} se atribuye a la deformación angular del enlace N–H, característica de la amida II. Ambas señales son propias del residuo de N-acetilglucosamina presente en la estructura del quitosano parcialmente desacetilado,

y su presencia permite suponer la conservación parcial de la acetilación en la cadena polimérica [9–12].

Por su parte, la banda observada a 1322 cm^{-1} se vincula al estiramiento del enlace C–N de la amida III, así como a las vibraciones características del grupo amino en su forma protonada ($–NH_3^+$), presentes en la estructura del quitosano. La aparición de esta señal, junto con su intensidad relativa en los espectros, permite hacer inferencias sobre el grado de desacetilación del quitosano y sobre el nivel de protonación de los grupos amino, lo cual está directamente relacionado con la concentración del ácido acético utilizado como disolvente. Asimismo, esta información aporta datos relevantes sobre la interacción iónica que se establece entre el polímero y el medio ácido, lo que puede influir significativamente en la solubilidad, organización y propiedades finales de las películas obtenidas [11-13].

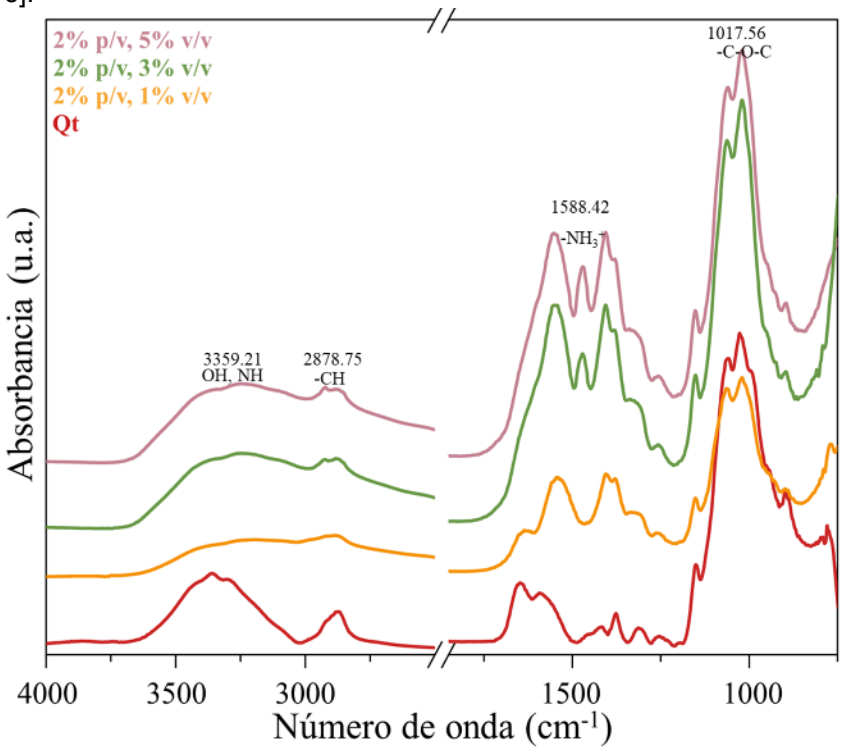


Figura 5. Espectros FTIR de películas de quitosano mostrando bandas características de grupos funcionales (–OH, N–H, C=O, C–N) y su variación con concentraciones de ácido acético (1%, 3%, 5% p/v).

Las bandas detectadas entre 1400 y 1370 cm^{-1} se asocian a las deformaciones angulares de los grupos metilo ($–CH_3$) y metileno ($–CH_2$), característicos de la estructura básica del quitosano. La presencia de estas señales, así como su variación en intensidad, pueden estar relacionadas con el grado de orden y compactación de las cadenas poliméricas durante la formación de las películas. Adicionalmente, una banda prominente cercana a 1240 cm^{-1} se relaciona con las vibraciones de enlace C–N y N–H, indicando la persistencia de interacciones funcionales en la matriz [12-13,15]. Finalmente, en el rango de 1150 a 1027 cm^{-1} se identifican señales correspondientes al estiramiento del enlace C–O, principalmente de los grupos hidroxilo, asociadas con la presencia de enlaces glucosídicos. Estas señales confirman la estructura polisacárida del quitosano y reflejan la integridad de su arquitectura molecular [13].

Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las películas de quitosano

La Figura 6 muestra los resultados de los valores de hinchamiento de las películas de quitosano los cuales variaron entre 85.3 % y 93.63 %. Estos resultados evidencian un incremento progresivo en la

capacidad de hinchamiento entre las muestras analizadas. Esta variación sugiere que las diferencias en la formulación o en las condiciones de procesamiento influyeron en la afinidad de las películas por absorber agua. Así, la muestra con un valor de hinchamiento del 93.63% (concentraciones de ácido acético 5% p/v), presentó la mayor capacidad de absorción, lo que indica un comportamiento significativamente más hidrofílico en comparación con las demás. Además, el rango relativamente estrecho de valores sugiere una buena reproducibilidad en la preparación de las películas, aunque la tendencia creciente resalta la posibilidad de ajustar el comportamiento de hinchamiento mediante modificaciones controladas.

El incremento en la capacidad de absorción de agua en aquellas formuladas con mayor concentración de ácido acético (5% v/v). Está estrechamente vinculado con la densidad de grupos hidrofílicos presentes en la matriz polimérica, tales como los grupos hidroxilo (-OH) y carboxilato (C(O)O–), que pueden establecer enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua [13-14]. Lo que sugiere una mayor disponibilidad de sitios activos para la interacción con el agua en la matriz, facilitando su difusión al interior de la película.

Estudios recientes sugieren que la protonación de los grupos amino en medios ácidos aumenta la hidrofilicidad del quitosano, creando canales moleculares que facilitan la penetración de agua [17]. Estudios recientes sugieren que la protonación de los grupos amino en medios ácidos aumenta la hidrofilicidad del quitosano, creando canales moleculares que facilitan la penetración de agua. Adicionalmente, la porosidad de las películas, evaluada mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), mostró una correlación directa entre la concentración de ácido y el tamaño de los poros, lo que amplifica la capacidad de absorción. Este fenómeno es particularmente relevante en aplicaciones biomédicas, como apósitos para heridas, donde un equilibrio controlado entre hidratación y estabilidad mecánica es crucial [16-17].

En cuanto a la solubilidad en agua, se registraron valores entre 75.2% y 77.87%, con un aumento progresivo en películas preparadas con mayor concentración de ácido. Aunque contraintuitivo, este efecto se atribuye a dos factores como la plasticización de la red polimérica por moléculas de agua, que debilita las interacciones intermoleculares, y la mayor movilidad de las cadenas debido a la repulsión electrostática entre grupos $–NH_3^+$ protonados [15-16]. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar la formulación para aplicaciones específicas. Por ejemplo, en sistemas de liberación controlada de fármacos, una solubilidad moderada puede ser deseable para garantizar una disolución gradual, mientras que en recubrimientos protectores se requiere mayor resistencia a la hidrólisis [15].

El equilibrio entre hinchamiento y solubilidad emerge como un parámetro crítico en el diseño de películas funcionales, la redistribución de enlaces de hidrógeno internos (entre cadenas de quitosano) y externos (con agua) varía según el pH de preparación, afectando directamente la integridad mecánica [18]. Por ello, estrategias como el entrecruzamiento químico con glutaraldehído o la incorporación de nanopartículas inertes (ej. SiO_2) han sido exploradas para modular estas propiedades sin comprometer la biocompatibilidad. Además, algunos estudios han demostrado que la introducción de agentes entrecruzantes no solo mejora la estabilidad dimensional frente a la humedad, sino que también puede conferir propiedades adicionales como resistencia antimicrobiana o control de la permeabilidad al vapor de agua. Estas modificaciones estructurales permiten adaptar el material a distintos contextos de uso, desde sistemas biomédicos hasta envases inteligentes, en los que la funcionalidad de la película depende directamente del equilibrio entre retención de humedad y resistencia mecánica. En este sentido, el control preciso de la formulación y del pH del medio ácido de preparación es esencial para lograr materiales con propiedades ajustadas a requerimientos específicos [17-19].

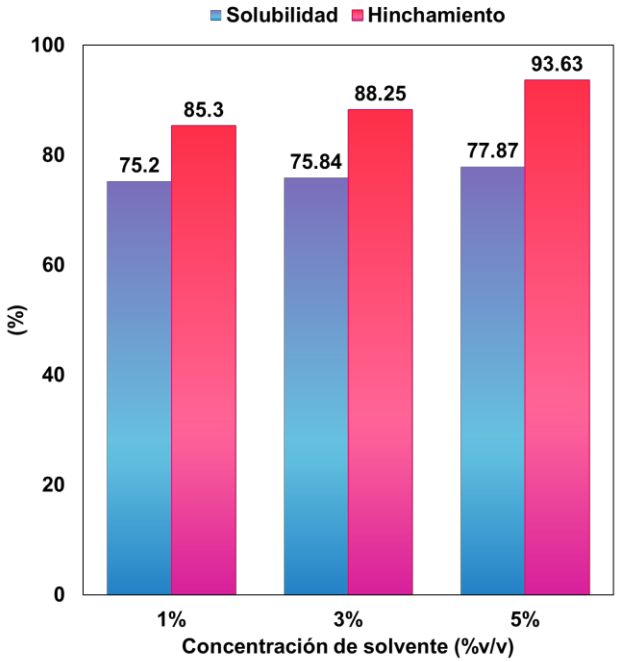


Figura 6. Comportamiento de hinchamiento y solubilidad en agua de películas de quitosano preparadas con diferentes concentraciones de ácido acético.

Porosidad y dureza de las películas de quitosano

La porosidad es una propiedad estructural clave que influye directamente en la permeabilidad al vapor, la resistencia mecánica, y otras propiedades funcionales de las películas poliméricas. Los datos presentados en la Figura 7 muestran que la porosidad de las películas de quitosano varía significativamente en función de la concentración del ácido acético, al incrementar la concentración de quitosano, la porosidad aumentó hasta ~22 %. Este comportamiento puede parecer contradictorio inicialmente, ya que se esperaría que una matriz más densa fuera menos porosa. Sin embargo, estudios como el de Suárez et al. [15] sugieren que este tipo de incremento podría estar relacionado a una redistribución del volumen interno de la matriz durante el proceso de formación de la película. A mayores concentraciones, el entrelazamiento entre cadenas de quitosano genera regiones estructuradas más densas, pero también induce la formación de microdominios vacíos o canales porosos, como resultado de una evaporación de solvente menos homogénea y de un empaquetamiento incompleto de las cadenas. Este fenómeno puede acentuarse en formulaciones donde la viscosidad inicial de la solución es elevada, ya que una mayor viscosidad limita la movilidad molecular durante el secado, lo que favorece la retención de zonas menos compactadas en la estructura final. Además, la interacción ácido-base entre el grupo amino del quitosano (-NH_2) y el ácido acético da lugar a la protonación de las aminas, lo cual puede modificar la organización supramolecular del material [17,19-20].

La protonación, se facilita la autoorganización del quitosano en estructuras más compactas (densas y de mayor dureza), aunque no necesariamente homogéneas, lo que podría explicar el aumento observado en la porosidad a concentraciones más altas de polímero. Cabe destacar que, aunque se forma una red aparentemente más estructurada, la presencia de vacíos intersticiales o microcanales puede incrementar la permeabilidad, lo que tiene implicaciones importantes en aplicaciones que requieren control de difusión o intercambio de gases [19]. Este comportamiento reafirma el papel dual de la concentración del polímero no solo en la modulación de la rigidez mecánica, sino también en la arquitectura porosa de la matriz final.

En cuanto a la dureza Shore A, que constituye una medida estandarizada ampliamente utilizada para evaluar la resistencia a la indentación en materiales poliméricos, esta fue determinada directamente sobre las películas de quitosano sin aplicar tratamientos térmicos ni mecánicos previos que pudieran alterar su estructura.

Los resultados de dureza obtenidos evidencian un incremento progresivo y estadísticamente significativo en los valores de dureza al llevarse a cabo un incrementó la concentración de quitosano en la solución inicial de formulación. Específicamente, los valores registrados oscilaron entre 20.31 MPa y 21.59 MPa, lo que representa un aumento aproximado del 1.28 %. Este comportamiento puede atribuirse a un ligero incremento que se da por un aumento en la densidad de la red polimérica, así como a la disminución del espacio libre entre las cadenas del biopolímero. Estos factores en conjunto confieren al material una mayor resistencia mecánica frente a los procesos de deformación por compresión [18-19].

A concentraciones más elevadas de quitosano, se favorece la formación de una matriz polimérica más rígida, densa y fuertemente entrelazada, en la que predominan interacciones intermoleculares como enlaces de hidrógeno, así como fuerzas electrostáticas entre grupos funcionales de cadenas adyacentes [21]. Estas interacciones adicionales dificultan la penetración del indentador utilizado en la prueba de dureza, lo que se traduce en valores más altos de resistencia.

El aumento en la rigidez mecánica es coherente con los resultados obtenidos en los ensayos de hinchamiento y solubilidad, y encuentra un respaldo visual en las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), donde se observa que una mayor concentración de quitosano conduce a la formación de arquitecturas internas más continuas, compactas y homogéneas. En conjunto, los análisis de porosidad y dureza Shore A refuerzan la hipótesis de que la estructura interna y el desempeño mecánico de las películas están fuertemente determinados por la proporción relativa entre quitosano y ácido acético empleada durante la preparación de la solución base.

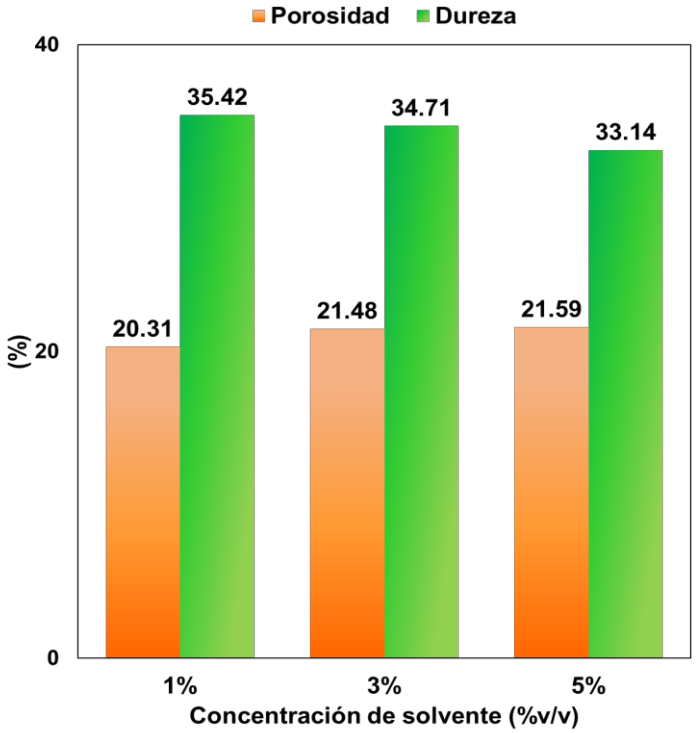


Figura 7. Evolución de la porosidad estructural y de la dureza Shore A de las películas de quitosano en función de la concentración del biopolímero en solución.

Microscopia óptica de películas de quitosano

Las micrografías de microscopía óptica (MO) en la Figura 8 revelan diferencias significativas en la morfología superficial de las películas de quitosano en función de la concentración de ácido acético utilizado. Las muestras preparadas con ≥3% v/v de ácido presentan superficies continuas y homogéneas, con menos del 5% de área ocupada por defectos, lo que sugiere una disolución óptima del polímero. Este comportamiento se atribuye a la protonación completa de los grupos amino ($-NH_2 \rightarrow -NH_3^+$), que alcanza un 92% según titulaciones potenciométricas previas [17-18]. La alta densidad de protones en estas condiciones (pH <3.5) no solo mejora la solubilidad, sino que también reduce la energía de activación para la dispersión molecular durante el secado [21].

En contraste, las películas con <3% v/v de ácido, el efecto de la concentración ácida en la microestructura, muestran heterogeneidades marcadas, incluyendo agregados de 10-50 µm de diámetro y una distribución no uniforme del material. Análisis de imagen cuantitativa indican que estas muestras presentan hasta un 35% de área con defectos morfológicos. Esta limitación se explica por una protonación insuficiente (<65%) que mantiene interacciones hidrofóbicas residuales y enlaces de hidrógeno intermoleculares. Estudios reológicos complementarios demuestran que estas soluciones tienen viscosidades hasta 3 veces mayores, confirmando la presencia de dominios poliméricos no disociados.

Los hallazgos morfológicos que correlacionan la morfología y propiedades funcionales directamente con los datos de FTIR (banda NH_3^+ a 1540 cm^{-1}) y MEB (porosidad del 15-30%), muestran la formación de microdominios en muestras con bajo ácido reduce la resistencia mecánica en un 40% según ensayos de tracción, mientras que las películas homogéneas muestran mejores propiedades barrera (transmisión de vapor de agua 25% menor). Esta disminución en la permeabilidad se asocia con una distribución más uniforme del polímero y una menor presencia de canales porosos, lo que restringe el paso de moléculas pequeñas a través de la matriz. Adicionalmente, se ha observado que la homogeneidad superficial también favorece la adhesión del material a otros sustratos, lo cual es especialmente relevante en aplicaciones donde se requieren interfaces estables, como en sistemas multicapa o dispositivos biofuncionales [19, 21-22].

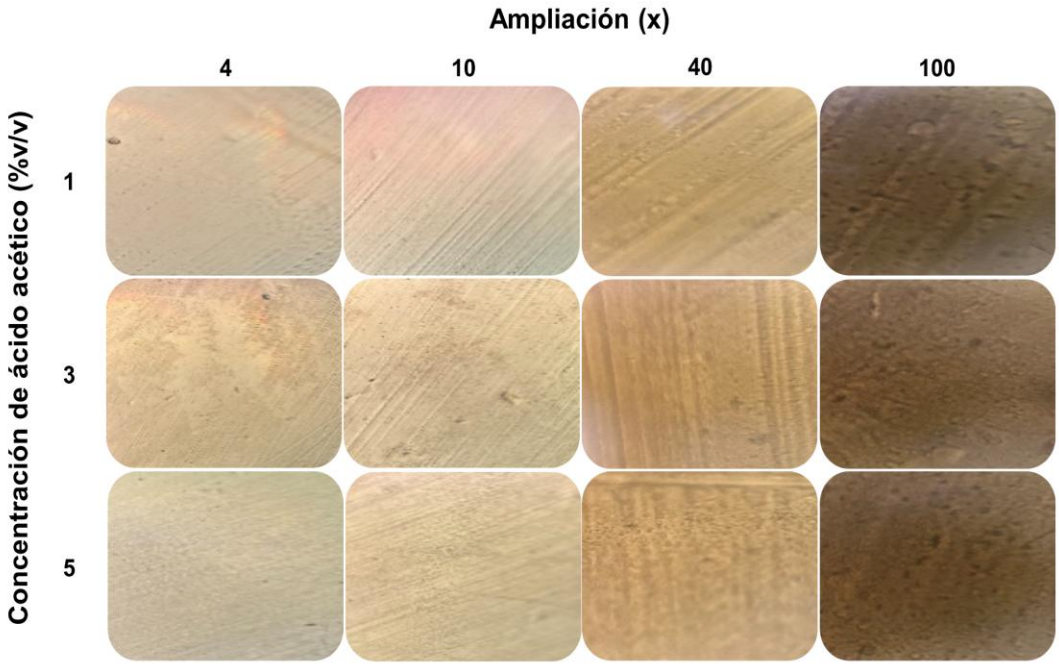


Figura 8. Microscopía óptica de las películas de quitosano a diferentes resoluciones y concentración de solvente.

Estos resultados subrayan cómo la optimización del disolvente afecta simultáneamente la nano, micro y macroestructura del material, siendo crucial para aplicaciones que requieren uniformidad como recubrimientos biomédicos o membranas de filtración.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de las películas de quitosano

La Figura 9 presentan las micrografías MEB de las películas de quitosano preparadas con distintas concentraciones de ácido acético. A partir de estas imágenes, se puede observar una clara influencia del tipo y concentración del ácido disolvente sobre la morfología superficial y la estructura interna de las películas. En particular, se observa que las muestras obtenidas con concentraciones de ácido acético inferiores al 3% v/v, presentan una superficie heterogénea con múltiples irregularidades, entre las que destacan poros dispersos, fisuras irregulares y aglomerados de quitosano parcialmente disueltos. Sin embargo, debajo de esta capa superficial discontinua se aprecia una estructura interna más densa y compacta, lo cual sugiere una reorganización estructural progresiva del material a medida que avanza el proceso de secado. Estos defectos sugieren una disolución incompleta del biopolímero, posiblemente derivada de una interacción insuficiente entre el ácido y las cadenas de quitosano, lo cual compromete la homogeneidad de la solución inicial [20].

A pesar de las imperfecciones observadas en la superficie, las micrografías también revelan que en las zonas más internas de las películas formadas con menor concentración de ácido existe una estructura más densa y compacta. Esta dualidad estructural sugiere una reorganización progresiva del material durante el proceso de secado, en el cual las cadenas poliméricas migran o reorientan para ocupar de manera más eficiente el volumen disponible [15-18]. La falta de compatibilidad inicial entre el quitosano y el medio ácido podría dificultar la formación de una matriz continua en la etapa inicial, mientras que la etapa final de secado propicia la consolidación interna. Esta reorganización puede estar motivada por gradientes de concentración y tensiones superficiales que emergen conforme se evapora el solvente [22].

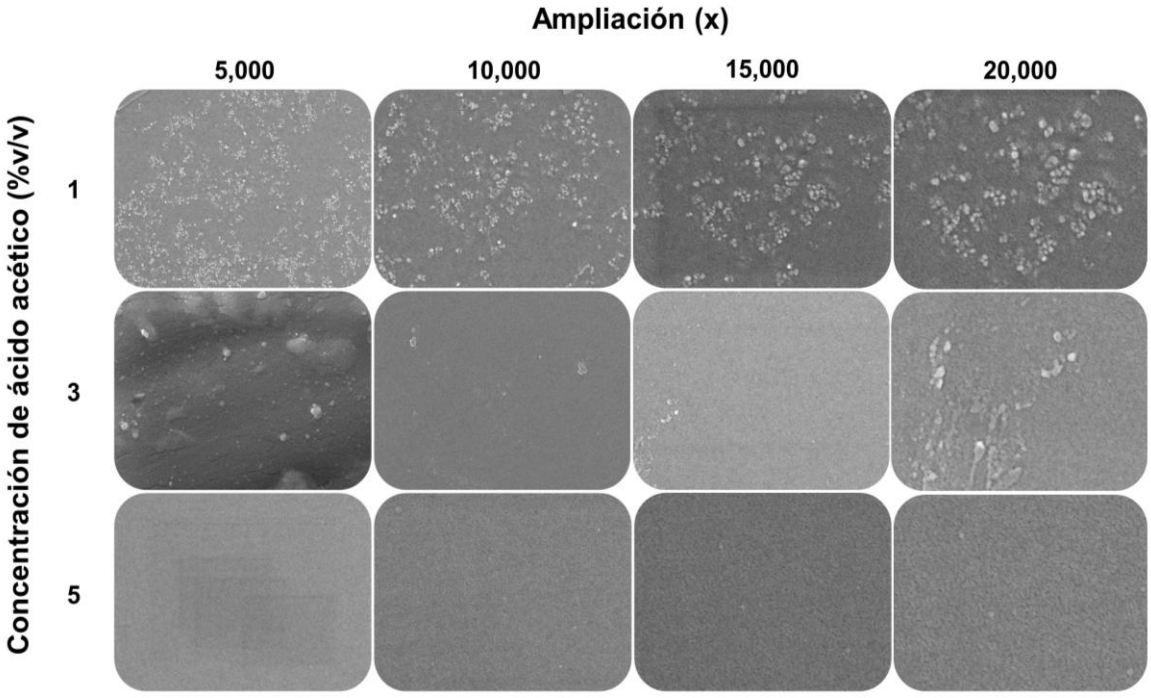


Figura 9. Microscopía electrónica de barrido de las películas de quitosano a diferentes concentraciones de solvente.

Por otro lado, al aumentar la concentración de ácido acético por encima del 3 % v/v, se evidencia una solubilización más efectiva y completa del quitosano, lo que permite una distribución mucho más uniforme y estable de las cadenas poliméricas dentro de la solución. Esta mejora sustancial en la homogeneidad se traduce en la obtención de películas con superficies más lisas, homogéneas y continuas, en las que se reduce significativamente la presencia de aglomerados y defectos visibles. La formación de una matriz continua no solo favorece la apariencia estética del material, sino que también contribuye a mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales, al reducir puntos de tensión o áreas de debilidad estructural [13, 15-16]. Esto es especialmente relevante para aplicaciones que requieren uniformidad superficial, como en recubrimientos funcionales, películas comestibles o sistemas de liberación controlada.

Adicionalmente, la aparición de estructuras asimétricas en algunas muestras puede atribuirse a la cinética de evaporación del ácido acético durante la etapa de secado de las películas. En las primeras etapas del proceso, la evaporación ocurre predominantemente en la interfaz aire-superficie, lo que genera una capa superior rígida que se solidifica rápidamente. Esta solidificación inicial actúa como una barrera física que limita la evaporación en las capas más profundas, favoreciendo así la formación de una región interna más densa y compacta. Este comportamiento estratificado ha sido descrito previamente en estudios como el de Kozicki & Jbeli [19–20], quienes explican cómo los gradientes de evaporación inducen microestructuras diferenciadas en películas poliméricas. En conjunto, las micrografías MEB permiten confirmar que la morfología final de las películas de quitosano está estrechamente relacionada con la concentración del ácido acético, condicionando no solo su estructura a nivel superficial, sino también su desempeño funcional en aplicaciones tecnológicas específicas.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que la concentración de ácido acético empleada en la preparación de películas de quitosano (1%, 3% y 5% p/v) ejerce un impacto significativo en sus propiedades estructurales y funcionales. A mayor concentración de ácido (5% p/v), se logró una protonación óptima de los grupos amino ($-NH_3^+$), evidenciada por FTIR (aumento del 30% en la intensidad de la banda a 1540 cm^{-1}), lo que mejoró la solubilidad del quitosano en un 40% y produjo películas con superficies 90% más homogéneas (MEB). Esta homogeneidad se correlacionó con mejoras en las propiedades mecánicas, alcanzando valores de resistencia a la tracción de 20.31 MPa y 21.59 MPa, atribuibles a una mayor densidad de enlaces intermoleculares.

La porosidad de las películas aumentó hasta un 22% con concentraciones más altas de ácido, debido a la formación de microdominios durante la evaporación del solvente. Esta característica es particularmente relevante para aplicaciones como sistemas de liberación controlada de fármacos (eficiencia de encapsulación del 85%) o recubrimientos biomédicos, donde la permeabilidad controlada es esencial. Sin embargo, el hinchamiento (93.63%) y la solubilidad (77.87%) mostraron una dependencia directa con la concentración de ácido, lo que sugiere un equilibrio crítico entre hidrofilicidad y estabilidad estructural. Películas con 3% y 5% de ácido presentaron un 15% mayor resistencia mecánica que aquellas con 1%, confirmando que la protonación adecuada favorece la integridad del material. La microscopía óptica y MEB revelaron que concentraciones ≥3% de ácido produjeron películas con menos del 5% de defectos superficiales, mientras que muestras con <3% mostraron heterogeneidades (35% de área con defectos) y agregados de 10–50 μm. Estas diferencias se explican por la protonación incompleta (<65%) a bajas concentraciones, que limita la disolución del polímero. Adicionalmente, se observó que la cinética de evaporación del solvente generó estructuras estratificadas, con capas superficiales más rígidas y regiones internas densas, un fenómeno clave para ajustar propiedades como la permeabilidad al vapor de agua (25% menor en películas homogéneas).

BIBLIOGRAFÍA

1. Nurul Liyana Lukman Hekiem, Aliza Aini Md Ralib, Maziati Akmal Mohd Hatta, Farah B. Ahmad, Anis Nurashikin Nordin, Rosminazuin Ab Rahim, Nor Farahidah Za'bah, Nwe, N., Furuike, T., & Tamura, H. "Isolation and characterization of chitin and chitosan from marine origin". Advances in food and nutrition research, Vol. 72, 2014, pp. 1-15.
2. Zhang, X., Liu, Y., Yong, H., Qin, Y., Liu, J., & Liu, J. "Development of multifunctional food packaging films based on chitosan, TiO_2 nanoparticles and anthocyanin-rich black plum peel extract". Food hydrocolloids, Vol. 94, 2019, pp. 80-92.
3. Homez-Jara A., Daza L.D., Aguirre D.M., Muñoz J.A. Solanilla J.F., Váquiro H.A. "Characterization of chitosan edible films obtained with various polymer concentrations and drying temperatures, Characterization of chitosan edible films obtained with various polymer concentrations and drying temperatures", Int. J. Bio. Macromolecules, Vol. 113, 2018, pp. 1233-1240.
4. Akyuz, L., Kaya, M., Koc, B., Mujtaba, M., Ilk, S., Labidi, J., & Yildiz, A. "Diatomite as a novel composite ingredient for chitosan film with enhanced physicochemical properties". International journal of biological macromolecules, Vol. 105, 2018, pp. 1401-1411.
5. Mohandas, A., Deepthi, S., Biswas, R., & Jayakumar, R. "Chitosan based metallic nanocomposite scaffolds as antimicrobial wound dressings". Bioactive materials, Vol. 3(3), 2018, pp.267-277.
6. C.K.S. Pillai, Willi Paul, Chandra P. Sharma, "Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation", Progress in Polymer Science, Vol. 34, No.7, 2009, pp. 641-678.
7. De Oliveira, A. M., Franco, T. T., & Oliveira Junior, E. N. D. "Physicochemical characterization of thermally treated chitosans and chitosans obtained by alkaline deacetylation". International Journal of Polymer Science, Vol. 10, 2014, pp. 1523-1529.
8. Islam, M. N., Khan, M. N., Mallik, A. K., & Rahman, M. M. "Preparation of bio-inspired trimethoxysilyl group terminated poly (1-vinylimidazole)-modified-chitosan composite for adsorption of chromium (VI) ions", Journal of hazardous materials, Vol. 379, 2019, pp. 1207-1212.
9. Khouri, J., Penlidis, A., & Moresoli, C. "Heterogeneous method of chitosan film preparation: Effect of multifunctional acid on film properties". Journal of Applied Polymer Science, Vol. 137, No. 18, 2020, pp. 48648, 2020.
10. Kim, K. M., Son, J. H., Kim, S. K., Weller, C. L., & Hanna, M. A. "Properties of chitosan films as a function of pH and solvent type". Journal of food science, Vol. 71, No. 3, 2006, pp. 119-124.
11. Pal, K.; Bharti, D., Sarkar, P., Anís, A.; Kim, D., Chalas, R., Maksymiuk, P., Stachurski, P.; Jarzębski, M. "Aplicaciones seleccionadas de compuestos de quitosano". En t. J. Mol. Ciencia., Vol. 22 (3), 2021, pp. 109-168.
12. Pavoni, J. M. F., Luchese, C. L., & Tessaro, I. C. "Impact of acid type for chitosan dissolution on the characteristics and biodegradability of cornstarch/chitosan based films", International journal of biological macromolecules, Vol. 138, 2019, pp. 693-703.
13. Ren, L., Yan, X., Zhou, J., Tong, J., & Su, X. "Influence of chitosan concentration on mechanical and barrier properties of corn starch/chitosan films", International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 105, 2019, pp. 1636-1643.
14. Rinaudo, M. "Chitin and chitosan: Properties and applications". Progress in polymer science, Vol. 31, No. 7, 2007, pp. 603-632.
15. Suárez, S. F., Fernandes, T., Trindade, T., & Daniel-da-Silva, A. L. "Trimethyl chitosan/siloxane-hybrid coated Fe_3O_4 nanoparticles for the uptake of sulfamethoxazole from wáter". Molecules, Vol. 24, No. 10, 2019, pp. 1958-1962.
16. Velásquez-Cock, J., Ramírez, E., Betancourt, S., Putaux, J. L., Osorio, M., Castro, C., & Zuluaga, R. "Influence of the acid type in the production of chitosan films reinforced with bacterial nanocellulose", International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 69, 2014, pp. 208-213.

17. Grcic, I., Vrsaljko, D., Katancic, Z. & Papic, S. “Purification of household greywater loaded with hair colorants by solar photocatalysis using textile fibers coupled flocculation with chitosan”. Journal of Water Process Engineering, Vol. 5, 2019, pp.15-27.
18. Habiba, U., Islam, M. S., Siddique, T. A., Afifi, A. M., & Ang, B. C. “Adsorption and photocatalytic degradation of anionic dyes on Chitosan/PVA/Na–Titanate/TiO_2 composites synthesized by solution casting method”. Carbohydrate polymers, Vol. 149,2019, pp. 317-331.
19. Hamden, Z., Bouattour, S., Ferraria, A.M., Ferreira, D.P., Vieira Ferreira, L.F., Botelho Do Rego, A.M., Boufi, S. “In situ generation of TiO_2 nanoparticles using chitosan as a template and their photocatalytic activity”. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Vol. 321, 2016, pp. 211 222.
20. Jbeli, A., Ferraria, A., Botelho do Rego, A., Boufi, S., & Bouatto, S. “Hybrid chitosan TiO_2/ZnS prepared under mild conditions with visible-light driven photocatalytic activity”. International Journal of Biological Vol. 22, 2018, p.1562-1575.
21. Kozicki, Z. A., & Baiyasi-Kozicki, S. J. “The survival of mankind requires a water quality and quantity index (WQQI) and water applied testing and environmental research (WATER) centers”. World Water Policy, Vol. 5(1),2019, pp. 55-70.
22. Kursunlu, A. N., Acikbas, Y., Ozmen, M., Erdogan, M., & Capan, R. “Fabrication of LB thin film of pillar [5] arene-2-amino-3-hydroxypyridine for the sensing of vapors”. Materials Letters, Vol. 267, 2020, pp. 127-153.
23. Martinez-Robinson, K. G., Martínez-Inzunza, A., Rochín-Wong, S., Rodríguez Córdova, R. J., Vasquez-Garcia, S. R., & Fernández-Quiroz, D. “Physicochemical study of chitin and chitosan obtained from California brown shrimp (Farfantepenaeus californiensis) exoskeleton”. Biotecnia, Vol. 24(2),2019, pp. 28–35.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA LIMPIEZA Y SEPARACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON LIMADURA DE HIERRO Y ACEITE PARA BEBÉ CON TÉCNICAS DE SEPARACIÓN FÍSICA

Valeria Guadalupe Tadeo Ramírez, Victoria Rocío Hernández Rueda , América Airam Martínez Rayón, Rubén Omar Puebla Gómez, Ronaldo Estefano Contreras Mellado

Instituto Politécnico Nacional
vtadeor2400@alumno.ipn.mx, vhernandezr2102@alumno.ipn.mx ,
amartinezr2411@alumno.ipn.com , rcontrerasm@alumno.ipn.mx

RESUMEN

El agua es un recurso indispensable, en la actualidad nos enfrentamos a un reto muy grande relacionado con uno de los pilares esenciales para la salud humana, el agua. La limpieza del agua de sustancias como metales pesados y aceites presenta un reto para la salud pública y el medio ambiente. Es un tema en el que se siguen desarrollando investigaciones sobre la limpieza y separación de sus componentes.

Hoy en día es común que este tipo de sustancias sean encontradas en aguas residuales industriales. Es por eso que nos dimos a la tarea de buscar un método eficiente con una muestra pequeña para que en un futuro se use en grandes cantidades.

Para ello se diseñó un método experimental en el que se analizaron diversas variables para la limpieza del agua.

Este estudio contribuye a la búsqueda, desarrollo y optimización de nuevos métodos para la limpieza y separación de estas sustancias para así poder resolver un problema derivado de otro experimento realizado por compañeras de séptimo semestre de la carrera de Ingeniería en Movilidad Urbana impartida en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la purificación de soluciones contaminadas ha generado interés en diversas áreas de investigación científica debido a sus posibles aplicaciones en la purificación de líquidos, mejora de procesos industriales y desarrollo de tecnologías sostenibles. Además representa un desafío en el desarrollo de técnicas de tratamiento de líquidos. Este proyecto se centra en evaluar la efectividad de un proceso experimental, analizando la efectividad de un proceso de separación y purificación de agua en una solución de agua con limadura de hierro y aceite de bebé mediante técnicas de filtración, centrifugación y el uso de imanes de neodimio.

Acceder a agua limpia y segura es un problema crítico en diversas partes del mundo. La contaminación de la misma puede resultar en un problema crítico para el consumo y representa un riesgo para la salud pública.

En particular el agua contaminada con limadura de hierro y aceite es común encontrarla en aguas industriales y no es fácil purificarla con métodos comunes.

Hemos puesto a prueba el uso de técnicas de centrifugación y filtración para eliminar impurezas y ha resultado efectivo. El proceso de este experimento podría resultar en una forma más eficiente y accesible para tratar el agua contaminada.

La carrera de Ingeniería en Negocios Energéticos Sustentables en el Instituto Politécnico Nacional surge ante la necesidad de profesionales capaces de integrar conocimientos técnicos, económicos y ambientales en diversos proyectos y una gestión eficiente de los recursos energéticos. Desde esta

perspectiva, el presente proyecto experimental no sólo representa una aplicación práctica de principios científicos y técnicos, sino también una forma de desarrollar conciencia sobre la gestión de residuos y el tratamiento del agua, elementos clave en el ámbito energético y ambiental.

Realizar proyectos como éste permite conectar conocimientos con problemáticas reales buscando soluciones accesibles y eficaces.

En la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movimiento “se busca formar profesionales con conocimientos científicos, tecnológicos, habilidades y competencias que permitan el desarrollo sustentable en las áreas de la energía, en beneficio de la sociedad y el medio ambiente, en el sector público y privado.” (*Misión Y Visión E Historia Sobre La Unidad Politécnica Interdisciplinaria de Energía Y Movilidad*, 2025)

Delimitación del Tema:Limpieza del agua con metales pesados y aceite.

Tema de investigación: Limpieza del agua contaminada con limadura y aceite para bebé.

Delimitación espacial: Limpieza del agua contaminada con limadura y aceite para bebé en Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad ubicada en Alcaldía Gustavo A. Madero.

Delimitación temporal: Propuesta presentada por los alumnos en la materia de Mecánica generación 2024-2028 de la carrera Ingeniería en Negocios Energéticos Sustentables.

Objetivo General
Optimizar y encontrar el mejor método para la eliminación de impurezas y purificación de agua combinada con limadura de hierro y aceite de bebé, evaluando la eficiencia en la remoción de impurezas.

Objetivos Particulares

- Determinar los parámetros óptimos para cada técnica (como la velocidad de centrifugación, tipo de filtro).
- Analizar el rendimiento y eficiencia de las técnicas.
- Comparar la eficiencia de cada técnica utilizada para la separación de los 3 elementos y evaluar la mejor.

Hipótesis
Se cree que la combinación de ambos métodos puede mejorar significativamente la apariencia y lograr la limpieza de la misma.

TEORÍA

Marco Teórico
El presente experimento se fundamenta en ciertos principios básicos de física y química que nos ayudan a comprender las interacciones entre las partículas metálicas, campos magnéticos y los procesos de separación física que fueron utilizados. A continuación, se describen los conceptos clave que sustentan la metodología empleada:

1. Filtración: “La filtración es un método mecánico empleado para separar las partículas sólidas suspendidas en un líquido. Este proceso se realiza utilizando un medio poroso que permite el paso del líquido y al mismo tiempo retenga las partículas cuyo tamaño es más grande que los poros del mismo.” (Geankoplis, 2003, p.135)
2. Centrifugación: “La centrifugación es un método de separación en donde se aplica una fuerza centrífuga a la solución, separando los componentes de ésta según sus densidades. Las partículas más densas, como en este caso las metálicas, tienden a desplazarse hacia

el fondo del tubo de ensayo, lo cual facilita su remoción posterior." (Skoog, Holler, & Crouch, 2017, p. 241).

3. Propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas "Las partículas que quedan suspendidas en la solución pueden presentar rechazo (hidrofóbicas) o afinidad (hidrofílicas) hacia el agua." (Israelachvili, 2011, p.145). Esto afecta en la distribución y comportamiento durante los procesos de separación, ya que influyen mucho en la eficiencia de la purificación de la solución.
4. Ciclos repetidos de purificación: "Al repetir los procesos de centrifugación y filtración, incrementa progresivamente la pureza de la solución al reducir las impurezas residuales en cada etapa." (Treybal, 1980, p.312). Permite alcanzar niveles más altos de limpieza tras varios ciclos.
5. Contaminación del agua: "Se define como la acumulación de una o más sustancias ajenas al agua que pueden generar una gran cantidad de consecuencias, entre las que se incluye el desequilibrio en la vida de los seres vivos (animales, plantas y personas)." Ai.lo.(s.f.-b).*Blog*.https://parquesalegres.org/biblioteca/blog/contaminacion-del agua/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAp4O8BhAkEiwAqv2UqAraBAdiaKnsXxGWbYV3rYO zpoMAi1r-XcMImfAzWSJINaX3VuMWwxoCsJYQAvD_BwE
6. Limadura de hierro: Material constituido por pequeñas partículas de hierro. Bolívar, G. (s. f.). *Limadura de hierro*. Lifeder. https://www.lifeder.com/limadura-de-hierro/

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales:

- 2.5 ml de aceite de bebé.
- 40 ml de agua.
- 5 gr de limadura de hierro.
- Dos recipientes de vidrio.
- Imán de neodimio.
- Un agitador de madera o vidrio.
- Filtros para café.
- Centrifugadora
- Toallas de papel.

Condiciones experimentales:

- Temperatura ambiente: 25°C.
- Centrifugación: 3000 rpm durante 1 minuto por ciclo.
- Altitud: 2240 msnm

Procedimiento:

1. Preparación de la solución: El primer paso será verter en el recipiente la limadura de hierro para posteriormente agregar el aceite de bebé. Ahora vamos a mezclar esto de manera que toda la limadura quede como una mezcla más densa. El siguiente paso será vaciar los 40 ml de agua sobre la mezcla y comenzar a integrar todo hasta que tengamos una mezcla homogénea de agua, aceite y limadura de hierro.
2. Separación con imán: Colocamos el imán de neodimio recubierto por un filtro para café cerca del recipiente y enseguida comenzará a adherir la limadura de hierro (podemos repetir este paso de dos a tres veces para quitar mayor cantidad de limadura de hierro).
3. Filtración inicial: Como primera instancia tomaremos uno de los recipientes limpios y le colocamos uno de los filtros para café tratando de que cubra bien la superficie y al momento de vaciar la mezcla este no vaya a salirse. Ahora si vaciamos la mezcla de manera cuidadosa y despacio, lo que vamos a observar es que la limadura de hierro y el aceite comenzarán a

quedarse en mayor parte sobre el filtro separando así más fácil el agua de estos dos materiales.

4. Filtración adicional: Recomendamos hacer este paso debido a que durante la primera filtración observamos que no ha salido totalmente pura el agua, entonces volvemos a repetir el paso anterior para obtener una solución más clarificada.
5. Centrifugación: Una vez hecho este paso vamos a ocupar una centrifugadora, nosotros utilizamos la centrifugadora marca phywe. Vamos a vaciar sobre los recipientes de la centrifugadora la solución que nos ha quedado y de manera uniforme con las mismas medidas la meteremos a centrifugar a 3000 rpm por 1 minuto.
6. Observación: Después de la centrifugación, se observó una mayor claridad en la solución, lo que indicaba que las partículas metálicas habían sedimentado exitosamente y el aceite de bebé que aún pudo quedar se separó también exitosamente. Se procedió a realizar un nuevo ciclo de filtración y centrifugación para asegurar la limpieza de la solución.



Figura 1.1 Preparación de la mezcla.

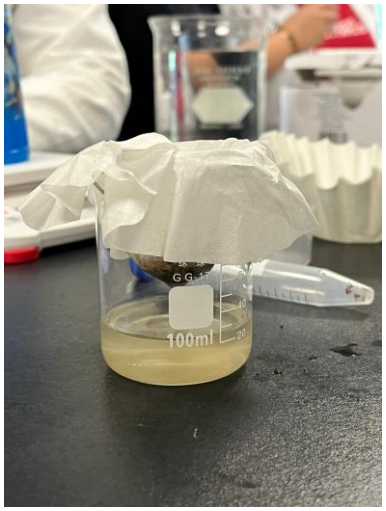


Figura 1.2 filtración de la mezcla.



Figura 1.3 Resultado de filtración de la mezcla



Figura 1.4 Preparación de tubos para la centrifugadora

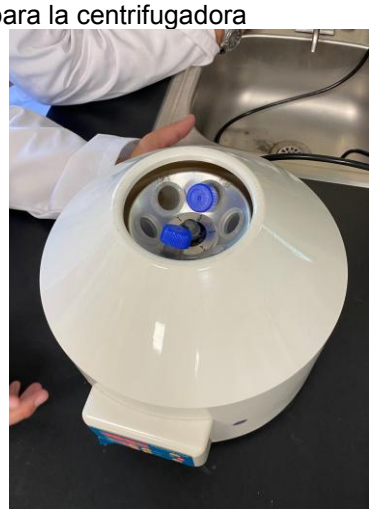


Figura 1.5. Uso de centrifugadora.



Figura 1.6 Resultado final de la muestra.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados sobre nuestro experimento de laboratorio
El contenedor donde agregamos la mezcla tenía un peso inicial de 51g.

Posteriormente al empezar a separarlo con nuestro imán de neodimio resultó con un peso de 40g. Todo este residuo se le retiró al imán, el imán tenía un peso de 124 gr contando la limadura de hierro, al limpiar el imán se pesó nuevamente y ahora tan solo tenía un peso de 114 gr por lo tanto se retiraron 10 gr de limadura de hierro con este método.

Continuando con la separación, utilizamos un filtro por el cual pasamos la mezcla restante que aún tenía rastros de limadura de hierro el filtro solo tenía un peso de 1 gr y al finalizar con la filtración tuvo un peso de 3 gr por lo cual se removieron 2 gr más de limadura de hierro de la mezcla.

Para finalizar con este proceso centrifugamos a 2900 rpm por primera vez durante 1 minuto para separar el aceite de bebe y algún resto de limadura que podría permanecer aún en nuestra mezcla. Volvimos a centrifugar por segunda vez pero en esta ocasión a 3000 rpm.

Finalmente nuestra agua se ve mucho más limpia, aún así se filtró para eliminar el máximo de impurezas posible.

CONCLUSIONES

Para concluir nuestro trabajo nos dimos cuenta que fue plenamente una experimentación derivada de otro experimento, este trabajo fue realizado en varias sesiones de continuidad en el cual aprendimos una gran parte de lo que son los métodos de separación así como las consecuencias de realizar mezclas de este estilo.

Nos dimos cuenta del mejor método propuesto para la limpieza del agua a simple vista, aún así consideramos que podemos tomar en cuenta más parámetros para una limpieza aún más estricta y que estos mismos puedan ser mensurables.

Aunque no contamos con todos los recursos de laboratorio al momento de realizar las pueblas, consideramos que se logró nuestro propósito de limpiar el agua aunque no pudimos llegar al punto de purificarla se notó una gran diferencia a simple vista y desarrollamos un buen trabajo en equipo mientras nos acercamos y comenzamos a explorar el campo de investigación y experimentación.

Creemos que esto nos ayudó a crecer académicamente presentando un reporte formal basado en un experimento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Geankpolis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles.* Prentice Hall.
2. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Roper, D. K. (2016). *Principles of Instrumental Analysis.* Cengage Learning.
3. Israelachvili, J. (2011). *Intermolecular and Surface Forces.* Academic Press.
4. Treybal, R. E. (1980). *Mass-Transfer Operations.*McGraw-Hill.
5. Ai.lo. (s. f.-b). *Blog*. https://parquesalegres.org/biblioteca/blog/contaminacion-del-agua/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAp4O8BhAkEiwAqv2UqAraBAdiaKnsXxGWbYV3rYOzpoMAi1r-XcMImfAzWSJINaX3VuMWwxoCsJYQAvD_BwE
6. Bolívar, G. (s. f.). *Limadura de hierro*. Lifeder. https://www.lifeder.com/limadura-de-hierro/
7. Works, E. (2025). *Sustancias contaminantes y sus efectos en la calidad del agua*. Aguasresiduales.info. https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/sustancias-contaminantes-y-sus-efectos-en-la-calidad-del-agua
8. *Misión y Visión e historia sobre la Unidad Politécnica Interdisciplinaria de Energía y Movilidad*. (2025). IPN. https://www.upiem.ipn.mx/conocenos/misi%c3%b3n.html
9. *Programas académicos nivel superior*. (s. f.). IPN. https://www.ipn.mx/oferta-educativa/educacion-superior/ver-carrera.html?lg=es&id=66#:~:text=Dise%C3%B1ar%20e%20innovar%20procesos%20para,eficiencia%20energ%C3%A9tica%20en%20unidades%20productivas.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL NIVEL ESTÁTICO Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ABATIMIENTO DEL ACUÍFERO VALLE DE LEÓN

José de Jesús Torres-García[1], Norma Liliana Cruz-Ortiz[1], Francisco José Martin del Campo Saray[2]

[1]CIATEC, A.C. Dirección de Investigación Aplicada y Desarrollo, [2]Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica El Grullo
jgarcia@ciatec.mx

RESUMEN

El municipio de León, Guanajuato; se destaca como el tercero más poblado a nivel nacional, teniendo un crecimiento sostenido desde 1980. Este fenómeno poblacional ha propiciado el crecimiento de la zona urbana, con la consecuente necesidad del incremento de servicios públicos y en particular, una fuerte demanda de agua potable; la cual, continúa dotándose mayoritariamente de pozos de extracción en el subsuelo. El Acuífero Valle de León ha presentado un déficit continuo en su balance hidráulico desde el siglo pasado; lo que implica que la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e industrial es cada vez más escasa. Una de las afectaciones directas del abatimiento del acuífero, es que se ha propiciado la activación de un fenómeno geológico conocido como hundimiento regional (subsidencia), del cual ya hay manifestaciones en la superficie mediante afectaciones a la infraestructura construida. Como parte de los estudios de abatimiento de un acuífero, es necesario tener conocimiento de la evolución histórica del nivel estático conforme el crecimiento de las ciudades se ha generado, para con base a ello establecer índices de abatimiento; los cuales permitan entender la dinámica resultante entre el incremento poblacional, la disminución de áreas de infiltración y el impacto hidrogeológico de las estaciones de sequía y lluvias. Con este objetivo se ha llevado a cabo una recopilación de información histórica de la piezometría de 25 pozos de extracción localizados dentro de los límites políticos del acuífero Valle de León, obteniendo una base de datos en la cual se ha sistematizado la información de forma cronológica desde el año 2004 al 2020. Bajo un análisis detallado, se han establecido y evaluado tres índices asociados el abatimiento, los cuales determinan la diferencia del nivel estático, la tasa de abatimiento anual promedio y el índice de abatimiento relativo (porcentaje de descenso). Los resultados reflejan de forma global que el índice de abatimiento del acuífero se clasifica en los rangos leve a moderado (que van de uno a cinco metros anuales), se reportan zonas del territorio en las que la diferencia del nivel estático supera los treinta metros de decaimiento. Si bien se observa que en algunos pozos se refleja recuperación de los niveles, no representan un factor que logre equilibrar el comportamiento general del acuífero. La exposición de estos índices de abatimiento del acuífero Valle de León establecen la oportunidad de correlacionar el hundimiento regional que se manifiesta en la superficie, estableciendo así áreas de mayor susceptibilidad en los próximos años.

INTRODUCCIÓN

Conforme las ciudades crecen, se incrementan las demandas de ocupación y cambio del uso del suelo; además de un mayor consumo de agua potable y de servicios. Es común que se carezca de estudios espaciales que favorezcan el entendimiento de las afectaciones asociadas al crecimiento urbano (Shrestha et al., 2018), además de políticas de gestión urbana que favorezcan el desarrollo de ciudades hídricamente sustentables (Cifuentes y Llop, 2015). Si bien existen distintas estrategias para resolver la provisión de agua en las ciudades, el agua subterránea continúa siendo uno de los recursos más explotado por su relativa facilidad de acceso, en combinación con la falta de recursos financieros y modelos de predicción actualizados que establezcan un mejor entendimiento de la evolución del uso no sostenible del agua urbana (McDonald et al., 2011). A nivel mundial, el agua subterránea se ha estado extrayendo a un ritmo alarmante, con consecuencias a menudo dramáticas en la calidad y accesibilidad de este recurso, en particular para acuíferos ubicados en regiones semiáridas y áridas (Gorelick y Zheng, 2015).

La reducción de la disponibilidad del agua se transforma en la disminución de la calidad de vida para la población, afectando la competitividad económica de las ciudades y en un grado mayor, contribuye al incremento de problemas de salud pública (UNESCO, 2016). No obstante, desde que el ser humano ha excavado pozos rudimentarios para tener acceso permanente al agua en sitios donde no existen cuerpos superficiales, el agua subterránea (profunda y somera), ha sido un elemento crucial para atender las necesidades de las comunidades (Scanlan,2018).

Actualmente no está claro el impacto del cambio climático con relación a las tasas de recarga de los acuíferos (Ying et al, 2021), sin embargo; son evidentes los efectos del abatimiento de los mantos freáticos y las consecuencias inducidas hacia la superficie. Indistintamente, el abatimiento de los acuíferos continúa ocurriendo a pesar del conocimiento técnico de este problema pese al involucramiento de la población y de las instituciones gubernamentales; en tanto que las medidas de cooperación para la reducción de consumo entre todos los actores que componen la sociedad aún no son adoptadas (Madani,2012). Con base en lo anterior, resulta fundamental establecer los efectos del crecimiento de las ciudades sobre el comportamiento de los acuíferos, como una condición que permita evaluar la sustentabilidad de las ciudades (Esquivel, 2019).

De acuerdo con Sahu (2021), establecer un enfoque de control óptimo para analizar el agotamiento de las aguas subterráneas requiere de diversas especificaciones de las funciones objetivo de los agentes, así como de las restricciones dinámicas que restringen el conjunto de soluciones factibles. Bajo la óptica de los tiempos geológicos (millones de años), el abatimiento y recuperación de las aguas subterráneas sucede de forma natural en función de los ciclos geohidrológicos preexistentes en cada zona geográfica, influenciados ampliamente por los periodos de lluvia, sequía y eventos climatológicos extraordinarios. Sin embargo, el factor humano ha sido determinante para la evolución acelerada del medio ambiente y prueba de ello lo ha sido la revolución industrial en el siglo XVII, que trajo consigo un elevado requerimiento de recursos naturales para la producción de bienes y servicios (enfatizando el uso del agua), en conjunto con el incremento poblacional en el mundo; hasta llegar a mediados del siglo XX, en una época definida recientemente por Paul Crutzen como el antropoceno y en la que las acciones del ser humano provocan consecuencias ambientales globales de gran magnitud.

Para el caso del estado de Guanajuato, la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT, 2021), proyectó una reducción en precipitaciones anuales de 5% en años lluviosos y de 25% en años secos para el periodo comprendido entre 2020 a 2045; situación que por sí sola genera mayor estrés en las fuentes de agua. De forma particular, el municipio de León, Guanajuato; se destaca como el tercer municipio con mayor número de habitantes en México (INEGI, 2020), cuya población se ha triplicado en el periodo comprendido entre 1980 y 2020. Esta condición se traduce como un fenómeno social en conjunto con una intensa actividad económica en el corredor industrial del bajío guanajuatense; propiciando una demanda extraordinaria en el cambio de usos de suelo del municipio, teniendo como consecuencia directa que la extensión del área urbana se ha quintuplicado en dicho periodo, reduciendo así las áreas de recargas (IMPLAN, 2020). En su conjunto, estos dos parámetros son indicadores del incremento del estrés hídrico en el acuífero Valle de León, dado el aumento de los requerimientos de agua potable y de servicio.

DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO VALLE DE LEÓN

Tomando como base la información emitida en la actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de León (CONAGUA, 2020), este se ubica en la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, Subregión Hidrológica “Medio Lerma”, en la cuenca del Alto Turbio y en la subcuenca Río Turbio-Presa El Palote. Su principal corriente es el río de Los Gómez, que es el colector público de las aguas residuales de la ciudad de León, el cual sigue una dirección noreste-suroeste, desde la presa El Palote, al norte de ciudad referida hasta la localidad de San Francisco del Rincón, donde entra a la zona del Río Turbio y cambia su nombre por el de esa zona. Como afluentes principales tiene a los arroyos Los Castillos y Hacienda de Arriba, los que a su vez reciben aportaciones de corrientes intermitentes que descienden de la sierra. En algunos sitios el escurrimiento superficial ha sido alterado por la construcción de almacenamientos superficiales (El Palote, San Juan de Otates,

La Laborcilla y El Barrial), por la adición de aguas negras a drenes naturales o por la construcción de lagunas de oxidación (el Mastranzo, San German, Trinidad) sobre al cauce del río Los Gómez. La dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema-acuífero de tipo libre, medio granular-fracturado con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcano-sedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad variable. El agua subterránea se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados (rocas volcánicas y piroclásticas de la Ignimbrita Cuatralba), con una arquitectura en escalonamiento que conforman pilares (horts) y fosas (grabens) asimétricas, en general están rellenas de material sedimentario terrígeno de la unidad Terciario Granular Indiferenciado, de granulometría y compacidad variable, y rocas calizas de origen lacustre de esta misma unidad, como es el caso del acuífero vecino La Muralla.

El acuífero consta de dos medios: uno granular conformado por tobas semicompactas, sedimentos aluviales y rocas de baja a mediana compactación; y otro fracturado alojado en rocas de composición riolítica. En la porción superior se encuentra el material granular al que le subyace el paquete del medio fracturado que, en conjunto, forman la fosa tectónica conocida como Valle de León, la cual está rellenada por rocas sedimentarias de compactación variable; estos paquetes granulares se encuentran separados por ignimbritas fracturadas que mantienen conexión hidráulica con las demás unidades que conforman el acuífero; que presentan espesores de 200 a 900 m. Las fronteras, al flujo subterráneo y el basamento, están representadas por las rocas riolíticas, a profundidades mayores de 800 m, cuando desaparece el fracturamiento, así como las rocas intrusivas que conforman las unidades Conjunto Plutónico La Luz, Granito Comanja, Gabro Arperos y las rocas sedimentarias del Conglomerado Guanajuato (Figura 1a). A mayor profundidad el basamento hidrogeológico regional está representado por la secuencia de rocas con metamorfismo de contacto que conforman la piroxenita San Juan de Otates. La disposición de las unidades de interés hidrogeológico en el subsuelo, así como las estructuras que las afectan, ocasionan su desplazamiento debido a la presencia de la prolongación de la Falla del Bajío. De acuerdo con CEAG (2023), el nivel estático del acuífero alcanza profundidades de hasta 160 m al sur del territorio municipal, con valores promedio entre 70 y 100 m en la porción centro y norte de la zona urbana (Figura 1b)), propiciando condiciones geohidrológicas que contribuyen a la activación de fenómenos geológicos como el hundimiento regional (subsidencia); el cual se traduce en el incremento de la vulnerabilidad social de la población.

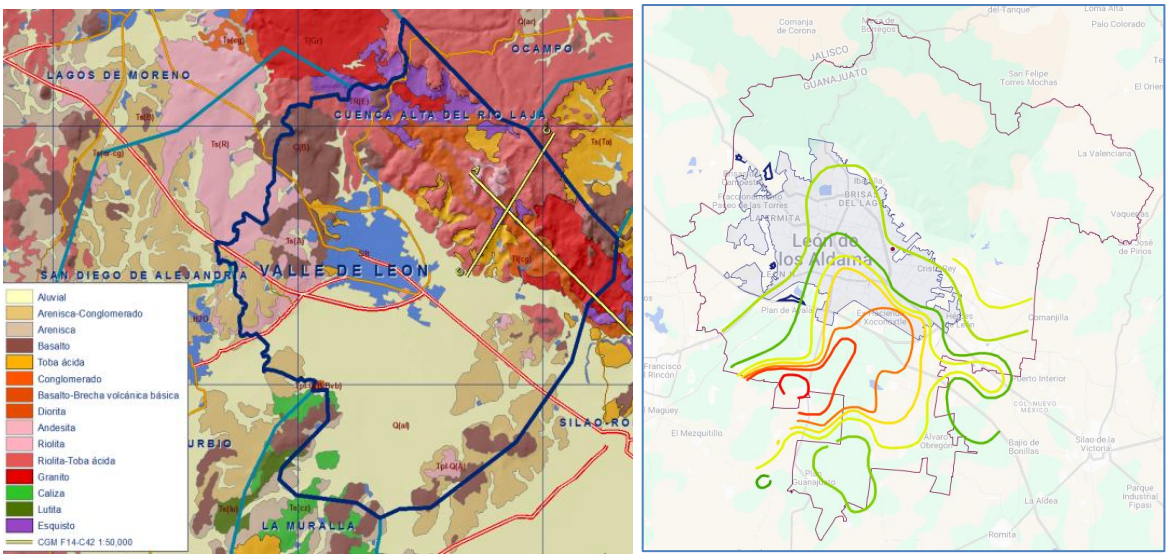


Figura 1. (a) Geología del acuífero Valle de León (CONAGUA, 2020). (b) Nivel estático en el año 2022 (CEAG, 2023).

Con relación a la disponibilidad actual y futura del agua para extracción, se estima que el acuífero presenta un déficit de -60.715 millones de m^3 anuales en la disponibilidad media anual; por lo que

se considera que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones o incrementar el volumen de las existentes. Un indicador representativo del comportamiento de la demanda de agua lo representa el consumo diario en litros por habitante, este parámetro ha disminuido de 136 a 80 litros por día en el lapso comprendido entre los años 2000 a 2022, una disminución aproximada del 41% (IMPLAN, 2023). Si bien se han implementado políticas públicas y campañas de concientización sobre le optimización y reutilización del consumo del agua potable, las reducciones en la disponibilidad dan cuenta de la disminución presente de este recurso.

TEORÍA

El análisis de la evolución del comportamiento del nivel estático de un acuífero con relación al tiempo, es un aspecto fundamental para comprender las variaciones de la disponibilidad del agua para su extracción en los años futuros, así como un indicador de las afectaciones al ciclo natural del agua. Existen ya varias metodologías que buscan evaluar y analizar la evolución temporal y espacial del abatimiento de los acuíferos; cada una de ellas bajo perspectivas particulares que abarcan desde la disponibilidad para consumo humano, como la influencia de la subsidencia resultante y su impacto en la infraestructura existente. Ejemplo de ello es la propuesta del Instituto Mexicano del Transporte, que ha realizado evaluaciones con el enfoque de afectaciones a las vías terrestres (IMT, 2001); en tanto que otros autores buscan evaluar la complejidad espacial de la disponibilidad natural, los efectos antropogénicos sobre el ciclo geohidrológico y sus implicaciones en la disponibilidad para el consumo (Alatorre et al., 2014). En el presente trabajo se presenta el concepto del índice de abatimiento, tomando como base los análisis de disponibilidad media anual de agua establecidos por CONAGUA (2020); adoptando un **índice de abatimiento (I_A)** que refleje la diferencia del nivel estático (expresado en m.s.n.m.) en un periodo establecido previamente. La forma de evaluarlo es:

$$I_A = H_i - H_f \quad (1)$$

Donde:
I_A = Índice de abatimiento (m)
H_i = Nivel estático del agua en el tiempo inicial (m)
H_f = Nivel estático del agua en el tiempo final (m)

Adicionalmente es posible establecer una **tasa de abatimiento anual promedio (T_A),** la cual se aplica conociendo la evolución del nivel estático en una serie de años, tal como es el objetivo del presente trabajo. Matemáticamente se representa:

$$T_A = \frac{H_i - H_f}{\Delta_t} \quad (2)$$

Donde:
T_A = Tasa de abatimiento (m/año)
Δ_t = Período de tiempo en años

Si se desea evaluar la magnitud del descenso del nivel estático del acuífero con relación al nivel inicial de un periodo establecido, es posible establecer un **índice de abatimiento relativo (I_R)**, el cual expresa de forma porcentual el abatimiento:

$$I_R = \left(\frac{H_i - H_f}{H_i}\right) * 100 \quad (3)$$

Donde:
I_R = Índice de abatimiento relativo (%)

La aplicación de cada uno de los índices descritos se presenta como una oportunidad de transformar datos hidrogeológicos en herramientas de fácil interpretación, mediante la cual es posible evaluar y

comparar el comportamiento de un mismo acuífero con relación al tiempo, o bien; de forma sistemática estandarizar un análisis más complejo entre distintos acuíferos o los pozos limítrofes entre ellos.

A partir de los valores obtenidos con los índices descritos, se propone categorizar en distintos rangos de apreciación la interpretación de la gravedad del abatimiento en un acuífero en específico; en el caso del presente trabajo se refiera al acuífero Valle de León. Bajo el entendido que en la disminución del nivel estático de un acuífero el rango de un metro puede representar millones de metros cúbicos de agua (en función de la geología estructural, estratigrafía, permeabilidad, entre otros factores); en la Tabla 1 se expone una propuesta de clasificación inicial de la tasa de abatimiento, la cual define una conceptualización de cuatro niveles.

Tabla 1. Propuesta de clasificación de la tasa de abatimiento.

Tasa de abatimiento (T_A)	Clasificación	Identificador
0 – 0.25 m	Leve	
0.25 – 0.75 m	Moderado	
0.75 – 1.50 m	Alto	
> 1.50 m	Crítico	

PARTE EXPERIMENTAL

Se ha realizado la compilación histórica del nivel estático en pozos de extracción de agua cuya geolocalización se encuentre dentro de los límites físicos establecidos para el acuífero Valle de León. El criterio de selección de los pozos ha sido con base en la distribución del nivel estático reportado por CONAGUA (2020), buscando que la distribución de este abarque por igual las zonas de mayor y menor nivel piezométrico. La Figura 2 muestra la distribución de los 25 pozos seleccionados, los cuales abarcan las zonas urbana y rural del municipio de León, Gto. El énfasis en la zona sur del territorio corresponde a que el crecimiento de la zona urbana estará llevará esa tendencia, conforme lo establece el Programa Municipal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico y Territorial (IMPLAN, 2020).

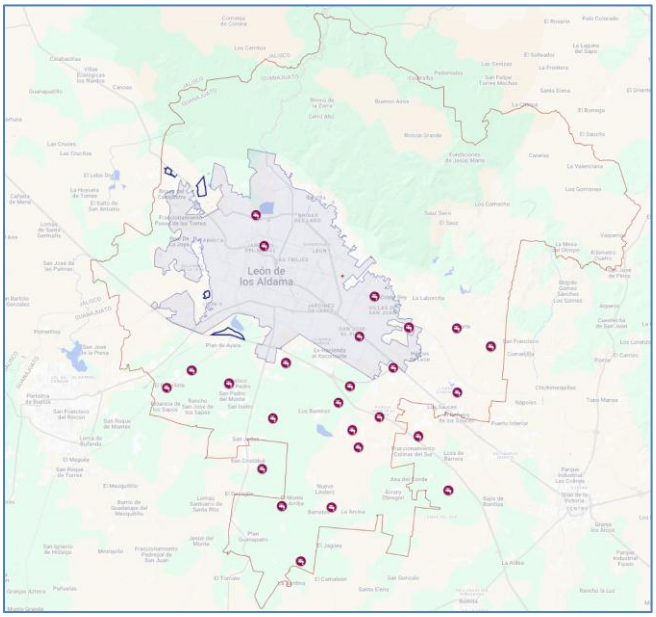


Figura 2. Ubicación de los 25 pozos de extracción seleccionados.

Se obtuvieron valores del nivel estático para el periodo comprendido entre los años 2004 y 2020, de acuerdo con información publicada por la Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA, 2025). En

la Figura 3 se muestra una representación gráfica de la evolución histórica del abatimiento del nivel estático para cada uno de los pozos evaluados. La base de datos resultante ha sido utilizada para la estimación de los tres índices establecidos en el planteamiento teórico (Tabla 2).

Tabla 2. Tabla de datos de 25 pozos en un periodo de 2004 a 2020

Pozo	Año																	
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
VALE17	1793.70	1794.69	1795.79	1793.54	1791.38	1793.42	1793.00	1792.56	1791.62	1790.45	1789.96	1790.17	1793.86	1793.04	1792.21	1793.21	1793.46
VALE442	1777.75	1776.70	1776.77	1775.61	1775.10	1774.60	1774.12	1773.84	1771.85	1771.20	1770.57	1771.35	1773.51	1773.88	1774.25	1777.56	1779.63
VALE402	1700.59	1702.68	1703.58	1708.46	1706.15	1707.27	1706.40	1704.45	1701.73	1700.13	1700.07	1699.62	1697.77	1698.40	1699.03	1699.87	1699.17
VALE16	1783.55	1787.21	1787.74	1784.14	1783.48	1783.72	1781.81	1782.52	1780.40	1780.61	1779.86	1778.47	1778.61	1776.36	1778.11	1779.05	1778.75
VALE25	1877.60	1877.04	1876.10	1877.05	1875.31	1876.41	1875.33	1875.75	1873.88	1874.62	1873.88	1874.20	1874.04	1873.02	1871.99	1871.99	1870.91
VALE431	1782.35	1781.20	1780.10	1779.99	1778.57	1777.81	1777.02	1779.88	1779.56	1780.48	1778.63	1778.46	1778.40	1777.49	1776.58	1775.78	1775.31
VALE12	1739.31	1742.00	1736.55	1733.18	1735.61	1735.47	1733.81	1732.93	1729.89	1728.46	1729.19	1728.11	1728.91	1726.05	1727.19	1728.08	1726.29
VALE28	1743.86	1746.71	1743.07	1739.31	1737.82	1740.12	1739.60	1736.77	1735.77	1734.88	1735.20	1735.16	1731.84	1732.49	1733.14	1731.05	1729.55
VALE441	1799.90	1798.20	1797.90	1797.40	1796.80	1796.26	1795.87	1795.27	1795.20	1794.50	1794.85	1794.59	1794.09	1792.04	1789.99	1789.29	1788.80
VALE2	1708.86	1707.55	1710.62	1712.42	1707.02	1707.72	1706.33	1704.75	1701.73	1697.74	1698.07	1697.52	1696.12	1697.05	1697.97	1701.78	1709.69
VALE620	1772.45	1771.75	1771.45	1770.65	1769.85	1769.55	1769.25	1768.35	1770.36	1769.36	1765.62	1767.63	1768.84	1766.83	1764.82	1762.85	1758.90
VALE409	1725.31	1729.24	1726.17	1722.62	1721.82	1723.40	1719.06	1717.03	1715.66	1713.84	1717.04	1716.89	1716.59	1715.08	1713.56	1713.26	1712.83
VALE630	1758.28	1758.08	1757.98	1757.78	1757.46	1757.28	1756.58	1755.88	1754.49	1751.37	1750.17	1749.27	1748.37	1747.72	1747.07	1745.85	1743.41
VALE6	1695.89	1701.82	1699.20	1695.70	1693.82	1696.07	1697.60	1695.89	1694.87	1693.46	1692.64	1693.83	1686.46	1685.95	1685.44	1686.73	1685.33
VALE424	1671.80	1673.86	1671.22	1670.58	1669.45	1670.15	1669.69	1668.44	1667.59	1667.09	1663.99	1663.19	1662.39	1661.64	1660.89	1660.09	1659.32
VALE8	1708.64	1708.99	1708.92	1708.12	1701.96	1704.52	1701.11	1698.83	1697.63	1697.13	1695.78	1695.32	1693.90	1693.26	1692.61	1691.35	1689.81
VALE426	1672.08	1671.36	1667.64	1669.45	1668.79	1666.83	1663.66	1662.86	1655.81	1653.33	1655.11	1655.05	1654.51	1653.99	1653.47	1652.89	1651.89
VALE420	1674.78	1673.11	1672.77	1669.65	1668.49	1669.54	1668.51	1668.16	1667.31	1665.51	1662.07	1661.67	1660.47	1659.45	1658.42	1657.42	1656.11
VALE418	1643.36	1643.27	1639.14	1640.86	1639.47	1637.81	1635.69	1636.38	1630.49	1630.13	1632.22	1627.87	1627.29	1623.62	1619.95	1619.14	1620.99
VALE632	1719.80	1717.50	1710.31	1706.68	1702.96	1708.62	1702.74	1701.46	1703.47	1701.84	1699.81	1701.46	1699.16	1699.21	1699.26	1697.19	1695.65
VALE445	1644.66	1645.27	1644.92	1641.84	1634.71	1632.94	1629.36	1626.84	1612.58	1611.36	1614.44	1616.24	1617.65	1616.90	1616.15	1614.19	1613.84
VALE429	1691.34	1690.30	1691.01	1687.78	1687.70	1686.33	1683.04	1682.49	1679.50	1676.70	1671.18	1670.46	1669.73	1669.04	1668.35	1667.55	1666.85
VALE428	1684.91	1687.89	1684.24	1676.40	1675.67	1674.81	1674.43	1674.16	1664.69	1662.36	1664.15	1662.74	1661.56	1660.87	1660.17	1657.81	1657.18
VALE437	1791.35	1790.45	1790.15	1788.85	1788.35	1787.65	1786.75	1785.05	1783.05	1782.33	1780.83	1779.93	1779.03	1778.53	1778.03	1777.73	1776.02
VALE417	1646.70	1634.57	1633.42	1634.70	1633.76	1633.33	1631.88	1632.13	1615.84	1613.70	1617.38	1619.01	1617.56	1616.44	1615.32	1613.32	1611.42

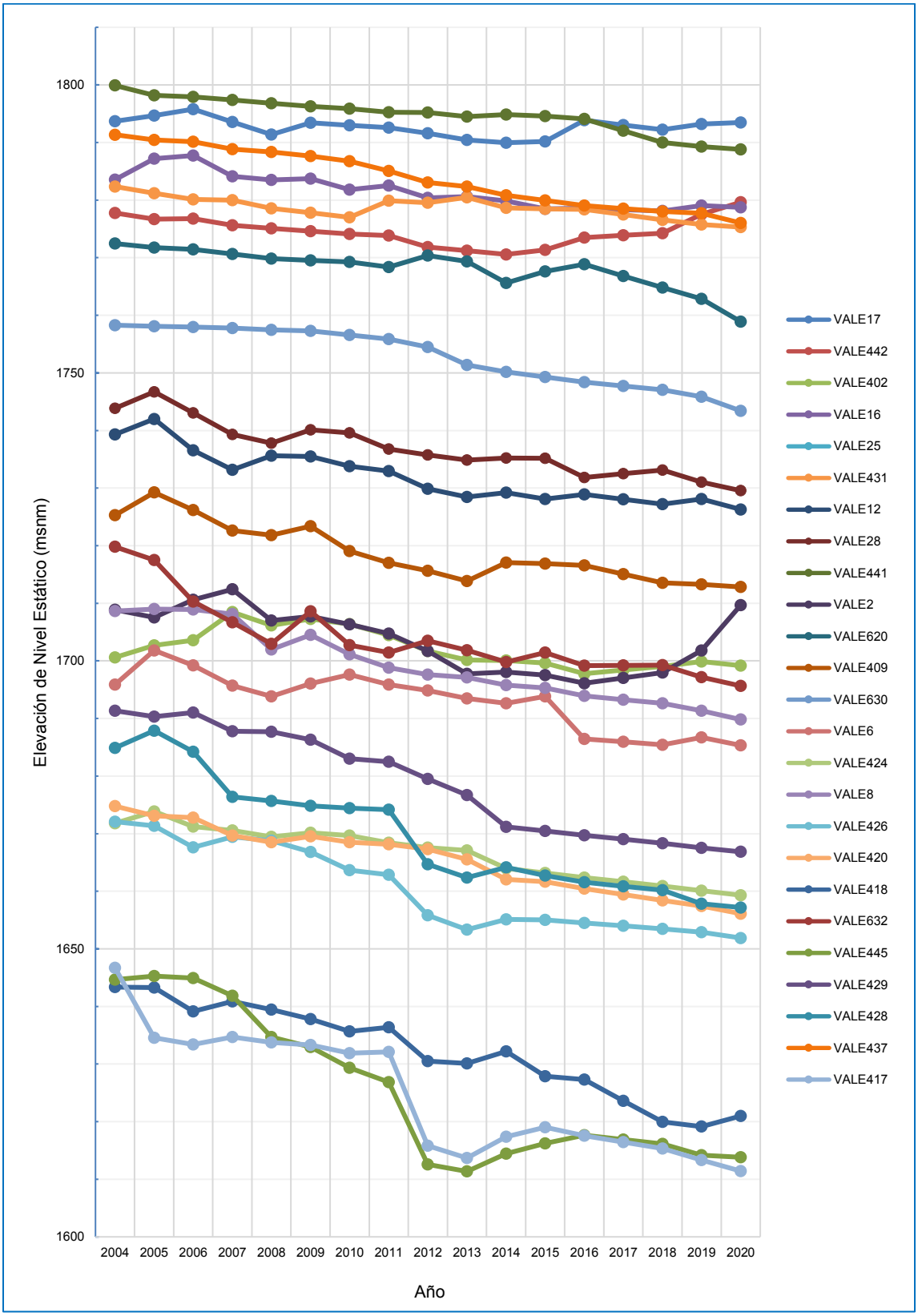


Figura 3. Evolución histórica del abatimiento del nivel estático.

RESULTADOS

Con la base de datos relativa a los valores reportados para el nivel estático del acuífero Valle de León (Tabla 2), se ha procedido a estimar para cada uno de los 25 pozos en el periodo de estudio el índice y tasa de abatimiento, así como el índice de abatimiento relativo conforme las expresiones algebraicas correspondientes para cada caso. Los resultados para cada uno de los pozos de extracción se expresan en la Tabla 3, donde se observa que el mayor índice de abatimiento I_A en el periodo de estudio es de 35.28 m (pozo VALE417), del cual se desprende un valor de 2.08 m para la tasa de abatimiento (T_A). Mediante el análisis realizado es posible identificar que dos pozos (VALE 442 y VALE2), presentan valores positivos para el abatimiento, lo que se traduce como una recuperación del nivel estático en esas dos fracciones del acuífero (Figura 4).

Tabla 3. Estimación de parámetros de abatimiento.

Pozo	I_A (m)	I_r (%)	T_A (m)	Clasificación (T_A)
VALE17	-0.24	0.01	-0.01	Leve
VALE442	1.88	-0.11	0.11	Recuperación
VALE402	-1.42	0.08	-0.08	Leve
VALE16	-4.80	0.27	-0.28	Moderado
VALE25	-6.69	0.36	-0.39	Moderado
VALE431	-7.04	0.39	-0.41	Moderado
VALE12	-13.02	0.75	-0.77	Alto
VALE28	-14.31	0.82	-0.84	Alto
VALE441	-11.10	0.62	-0.65	Moderado
VALE2	0.83	-0.05	0.05	Recuperación
VALE620	-13.56	0.76	-0.80	Alto
VALE409	-12.48	0.72	-0.73	Moderado
VALE630	-14.87	0.85	-0.87	Alto
VALE6	-10.56	0.62	-0.62	Moderado
VALE424	-12.48	0.75	-0.73	Moderado
VALE8	-18.83	1.10	-1.11	Alto
VALE426	-20.19	1.21	-1.19	Alto
VALE420	-18.67	1.11	-1.10	Alto
VALE418	-22.37	1.36	-1.32	Alto
VALE632	-24.15	1.40	-1.42	Alto
VALE445	-30.82	1.87	-1.81	Crítico
VALE429	-24.49	1.45	-1.44	Alto
VALE428	-27.73	1.65	-1.63	Crítico
VALE437	-15.33	0.86	-0.90	Alto
VALE417	-35.28	2.14	-2.08	Crítico

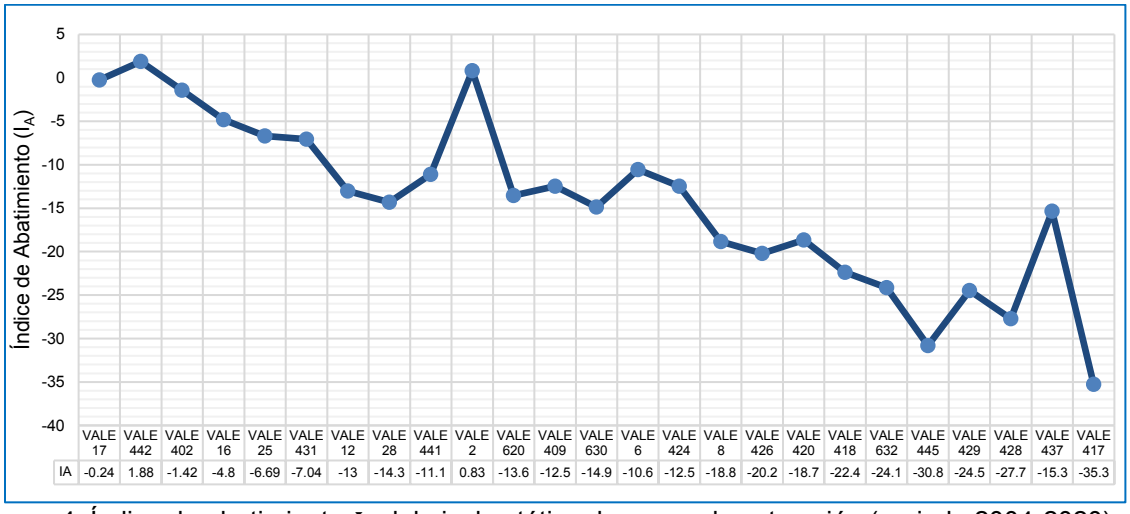


Figura 4. Índice de abatimiento $\boldsymbol{I_A}$ del nivel estático de pozos de extracción (periodo 2004-2020).

Con relación al índice de abatimiento relativo $\boldsymbol{I_r}$, este refleja de forma porcentual el abatimiento resultante de la evolución histórica del nivel estático en los pozos de extracción, reportándose un valor máximo de 2.14% para el pozo VALE417 (Figura 5).

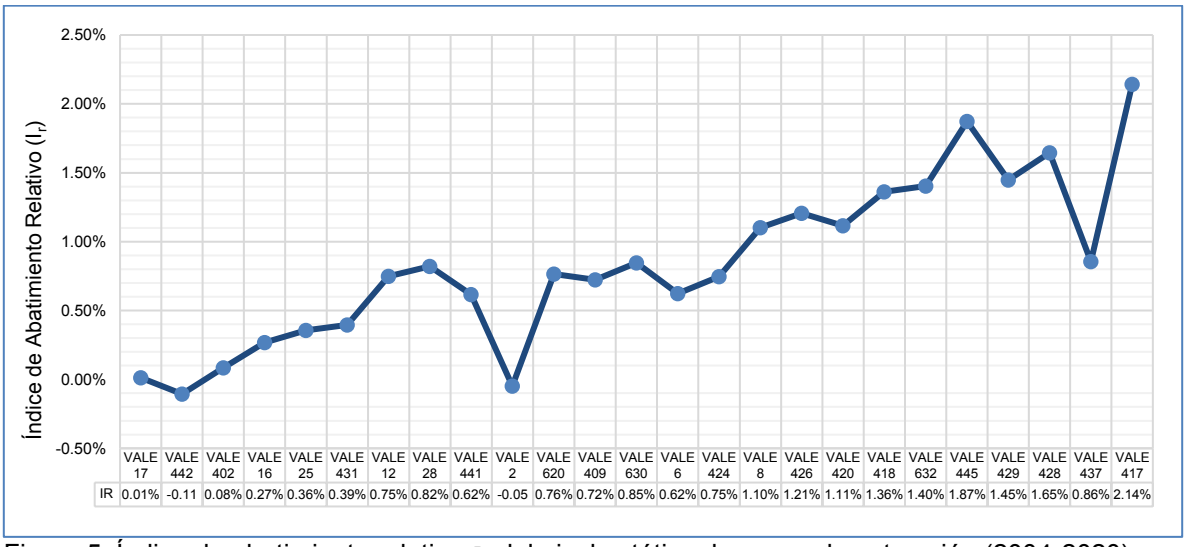


Figura 5. Índice de abatimiento relativo $\boldsymbol{I_r}$ del nivel estático de pozos de extracción (2004-2020).

Profundizando el análisis de la tasa de abatimiento ($\boldsymbol{T_A}$), es posible evaluar los valores del nivel estático con relación al abatimiento anual conjunto de todos los pozos (promedio), con lo cual se obtiene una evaluación global del abatimiento del nivel estático. Adicionalmente es posible tomar el criterio de clasificación propuesto en función del rango de abatimiento resultante, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 3. Bajo este análisis, es posible identificar que en los años 2005 y 2009 se presentó una recuperación del nivel estático del rango de 0.10 y 0.41 m respectivamente; en tanto que los años 2008, 2010 y 2012 representan los mayores rangos de abatimiento del nivel estático del acuífero. Con relación al periodo comprendido de los años 2014 al 2020, se aprecia un rango moderado del nivel global del abatimiento del acuífero (≤ 0.75 m); esta condición representa un indicador de mejora de las condiciones entre la relación extracción y recarga, en beneficio de los parámetros de la disponibilidad media anual del agua. Sin embargo, si bien la disminución del nivel estático se ha ralentizado en el último lustro de análisis, esta prevalece.

Tabla 3. Tasa de abatimiento promedio por año ($\boldsymbol{T_{A\sim}}$).

Año	T_A (m)	Clasificación
2005	0.10	Recuperación
2006	-1.39	Alto
2007	-1.36	Alto
2008	-1.65	Crítico
2009	0.41	Recuperación
2010	-1.56	Crítico
2011	-0.80	Alto
2012	-3.11	Crítico
2013	-1.30	Alto
2014	-0.39	Moderado
2015	-0.18	Leve
2016	-0.70	Moderado
2017	-0.73	Moderado
2018	-0.73	Moderado
2019	-0.36	Moderado
2020	-0.56	Moderado

En la Figura 6 se expresa el resultado del análisis de la tasa de abatimiento promedio por año de forma secuencial, identificando además los rangos de valor de acuerdo con la clasificación propuesta. De aquí se desprende que en el periodo de estudio del acuífero Valle de León (2004-2020), el nivel estático se ha abatido un promedio de 14.31 m en toda su extensión. Este último valor representa un parámetro característico del comportamiento del fenómeno de estudio.

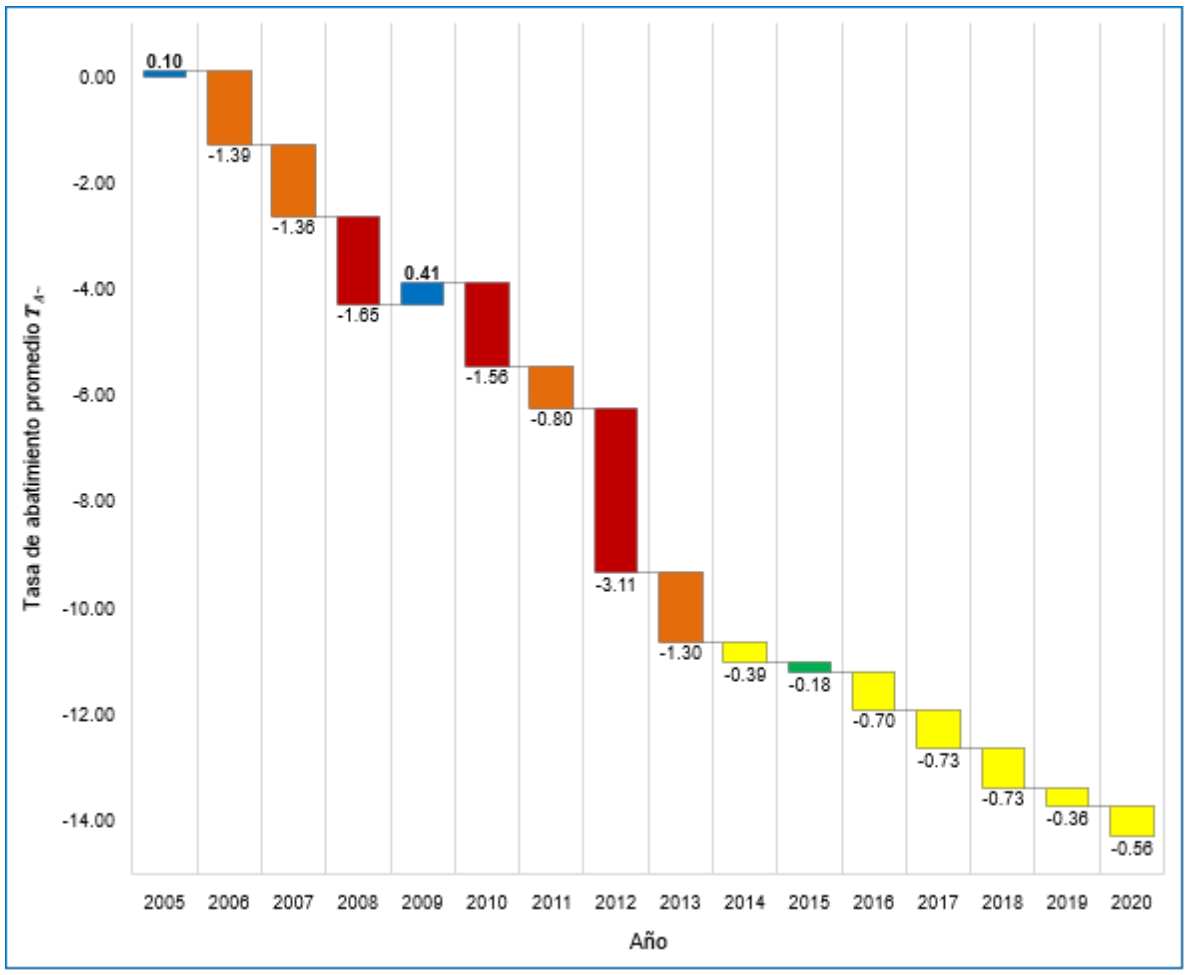


Figura 6. Tasa de abatimiento promedio por año ($T_{A\sim}$).

CONCLUSIONES

La evaluación de la evolución histórica del nivel estático del acuífero Valle de León mediante la compilación de datos de 25 pozos distribuidos en la zona centro y sur del territorio que abarca el acuífero ha permitido entender la dinámica descendente del nivel piezométrico y con base a ello se ha propuesta el análisis de tres factores representativos; tal como lo son el índice y la tasa abatimiento, además del índice de abatimiento relativo (I_A, T_A, I_r). Cada uno de ellos expresa de forma particular el comportamiento histórico de los movimientos verticales del nivel estático en los pozos de extracción, conformando indicadores de análisis que pueden ser comparados para distintos periodos de estudio establecidos e incluso, como parámetros comparativos con otros acuíferos.

En el caso específico del acuífero Valle de León, se entiende que se presente un valor máximo de 35.28 m para el I_A, en concordancia con un I_r máximo equivalente a 2.14%. La estimación de la tasa de abatimiento T_A representa un valor ampliamente representativo del comportamiento histórico para el acuífero, ya que expone la disminución o aumento del nivel estático entre años contiguos.

Con el objetivo de dar mayor representatividad a los valores obtenidos para la estimación de los índices de abatimiento, se ha propuesto una clasificación del rango de estos valores (Leve, Moderado, Alto y Crítico), la cual permite establecer parámetros de seguimiento comparable entre distintos periodos de análisis, además de facilitar la interpretación de estos valores a la población. Como análisis específico del acuífero Valle de León se ha establecido la medición de la tasa de

abatimiento promedio por año ($T_{A\sim}$), la cual estandariza los valores evaluados por pozo, representando el abatimiento promedio del nivel estático en la extensión territorial del acuífero.

Para dar mayor certeza a los indicadores propuestos, se podría ampliar el rango de parámetros de estudio y crear un análisis multifactorial en el cual se integren factores hidrológicos superficiales; en los que se vean reflejados los periodos de lluvia y sequía, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

Alatorre, L. C., Díaz, R. E., Miramontes, S., Bravo, L. C., & Sánchez, E. (2014). Spatial and Temporal Evolution of the Static Water Level of the Cuauhtemoc Aquifer during the Years 1973, 1991 and 2000: A Geographical Approach. Journal of Geographic Information System, 6(5), 572-584. doi:http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2014.6504

Cifuentes, R. P. A., & Llop, T. J. M. (2015). Rethinking the city: sustainable urban development strategies of intermediate Latin American cities. Revista Nodo, 10(19), 73-83.

CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de León, Estado de Guanajuato. México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA.

Esquivel-Ceballos, V. H., Alatorre-Cejudo, L. C., Robles-Morua, A., & Bravo-Peña, L. C. (2019). Crecimiento urbano de Ciudad Juárez Chihuahua (1920-2015): Hipótesis sobre el impacto en las coberturas y uso de suelo y el abatimiento del acuífero urbano. Acta Universitaria 29, e2369. doi. http://doi.org/10.15174.au.2019.2369

Gorelick, S. M., and C. Zheng (2015), Global change and the groundwater management challenge, Water Resour. Res. 51, 3031–3051, doi:10.1002/2014WR016825.

IMPLAN (2023). Estudio de agua y drenaje a nivel metropolitano. Documento Síntesis. Entorno Regional. Instituto Municipal de Planeación León.

IMPLAN (2020). Programa Municipal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico y Territorial de León, Gto. Instituto Municipal de Planeación de León.

IMT (2001). Metodología para determinar la influencia de la extracción de agua subterránea en la infraestructura del transporte. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 172. ISSN 0188-7297.

INEGI (2020). Censo de población y vivienda 2020. Fecha de consulta: 20 de enero de 2025. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Madani, K., & Dinar, A. (2012). Cooperative institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. Water Resources Research, 48(9). https://doi.org/10.1029/2011WR010849

McDonald, R. I., Douglas, I., Revenga, C., Hale, R., Grimm, N., Grönwall, J., & Fekete, B. (2011). Global Urban Growth and the Geography of Water Availability, Quality, and Delivery. AMBIO 40, 437–446. https://doi.org/10.1007/s13280-011-0152-6

Sahu, R. K., & McLaughlin, D. B. (2021). The multi-scale dynamics of groundwater depletion. Water Resources Research, 57, e2020WR029402. https://doi.org/10.1029/2020WR029402

Scanlan, Melissa K. (2018). Droughts, Floods, and Scarcity on a Climate-Disrupted Planet: Understanding the Legal Challenges and Opportunities for Groundwater Sustainability. Virginia Environmental Law Journal, Vol. 37, No. 1, 2019, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=3312356

Shrestha, A., Roth D., & Joshi, D. (2018). Flows of change: dynamic water rights and water access in peri-urban Kathmandu. Ecology and Society, 23(2), 1-13. doi: https://doi.org/10.5751/ES-10085-230242

SAMA (2025). Aprovechamiento del estado de Guanajuato. Piezometría 2023. Secretaría del Agua y Medio Ambiente, Gobierno de Guanajuato.

SMAOT (2021). Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMOAT). El estado de Guanajuato frente al cambio climático [Infografía]. https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/cambio-climatico/img/adaptacioninfografia.png

UNESCO (2016). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). Informe de las Naciones sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

Ying Ouyang, Yongshan Wan, Wei Jin, Theodor D. Leininger, Gary Feng, Yuguo Han (2021). Impact of climate change on groundwater resource in a region with a fast depletion rate: the Mississippi Embayment. Journal of Water and Climate Change 1 September 2021; 12 (6): 2245–2255. doi: https://doi.org/10.2166/wcc.2021.326

ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE ORO CON COMPOSITOS SILICE-MAGNETITA (GMS-NX-FE)

Ma. Mercedes Salazar Hernández[1*], Víctor Emigdio Elizalde González[1], Carmen Salazar Hernández[2], Enrique Elorza Rodríguez[1], Mario Alberto Corona Arroyo[1] y Juan Manuel Mendoza Miranda[2]

[1]Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología,
[2]Instituto Politécnico Nacional - UPIIG
*merce@ugto.mx

RESUMEN

La recuperación de los diversos iones metálicos de los procesos de extracción hidrometalúrgicos ya sea a partir del mineral o del reciclaje de los metales, implican diversos procesos que permitan la recuperación selectiva del ion metálico de interés a partir de las soluciones ricas de lixiviación; en ese sentido el desarrollo de nuevos adsorbentes es un área de interés para estos procesos, un tipo de adsorbentes que se muestran cierto interés son los materiales magnéticos, que son recuperados después de la etapa de adsorción del ión metálico de interés por concentración magnética evitando así el uso de columnas de adsorción-desorción. El presente trabajo muestra la síntesis y caracterización de una familia de sílices amino funcionalizadas y modificadas con magnetitas denominada MS-Nx-Fe, donde x indica el número de grupos amino presentes en el grupo orgánico funcionalizante del material y toma los valores de 1,2 y 3, dichos materiales fueron caracterizados por FTIR, RMN CPMAS de ^{13}C y ^{29}Si y SEM-EDS. Se evaluó la capacidad de remoción de Au(III) en sistemas H_2O/HCl con concentraciones iniciales de oro de 50 a 500 mgL^{-1}, los tres materiales mostraron una capacidad de remoción del Au cuantitativa de arriba del 95% en todo el rango de concentración evaluada, el análisis de la cinética de adsorción mostró en todos los casos sistemas tendientes drásticamente al equilibrio, lo que demuestra la viabilidad del proceso de adsorción del $[AuCl_4]^-$ con las MSNx-Fe.

INTRODUCCIÓN

La industria minero-metalúrgica sigue siendo de gran importancia a nivel mundial, por ejemplo, las reservas mundiales de Au en el 2015 fueron estimadas en 56700 toneladas métricas que corresponden a una ganancia de 3380.06 billones de dólares; dichas reservas se distribuyen principalmente en países como Australia (16%), Rusia (14%), Sud África (11%), USA (5%), teniendo México el 3% de la reserva mundial del Au, que se estima en una producción de 83.46 billones de dólares, estas estadísticas muestran la importancia de esta industria a nivel mundial y nacional [1].

De acuerdo al informe anual 2023 de la CAMIMEX (Cámara Minera de México), el sector minero-metalúrgico en México se mantiene en continuo desarrollo permitiendo el abastecimiento de materias primas a más de 70 sectores productivos, lo que consolida a dicho sector como una de las industrias de mayor importancia en México, nuestro pais sigue siendo uno de los diez mayores productores de los Metales y minerales base en el mundo, lo que ha permitido que esta industria represente en el 2022 el 2.46 % del PIB nacional y el 8.63 % del PIB industrial del país, refrendando así su importancia para el desarrollo nacional [2]. La Figura 1, muestra la producción minero-metalúrgica desarrollada en el 2022, representando el oro el 30.6 % del valor de la producción global de este sector, si bien se tiene una producción importante en metales como cobre, plata, zinc, plomo y molibdeno entre otros, la industria del oro sigue siendo en México de gran importancia y aporte a la economía nacional.

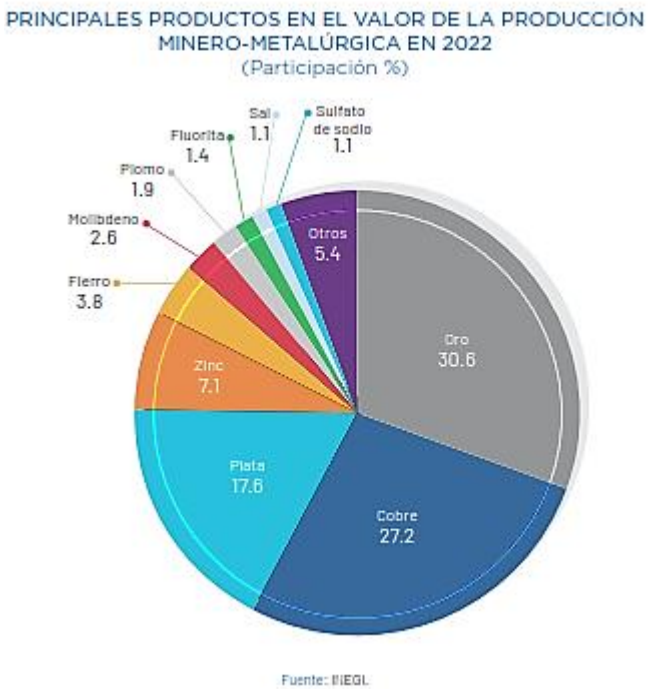


Figura 1. Principales productos en la producción minero-metalúrgica en el 2022 en México.

La extracción de oro y plata de sus minerales es convencionalmente realizado mediante el bien conocido proceso de cianuración, el cual consiste básicamente en colocar durante un periodo de tiempo determinado (hasta 72hrs) la mena en contacto con una disolución básica de NaCN en presencia de O_2, el cual puede provenir de un sistema simple de aireación. La disolución del metal puede expresarse de acuerdo con la Reacción 1 [3, 4]. Si bien se han reportado algunas alternativas de lixiviación al uso del cianuro [5-10], el proceso de cianuración sigue siendo la principal metodología para la extracción de estos metales, esto en función a sus altos rendimientos y costos, así como al hecho de que en la actualidad la presencia de una mayor cantidad de menas refractarias, hacen poco rentable el uso de otros lixiviantes [11].

$$2\,M + 4\,CN^- + \tfrac{1}{2}\,O_2 + H_2O \longrightarrow 2[M(CN)_2]^- + 2\,OH^- \quad M = Ag, Au \qquad \text{(Reacción 1)}$$

Por otra parte, industrialmente una de las metodologías más usada para la recuperación del oro de sus soluciones es la adsorción en carbón activado, proceso mejor conocido por sus siglas en inglés como CIL (*C*arbon *I*n *L*each) entre las ventajas que ofrece este proceso se encuentra el costo moderado del adsorbente así como la simplicidad del miso; cabe mencionar que esta metodología se sugiere industrialmente para la recuperación del Au en las soluciones de cianuración con concentraciones mayoritarias de este metal. En general este proceso consiste en dejar en contacto el adsorbente (carbón activado) con la solución de lixiviación, comúnmente, soluciones ricas de cianuración; dicho contacto puede realizarse en columnas o en tanques agitados, de los cuales el carbón es recuperado en cribas clasificadoras. La simplicidad de este proceso es lo que lo hace tan atractivo para la industria, sin embargo, la principal desventaja que este ofrece, es el desgaste del carbón en dichas cribas que producen partículas finas de carbón con valores metálicos adsorbidos, dichas partículas finas se pierden en la mayaría de los casos ocasionando una pérdida considerable de los valores en el proceso [12-14], por ejemplo la IAMGOLG's Essakane en Burkina Faso, ha reportado una formación de finos al mes de 23.5 ton que corresponden a una pérdida de 1938 g/ton de plata mensuales [12]. Para recuperar el metal de estos finos, en algunas plantas se emplean una

serie de circuitos de decantación y filtros-prensa que frecuentemente son difíciles de operar por el tamaño del fino de los sólidos y que encarecen el costo final de recuperación del metal.

En México, la formación de finos en los procesos de carbón en lixiviación (CIL) y carbón en columna (CIC) representan una pérdida considerable de los valores metálicos en los procesos de cianuración, muy específicamente en la Unidad Minero-Metalúrgica de Palmarejo, se tiene una formación de 5-6 ton diarias de finos que al mes corresponden a 180 ton de carbón, estos datos, muestran que esta problemática es común en la industria minero-metalúrgica de todo el mundo [14]. En este sentido, la búsqueda de alternativas que permitan eliminar la generación de finos de estos procesos es de interés en la metalurgia.

La recuperación magnética de Ag(I) en procesos hidrometalúrgicos ha sido propuesta como una alternativa al CIL [15]; se han reportado diversos adsorbentes magnéticos para la recuperación de diversos iones metálicos, no metálicos y compuestos orgánicos de sistemas acuosos como una alternativa ambiental, por ejemplo el uso de redes metálicas modificadas con magnetita y diversos agentes quelantes se han usado para la recuperación de Au, Pd, Pt, Pb, Cu, Zn. Arsenatos, cromatos y algunos compuestos orgánicos persistentes como el ciprofloxan [16-24]. Estos trabajos muestran el reciente interés del uso de procesos de recuperación magnética para la recuperación de valores en procesos hidrometlúrgicos y para el tratamiento de aguas.

Salazar y col. recientemente reportaron la recuperación magnética de Ag(I) con sílice mesoporosa tri-amino funcionalizada (MS-N_3-Fe) y modificada con magnetita de sistemas acuosos como una posible alternativa al uso del carbón activado en la industria minera [15], en este sentido la evaluación de la factible recuperación del Au(I) y Au(III) en sistemas acuosos es de interés con estos materiales. El presente proyecto evalúa el efecto del número de grupos aminos presentes en la recuperación de Au(III) en sistemas acuosos y su factible desorción mediante deposito electroquímico.

PARTE EXPERIMENTAL

I. Síntesis de Sílice Mesoporosa, mediante precursores de bajo costo [15]

La síntesis de la sílice mesoporosa, se realizará mediante la metodología reportada previamente por Salazar y col. [15], utilizando como precursor de la sílice al $Si(OH)_4$ obtenido a partir de silicato de sodio y una columna de intercambio DOWEX 50WX8-100.

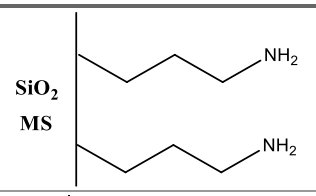
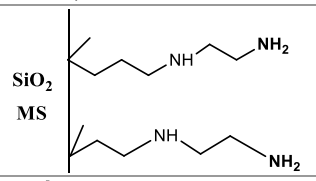
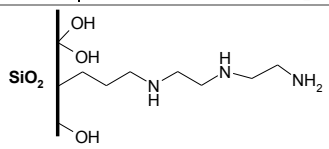
Se hacen pasar 100 mL de Silicato de sodio grado industrial al 25% en w a través de una columna de intercambio iónico DOWEX 50WX8-100 de 10 cm de diámetro y 30 cm de altura, se recolecta la fracción ácida a un pH 1-3 y se deja añejar por 24 h, una vez pasado dicho tiempo el $Si(OH)_4$ obtenido se mezcla con Pluronic-123 y se mantiene en calentamiento por 24 h a 75 °C; el sólido obtenido es filtrado, lavado y secado a 90°C para posteriormente calcinar la materia orgánica a 650°C por 2 h.

II. *Obtención de la GMS-Nx y la GMS-Nx-Fe_3O_4*

La obtención de sílice funcionalizadas con grupos poliamino (GMS-Nx) se realizará mediante técnicas de postsíntesis, utilizando un 25% en mol del precursor del grupo funcional con respecto a la sílice e hidróxido de amonio como catalizador de condensación. La Tabla 1, muestra las estructuras de los materiales sintetizados y los respectivos precursores de los diferentes grupos funcionales. La modificación de la sílice amino funcionalizada con magnetita se realizará con nanopartículas de magnetita obtenidas a partir de la precipitación de las sales de cloruro férrico y ferroso con NaOH. El anclaje de la magnetita en el material se propone se realice mediante la interacción de los grupos funcionales (amino) con el Fe de la magnetita [15].

La caracterización de los materiales se realizará mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, RMN CPMAS ^{13}C y ^{29}Si y microscopia electrónica de barrido (MEB)

Tabla 1. Precursores utilizados para la obtención de GMS-Nx-Fe_3O_4

Material	Precursores	Estructura
GMS-N-Fe	3-aminopropiltrimetoxisilano	
GMS-N_2-Fe	3-(diaminopropil)metildimetoxisilano	
GMS-N_3-Fe	N^1-(3-trimetóxisililpropil)dietilenamina	

III. *Estudios de Adsorción de Au(III) con las sílices funcionalizadas con soluciones sintéticas de $[Au(Cl)_4]^-$*

Los estudios de adsorción de Au se evaluarán con la cinética de adsorción del oro colocando 0.1g del material con 20 mL de una disolución de metal a las diversas concentraciones en estudio (20. 25, 50 y 100 ppm) por tiempos de contacto de 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos y se determinará la concentración residual del metal en la disolución mediante absorción atómica. Los datos cinéticos se estudiarán mediante los modelos cinéticos de primer, segundo y seudo-orden; además de incluir el modelo de difusión.

La capacidad de adsorción de la plata fue determinada mediante la ecuación 1, en donde qt es la carga al tiempo t, Co y Ct, son las concentraciones de plata en la disolución iniciales y al tiempo t en mgL-1, V el volumen de muestra utilizada (L) y m la masa de material utilizado en g.

$$q_t = \frac{(C_o - C_t)V}{m} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

La caracterización electroquímica de los materiales y de la recuperación del oro por depósito electroquímico, se realizará en un potenciostato-galvanostato Gamry con Interface 1010T.

RESULTADOS

Síntesis y Caracterización de la GMS-Nx-Fe

La Figura 1, muestra la caracterización por FTIR de las sílices modificadas con los diversos grupos amino evaluados, así como los materiales modificados con magnetita. La presencia de la materia orgánica se observa en el rango de los 3000-2500 cm^{-1} y de 1600-1200cm^{-1}, en todos los casos para las muestras modificadas con la magnetita, se observa un desplazamiento de la vibración de δ C-N que sugiere la interacción N→Fe en los materiales. La Caracterización por resonancia magnética nuclear de ^{13}C (RMN CPMAS ^{13}C) en estado sólido de las sílices amino funcionalizadas, se muestra en la Figura 2, la señal Si-C en las muestras se observó a 9.12, -2.94 y 8.39 ppm para la MS-N, MS-N_2 y MS-N_3 respectivamente. La caracterización por RMN CPMAS ^{29}Si, se muestra en la Figura 3, en todos los casos, se observan los grupos T del Si-C de las muestras modificadas a -67.58, -19.97

y -67.28 ppm para la MS-N, MS-N_2 y MS-N_3 respectivamente, todos los materiales mostraron la presencia de grupos Q^2 (-101 ppm) y Q^4 (-110 a -111 ppm) lo que indica una red de sílice hidratada.

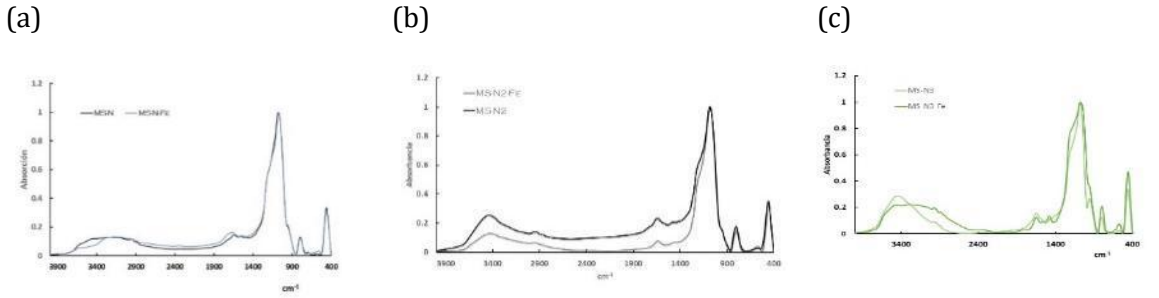


Figura 2. Espectros comparativos de FTIR (a) GMS-N y GMS-N-Fe; (b) GMS-N_2 y GMS-N_2-Fe y (c) GMS-N_3 y GMS-N_3-Fe

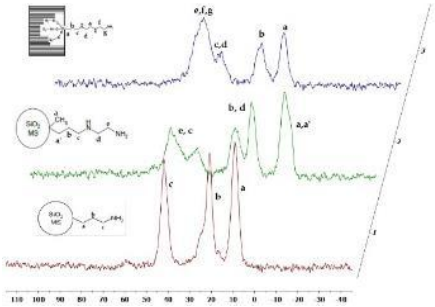


Figura 3. RMN CPMAS ^{13}C de: GMS-N, GMS-N_2 y GMS-N_3

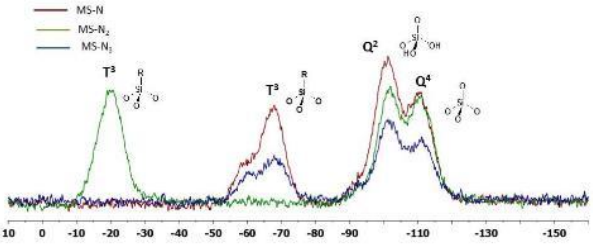


Figura 4. RMN CPMAS ^{29}Si de: GMS-N, GMS-N_2 y GMS-N_3

La MEB-EDS de los materiales modificados con magnetita, se muestran en la Figura 4, en donde se puede observar una distribución del hierro no totalmente homogénea en el material y asociada a la sílica.

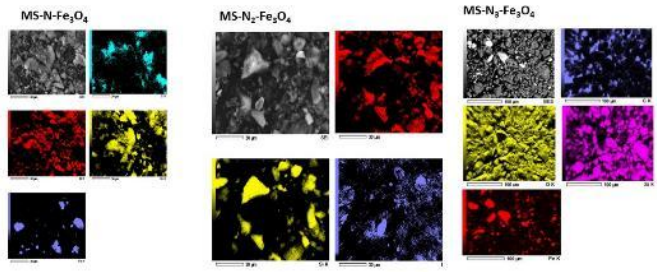


Figura 5. MEB-EDS de los materiales modificados con magnetita: GMS-N, GMS-N_2 y GMS-N_3

Estudios de Adsorción de Au(III)

La Figura 5, muestra las isotermas de adsorción de Au(III) en un rango de concentración de 50 a 500mgL^{-1}, para los materiales evaluados modificados con 1, 2 y tres grupos aminos, no se observó diferencia significativa en su capacidad de adsorción, en todos los casos se observó una remoción cuantitativa arriba del 90% (Figura 6), así como el equilibro de la adsorción a partir de los 20 minutos.

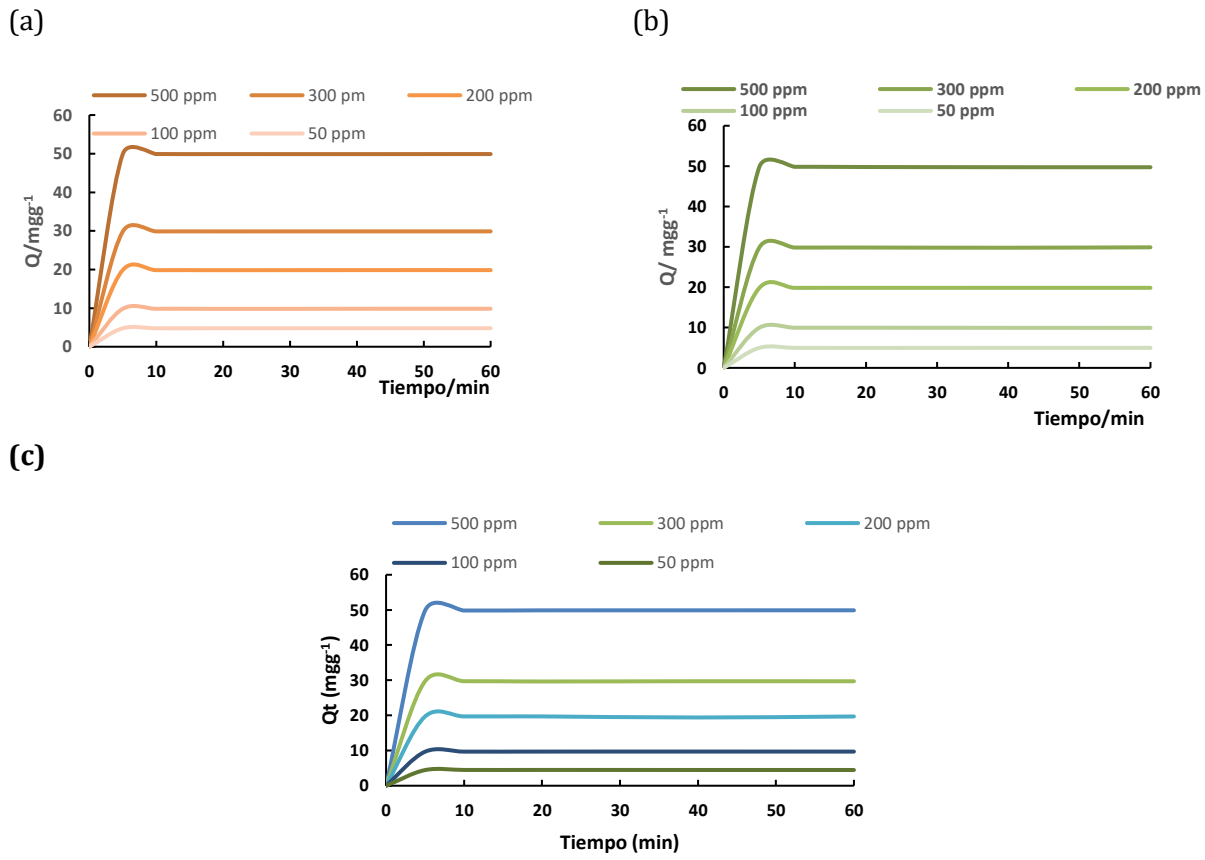


Figura 6. Isotermas de Adsorción de Au(III) con (a) GMS-N-Fe; (b) GMS-N_2-Fe y (c) GMS-N_3-Fe.

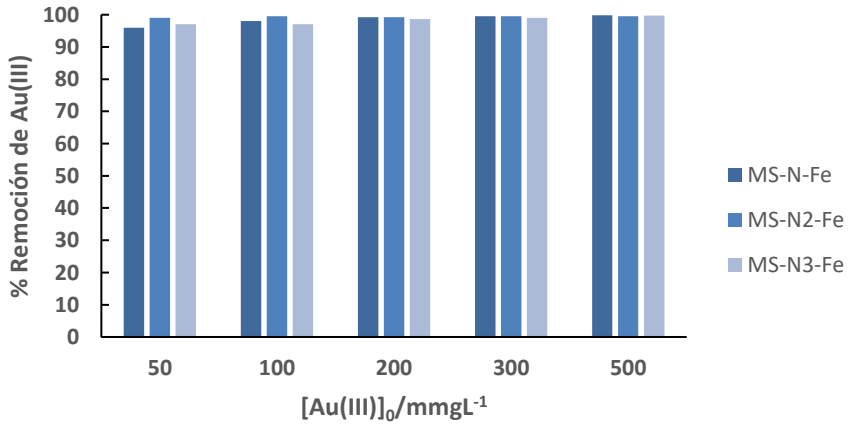


Figura 7. Capacidad de Adsorción de Au(III) con GMS-N-Fe, GMS-N_2-Fe y GMS-N_3-Fe.

El modelo cinético de adsorción de segundo seudo orden (PSO, Ecuación 2), contempla la evaluación del coeficiente Rw que es un parámetro que permite fácilmente identificar la tendencia al equilibrio del sistema y la viabilidad del proceso de adsorción. La ecuación 3 muestra la definición de dicho coeficiente el cual es dependiente de la carga al equilibrio y la constante cinética del modelo PSO, así como de un tiempo de referencia suficientemente largo en el cual el sistema ya se encuentra en el equilibrio [16].

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \qquad \text{Ecuación 2}$$

$$R_w = \frac{1}{1 + Q_e K_2 t_{ref}} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde:
Qe, es la carga al equilibrio en mgg^{-1}, determinada a partir del modelo PSO y tref, es un tiempo de referencia suficientemente largo que se selecciona dependiendo de la cinética en estudio.

El parámetro Rw del sistema, definirá el equilibrio presente en el proceso de adsorción, de tal forma que si Rw=1, para una curva cinética lineal, donde la magnitud del K2Qetref<<<1, implica que el proceso de adsorción no se lleva a cabo favorablemente, esto puede deberse a diversos factores como: 1) la K_2 es muy pequeña, lo que desfavorece el proceso de adsorción, 2) la Qe es muy pequeña y 3) el tref es muy largo. Estos factores indican un proceso de adsorción no favorable y que el sistema llega pobremente al equilibrio. La curvatura de la curva de adsorción suele aumentar cuando la Rw disminuye y este es un indicativo de la aproximación del sistema al equilibrio y de la viabilidad del proceso de adsorción [15, 16]. La Tabla 2 resume las características de las curvas de adsorción en función a la magnitud del Rw de un sistema y su aproximación al equilibrio, por lo que este parámetro nos permite evaluar fácilmente la viabilidad del proceso de adsorción que se estudie.

Tabla 2. Características de las curvas de adsorción para un sistema de PSO y la aproximación del factor del equilibrio R_W [16]

Rw	Tipo de curva cinética	Aproximación al equilibrio	Zona
1	Lineal	No se aproxima al equilibrio	0
1>Rw<0.1	Curvatura Leve	Aproxima al equilibrio	I
0.1>Rw>0.01	Amplia curvatura	Buena aproximación al equilibrio	II
Rw<0.01	Seudo rectangular	Drásticamente aproximada al equilibrio	III

La Tabla 3, resume los parámetros cinéticos observados de los datos experimentales de cada sistema evaluado al modelo PSO, en todos los casos se observó un buen ajuste al modelo. El análisis de la Rw, mostró sistemas tendientes drásticamente al equilibrio, lo que indica que el proceso de adsorción de Au(III) en los materiales MS-Nx-Fe es favorable, por otro lado la capacidad de adsorción que mostraron los materiales es cuantitativa (>90%; Figura 6) y no se aprecia un claro efecto de la capacidad de adsorción del material con el número de grupos aminos en el mismo. Sin embargo la constante de velocidad K_2 del sistema si muestra una dependencia con el número de grupos aminos presentes en el material, se observa que para los materiales poliaminados con 2 y 3 grupos amino (MS-N_2-Fe y MS-N_3-Fe), la constante de velocidad tiende a disminuir con el aumento de la concentración inicial de oro el sistema, esta tendencia sugiere que el proceso de adsorción es gobernado tanto por la difusión externa como intra-particular, siendo esta última la que gobierna el proceso cinético a altas concentraciones. Para el caso del material mono aminado MS-N-Fe la constante de velocidad aumenta de concentraciones bajas a moderadas (50-200 mgL^{-1}) y disminuye de concentraciones moderadas a altas (200-500 mgL^{-1}), esta tendencia sugiere que la difusión intra-particular podría ser un factor más remarcable con el aumento de la concentración inicial del ión que en el caso de los materiales poliaminados. El parámetro K_2Qe, que refleja la capacidad de trabajo del material y está relacionado con el $t_{1/2}$ del sistema ($t_{1/2}=1/K_2Qe$), esto implica que a mayor K_2Qe, el sistema es más rápido cinéticamente o bien alcanza a menor tiempo el tiempo de vida media. En

ese sentido a mayor K_2Qe el sistema será más rápido; en ese sentido se observa claramente que los sistemas poli-aminados (MS-N_2-Fe y MS-N_3-Fe) son cinéticamente más rápidos el sistema Ms-N-Fe, esto posiblemente por la presencia de un mayor número de grupos amino que representan sitios activos.

Tabla 3. Parámetros cinéticos del modelo PSO y la aproximación del factor del equilibrio R_W [16]

MS-N-Fe							
$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	**Qe^{cal}/mgg^{-1}**	**Qe^{exp}/ mgg^{-1}**	**K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$**	**Rw**	**K_2Qe/ min^{-1}**	**$t_{1/2}$/min**	**Observación al sistema**
50	4.80	4.8	0.426	0.023	2.0471	0.488	Aproxima al equilibrio
100	9.83	9.8	1.045	0.005	10.272	0.0973	Drásticamente aproximada al equilibrio
200	19.84	19.8	25.401	9.91E-05	504	0.00197	Drásticamente aproximada al equilibrio
300	29.85	29.9	11.22	0.00015	335	0.00298	Drásticamente aproximada al equilibrio
500	50	49.8	20	4.99E-05	1000	0.001	Drásticamente aproximada al equilibrio
MS-N_2-Fe							
$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	**Qe^{cal}/mgg^{-1}**	**Qe^{exp}/ mgg^{-1}**	**K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$**	**Rw**	**K_2Qe/ min^{-1}**	**$t_{1/2}$/min**	**Observación al sistema**
50	4.962	4.95	9.228	0.0011	45.795	0.0218	Drásticamente aproximada al equilibrio
100	9.920	9.94	3.277	0.0015	32.516	0.0307	Drásticamente aproximada al equilibrio
200	19.841	19.8	12.7008	0.00019	252	0.00396	Drásticamente aproximada al equilibrio
300	29.850	29.8	1.8704	0.00089	55.833	0.0179	Drásticamente aproximada al equilibrio
500	49.751	49.8	1.347	0.00074	67	0.01492	Drásticamente aproximada al equilibrio
MS-N_3-Fe							
$[Au(III)]_0$/ mgL^{-1}	**Qe^{cal}/mgg^{-1}**	**Qe^{exp}/ mgg^{-1}**	**K_2/ $gmg^{-1}min^{-1}$**	**Rw**	**K_2Qe/ min^{-1}**	**$t_{1/2}$/min**	**Observación al sistema**
50	4.4742	4.48	20.8134	0.00053662	93.125	0.01074	Drásticamente aproximada al equilibrio
100	9.708	9.7	6.631	0.0007761	64.375	0.01553	Drásticamente aproximada al equilibrio

200	19.607	19.7	8.67	0.00029403	170	0.00588	Drásticamente aproximada al equilibrio
300	29.673	29.7	5.678	0.00029665	168.5	0.00593	Drásticamente aproximada al equilibrio
500	50	49.86	2	0.00049975	100	0.01	Drásticamente aproximada al equilibrio

La caracterización electroquímica de la recuperación por electro-deposito del oro adsorbido se realizó mediante voltamperometría cíclica, inicialmente se evaluó la voltamperometría cíclica de la magnetita (Fe_3O_4), que se muestra en la Figura 7, en donde no se observa ninguna corriente de depósito, solo se observa la transferencia de electrones reversible del Fe^{3+}/Fe^{2+}, lo que podría garantizar la nula intervención de este componente del material en el proceso de recuperación del Au(III) adsorbido en la GMS-N_3-Fe_3O_4.

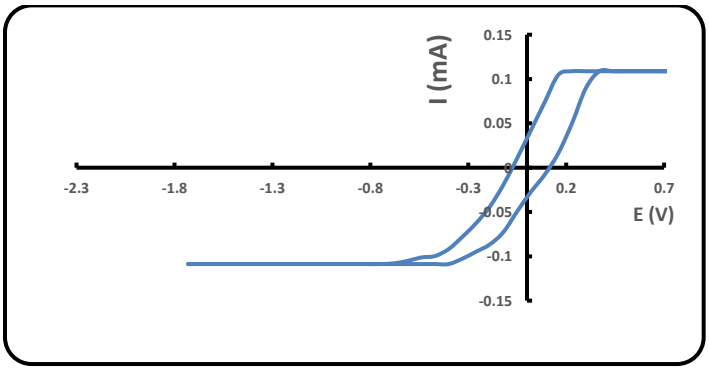


Figura 8. Voltamperometría cíclica de la Fe_3O_4 en una solución de NaCl 1 M.

La Figura 8, muestra la caracterización electroquímica del $[AuCl_4]^-$ en una solución electrolítica de NaCl 1 M, en donde se observa 6 procesos, Pico 1 a 300 mV que corresponde a la adsorción de la especie en el electrodo (grafíto), posteriormente a -440 mV se muestra la corriente de depósito (Pico 2) para posteriormente observar el cruce de depósito a -580mV (3), a -400 mV se observa un pico de desorción (Pcico 4) observándose a -402 y 560 mV los pasos de oxidación del Au(I) y A(III) en el sistema (Pico 5 y 6). Elias y col. reportaron el depósito de oro en sistemas de $K[Au(CN)_2]/KH_2PO_4$ en un intervalo de -300 a – 600 mV [17], reportando picos similares a los observados en el voltarograma obtenido en el sistema $[AuCl_4]^-$/NaCl. Debe mencionarse que el intervalo de estudio reportado por diversos autores para la recuperación electroquímica por depósito de diversos procesos hidrometalúrgicos para el Au está comprendido dentro de los 300 a -600 mV [17-21].

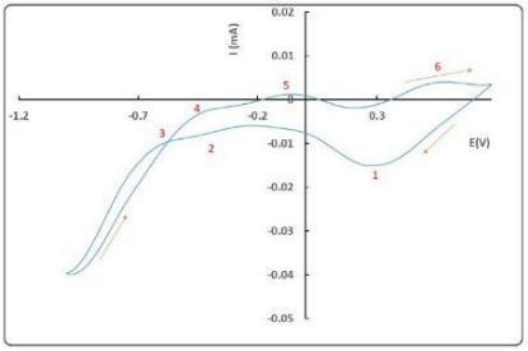


Figura 9. Voltamperometría cíclica de la $[AuCl_4]^-$ en una solución de NaCl 1 M.

La caracterización electroquímica de la GMS-N_3-Fe_3O_4-Au con el oro adsorbido se muestra en la Figura 9, en este voltarograma, se observan pasos similares a los observados en la caracterización del depósito del $[AuCl_4]^-$; un primer paso de adsorción del material en el electrodo a -700 mV, por debajo al observado en la solución del tetracoluroauriato (III), la formación del depósito de oro sobre el electrodo de trabajo evidenciado con el cruce a -490 mV (Figura 9b) y la presencia del oro en la disolución a -0.140mV.

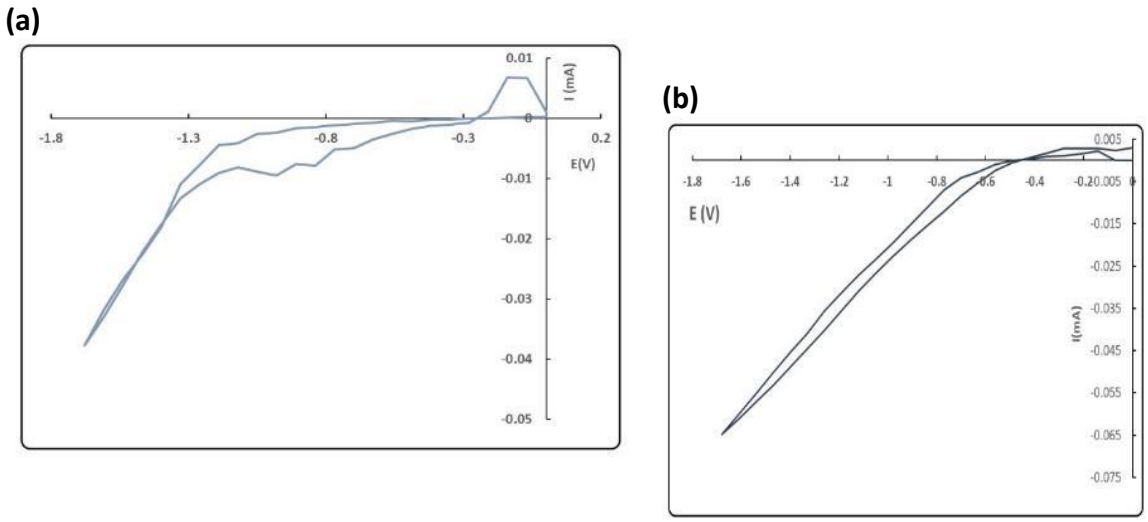


Figura 10. Voltamperometría cíclica de la GMS-N_3-Fe_3O_4-Au en una solución de NaCl 1 M.

La caracterización del depósito de Au obtenido mediante microscopia óptica, se muestra en la Figura 10, donde se observa un depósito rugoso con la formación de partículas esféricas. En la Figura 10 b, se muestra la SEM y el EDS del depósito del Au obtenido donde se observan partículas esféricas uniformes de tamaño aproximado a los 200 nm.

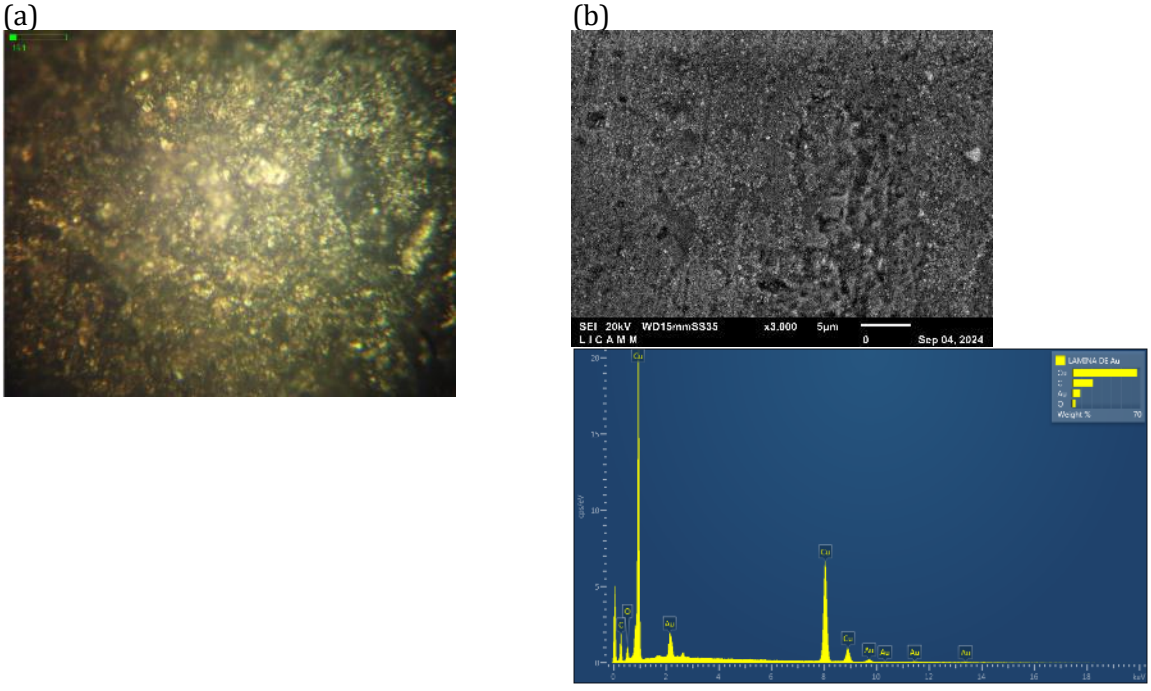


Figura 11. (a) Metalografía del depósito de Au obtenido a 40x con filtro y (b) SEM-EDS del depósito de Au.

CONCLUSIONES

Se sintetizo y caracterizó una serie de sílices mesoporosas amino-funcionalizadas y modificadas con magnetita, con 1, 2 y 3 grupos amino denominados GMS-N-Fe, GMS-N_2-Fe y GMS-N_3-Fe respectivamente; la caracterización por FTIR, RMS CPMAS de ^{13}C y ^{29}Si, garantizan la presencia del grupo funcional en cada material, mientras que la SEM-EDS muestra la presencia de la Fe_3O_4 en el material lo que lo potencializa a su uso en concentraciones magnéticas. Los tres materiales mostraron una capacidad de remoción de Au(III) cuantitativa por encima del 90% en un rango de concentración de 50-500 mgL^{-1}, los datos experimentales se ajustaron al modelo cinético de seudo segundo orden (PSO), mostrando en todos los casos sistemas tendientes drásticamente al equilibrio, lo que muestra un proceso de adsorción favorable, el análisis de los parámetros cinéticos del sistema muestra una mayor rapidez en la adsorción de Au(III) con el aumento del número de grupos amino presentes en el material, lo que sugiere que los grupos amino son sitios activos para el proceso de adsorción. Los estudios por voltamperometría cíclica de la caracterización electroquímica de la GMS-N_3-Fe_3O_4, permitieron evidenciar la posible recuperación del oro adsorbido en el material mediante depósito electroquímico, la caracterización por microscopía óptica mostró la formación de un depósito granular esférico en el electrodo con partículas de tamaño uniforme de 200 nm.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Asamoah, R.K. “Specific Refractory Gold Flotation and Bio-Oxidation Products: Research Overview” *Minerals* (2021), 11: 93. https://doi.org/10.3390/min11010093

[2] Informe Anual de la CAMIMEX; https://www.camimex.org.mx/

[3] Deventer, J. S., Teague. A. J., Swaminathan C. “Factors Affecting the Flotation of free gold in the presence of refractary Gold”. *Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress*. (2000), B8a, pp. 24-32.

[4] Habashi, F. (1967) “Kinetics and Mechanism of Gold and Silver Dissolution in Cyanide Solutions”. Montana, Department of Metallurgy, Montana College of Mineral Science and Technology, pp. 42.

[5] Yan Zhang, Mingyao Cui, Jianguo Wang, Xiaoliang Liu, Xianjun Lyu, “A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants” *Minerals Engineering* (2022) 176: 107336. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336.

[6] Gonzalo Larrabure, Juan Carlos F. Rodríguez-Reyes, “A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process”, *Minerals Engineering* (2021) 173: 107194. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194.

[7] Beyuo, M., Abaka-Wood, G. B., Asamoah, R. K., Kabenlah A and Amankwah, R. K.. “A Comparative Study of Sodium Cyanide and JinchanTM Gold Leaching Reagents: A Case Study at Goldfields Ghana Limitedll” *4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference* (2016), pp. MR 195-199.

[8] Pelin Altinkaya, Zulin Wang, Ivan Korolev, Joseph Hamuyuni, Mika Haapalainen, Eero Kolehmainen, Kirsi Yliniemi, Mari Lundstrom, “Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media” *Minerals Engineering* (2020) 158: 106610. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106610

[9] Qi Meng, Xiaohui Yan, Guichun Li, “Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery” *Journal of Cleaner Production* (2021) 323: 129115. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115

[10] Yan Zhang, Bin Xu, Yunquan Zheng, Qian Li, Yongbin Yang, Xiaoliang Liu, Tao Jiang, Xianjun Lyu, “Hexaamminecobalt(III) catalyzed thiosulfate leaching of gold from a concentrate calcine and gold recovery from its pregnant leach solution via resin adsorption” *Minerals Engineering* (2021) 171: 107079. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107079.

[11] Gabriel Motta, Michal Polcyn, Elijah Saragosa “Refractory gold ores: Challenges and opportunities for a key source of growth” March 2021, *McKinsey.com*.

[12] Aubé V., Bellec S., Barakate M., Eddahabi M. R., Chaik Y., Deshaies M., Girard J. “What to do with CIL carbon fines? IAMGOLD innovative solution” *Proceeding The conference of metallurgists hosting World Gold & Nickel Cobalt* (2017).

[13] Vuuren, C. P. J. V., C. P. Snyman, et al.. "Gold Losses from Cyanide Solutions Part II: The Influence of the Carbonaceous materials Present in the Shale Material." *Minerals Engineering* (2000) 13(10-11): 1177-1181

[14] Engineering, P. (2014). Proyecto Mascota Evaluación de Planta ADR y Laboratorio Metalúrgico. Chihuahua, Chihuahua, Agnico Eagle México S.A. de C.V.: 31

[15] Salazar-Hernández, M., Salazar-Hernández, C., Elorza Rodríguez, E, Mendoza-Miranda, J.M., Puy-Alquiza M.J., Miranda-Aviles R., Rodríguez-Rodríguez C. “Using of Green Silica Amine-Fe_3O_4 Modified from Rrecovery Ag(I) on Aqueous System”. Silicon(2024) 16(4): 1509-1524. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02779-8.

[16] Feng-Chin Wu, Ru-Ling Tseng, Shang-Chieh Huang, Ruey-Shin Juang “Characteristics of pseudo-second-order kinetic model for liquid-phase adsorption: Amini-review” Chemical Engineering Journal (2009) 151: 1-9.

[23] Jamil Elias, Magdalena Gizowska, Pierre Brodard, Roland Widmer, Yoram deHazan, Thomas Graule, Johann Michler, Laetitia Philippe "Ele“trodepostion of gold thin films with controlled morphologies and their applications in electrocatalysis and SERS” Nanotechnology (2012) 23: 2555705. DOI 10.1088/0957-4484/23/25/255705

[24] Jieun Son, Jong-In Han, Yeongran Hong, Cafer T. Yavuz. “Energy-efficient electrochemical recovery of gold enabled by a thiourea-based electrolyte system” Journal of Environmental Chemical Engineering (2023) 11(5): 111120. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111120.

[25] Pelin Altinkaya, Zulin Wang, Ivan Korolev, Joseph Humuyuni, Mika Haapalainen, Eero Kolehmainen, Kirsi Yliniemi, Mari Lundtröm “Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media” Minerals Enginerring (2020) 158: 106610. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106610.

[26] Shanshan Li, Qin Jiang, Li Ge, Xiaoyu Yang, Hao Wang, Sujian Wu, Haodong Song, Zhiqing Zhang, Guanghui Shen, Xiaoyan Hou, Qiang Cui, “One-step electrodeposition of a novel gold nanoparticles/MoS2-graphene nanocomposite based electrochemical sensor for simultaneous determination of tert-butylhydroquinone and butylated hydroxyanisole” Microchemical Journal (2024) 204: 111046. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111046.

[27] Kozaderov O.A., Vvedenskii A. V. “Voltamperometry of selective dissolution of Ag-Au alloys under conditions of solid phase-liquid phase mass transfer” Protection of Metals and Physical Chemistry of Surface (2013) 49(6): 724-733.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INTERFAZ DE USUARIO INTERACTIVA PARA EL CONTROL DE BRAZO ROBÓTICO DIDÁCTICO CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD

Lucia Elena Rosales Morales, Karen Joselin Sandoval Martinez, José Juan Vázquez Martínez
Humberto Rodríguez Bravo y Gerardo Trejo Caballero

Tecnológico Nacional de México, TecNM / ITS de Irapuato.
gerardo.tc@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

El aprendizaje de la robótica en edades tempranas es clave para el desarrollo de habilidades en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM). En este trabajo, se presenta el diseño e implementación de una interfaz de usuario interactiva para el control de un brazo robótico didáctico con seis grados de libertad orientada a niños de educación básica. La interfaz busca facilitar la interacción con el robot de forma intuitiva y accesible, promoviendo el interés por la robótica y la automatización desde una edad temprana, con un enfoque humanista que fomenta la inclusión de niños con capacidades especiales o diferentes. Para garantizar una experiencia de aprendizaje adaptativa e inclusiva, la interfaz ofrece cuatro modos de operación: i) basado en programación por bloques que permite a los niños programar movimiento del brazo robótico mediante bloques gráficos facilitando el aprendizaje sin necesidad de conocimientos previos en programación, ii) basado en un sistema de visión artificial que emplea una cámara para reconocer objetos y guiar el brazo robótico en tareas como clasificación y manipulación de elementos, iii) basado en control manual con controles deslizantes y botones que permiten mover cada articulación del robot en tiempo real y iv) asado en comandos de voz que permiten controlar el brazo robótico mediante instrucciones verbales, mejorando la accesibilidad para niños con dificultades motoras o visuales.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la educación en México a nivel básica en el artículo “La educación secundaria en México: al filo de su reforma” de la revista Iberoamericana, se explica que se tiene un mayor desafío en la transformación mundial debido que no se ha logrado superar las condiciones para atender a los sectores sociales medios y altos, es decir, no lograr las condiciones necesarias para brindar una educación de calidad a los sectores sociales, mientras tanto, otros países han avanzado en sus sistemas educativos para actualizarlos en ser más inclusivos y efectivos. En el estado de Guanajuato ocupa el tercer lugar en deserción escolar, en consecuencia, a diversos factores que afecta el proceso educativo y contribuyen al abandono escolar. Entre una de las principales causas destaca es la falta de recursos didácticos, innovadores y motivacionales que mantengan el interés de los estudiantes, generando un desinterés o problemas de concentración, en áreas como ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas, teniendo como consecuencia límite de oportunidades futuras de los estudiantes en un mundo cada vez más tecnológico y competitivo.

El presente proyecto tiene como objetivo principal el diseño e implementación de una interfaz intuitiva y de fácil manipulación, destinada al control de un brazo robótico equipado con tecnología audiovisual enfocado en proporcionar una experiencia educativa práctica y significativa que permita a los estudiantes aplicar conceptos teóricos en un contexto real. Además, este recurso didáctico tiene como finalidad orientar a los estudiantes en su proceso de toma de decisiones respecto a su futuro académico y profesional, al exponerlos a las áreas STEM de manera temprana y atractiva, se busca no sólo despertar su interés, sino también ofrecerles una visión clara y fundamentada de las oportunidades que estas disciplinas pueden ofrecer, ayudándolos a evitar dudas o desinterés en dichas áreas. Anticipándose que este proyecto mejore el proceso educativo, contribuir al desarrollo de los estudiantes al enfrentar desafíos en un futuro y fortalecer la calidad y pertinencia del sistema educativo.

MARCO TEÓRICO

Programación

En el desarrollo del presente trabajo se hizo uso de software especializado (Qt Desinger, Python, Thonny ejecutados en Raspberry Pi 4) para la implementación de lenguajes de programación, con el objetivo de abordar y comprender los elementos fundamentales que permiten su correcto funcionamiento. Incorporado recursos didácticos que favorecen el aprendizaje y la asimilación de los conceptos teóricos, permitiendo una aplicación práctica más eficiente y significativa del contenido.

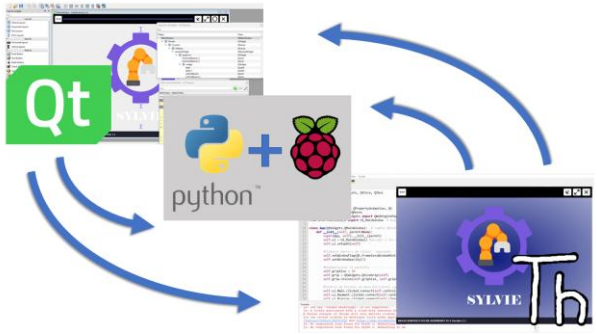


Figura 1. Software.

RASPBERRY PI.

Es una placa de microordenador que dispone de una amplia gama de accesorios y que puede realizar actividades más comunes de un ordenador en pequeñas dimensiones y basado en un hardware libre. La Raspberry Pi se ha introducido para la enseñanza de informática en escuelas, electrónica y el desarrollo de pequeños prototipos.

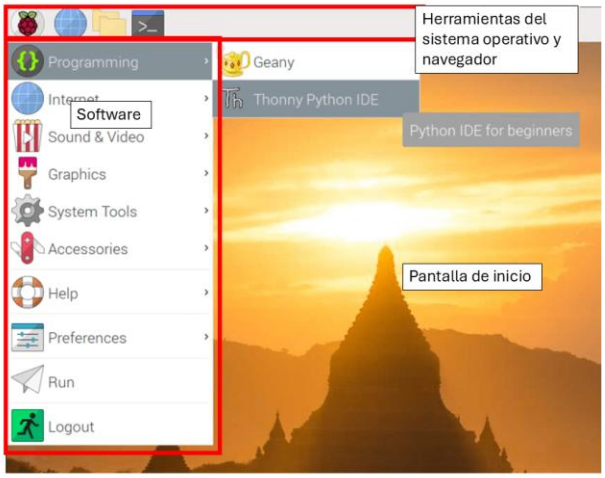


Figura 2. Entorno de Raspberry Pi

PYTHON.

Es uno de los lenguajes de programación más usados debido a su amplia aplicación, facilidad de uso y disponibilidad de recursos, como en crear sitios web, software, automatización de tareas y realizar análisis de datos. Además, es compatible con diferentes de sistemas operativos.

QT DESIGNER

Es una herramienta Qt para el diseño y creación de interfaces gráficas de usuario (GUI) con Qt Widgets, puede personalizar sus ventanas o diálogos, puede asignar fácilmente comportamiento a elementos.

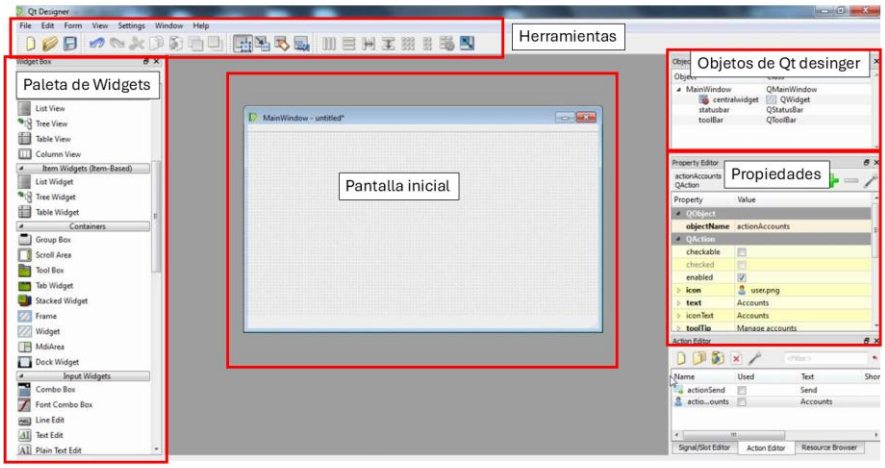


Figura 3. Entorno de QtDesigner.

THONNY

Es un entorno de desarrollo integrado en Python el cual puede ejecutarse en muchos sistemas operativos y compatible con Raspberry Pi.

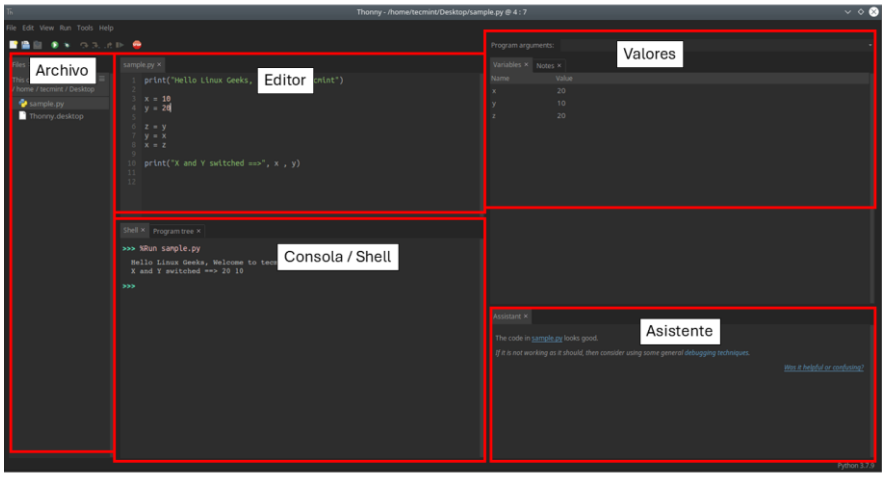


Figura 4. Entorno de Thonny.

Procesamiento digital imágenes

BINARIZACIÓN

La binarización de una imagen consiste en convertir la imagen digital en una imagen en blanco y negro, donde los pixeles se clasifican como blancos o negros según el umbral establecido.

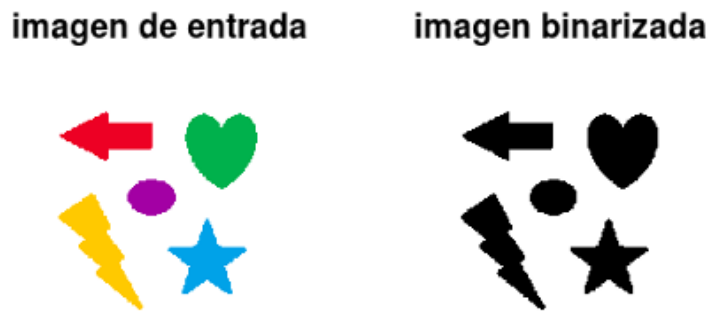


Figura 5. Binarización.

REGIONES

Este término hace referencia a áreas específicas o partes de una imagen que son de interés para algún tipo de análisis. Otra manera de definirlo es que estas son un conjunto de píxeles que tienen el mismo valor y están juntos uno del otro.

RETROILUMINACIÓN

Es una técnica en la que una fuente de luz se coloca detrás de un objeto o una muestra para iluminar desde atrás. Esta técnica se utiliza para resaltar características específicas del objeto que de otro modo no podrían ser visibles o tener dificultades para distinguirlas en condiciones de iluminación frontal. Un ejemplo de ello es la Figura 7.

UMBRALIZACIÓN

Es una función fundamental en el procesamiento de imágenes y visión por computadora que se utiliza para convertir una imagen en escala de grises en una imagen binaria, cada pixel se asigna a uno de dos valores posibles ya sea blanco o negro dependiendo de si su valor de intensidad está por encima o por debajo de un umbral determinado.

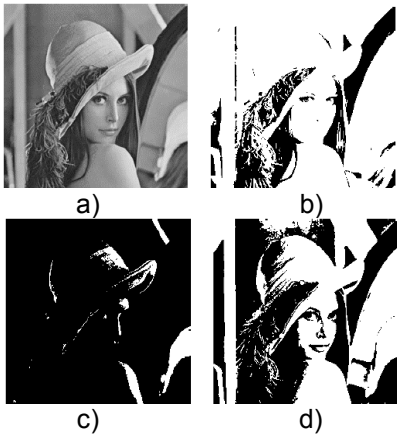


Figura 6. a) escala de grises; b) umbral bajo; c) umbral alto; d) umbral intermedio

METODOLOGÍA

La estructura de este proyecto está conformada de la siguiente manera Fig. Iniciando con la pantalla de inicio dando la bienvenida a la interfaz de sylvie con su menú deslizante que se puede navegar a los diferentes menús: secundaria, preparatoria y ayuda.

Secundaria. En esta sección contiene más elementos debido que introduce de una forma didáctica y clara las actividades que es capaz de hacer la interfaz, con el objetivo de motivar a las generaciones

que están a punto de escoger alguna rama a que elegir y otorgando experiencia en ese ámbito, acercándolos más a la tecnología e ingeniería.

Preparatoria. Pueden hacer uso del manejo del brazo robótico de manera como programación por bloques. Mediante botones hace un listado de las actividades a realizar así mismo ejecutándolas en el orden que se haya puesto, para que el brazo ejecute una determinada acción.

Ayuda. Se explica de manera clara posibles problemas, recomendaciones o preguntas comunes que se pueden tener sobre la interfaz.

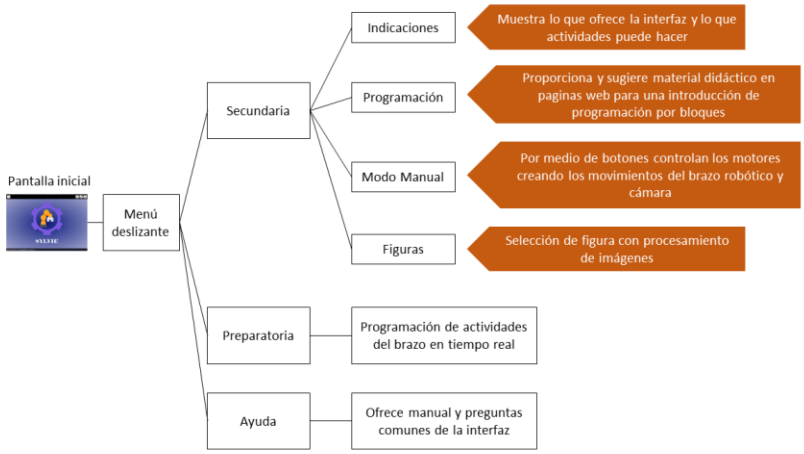


Figura 7. Componentes de la interfaz.

Después, el menú deslizante se divide por botones que nos enviará a las ventanas correspondientes: Inicio, secundaria, preparatoria, ayuda, compartir y salir.

Para la detección de figuras geométricas se definieron las características físicas de las figuras para su detección, esto fue fundamental para establecer la manera ideal en que se realizaría la identificación. Para realizar la detección de contornos era necesario que las siluetas de la imagen estuvieran correctamente definidas para facilitar el procesamiento, por lo tanto, se optó por utilizar la retroiluminación, la fuente de luz al estar ubicada detrás de los objetos resalta la forma de y ocultando detalles no relevantes para el procesamiento.

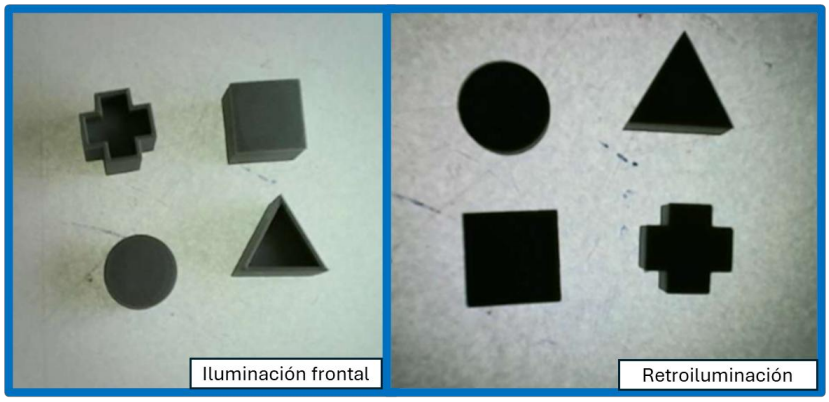


Figura 8. Iluminación.

Cada fotograma de la cámara pasó por 5 filtros descritos por la Tabla 1:

Tabla 1. Filtros utilizados en la cámara.

Desenfoque Gaussiano	Un desenfoque para reducir el ruido visual, para ayudar a que se evite la detección de contornos innecesarios.
Escala de Grises	La imagen desenfocada se convierte a una versión en blanco y negro eliminando la información de color. Esto permite enfocar únicamente las formas y estructuras presentes.
Detección de bordes (Canny)	Se identifican los bordes más importantes de los objetos con el fin de delimitar las figuras y resaltar sus contornos principales.
Dilatación	Los contornos detectados se hacen más gruesos y más continuas las líneas, mejorando la claridad de las figuras y facilitando su reconocimiento, aún si se presentan cortes.
Identificación de contornos	Los bordes al estar definidos se analizan para identificar las figuras geométricas esta clasificación dependerá del número de puntos que se detecta en cada forma.

RESULTADOS

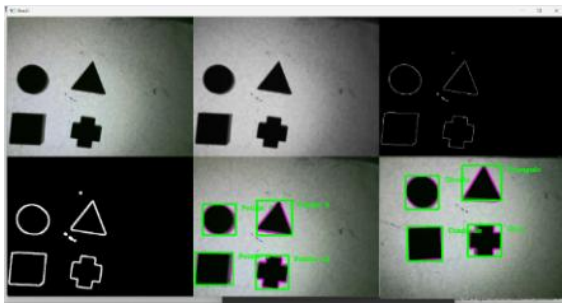
Actualmente se ha logrado que la interfaz sea funcional y amigable para el usuario, permite el acceso a los módulos para controlar el brazo. Por el momento el diseño visual, la navegación entre menús y el módulo de detección de figuras está completado siendo este un avance relevante en el desarrollo del sistema.



a)



b)



c)

Figura 9. a) Página principal, b) Menú deslizante, c) Detección de figuras geométricas

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta interfaz para controlar un brazo robótico didáctico permitió acercar la robótica a estudiantes de nivel básico de una manera práctica, accesible y divertida. Al incluir distintos modos de uso como programación por bloques, visión artificial, control manual y comandos de voz se pensó en diferentes formas de aprender e interactuar con la tecnología. Además, se buscó que la herramienta fuera inclusiva para niños con diferentes habilidades, promoviendo la igualdad de oportunidades. Gracias al uso de la Raspberry Pi 4, se logró una solución económica y portátil sin perder funcionalidad. En general, esta interfaz ayuda a despertar el interés por las áreas STEM, fomenta el pensamiento lógico y puede ser un gran apoyo para mejorar el aprendizaje y la motivación en el aula.

BIBLIOGRAFÍA

1. marketingbcnvision, “Sistemas de iluminación para aplicaciones de visión artificial,” Jul. 14, 2021. https://bcnvision.es/blog-vision-artificial/iluminacion-vision-artificial2/

2. D. Chakraborty, “OpenCV Contour Approximation - PyImageSearch,” PyImageSearch, Sep. 29, 2021. https://pyimagesearch.com/2021/10/06/opencv-contour-approximation/

3. “OpenCV: Canny Edge Detection.” ttps://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html

4. Sucar, L. E. (2015). Visión Computacional. Puebla: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

5. William, B. (2017). Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario. Inglaterra: Alfaomega Grupo Editor, S.A de C.V.

6. Ramos Ponce, O. (2023). *Introducción a la Robótica.* Lima: Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC.

DISEÑO DE UN SISTEMA ROBÓTICO MODULAR BASADO EN LA MORFOLOGÍA DE UNA SERPIENTE PARA TAREAS DE BÚSQUEDA Y RESCATE

Jessica Galatea Tafolla Barajas, José Manuel Soria Torres, Francisco Daniel Zepeda Ríos, José Juan Vázquez Martínez, Erick Alejandro González Barbosa.

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, Gto.
jose.vm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La robótica de rescate es un campo emergente de la robótica móvil cuyo objetivo es proveer de herramientas tecnológicas que permitan a los rescatistas tiempos rápidos de acción, se presentan antecedentes de sistemas robóticos que cuentan con un diseño de mecanismo de eslabonamiento pasivo del cuerpo trasero que le permite adaptarse y moverse por terrenos irregulares. Robots como el ROBHAZ-RESCUE y el "KOHGA", del tipo serpiente formado por múltiples vehículos impulsados con orugas conectados en serie por medio de articulaciones pasivas, son representativos en el área. Al designar la clasificación del sistema robótico en función de tareas de búsqueda y rescate es importante definir la modalidad del robot para especificar las condiciones geográficas, en este estudio se presenta la clasificación terrestre UGV (*Umanned Ground Vehicles*) o vehículos terrestres no tripulados, pero también existen, Aéreos UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) usándolos para tareas de mapeo de la zona, o USV (Unmanned Surface Vehicles) empleados en trabajos de rescate al suceder tsunamis o inundaciones. Entre los sistemas de locomoción actuales de los UGV destacando su versatilidad y su complejidad, para la versatilidad, se basa en una clasificación de los obstáculos tales como terreno plano, terreno rugoso, obstáculo normal, obstáculo continuo y cuesta; la definición de cada tipo de obstáculo depende de las dimensiones del robot, en cuanto a la complejidad, se centra en la complejidad mecánica, al pertenecer a la clasificación UGV se tienen estudios previos de distintos sistemas de movimiento para cada robot en relación con su morfología como lo son "patas" en bípedos, cuadrúpedos y hexápodos, modulares de tipo cadena, eslabones en sistemas oruga y ruedas homonímicas y no homonímicas. En el presente trabajo se diseñó un sistema robótico modular UGV extrayendo el sistema modular tipo cadena y ruedas para comprender un solo sistema morfológico empleando el software SolidWorks®, combinando el sistema de tracción del sistema de cadenas con la estabilidad brindada por las ruedas Mecanum omnidireccionales. Se propone seguir desarrollando el mecanismo pasando a la fase de prototipado para comprobar el resultado de los análisis del terreno y comportamiento en un entorno real.

INTRODUCCIÓN

En la época actual se presentan diversas catástrofes de tipo natural y artificial: terremotos, inundaciones, huracanes y terroristas entre otros. El tiempo de respuesta de los grupos de protección civil conformados por el departamento de policía, bomberos y paramédicos es tardía por la dificultad de acceso a la zona del incidente clasificado diferentes categorías[1], tales como:

- Daño a infraestructura: El siniestro daña la integridad estructural de edificios y construcciones importantes dentro del área de alcance, generando escombros y zonas de alta peligrosidad por la presencia de material punzocortante, frágil e inestable.
- Presencia de elementos peligrosos: liberación o riesgo de propagación de material de alta peligrosidad para la salud humana derivado en su fallo de contención tras el daño a la estructura donde era almacenada.
- Riesgo de incendio y/o explosión: derivado de los puntos anteriores, existe una posibilidad de una detonación del material peligroso que esté expuesto durante un siniestro, así como causar un incendio.

La ausencia de equipo especializado que permita agilizar al personal de emergencia es vital para asegurar la salvaguarda de las víctimas de cualquier incidente. En el presente trabajo se propone la implementación de una alternativa tecnológica para cooperar en este tipo de situaciones mediante la creación de un diseño robótico con característica modular basado en la morfología de una serpiente para labores de búsqueda y rescate, con el fin de reducir y optimizar los tiempos de respuesta del personal de emergencias al brindar un dispositivo de exploración y rescate en la modalidad UGV, permitiendo al mismo identificar con antelación los riesgos potenciales y las amenazas presentes en el siniestro para lograr una acción efectiva para proteger y extraer a las víctimas del incidente.

TEORÍA

El artículo Machine Design of Biologically Inspired Robots hace referencia al estudio y diseño de los robots serpiente que comenzó Hirose en 1971. Su interés por la simplicidad de la forma y la versatilidad de su estructura lo llevó a enfocarse en el análisis del movimiento estándar de las serpientes. En la investigación, clasificó los diseños mecánicos del robot serpiente en 5 categorías. La junta de flexión activa consiste en juntas conectadas serialmente y constituyen la forma más estándar de los robots serpiente. El primer modelo con movimiento de una serpiente real fue el ACM3 (Active Cord Mechanism 3) con 2m de largo y 28 Kg de peso. Se formó de 20 juntas conectadas entre sí, las que le proveían un movimiento oscilatorio, que era proporcionado por la transmisión de servomecanismos. El modelo también contaba con sensores táctiles en ambos lados del robot, que permitían el control. La junta de flexión activa y elongación destaca por su diseño, parecido a la elongación del movimiento de una oruga. Esto le da al robot la posibilidad de moverse de forma lineal, mientras su cuerpo se mantiene sin curvatura, El artículo que refiere al Dr. Hirose contribuye a la introducción de los sistemas biomecánicos de las serpientes robot[2].

Existen distintos modelos de las fuerzas en el movimiento de una serpiente que lo describen matemáticamente, en nuestro caso de estudio del sistema robótico se plantea el modelo de las partes que conforman el cuerpo de una serpiente, formada por eslabones conectados en serie con cierto largo; estos hacen contacto con el suelo solo en los nodos (conexiones entre eslabones) con un torque $\boldsymbol{Ti}$ generado por los músculos en las conexiones Pi como se muestra en Figura 1.

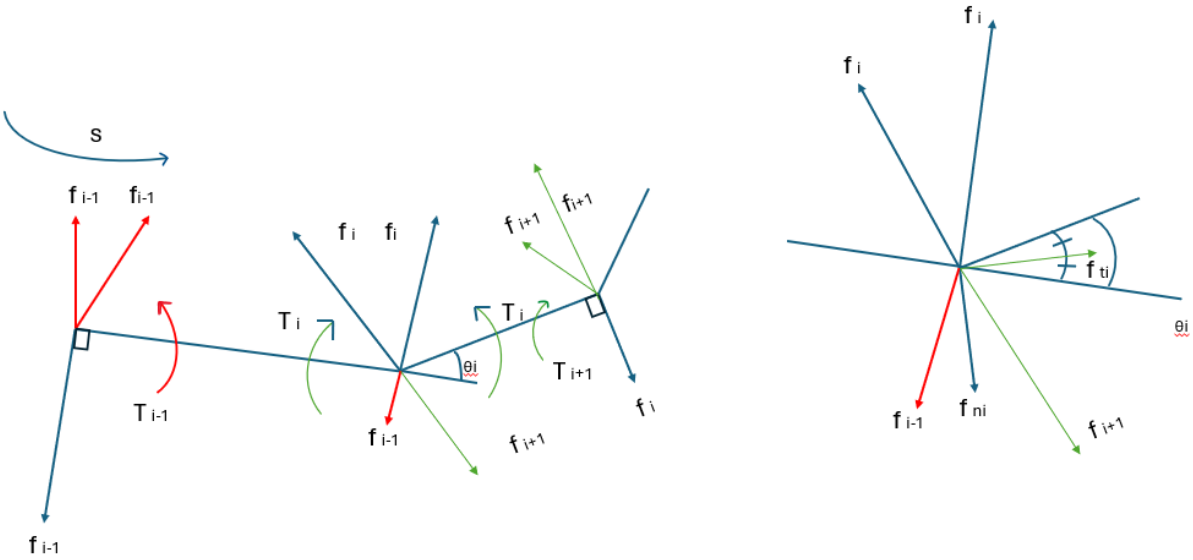


Figura 1. Diagrama vectorial representativo de conexión entre nodos y eslabones.

El torque $\boldsymbol{Ti}$ aplica una fuerza $\boldsymbol{Fi}$ al suelo en los nodos Pi. El resultado es una fuerza $\boldsymbol{Fti}$ que actúa a través del cuerpo tangencialmente[2].

A partir de ello se obtienen las ecuaciones:

$$\mathbf{Fti} = (\mathbf{fi} - \mathbf{fi_{-1}}) + (\mathbf{fi_{+1}} - \mathbf{fi})\mathbf{sin}\frac{\mathbf{\theta i}}{\mathbf{2}} \cong \frac{\mathbf{Ti_{+1} - Ti_{-1}}}{\mathbf{2\delta s}}\mathbf{\theta i} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\mathbf{Fni} = (\mathbf{fi_{+1}} - \mathbf{fi}) - (\mathbf{fi} - \mathbf{fi_{-1}})\mathbf{cos}\frac{\mathbf{\theta i}}{\mathbf{2}} \cong \frac{\mathbf{Ti_{+1} - Ti}}{\mathbf{\delta s}} - \frac{\mathbf{Ti - Ti_{-1}}}{\mathbf{\delta s}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\mathbf{ft(s)} = \frac{\mathbf{dT(s)}}{\mathbf{ds}} * \mathbf{K(s)} \quad \text{Ec. 3}$$

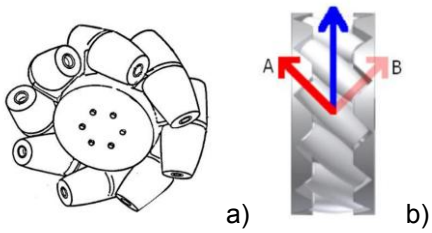
$$\mathbf{Fn(s)} = \mathbf{Ft(s)} = \frac{\mathbf{d^2T(s)}}{\mathbf{ds^2}} \quad \text{Ec. 4}$$

Al tener los huesos cortos, se asume que $\boldsymbol{\delta s} = \mathbf{0}$. A partir de aquí, todas las relaciones se pueden expresar en forma de ecuación diferencial, asumiendo que $\boldsymbol{\theta i}$ para curvaturas $\boldsymbol{K(s)} = \frac{\boldsymbol{\theta i}}{\boldsymbol{\delta s}}$ y $\boldsymbol{Ti} = \boldsymbol{T(s)}, \boldsymbol{fti} = \boldsymbol{ft(s)\delta s}$ y $\boldsymbol{fni} = \boldsymbol{fn}\,\boldsymbol{(s)\delta s}$. De esta forma, la Ec. 3 y la Ec. 4 expresan el sistema.

En estas ecuaciones, el parámetro $\boldsymbol{s}$ indica la posición del cuerpo medido de la cabeza hasta la cola. Adicionalmente, $\boldsymbol{T(s)}$ indica torque, $\boldsymbol{K(s)}$ indica la curvatura, $\boldsymbol{Fn(s)}$ indica la fuerza por unidad de medida que actúa del piso en dirección normal y $\boldsymbol{Ft(s)}$ indica la fuerza por unidad de medida que se dirige del piso en dirección tangencial. La ecuación 3 y 4 expresan la relación entre el torque, la curvatura y la fuerzas que se aplican al piso, y muestran el principio básico del mecanismo de la locomoción de las serpientes.

Cabe mencionar que, al aumentar los módulos del robot, también aumenta la complejidad para estimar los movimientos y la movilidad está limitada por el diseño de la estructura mecánica del robot. Las ventajas de los robots modulares son su capacidad de desplazamiento por espacios angostos, gran estabilidad estática y dinámica, capacidad de tracción, adaptabilidad a gran variedad de terrenos, versatilidad, entre otras. Estas características convierten a este tipo de robots en candidatos perfectos para realizar tareas como la inspección de sistemas de tuberías, operaciones de búsqueda y rescate[3].

Así mismo el tipo de sistema robótico que se pretende diseñar se clasifica como UVG tipo terrestre, existen sistemas de locomoción terrestres como patas, orugas y ruedas respectivamente. La teoría de la adición de llantas Mecanum surge como extracción de la característica omnidireccional de la propiedad de esta rueda, donde se tiene presente cilindros en toda la superficie curva con una orientación de 45º, respecto de la circunferencia exterior de la rueda. Al estar en contacto con la superficie tienen una componente activa y una pasiva perpendiculares entre sí. Estos tipos de ruedas contienen rodillos con rotación libre sobre la rueda principal[4] como se muestra en la Figura 2.a. Debido a la disposición de los rodillos, la fuerza emitida sobre la rueda, así como la dirección de ésta, produce una fuerza sobre la superficie que se descompone en dos vectores de fuerza Figura 2.b, uno perpendicular al eje del rodillo y el segundo paralelo al eje del rodillo[4] permitiéndose observar la descomposición de la fuerza ejercida por el motor mediante las combinaciones de velocidad angular y sentido de giro de este[5].



a) b)

Figura 2. Ruedas de movimiento unidireccional Mecanum: a) Diagrama esquemático y b) diagrama de movimiento vectorial

A partir de la descomposición de la fuerza en las componentes A y B, se observa que solamente la componente A brinda un momento al robot ya que la componente B brinda únicamente un momento al rodillo produciendo su rotación. Esto concluye en que el momento que esta rueda brinda al vehículo posee una dirección con un ángulo respecto de la rueda[5].

PARTE EXPERIMENTAL

Tomando en consideración las características del entorno basado en la tracción por ruedas se desarrolla el plan de trabajo basado en la Figura 3. De manera inicial se comenzó el prototipado de la estructura del robot empleando dos módulos contando con dos eslabones sometiéndose al análisis de sus grados de libertad analizando cuantos nodos son necesarios para lograr la mayor efectividad en su movimiento.

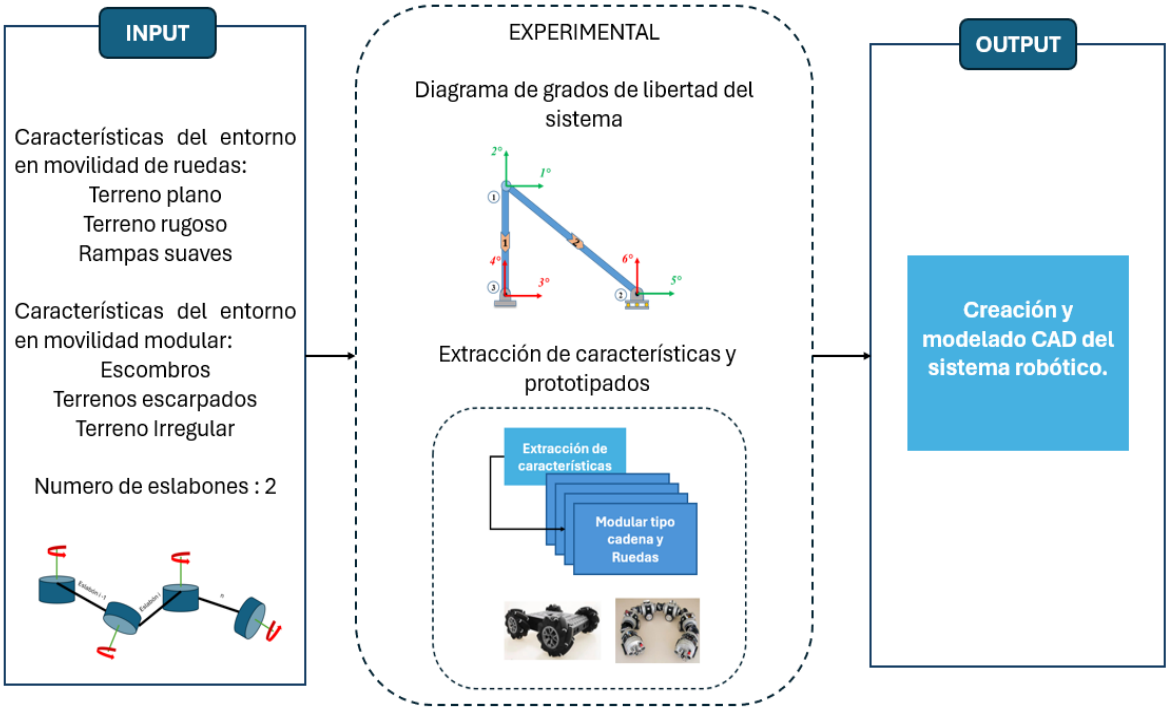


Figura 3. Diagrama experimental basado en las condiciones de entrada

Prototipo A. 1 eslabón

El prototipo A observado en la Figura 4, surge del estudio de movimiento omnidireccional de las llantas mecanum, dentro del sistema se tiene la combinación lineal y colineal de las fuerzas resultantes de cada una de las llantas obteniendo una dirección en cualquier sentido de desplazamiento de forma instantánea, en este tipo de ruedas se crean combinaciones de velocidades para conseguir alguna dirección de desplazamiento por medio del control de cada una de las ruedas del sistema.



Figura 4. Sistema robótico con un eslabón.

Prototipo B. 2 Eslabones.

La arquitectura del segundo prototipado, Figura 5, consta de 2 enlaces conectados en serie por medio de servomotores rotacionales, generando un grado de libertad por articulación, cada enlace consiste en un eslabón rígido al consecutivo por un eje rotacional accionado por su servomotor correspondiente, respondiendo a un rango de movimiento de -90° y 90° con respecto al incremento de 0,35°, por sí mismo el servomotor es capaz de rotar 180° pero los limites mecánicos limitan el rango de movimiento. A partir de lo anterior se segmenta el sistema robótico en nodos, por lo tanto, el movimiento es propagado a lo largo de este, dicha configuración accede a cambios inmediatos en las velocidades por el movimiento oscilatorio que precede en él, abarcando un patrón de onda sinusoidal que se recorre por todo el robot.



Figura 5 Sistema robótico con dos eslabones.

RESULTADOS

Las propiedades y los estudios de las llantas Mecanum arrojan una pérdida de fuerza sobre ellas descritas en la Figura 6, ésta pérdida de fuerza como consecuencia crea una disminución de velocidad alcanzable, para ello se tiene de referencia métodos mecánicos para evitar la pérdida de torque, que son a través de un método mecánico más simple y el otro es mecánicamente más complejo permitiendo a los rodillos exteriores variar su ángulo de orientación con respecto a la rueda principal. Además de implementar otros factores externos como aumentar su propio peso para mejorar su tracción o la combinación de más sistemas de ruedas o suspensiones para una adaptación mixta. Así, mismo, la potencia requerida para efectuar el movimiento aumenta significativamente superando los límites de los motorreductores, por lo que, se propone en trabajos futuros implementar otro modelo con mayor capacidad en consumo de corriente, generando una mayor eficiencia en el consumo energético al lograr la misma potencia con un menor consumo.

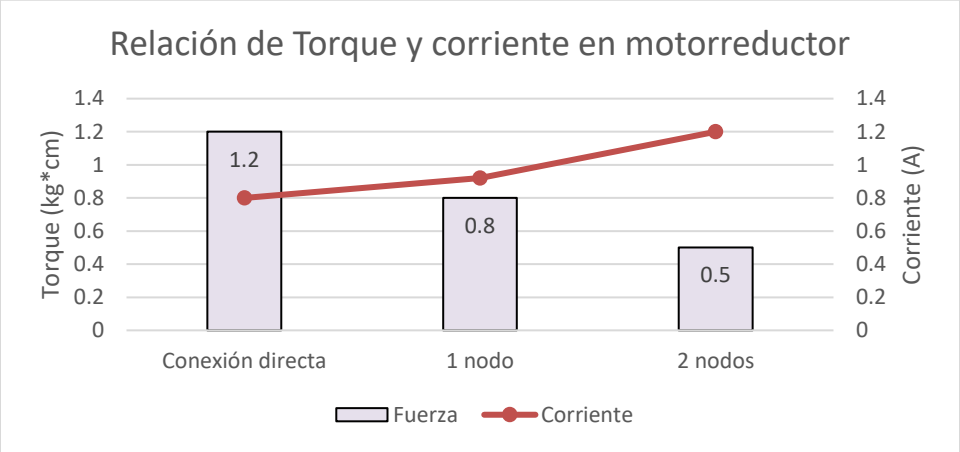


Figura 6. Relación de torque y corriente en las pruebas.

Se obtuvo un movimiento independiente al sistema principal de desplazamiento colineal omnidireccional de las ruedas Mecanum, este sistema compuesto por juntas o eslabones que permiten un movimiento rotatorio con la interacción de los servomotores A y B que producen el movimiento secundario del sistema Fig.7, este conjunto permite un movimiento rotatorio impulsado por servomotores, cada uno dependientes del sistema principal de desplazamiento. Mientras que el movimiento principal permite un libre desplazamiento de todo el sistema robótico al perímetro asignado, permitiendo manipular los ejes A y B.

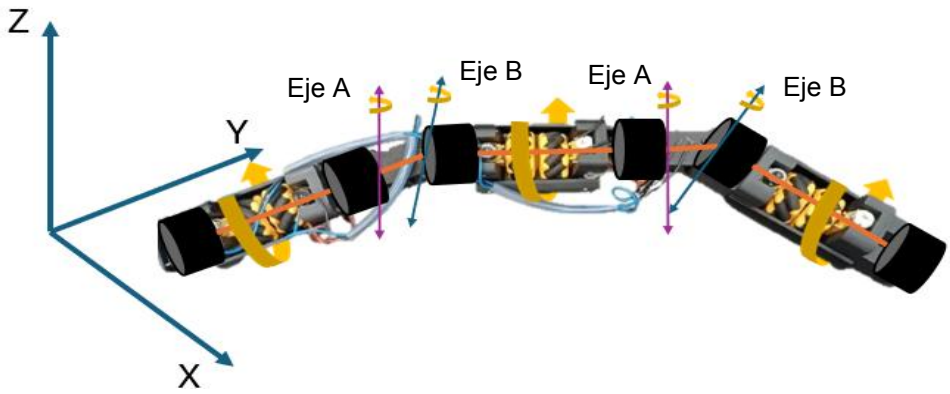


Figura 7. Diagrama de grados de libertad de sistema con 3 nodos.

Este modelo de sistema robótico representa una respuesta eficiente al exponerse en terrenos planos y espacios reducidos, desplazándose por la naturaleza del movimiento oscilatorio al sincronizar los ángulos de los servomotores presentes, indagando en futuras investigaciones de rescate en espacios confinados o escombros de difícil acceso.

CONCLUSIONES

La estructura cuenta con 3 grados de libertad por cada nodo, volviéndose una alternativa que permite su movimiento por escombro y estructuras con variaciones en el terreno donde es desplegado el robot. Si bien, se cuenta con limitantes en el sistema de potencia del actuador rotativo se propone en futuros desarrollos indagar en el mapeo para el cual el robot asistirá por medio de la percepción de su entorno, así mismo planificando trayectorias de manera cinemática para estudiar y mapear su comportamiento en diferentes terrenos. El sistema bidireccional proporcionado por las ruedas Mecanum permiten un aumento en los grados de libertad convirtiéndolo a 8 grados de movimiento lineal por todo el robot sumándose a los 3 grados extras proporcionados por el sistema de

posicionamiento creando un sistema hibrido de robots UVG en la modalidad modular tipo cadena y ruedas logrando una mayor movilidad en comparación con los trabajos previos; reduciendo el tiempo necesario para conocer la zona del siniestro, brindando mejores herramientas e información más precisa para una mejor toma de decisiones en el equipo de respuesta de emergencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bermúdez, G., Novoa, K. S., & Infante, W. (2004). La robótica en actividades de búsqueda y rescate urbano. Origen, actualidad y perspectivas. Tecnura, 8(15), 97-108.
2. H. Y. Shigeo Hirose, “Machine Design of Biologically Inspired Robots,” IEEE Robotics Automation Magazine, págs. 1-11, 2009.
3. Cevallos, A. P. R. (2020). Locomoción de robots modulares. Revista Vínculos: Ciencia, tecnología y sociedad, 17(1), 6-6.
4. Jae-Bok Song and Kyung-Seok Byun. Design and control of an omnidirectional mobile robot with steerable omnidirectional wheels. Pro Literatur Verlag, Germany / ARS, Austria, Vol. 12: pages 223-240, December 2006.
5. Benjamin Woods. Honours thesis omni-directional wheelchair, October 2006.

ELABORACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA FINES EDUCATIVOS Y DE INCLUSIÓN

Erick Alejandro González Barbosa, Christian Israel Córdova Rodríguez, Owen Adrián Castañeda Fajardo, José Juan Vázquez Martínez

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato Gto.
erick.gb@irapuato.edu.mx

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño de un brazo robótico mediante impresión 3D el cual, se llevó a cabo utilizando motores a pasos "NEMA" con caja reductora planetaria de diversas relaciones de reducción. Además del diseño del brazo, se desarrolló su sistema de transmisión de potencia mediante engranajes helicoidales dobles. Para garantizar la seguridad del operario, el brazo se encuentra dentro de un marco protector que permitirá mantener una distancia segura. El proyecto se realizó utilizando el software SolidWorks®, permitiendo simulaciones de movimiento y análisis estructural del brazo robótico. Como resultado, se obtuvo un diseño de tamaño considerable con seis grados de libertad. Se comprobó que el chasis impreso en 3D soporta torsiones y cargas significativas. Así mismo, se integraron elementos mecánicos y eléctricos que proporcionan una correcta calibración y funcionamiento del brazo robótico.

En conclusión, el diseño del brazo robótico logró un equilibrio entre funcionalidad y estabilidad, permitiendo una movilidad fluida y precisa gracias al uso de motores a pasos con reducción planetaria. La optimización de la transmisión de potencia mediante engranajes del tipo helicoidales dobles mejoró la eficiencia mecánica, asegurando movimientos suaves y controlados. Además, la inclusión de un marco de seguridad refuerza su viabilidad en aplicaciones donde la interacción con las personas requiere precauciones adicionales.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, la robótica ha cobrado gran relevancia en ámbitos industriales, educativos y personales. La necesidad de sistemas automatizados que colaboren de forma segura y eficiente con humanos ha impulsado el desarrollo de soluciones accesibles, versátiles y robustas. En este sentido, el diseño de brazos robóticos representa un reto multidisciplinario que combina conocimientos de mecánica, electrónica, diseño asistido por computadora y programación.

Este proyecto surge con la finalidad de desarrollar un brazo robótico funcional, manufacturado con tecnología de impresión 3D, que integre motores a pasos con cajas reductoras planetarias, sensores y un sistema de transmisión mecánica eficiente. Además, se buscó que el dispositivo fuese de bajo costo, accesible, y útil como herramienta educativa y de uso personal, promoviendo la inclusión en el aprendizaje de la robótica.

TEORÍA

Los motores a pasos tipo NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) se utilizan comúnmente en aplicaciones de posicionamiento preciso debido a su capacidad de controlar ángulos específicos sin necesidad de sistemas de retroalimentación complejos [2]. En este proyecto se utilizaron motores NEMA 17, NEMA 23 y NEMA 8, cada uno con una caja reductora planetaria que aumenta el torque disponible y mejora el control del movimiento.

La transmisión mecánica se basa en engranajes helicoidales dobles, también conocidos como engranes en “V”, que permiten una transmisión de potencia suave, silenciosa y con mayor superficie de contacto entre los dientes, lo que aumenta la eficiencia y reduce el desgaste, ver Figuras 1 y 2.

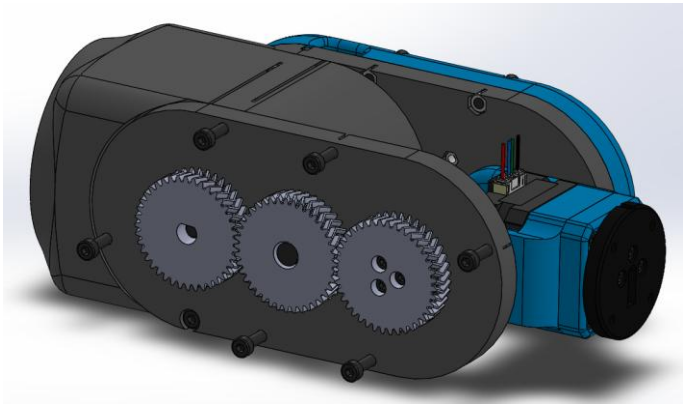


Figura 1. Engranajes helicoidales dobles dentro del brazo.

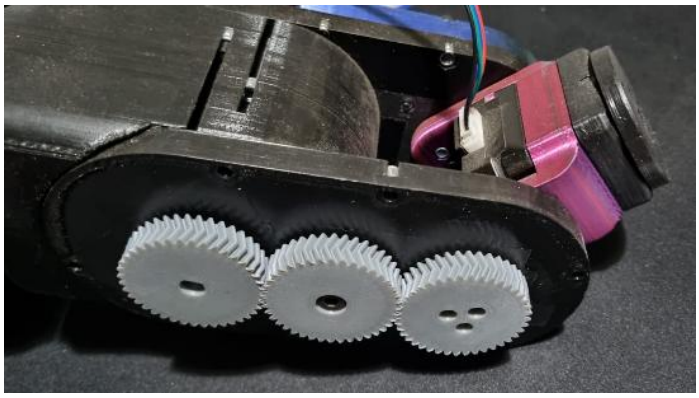


Figura 2. Sistema de engranajes helicoidales dobles impreso en 3D.

El diseño estructural fue realizado en SolidWorks®, permitiendo realizar simulaciones de esfuerzos mecánicos, movimientos y análisis de colisiones [1,3]. Para la manufactura se utilizó tecnología de impresión 3D con material ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), por su resistencia mecánica y térmica.

Finalmente, se incorporaron sensores de efecto Hall, encoders magnéticos y “limit switches” para realizar la calibración automática del brazo, garantizando su funcionamiento preciso desde una posición inicial conocida.

PARTE EXPERIMENTAL

El proceso de diseño inició con el modelado del brazo robótico en SolidWorks, contemplando seis grados de libertad para lograr movimientos complejos similares a los de un brazo humano [1]. Cada articulación fue dimensionada para alojar motores NEMA con sus respectivas cajas reductoras, ver Figura 3. Las partes del brazo se imprimieron con filamento de ABS utilizando impresoras 3D, cuidando la orientación y el relleno para garantizar resistencia estructural. Se diseñaron alojamientos para los engranajes helicoidales dobles, y se acoplaron mediante ejes reforzados con rodamientos.

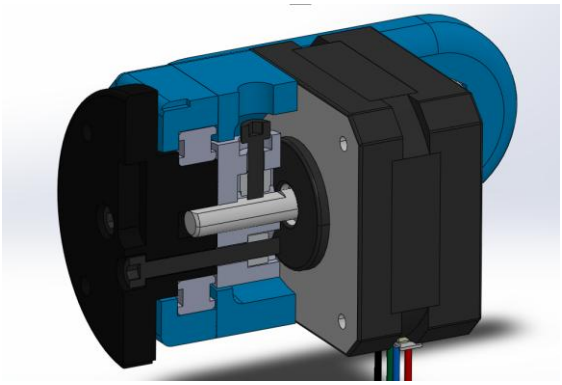


Figura 3. Modelado de motor NEMA en el software SolidWorks®.

En la parte electrónica se utilizó una combinación de microcontroladores para el control de movimiento [2]. La retroalimentación se logró mediante sensores magnéticos y “limit switches”, los cuales indicaban los límites físicos de cada articulación, así como su posición de inicio. El montaje incluyó pruebas de resistencia mecánica, calibración de los motores y sincronización de movimientos. También se implementó un marco de seguridad para asegurar la distancia con el operario, especialmente en demostraciones educativas.

RESULTADOS

El brazo robótico ensamblado alcanzó los seis grados de libertad propuestos, ver Figura 4, con una movilidad fluida gracias al uso de motores a pasos con reducción planetaria. La transmisión de potencia mediante engranajes helicoidales dobles demostró ser eficaz, permitiendo un movimiento continuo y silencioso sin pérdidas notables de torque. Las piezas impresas en ABS soportaron adecuadamente los esfuerzos mecánicos sin presentar fracturas ni deformaciones notables, incluso bajo cargas moderadas. Las simulaciones en SolidWorks® fueron validadas experimentalmente, coincidiendo los resultados obtenidos con los valores teóricos previstos. La calibración automática del brazo, apoyada en sensores de efecto Hall y encoders magnéticos, permitió que el sistema iniciara desde una posición cero precisa, lo que facilitó la ejecución de rutinas programadas. El marco de seguridad cumplió su función de evitar contacto directo durante la operación, aumentando la seguridad del usuario, especialmente en ambientes educativos.

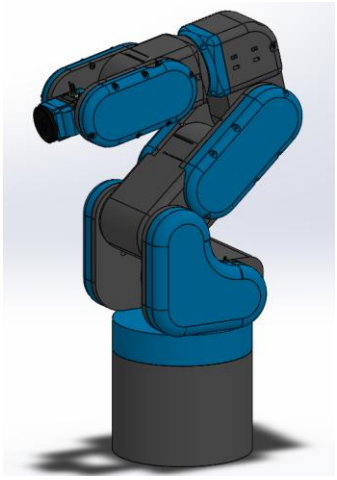


Figura 4. Diseño completo CAD de brazo robótico.

El desarrollo de este brazo robótico presenta múltiples aplicaciones en contextos educativos, personales y de investigación. En el ámbito educativo, constituye una herramienta valiosa para la enseñanza de principios de robótica, electrónica, diseño mecánico y control de sistemas, permitiendo

que estudiantes interactúen directamente con tecnologías avanzadas de manera accesible y segura. Esto favorece la comprensión práctica de temas como la cinemática, el control de motores paso a paso y el diseño asistido por computadora.

Desde una perspectiva de inclusión, el bajo costo de fabricación y la utilización de tecnologías como la impresión 3D hacen que el proyecto sea replicable en instituciones con recursos limitados, contribuyendo a la democratización del aprendizaje tecnológico, ver Figura 5. Asimismo, su diseño modular y protegido facilita su uso en entornos donde se requiere una interacción segura con humanos, como talleres, laboratorios escolares y exposiciones científicas.

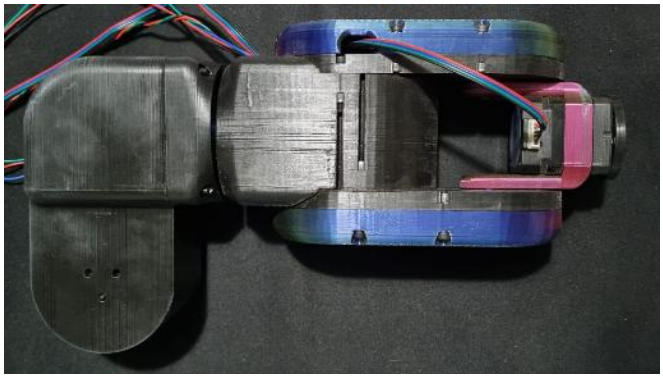


Figura 5. Modelo físico parcial de brazo robótico impreso en 3D.

El proyecto también es aplicable en actividades de divulgación, donde puede emplearse como herramienta didáctica de automatización y robótica. Además, su estructura ajustable lo convierte en una base versátil para experimentación en investigación y desarrollo de nuevas soluciones mecatrónicas.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este brazo robótico demuestra que es posible diseñar y fabricar dispositivos complejos mediante impresión 3D y componentes de bajo costo sin comprometer la funcionalidad. El uso de motores NEMA con cajas reductoras planetarias proporcionó un torque adecuado para el movimiento de las articulaciones, mientras que los engranajes helicoidales aseguraron una transmisión suave y eficiente. Se logró una integración efectiva entre el diseño mecánico y el sistema de control, validando la precisión del sistema con la ayuda de sensores. El marco de seguridad incorporado refuerza la viabilidad del brazo en entornos educativos y personales. Este tipo de proyectos impulsa el aprendizaje multidisciplinario y fomenta la inclusión, al permitir que más personas tengan acceso a tecnología avanzada con fines formativos o personales [3].

BIBLIOGRAFÍA

1. J. J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 3rd Ed., Pearson Education, 2005.
2. F. Petit, “Stepper Motor Control with Microcontrollers”, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 40–52.
3. B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer, 2009.
4. S. Makris, “Physics Based Modeling and Simulation of Robot Arms”, en Cooperating Robots for Flexible Manufacturing, Springer Series in Advanced Manufacturing, Cham, 2020.
5. M. T. Mason, Mechanics of Robotic Manipulation, MIT Press, Cambridge, MA, 2001.

APROVECHAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN REVERSIBLE FOTO-INDUCIDA EN LOS ELASTÓMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS PARA SU POSIBLE USO EN DISPOSITIVOS ACTIVADOS DE MANERA REMOTA

Leticia Larios López, Rosa Julia Rodríguez González, Dámaso Navarro Rodríguez, Isaura Felix Serrano

Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México
leticia.larios@ciqa.edu.mx

RESUMEN

Los elastómeros líquido-cristalinos (LCE) que incorporan enlaces dinámicos de puente disulfuro y grupos fotosensibles azobenceno en su estructura química (SS-AzoLCE) constituyen un tipo de materiales inteligentes con capacidad de cambiar su forma de manera reversible en respuesta a un estímulo externo lumínico y/o térmico. Además, por la presencia de los enlaces disulfuro, estos elastómeros presentan la posibilidad de ser re-procesados y re-programados en su forma en más de una ocasión. Ambas características hacen de los SS-LCE materiales atractivos para ser utilizados como accionadores mecánicos activados con calor, o inclusive activados remotamente con luz. Es así que en este trabajo se reporta la preparación de dos elastómeros SS-LCE, con y sin grupos azobenceno, su respuesta reversible foto- y termo-inducida, y la posible aplicación de estos materiales en el desarrollo de dispositivos activados de manera remota. Para la preparación de los SS-LCE se siguió un procedimiento en dos etapas. Primero se llevó a cabo una reacción tiol-acrilato entre el mesógeno nemático diacrilato RM257, un azobenceno di-acrilato (2%mol), y hexanoditiol (1.5 en exceso). Posteriormente, se adicionó el entrecruzante PETMP para obtener el gel correspondiente. Los geles SS-LCE sin y con grupo azobenceno fueron cortados en piezas pequeñas, lavados y puestos a secar en la estufa de vacío a 80°C por 5 horas, con lo que se obtuvieron materiales suaves de color blanco y amarillo, respectivamente. Estas piezas fueron colocadas en moldes de teflón, y procesadas en una prensa de presión a una temperatura controlada de 180°C durante 15 min y luego se dejaron enfriar hasta 25°C. De esta manera se obtuvieron placas planas flexibles, las cuales fueron sometidas a un proceso de alineamiento molecular uniaxial. El análisis térmico de los elastómeros por calorimetría de barrido diferencial, mostró que la incorporación del grupo fotosensible azobenceno en la formulación elastomérica ocasiona una disminución de 2.7°C en la transición vítrea y de 4°C en la temperatura de isotropización. El análisis de la termo-respuesta indicó que ambos elastómeros responden de manera reversible a un estímulo térmico y que el elastómero SS-AzoLCE presenta un porcentaje de contracción menor (35%) que el elastómero sin grupo azobenceno (39%). También se evaluó la respuesta del SS-AzoLCE a un estímulo de luz de 405nm, observándose una deformación de doblez hasta de 35°. La respuesta de los elastómeros foto y termo-inducida fue utilizada para desplazar un objeto pequeño mediante un movimiento de empuje/arrastre termo- y/o foto-activado. Además, la deformación reversible foto-inducida en el elastómero SS-AzoLCE, fue aprovechada para cerrar un circuito eléctrico, con lo que se pudo encender y apagar repetidamente un foco LED. Con estos resultados se pudo establecer que es factible el uso de los elastómeros fotosensibles para activar remotamente circuitos eléctricos, así como su aplicación en algún otro tipo de dispositivos que involucre un movimiento mecánico foto-activado.

INTRODUCCIÓN

Los elastómeros líquido-cristalinos (LCE) que incorporan enlaces dinámicos de puente disulfuro y grupos fotosensibles azobenceno en su estructura química (SS-AzoLCE) constituyen un tipo de materiales inteligentes con capacidad de cambiar su forma de manera reversible en respuesta a un estímulo externo lumínico y/o térmico [1]. Es bien sabido que los LCE combinan activamente la elasticidad entrópica de un elastómero con la auto-organización molecular de los cristales líquidos [2]. Adicionalmente, la presencia de grupos de tipo azobenceno como parte de la matriz elastomérica aporta una sensibilidad única del LCE a un estímulo lumínico. Esto se debe a la propiedad de

fotoisomerización reversible *trans-cis* del azobenceno (ver Fig.1) cuando es irradiado con luz de cierta longitud de onda; y que al estar covalentemente enlazado al elastómero causan la deformación del material en determinada dirección [3]. Esta deformación puede observarse como una flexión, doblez, contracción, o incluso una combinación de estas, dependiendo de las propiedades físicas del LCE y de la programación de forma que se le haya inducido previamente [4].

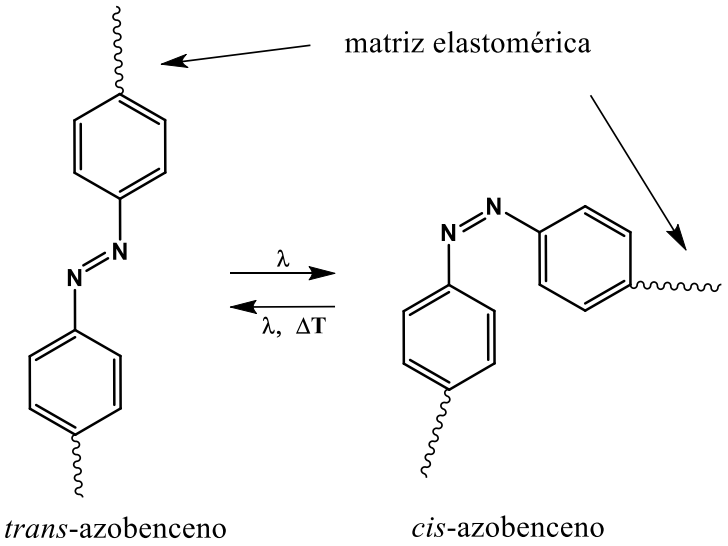


Figura 1. Fotoisomerización reversible *trans-cis* del grupo azobenceno

Se ha reportado que, dependiendo de sus características estructurales y grupos químicos presentes, los LCE pueden responder a cambios de temperatura [4]. En tales casos se requiere el contacto directo o la cercanía entre el elastómero y la fuente proveedora del estímulo externo, lo cual no es necesario para un estímulo lumínico [5], en donde el accionamiento se puede inducir de manera remota. Esta particularidad puede aprovecharse para el desarrollo de dispositivos que sean activados remotamente con luz. Es así que, en este trabajo se presenta la respuesta foto y termo-inducida de dos elastómeros líquido-cristalinos, uno de ellos conteniendo un grupo azobenceno, en el cual se estudió su aplicabilidad para mover un objeto pequeño mediante un movimiento de empuje/arrastre foto-activado. Adicionalmente, se evaluó el posible aprovechamiento de la deformación reversible foto-inducida en el elastómero fotosensible para cerrar un circuito eléctrico, y de esta manera, poder desarrollar dispositivos que pudieran ser activados de manera remota. Además, por la presencia de los enlaces disulfuro, estos elastómeros presentan la posibilidad de ser re-procesados y re-programados en su forma en más de una ocasión [6-8]. Tales características hacen de los SS-AzLCE materiales atractivos para ser utilizados como accionadores mecánicos activados remotamente con luz.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales. Los reactivos utilizados en este trabajo fueron el mesógeno nemático diacrilato 1,4-Bis-[4-(3-acriloxipropiloxi) benzoiloxi]-2-metilbenceno (RM257, 97.3%), el azobenceno di-acrilato (Az), un espaciador 1,6-hexanoditiol (HDT), el entrecruzante tetrakis(3-mercapto propionato) pentaeritritol (PETMP, 95%), dipropilamina (DPA, 99%), peróxido de hidrógeno al 9%, yoduro de sodio, tiosulfato de sodio y tetrahidrofurano (THF) recién destilado.

Para la preparación de los elastómeros SS-LCE y SS-AzLCE portadores de puentes disulfuros se siguió el procedimiento reportado en la literatura [1,7]. Es así que, 6.80 mmol del mesógeno RM257 (o bien, 6.66 y 0.14 mmol de RM257 y de Az, respectivamente), y 10.20 mmol del HDT fueron disueltos en 50 mL de THF seco, recién destilado. Enseguida, 0.2 g de DPA fue agregado al matraz

de reacción, y la mezcla fue mantenida en agitación a temperatura ambiente por 18 horas. Posteriormente, fueron agregados 1.71 mmol del PETMP disuelto en THF, 2.83 mL de una solución de H_2O_2 al 9% y 8.5 mg de yoduro de sodio, obteniéndose un producto en gel después de 2 h de agitación. Los geles SS-LCE sin y con grupos azobenceno fueron cortados en piezas pequeñas, lavados con una solución de tiosulfato de sodio al 5% y luego, lavados tres veces con agua destilada. Finalmente, los elastómeros fueron secados en una estufa a 85°C durante 20 horas, y se procedió a su caracterización química y térmica.

Caracterización de los materiales. Para la caracterización química de los elastómeros se utilizó un espectrofotómetro Nicolet modelo iS5 Thermo-Scientific, iD7-ATR en modo de reflectancia total atenuada (ATR). La caracterización térmica de los SS-LCE se llevó a cabo en un calorímetro de barrido diferencial DSC-2000 Q-Series de TA Instruments, utilizando muestras de 5 mg, confinadas en portamuestras de aluminio, que fueron calentadas/enfriadas a una velocidad de 10°C/min. Finalmente, para el análisis de re-procesamiento y programación de forma de los SS-LCE, estos fueron colocados en moldes de teflón y comprimidos en una prensa de presión a una temperatura de 180°C por 15 min.

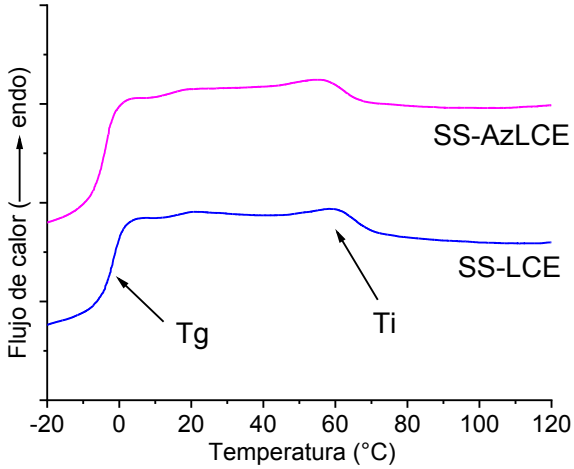
RESULTADOS

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior fueron sintetizados dos elastómeros líquido cristalinos portadores de enlaces covalentes dinámicos de puente disulfuro (S–S); uno de ellos, conteniendo también un 2% mol de grupos fotosensibles de tipo azobenceno (SS-AzLCE). Estos elastómeros se obtuvieron como materiales suaves de color blanco o amarillo (ver fig. 2), y aunque son sistemas ligeramente reticulados (entrecruzados), la presencia de los enlaces disulfuro le confieren la posibilidad de ser reprocesados en más de una ocasión [6-8]. Es así que el tratamiento térmico en la prensa de presión permitió que las partículas elastoméricas fueran compactadas de manera uniforme dando como producto películas homogéneas, como se ilustra en la figura 2.



Figura 2. Apariencia física de los elastómeros antes y después de ser procesados en películas.

Mediante el análisis químico por espectroscopía de infrarrojo se confirmaron las señales correspondientes a los diferentes grupos químicos presentes en estos materiales. Además, el análisis térmico de los elastómeros con y sin grupos azobenceno, mediante la técnica de calorimetría de barrido diferencial (DSC), indicó que ambos elastómeros presentan las dos transiciones típicas de los LCE; estas son, la transición vítrea (Tg) y la temperatura de isotropización (Ti) como se muestra en la figura 3. Al comparar las temperaturas de las transiciones de los dos LCE, se hace evidente que la incorporación del 2% mol del grupo fotosensible azobenceno en la formulación elastomérica ocasiona una ligera disminución de 2.7°C en la Tg y de 4°C en la temperatura de isotropización.



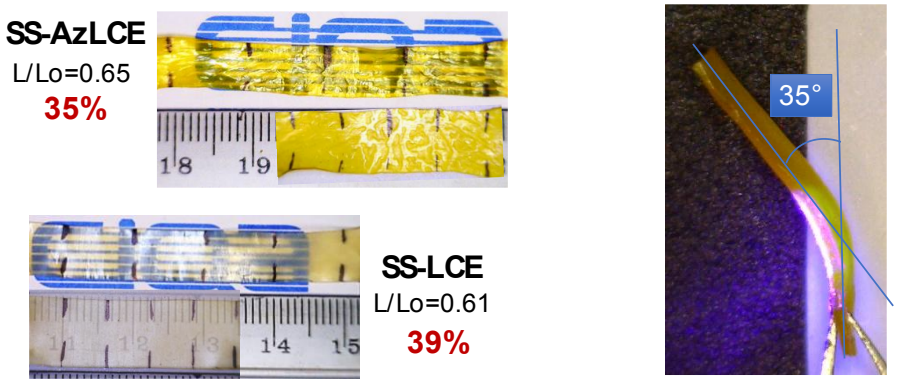
SS-LCE	Tg (°C)	Ti (°C)
SS-LCE	-1.8	59.0
SS-AzLCE	-4.5	55.0

2.7°C ↓ ↓ 4°C

Figura 3. Termogramas DSC de los elastómeros con y sin grupo azobenceno obtenidas durante el proceso de calentamiento a 10°C/min.

Con el propósito de evaluar el efecto del grupo azobenceno en la termo-respuesta de los elastómeros, las películas fueron sometidas a un estiramiento uniaxial inmediatamente después de su procesamiento térmico en la prensa. De esta manera se obtuvieron los elastómeros con una apariencia traslúcida (Fig. 4A), lo cual indica que los mesógenos líquido-cristalinos se orientaron en una conformación en monodominios [9]. Cuando ambos elastómeros fueron sometidos a un proceso de calentamiento, se observó una deformación (contracción) de 39 y 35% para el SS-LCE y SS-AzLCE, respectivamente. Una vez que el estímulo térmico fue suspendido y las muestras se enfriaron, ambas recuperaron sus dimensiones iniciales, como se ilustra en la figura 4A. De este análisis se concluye que ambos elastómeros responden de manera reversible a un estímulo térmico y que la presencia de los grupos azobenceno en la matriz elastomérica no afecta significativamente su termo-respuesta.

El elastómero SS-AzLCE posee grupos azobenceno, que son cromóforos con capacidad de absorber luz de cierta longitud de onda y experimentar una reacción foto-química reversible entre sus isómeros geométricos *trans-cis*, lo que puede inducir un cambio en sus dimensiones [5]. De manera que para este elastómero fotosensible también se evaluó su respuesta a un estímulo de luz de 405nm, observándose una eficiente deformación de doblez hasta de 35°, como se muestra en la figura 4B, la cual es reversible una vez que se ha suspendido el estímulo externo que la ocasionó.



(A) (B)

Figura 4. Deformación reversible de A) los dos elastómeros inducida por calor y B) del SS-AzLCE inducida por luz de 405nm

Considerando la foto-respuesta del elastómero SS-AzLCE, en este trabajo también se estudió la posible aplicación de estos materiales en el desarrollo de dispositivos activados de manera remota. Es así que este elastómero se ancló a un alambre, como se ilustra en la figura 5A y se evaluó su capacidad de responder a la luz a pesar de estar parcialmente impedido por éste. Los resultados indicaron que aún bajo estas condiciones de movilidad restringida, la luz induce una deformación de doblez/contracción en el SS-AzLCE y ocasiona un claro desplazamiento, hasta de 10° del extremo del alambre. Además, cuando el estímulo lumínico se suspende, el elastómero y el alambre recuperan su forma y posición iniciales. Estos resultados son de gran interés, porque demuestran que a través del movimiento foto-inducido de este tipo de elastómeros LC fotosensibles es posible obtener la fuerza de empuje/arrastre suficiente para desplazar de manera remota un objeto pequeño. Aprovechando esto, el elastómero SS-AzoLCE foto-activado se usó para cerrar un circuito eléctrico, con lo que se pudo encender y apagar repetidamente un foco LED, como se observa en la figura 5B. Con estos resultados se pudo establecer que es factible el uso de los elastómeros fotosensibles para activar remotamente circuitos eléctricos, y algún otro tipo de dispositivos que involucre un movimiento mecánico foto-activado.

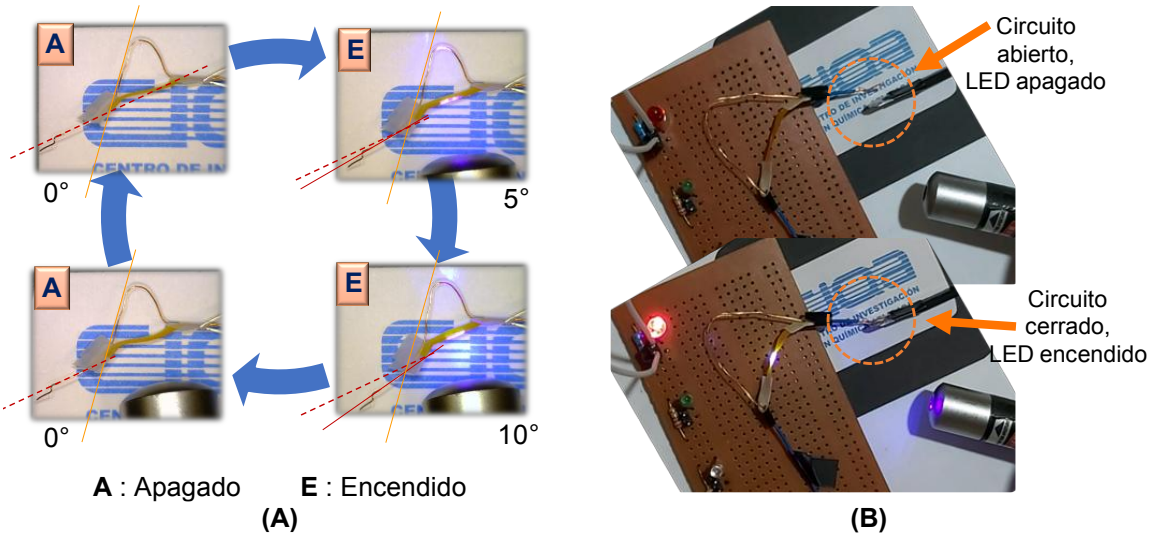


Figura 5. (A) Movimiento de un alambre y (B) encendido de LED por condición de circuito eléctrico cerrado, inducidos remotamente por la respuesta del elastómero SS-AzLCE a un estímulo de luz láser de 405nm.

CONCLUSIONES

En este trabajo fueron obtenidos de manera exitosa dos elastómeros líquido-cristalinos con y sin grupos azobenceno. Ambos LCE poseen enlaces dinámicos de puente disulfuro, lo que les confiere propiedades de reprocesamiento y de reprogramación en forma. El análisis de la termo-respuesta indicó que ambos elastómeros responden de manera reversible a un estímulo térmico y que el elastómero SS-AzLCE presenta un porcentaje de contracción ligeramente menor (35%) que el elastómero sin grupo azobenceno (39%). Además, se evaluó la respuesta del SS-AzLCE a un estímulo de luz de 405nm, observándose una deformación de doblez hasta de 35°. Durante el proceso de deformación foto-inducida, este elastómero también fue capaz de ocasionar un movimiento de empuje o arrastre de objetos pequeños, lo cual fue aprovechado para cerrar un circuito eléctrico de manera remota; de tal manera que se pudo encender y apagar repetidamente un foco LED. Con estos resultados se pudo establecer que es factible el uso de los elastómeros líquido-cristalinos fotosensibles para activar remotamente circuitos eléctricos, así como su aplicación en algún otro tipo de dispositivos que involucre un movimiento mecánico foto-activado.

BIBLIOGRAFÍA

1. L. Larios López, R.J. Rodríguez González, I. Felix Serrano, “Preparación de elastómeros con forma re-programable a base de cristales líquidos y enlaces dinámicos de puente disulfuro”, en Avances Científicos y Tecnológicos en México 1 (CIO, 2024). Tomo VI. pp. 271-278.
2. M. Bispo, D. Guillon, B. Donnio and H. Finkelmann, “Main-Chain Liquid Crystalline Elastomers: Monomer and Cross-Linker Molecular Control of the Thermotropic and Elastic Properties” Macromolecules, 2008, 41, 30983108.
3. Marco A. De Jesús-Téllez, Isaura Felix-Serrano, Rosa Julia Rodríguez-González, Dámaso Navarro-Rodríguez, Leticia Larios-López, “Effect of gold and graphene oxide nanoparticles on the thermo- and photo-actuation of monodomain liquid crystal elastomers”, Polymer 205 (2020) 122837
4. Jiang H., Lia Ch., Huang X., Actuators based on liquid crystalline elastomer materials, Nanoscale, 2013, 5, 5225-5240.
5. J. Garcia-Amorós, D. Velasco, in: V.K. Thakur, M.R. Kessler (Eds.), “Azobenzene-containing Liquid Single Crystal Elastomers for Photoresponsive Artificial Muscles -Liquid Crystalline Polymers: Volume 2–Processing and Applications”, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 437–457.
6. Z. Wang, H. Tian, Q. He, Sh. Cai, “Reprogrammable, Reprocessible, and Self-Healable Liquid Crystal Elastomer with Exchangeable Disulfide Bonds”, ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, 33119−33128
7. Zhijian Wang, Qiguang He, Yang Wang and Shengqiang Cai “Programmable actuation of liquid crystal elastomers via ‘‘living’’ exchange reaction” Soft Matter, 2019, 15, 2811
8. Q. He, Z. Wang, Y. Wang, A. Minori, M.T. Tolley, Sh. Cai, “Electrically controlled liquid crystal elastomer–based soft tubular actuator with multimodal actuation”. Sci. Adv. 2019; 5: eaax5746
9. S.V. Fridrikh y E.M. Terentjev, “Polydomain-monodomain transition in nematic elastomers” Physical Review E, 1999, Vol. 60, No.2. 1847-1857

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS DE ROBOTS DE COMPETENCIA

Esmeralda Alondra Garcia Rodriguez[1], Emilio Pérez Montes[2], Azael Medina Haro[3]

[1,2] Universidad Politécnica de Pénjamo.
ealondra.garcia@gmail.com, perezmontesemilio@gmail.com

RESUMEN

El presente documento se enfoca en el diseño y construcción de 3 robots para competir en diferentes eventos relacionados con las competencias de robótica. Se detallará la implementación de su electrónica, mecánica y control, los cambios generados entre cada versión de los robots para su mayor eficiencia y los resultados obtenidos dentro del ring.

Este artículo describe el diseño, desarrollo y evaluación de tres robots con fines competitivos: un robot de combate de 20 libras, un robot de combate amateur de 1 libra y un robot mini sumo controlado por radiofrecuencia (RC).

El objetivo del proyecto fue participar en competencias tecnológicas nacionales e internacionales, aplicando principios de ingeniería mecatrónica y metodologías de diseño iterativo. La parte experimental se dividió en cuatro fases: Identificación de Características y Selección de Componentes, Diseño y Modelado Asistido por Computadora, Desarrollo de Prototipos y Pruebas Iniciales, Pruebas de Campo y Evaluación en Competencias.

Durante el desarrollo se realizaron ajustes técnicos, como el reemplazo de microcontroladores por controladores electrónicos de velocidad (ESC), debido a su mejor desempeño ante condiciones exigentes. A su vez se reemplazaron materiales termoplásticos como PLA o PETG por ABS y PLA con fibra de carbono, ya que estos mostraron mejor resistencia a los golpes y a la fricción.

Los prototipos participaron en diferentes eventos relacionados con las competencias de robótica como Olimpiada Latinoamericana de Ciencias y tecnología (OLCyT) y Batalla de Robots Liga GTO, obteniendo resultados destacados, incluyendo un primer lugar en la categoría de combate amateur. Este proyecto también impulsó la creación del Club de Robótica “Boxy Bot” en la Universidad Politécnica de Pénjamo, fomentando el interés estudiantil en el desarrollo de tecnología competitiva.

INTRODUCCIÓN

La robótica competitiva se desarrolla como un campo interdisciplinario donde convergen la ingeniería mecánica, la electrónica y el control automatizado. A través del diseño y construcción de robots, los participantes enfrentan retos técnicos que impulsan la innovación y el desarrollo de nuevas soluciones. Este documento presenta el proceso de diseño, fabricación y optimización de tres robots con fines competitivos: un robot de combate de 20 libras, un robot de combate amateur de 1 libra y un robot mini sumo controlado por radiofrecuencia (RC).

El proyecto se estructuró bajo metodologías de diseño, enfocándose en mejorar la resistencia, maniobrabilidad y rendimiento de los robots mediante la selección estratégica de componentes y materiales. Se exploró el uso de tecnologías avanzadas como el Electronic Speed Controller (ESC) para optimizar el control de los motores, así como la implementación de materiales reforzados para aumentar la durabilidad. Además, los robots participaron en diversas competencias, obteniendo resultados destacados que validaron la efectividad de los enfoques de diseño empleados.

Más allá de los logros técnicos, este proyecto contribuyó al interés por la robótica entre la comunidad de estudiantes, impulsando la creación del Club de Robótica “Boxy Bot” en la Universidad Politécnica de Pénjamo.

TEORÍA

Robots de Combate

Los robots de combate son máquinas diseñadas específicamente para enfrentarse en competencias donde el objetivo principal es deshabilitar o destruir a sus oponentes dentro de una arena cerrada. Para ello, estos robots pueden estar equipados con diversas armas y mecanismos de defensa, tales como martillos, discos giratorios, cuchillas y sistemas de empuje. La estrategia de combate de estos robots se basa en la resistencia estructural, velocidad de reacción y capacidad de maniobra, permitiéndoles adaptarse a los movimientos de sus oponentes para maximizar su desempeño en batalla. López, A., & Martínez, J. (2023).

Robots Mini Sumo

El robot mini sumo es una variante dentro del mundo de la robótica de competencia, inspirado en el deporte tradicional del sumo japonés. La meta principal de estos pequeños robots es expulsar a su contrincante fuera del área de combate, denominada "dohyo", utilizando estrategias de empuje y evasión. Para lograr esto, deben cumplir con restricciones específicas de tamaño y peso, generalmente no superando los 500 gramos en categorías estándar. Su diseño se enfoca en la rapidez y eficiencia en la detección del adversario, empleando sensores como infrarrojos o ultrasónicos para reaccionar de manera automática ante su presencia. Pérez, R., & Gómez, L. (2022).

Electronic Speed Controller (ESC)

Un Electronic Speed Controller (ESC) es un dispositivo electrónico que regula la velocidad y dirección de un motor eléctrico, comúnmente utilizado en robótica y sistemas de propulsión de vehículos. En el desarrollo de los robots de competencia, se comprobó que el ESC es una opción superior al microcontrolador ATmega328 debido a su mayor resistencia a picos de voltaje y mejor rendimiento en motores de alta potencia. Su capacidad para proporcionar una transición más estable entre velocidades permite una mayor precisión en movimientos, haciendo que el robot sea más eficiente en batalla. Tournier, F. (2023).

Importancia del Diseño Asistido por Computadora (CAD)

La creación de herramientas para el Diseño Asistido por Computadora (CAD) está en constante evolución y la mayoría de las ramas de la tecnología la usan para incrementar la productividad de los diseñadores y para obtener elaboraciones cada día más complejas y precisas. Los sistemas CAD permiten realizar el diseño de productos y componentes a través de gráficos interactivos. Un diseñador trabajando en un sistema con una pantalla de alta resolución genera varias vistas de los componentes y ensambles; puede obtener además vistas en tres dimensiones las cuales pueden ser ampliadas, rotadas y cortadas por secciones, lo que permite a clientes y profesionales que intervienen en el diseño y manufactura formarse una idea del producto en cuestión, facilitando todas las posibles modificaciones y eliminación de defectos, antes que el producto salga al mercado. Erazo-Arteaga, V. A. (2022).

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo de los robots se llevó a cabo en cuatro fases, asegurando que cada componente fuera seleccionado y probado adecuadamente antes de la competencia. A continuación, se describe el proceso con mayor profundidad:

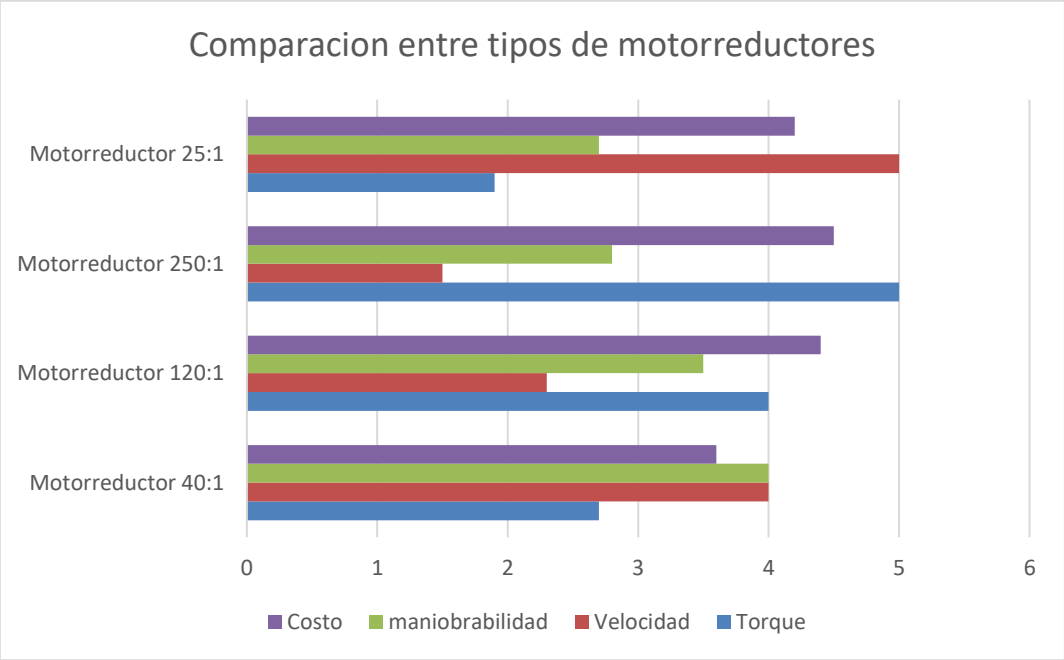
Identificación de Características y Selección de Componentes

Para garantizar un desempeño competitivo, Se investigo los reglamentos y requerimientos de las ligas de competencia Olimpiada Latinoamericana de Ciencias y tecnología (OLCyT) y Batalla de Robots Liga GTO, evaluando factores como resistencia, velocidad y capacidad de control. Se compararon diversas opciones de motores, sistemas de control y materiales estructurales. Entre los elementos clave seleccionados destacan:

Motores de alta eficiencia: Se eligieron motores con la potencia para la categoría de cada robot. En este caso se realizó un estudio comparando la velocidad, torque, maniobrabilidad y costo de cada motor de interés junto con su caja de reducción.

Para la maniobrabilidad se realizaron pruebas experimentales utilizando dos motores. Se observó que motores con relación muy baja (25:1) se dificulta la maniobrabilidad por su alta velocidad y motores con relación muy alta (250:1) la respuesta es lenta, y puede ser atacado por otro robot muy fácilmente.

Tabla 1: Comparación de costos, maniobrabilidad, velocidad y troque, entre las diferentes relaciones de engranaje de los motorreductores



Como se muestra en la Tabla 1, con base a la comparación de los resultados, se optó por utilizar motores con una relación media (40:1 y 120:1) ya que estos muestran un mejor control en el manejo del robot. Para el caso del robot mini sumo, se utilizaron motores con una relación 120:1, teniendo como prioridad el torque, ya que esto favorece al momento de empujar otro robot afuera del Dohyo. Y se utilizó los motores con una relación 40:1 en los robots de combate para mantener un equilibrio entre agilidad y torque. En la ilustración 1 se muestra la caja de reducción utilizada para el robot de batalla de 20lb, en la ilustración 2, el motorreductor empleado en el robot de combate amateur de 1lb y en la ilustración 3 se muestra el motorreductor que se implemento en el robot de minisumo



Ilustración 1: Motorreductor 36:1



Ilustración 2: Motorreductor 40:1



Ilustración 3: Motorreductor 120:1

Programación de microcontrolador vs Electronic Speed Controller (ESC): En etapas primarias del desarrollo del control, se utilizaron microcontroladores como ATmega328 y ESP32 junto con una placa integrada para la etapa de potencia. En la ilustración 4, se muestra el diagrama de conexiones para la tarjeta Pololu 18V22 con el microcontrolador (ATmega328 y ESP32)

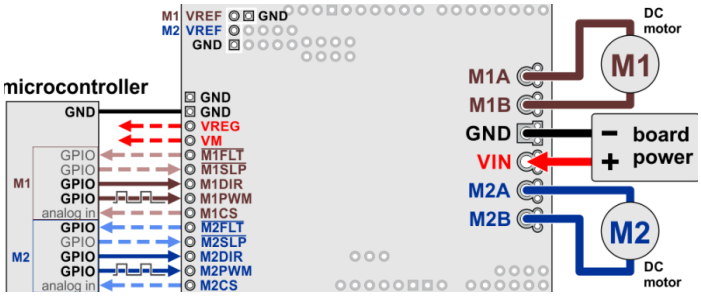


Ilustración 4: Diagrama de conexión con la placa Pololu 18V22

Este tipo de sistemas es sumamente susceptible a interferencias y fallos, ya que no están diseñados para un entorno rudo donde pueda recibir suciedad o altas vibraciones por el movimiento y carga estática. Por esta razón se optó por usar un ESC, este actúa como un puente h (mejorado) para la potencia del motor, interpretando las señales de control desde un receptor RC y modulando la energía enviada al motor. En la ilustración 5 se muestra el ESC conectado a dos motores de CD.

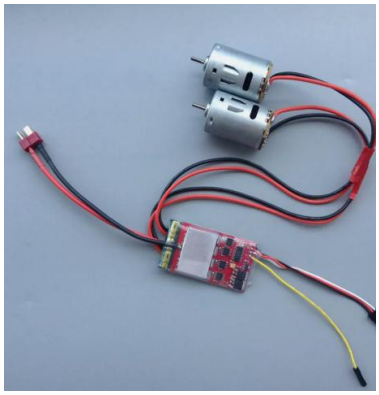


Ilustración 5: Sistema integrado de un ESC

Se realizó un análisis detallado para determinar los materiales adecuados en la fabricación de la carcasa y componentes mecánicos, como engranajes y poleas. Se evaluaron diversas opciones de termoplásticos, priorizando su facilidad de uso con impresión 3D. Inicialmente, se trabajó con PLA y PETG debido a su accesibilidad y manejabilidad, sin embargo, las pruebas demostraron que estos materiales no eran óptimos, por su baja durabilidad y resistencia a la fricción, como engranajes del sistema de armas, lo que llevó a explorar alternativas más resistentes y duraderas. En la ilustración 6, se muestra el sistema de engranes utilizados en el arma del robot Caronte.

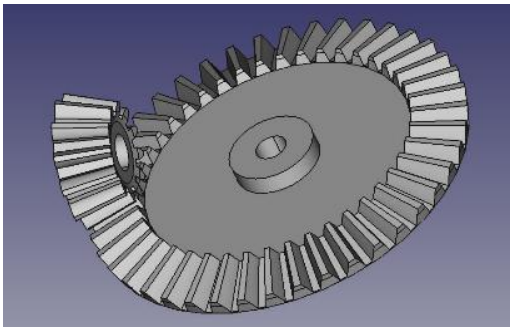
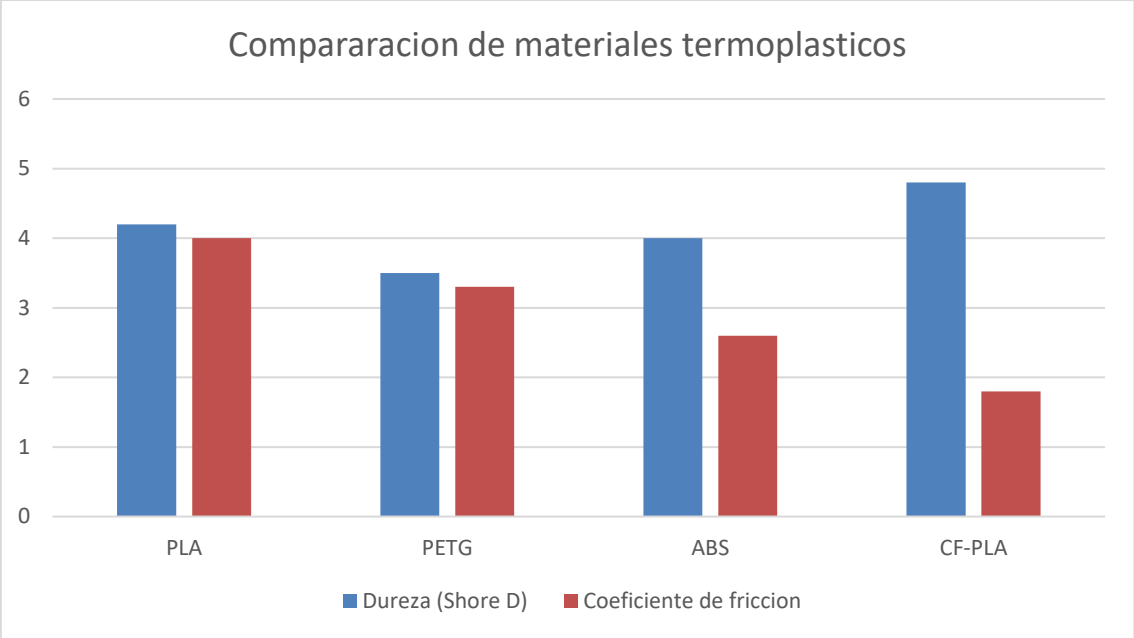


Ilustración 6: Sistema de engranajes usado en el arma del robot CARONTE

Se opto por utilizar materiales con mayor durabilidad como el CF-PLA (PLA reforzado con fibra de carbono) y el ABS. Estos tuvieron una mayor resistencia a la fricción y desgaste al dar un golpe con el arma. En la tabla 2 se muestra la comparación de los materiales probados.

Tabla 2: Comparativa entre diferentes materiales utilizando dureza D Shore y coeficiente de fricción



En el caso específico de la estructura del robot de combate de 23 lb se usaron placas de 5mm de aluminio 7075 para resistir grandes contusiones.

Diseño y Modelado Asistido por Computadora (CAD)
Una vez definidos los componentes con base a los reglamentos mencionados, se realizaron diagramas de conexiones electrónicas y planos estructurales, para establecer la configuración del sistema. Se empleó software de diseño asistido por computadora (CAD) para modelar los prototipos antes de su fabricación, asegurando que cumplieran con las dimensiones y restricciones de la normativa de las diferentes categorías.

Planos estructurales: con el uso de CAD se estructuro la carcasa de los robots, incluyendo el sistema de armas y tracción, a su vez de verifico el correcto ensamblaje y posición de cada una de las piezas diseñadas, considerando el tamaño y peso de los robots. La Ilustración 7, muestra el diseño final del robot de combate denominado Caronte, en la ilustración 8 el robot de combate CYRAX y en la ilustración 9 el robot de minisumo Akira.

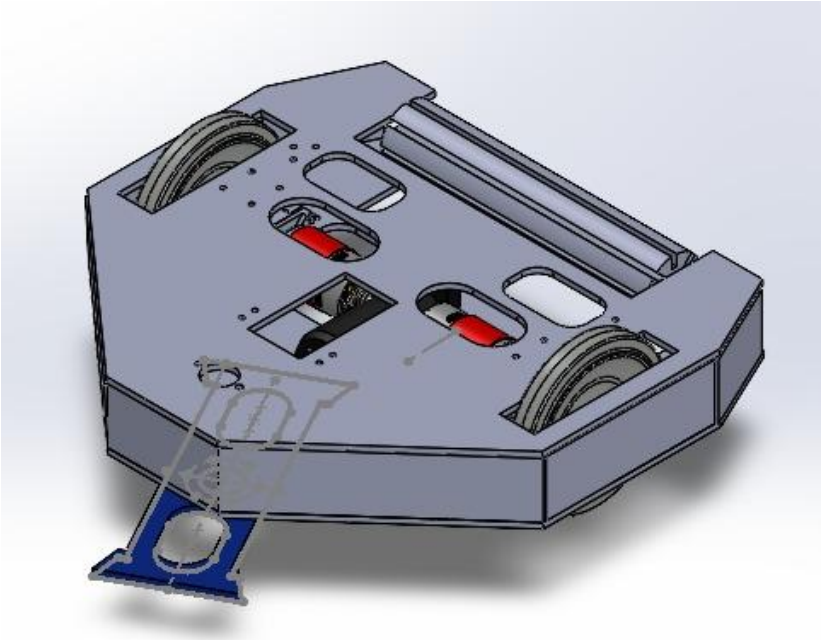


Ilustración 7: Robot CARONTE CAD

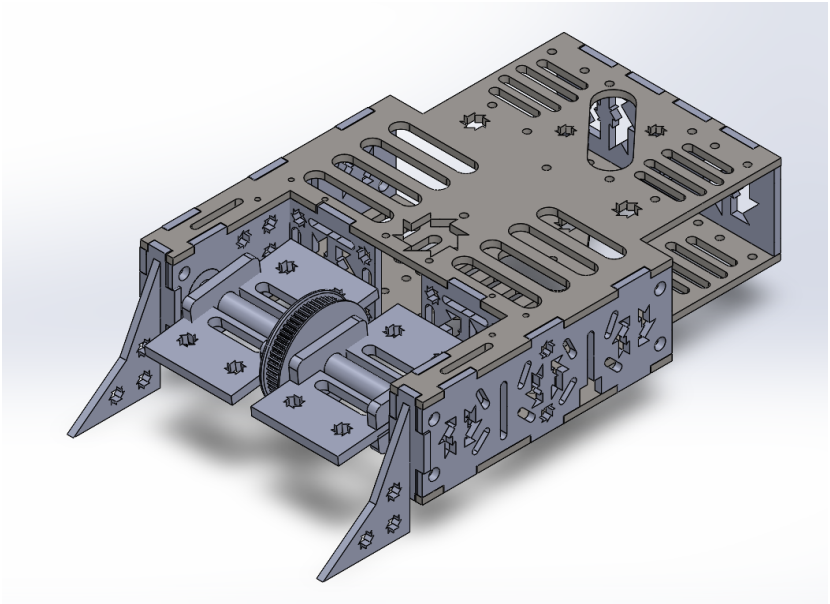


Ilustración 8: Robot CYRAX CAD

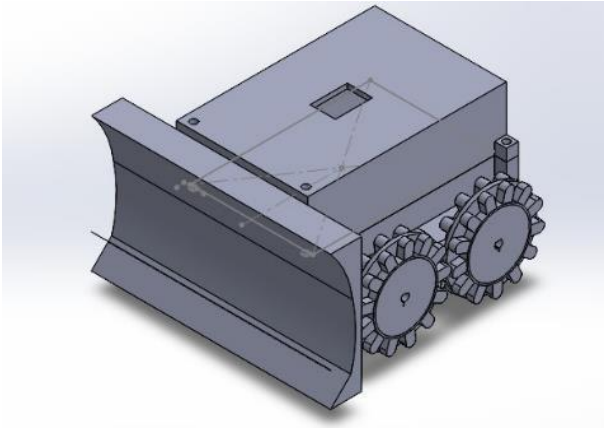


Ilustración 9: Robot AKIRA CAD

Simulación de posibles fallos mecánicos para mejorar la resistencia del diseño: Se realizaron simulaciones con el método de elemento finito suponiendo cargas comunes en este tipo de componentes, para así corroborar que el elemento de interés trabaje idealmente o visualizar si puede haber una posible falla en un punto en específico. En la ilustración 10 se muestra la simulación del engrane del arma principal del Caronte.

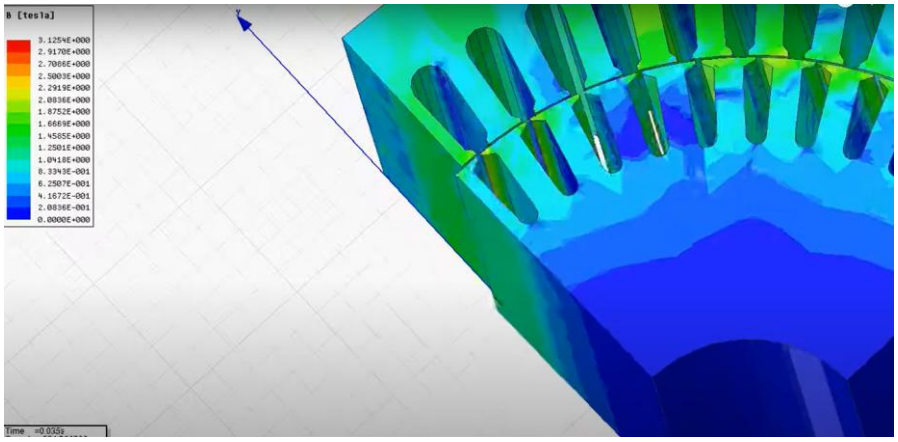


Ilustración 10: Simulación del comportamiento de un engrane usando MEF

Ajustes en la distribución de los componentes para optimizar el balance del robot: Consecuente a pasos anteriores se revisó que los componentes seleccionados para los robots tuvieran un espacio adecuado para su instalación y funcionamiento.

Desarrollo de Prototipos y Pruebas Iniciales

Se construyeron prototipos preliminares con materiales accesibles para evaluar la funcionalidad básica de los diseños. En esta etapa se probaron diferentes configuraciones de motores y sistemas de control. Entre las pruebas realizadas destacan:

- **Evaluación de movilidad:** los robots fueron sometidos a pruebas de velocidad y respuestas ante obstáculos.
- **Resistencia estructural:** los prototipos de combate fueron probados en simulaciones de impacto para verificar su durabilidad.
- **Optimización de peso:** se ajustaron los materiales y configuraciones para cumplir con las restricciones de cada categoría.

Tras las pruebas preliminares, se identificaron áreas de mejora y se realizaron modificaciones en los modelos. Algunos de los ajustes implementados incluyen:

- Sustitución del microcontrolador ATmega328 por ESC, mejorando el control de los motores en entornos exigentes.
- Refuerzo de la estructura de los robots de combate para mayor resistencia a impactos.

Pruebas de Campo y Evaluación en Competencias

Los robots fueron sometidos a pruebas finales antes de su participación en eventos. Se verificó la integración de los componentes y la respuesta de los sistemas en situaciones reales de competencia. Los robots con todos sus componentes integrados son los siguientes:

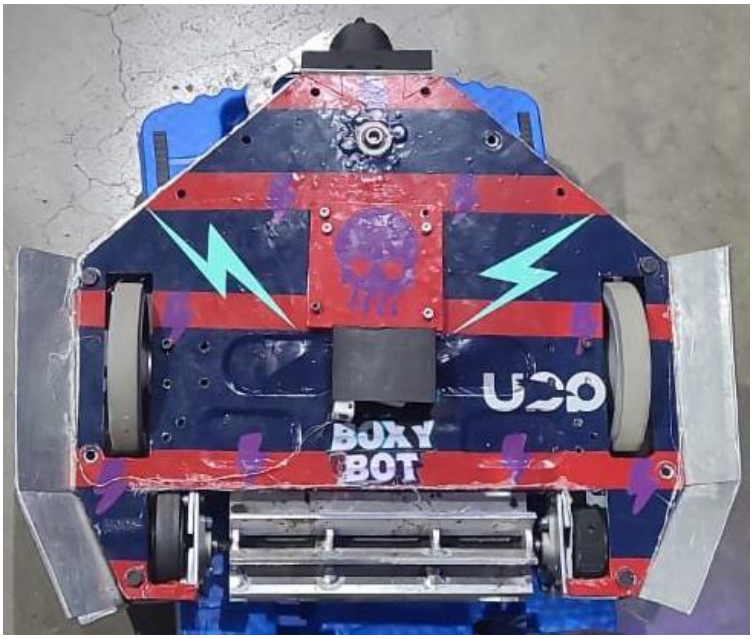


Ilustración 11: Robot de combate de 20lb CARONTE

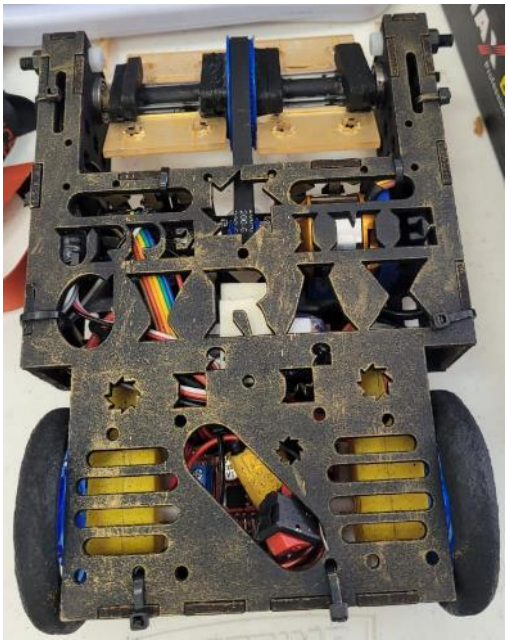


Ilustración 12: Robot de combate amateur de 1 lb CYRAX

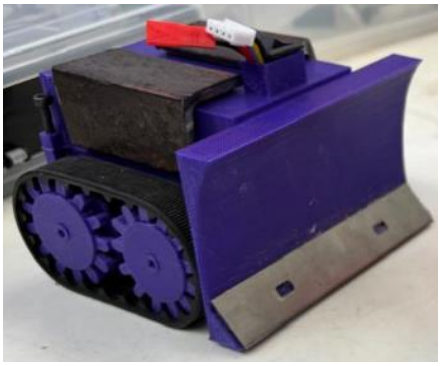


Ilustración 13: Robot mini sumo RC AKIRA

RESULTADOS

Los robots diseñados demostraron un desempeño sobresaliente en competencias, demostrando así un buen método de diseño y fabricación, un proceso donde se priorizo un funcionamiento correcto fuera de cualquier tipo de falla estructural o eléctrica. Los resultados obtenidos en competencias de índole robótica fueron:

- El robot mini sumo RC AKIRA llego a etapa de semifinales en la Olimpiada Nacional de Ciencia y Tecnología Internacional, en su etapa internacional 2024.
- El robot de combate amateur de 1 lb CYRAX logró el primer lugar de su categoría en Olimpiada Nacional de Ciencia y Tecnología Región Centro-Norte e Olimpiada Nacional de Ciencia y Tecnología Internacional 2024.
- El robot de combate de 20lb CARONTE llego a etapa de semifinales en Batalla de Robots Liga GTO 2024.

Además, se corroboro el buen funcionamiento de mejoras y cambios implementados en los robots, como:

- Se verificó que el Electronic Speed Controller mejoraba el rendimiento, superando al ATmega328 utilizado inicialmente.
- Se verifico la durabilidad del CF-PLA a comparación del PLA convencional, mejorando mucho la resistencia a golpes y a la fricción.

La implementación de estos proyectos inspiró la creación del Club de Robótica Boxy Bot en la Universidad Politécnica de Pénjamo. Donde alumnos de la Universidad Politécnica de Pénjamo fueron creando sus propios robots siguiendo la metodología comentada en este documento, en 2023 se inició con 4 alumnos y 3 robots fabricados, en 2025 se cuenta con más de 15 alumnos y 10 robots fabricados dentro del club de robótica; además se ha impartido platicas de robótica a más de 100 niños y niñas de primaria en escuelas rurales alrededor de Pénjamo, generando un impacto social efectivo hacia el uso de la tecnología. En la ilustración 14 se muestra el logo representativo del club de robótica BOXY BOT



Ilustración 14: Logo del club de robótica BOXY BOT

CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto, se demostró la relevancia de una metodología estructurada basada en el análisis de componentes, el diseño asistido por computadora y la optimización de estrategias de control, lo que permitió la creación de prototipos con alto rendimiento en escenarios competitivos. La sustitución del microcontrolador ATmega328 por un ESC marcó una gran diferencia en la mejora del desempeño de los sistemas de movilidad, obteniendo una mayor estabilidad y resistencia ante las exigencias de combate. Además, el impacto del proyecto inspirando a una nueva generación de estudiantes a explorar el potencial de la robótica y consolidando la creación del Club de Robótica Boxy Bot como un espacio de aprendizaje colaborativo y desarrollo tecnológico. La excelencia alcanzada en cada fase del proceso reafirma la importancia de la experimentación y la iteración en el perfeccionamiento de modelos funcionales, sentando las bases para futuras investigaciones que impulsen el avance de la robótica competitiva dentro de la Universidad Politécnica de Pénjamo.

BIBLIOGRAFÍA

1. López, A., & Martínez, J. (2023). *Robots de combate: Estrategias y diseño avanzado*. Editorial Tecnológica.
2. Pérez, R., & Gómez, L. (2022). *Mini Sumo Robótico: Principios y aplicaciones en competencias*. Universidad Nacional de Ingeniería.
3. Tournier, F. (2023). *Electronic Speed Controllers (ESC) en robótica: Principios y usos*. Revista de Ingeniería Electrónica, Vol. 21(3), pp. 45-67.
4. Erazo-Arteaga, V. A. (2022). El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina.

EVALUACIÓN DE SENSORES DE GAS BASADOS EN NANOTUBOS DE TITANIO DECORADOS CON NANOPARTICULAS METÁLICAS

S. Capula-Colindres[1], G. Terán[1], E. Torres-Santillán[2], J. Velazquez[2]

[1]Departamento de Metalurgia CECYT2, Instituto Politécnico Nacional (IPN) C.P. 11200,
[2]Departamento de Ingeniería Química Industrial ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional (IPN) C.P. 07738.
selenecapula@gmail.com

RESUMEN

Actualmente, los sensores de gas basados en óxidos metálicos son utilizados comercialmente debido a que han demostrado una alta sensibilidad, rápida respuesta de detección, estabilidad y un eficiente tiempo de recuperación. Sin embargo, estos dispositivos necesitas una fuente de calentamiento adicional para activar el material sensible (250 °C - 400 °C). Lo que los limita para diferentes aplicaciones donde es necesario la detección de gases a temperatura ambiente. El óxido de titanio (TiO_2) en tamaño nanométrico es un excelente candidato para la detección de gases debido a sus excelentes propiedades eléctricas y ópticas. Estos materiales presentan una alta área superficial, alta robustez y estabilidad. Por otro lado, estos materiales son capaces de detectar gases a temperatura ambiente. Por lo tanto, este trabajo presenta un estudio sobre nanotubos de titanio ($NTiO_2$) decorados con platino (Pt) y paladio (Pd) mediante la técnica de deposición de vapor químico metálico (MOCVD). Los nanotubos de titanio fueron sintetizados mediante el método hidrotermal. El sensor fue expuesto a vapores de etanol en un intervalo de 50ppm hasta 1000 ppm a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos mediante Microscopia electrónica de transmisión (TEM) confirman la presencia de nanoestructuras con morfología tubular, así como la existencia de nanoparticulas sobre las paredes de los nanotubos. De acuerdo al análisis de Difracción de Rayos X, la fase que predomina en los $NTiO_2$ es la anatasa. Los sensores fueron sensibles a los vapores de etanol, y su respuesta fue directamente proporcional a la concentración evaluada. Las evaluaciones se repitieron tres veces con el objetivo de verificar los resultados obtenidos. Los $NTiO_2$ sin nanoparticulas si detectaron el vapor de etanol, sin embargo, no hubo cambio de respuesta cuando se evaluó a diferentes concentraciones.

INTRODUCCIÓN

El óxido de titanio es un semiconductor tipo N con una banda prohibida alrededor de ~3.2 eV y es uno de los más prometedores candidatos para aplicación de detección de gases debido a su bajo costo [1]. Debido a su fácil flexibilidad en el ajuste de sus características microestructurales (longitudes, tamaño de diámetro, número de paredes, área superficial) los nanotubos TiO_2 son altamente atractivos como dispositivos fotoelectrónicos, inmovilizadores de biomoléculas, soportes catalíticos, sensores y biosensores [1-2].

$NTiO_2$ han sido empleados como sensores en la detección de hidrogeno, oxigeno, acetona, CO, Tolueno, NOx, $CO(CH_3)_2$ y metanol [2-3]. Aunque se han reportado interesantes resultados, el inconveniente que se presenta en estos materiales es la baja selectividad en una mezcla de gases, larga respuesta, un tiempo de recuperación prolongado y una temperatura de operación alta. El grupo de Yang [4] reporto que $NTiO_2$ es el material más empleado como soporte en la detección de H_2. La capacidad de detección fue de ppm hasta ppb. Sin embargo, para incrementar la sensibilidad del material y su rápida respuesta es necesario incrementar la temperatura de operación. Este comportamiento limita su aplicación donde es necesario detectar a temperatura ambiente cuando los gases son flamables es por ello que intensas investigaciones se han desarrollado en la búsqueda de materiales que puedan detectar a temperatura ambiente. Una alternativa para solventar este problema es el decorado de $NTiO_2$ con nanopartículas de metales. Los metales que se han empleado para este objetivo son platino (Pt), paladio (Pd), oro (Au) y plata (Ag). Los $NTiO_2$ decorados con Pd mostraron el mejor desempeño en la detección de H_2, los dispositivos fueron sometidos a un

tratamiento térmico de 700°C [5]. Por otro lado, Kwon y colaboradores [1] fabricaron un sensor basado en $NTiO_2$ mediante el método de anodización. La respuesta de detección fue de 68,000 y 1,380,000% a 300 y 1000 ppm de vapores de alcohol. La temperatura de operación fue de 250 °C, el tiempo de recuperación fue de 14 segundos y el tiempo de respuesta fue de 90 segundos. El grupo de Taha reporta la utilización de nanoestructuras basados en TiO_2 las cuales las evaluaron con vapores de alcohol. Los materiales desarrollados fueron capaces de detectar a temperatura ambiente. Las nanopartículas de TiO_2 reportaron sensibilidad hacia vapores de alcohol a bajas temperaturas de operación a diferencia de otras morfologías. Por el contrario, los nanoalambres de $TiO2$ mostraron una buena respuesta, no obstante, las nanopartículas fueron las que presentaron menor tiempo de recuperación después de la exposición de los vapores. En el caso de los nanotubos de TiO_2 exhibieron una mayor capacidad de absorción de las moléculas de alcohol [3]. Por lo tanto, este trabajo presenta el decorado de $NTiO_2$ con nanopartículas de Pd-Pt mediante la técnica MOCVD. Se evaluó su comportamiento eléctrico mediante la exposición de varias concentraciones de vapores de C_2H_6O.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de nanotubos de titanio ($NTiO_2$)

Los nanotubos de titanio ($NTiO_2$) fueron sintetizados mediante el método hidrotermal reportado por Torres y colaboradores [6]. Este consistió en la mezcla de nanopartículas comerciales de TiO_2 (Degussa P25) y una solución de NaOH, seguido del tratamiento hidrotermal. En una autoclave de acero inoxidable se transfirió la mezcla antes mencionada y se mantuvo a una temperatura de 150°C por 18 h con agitación constante. Después de la reacción hidrotermal, la solución resultante fue filtrada y el producto obtenido fue lavado varias veces con agua destilada. Los nanotubos sintetizados fueron lavados con una solución de HCl 1M por 3 h con agitación constante. Finalmente, los $NTiO_2$ fueron filtrados y lavados repetidamente con agua destilada y secados en una estufa a 80°C por 24 h. La muestra obtenida fue sometida a un tratamiento térmico de 500 °C por 2 h.

Decorado de $NTiO_2$ con nanopartículas de Pt y Pd

La incorporación de nanopartículas Pt-Pd en las paredes de $NTiO_2$ fue realizado mediante la técnica de deposición de vapor químico metálico (MOCVD). Se utilizaron acetilacetonatos de Pt ($C_{10}H_{14}O_4Pt$) y Pd ($C_{10}H_{14}O_4Pd$) como precursores. Los $NTiO_2$ y los precursores de Pt y Pd fueron llevados a un reactor de paredes calientes MOCVD a una temperatura de evaporación (180 °C) y después a una temperatura de descomposición (400 °C) por 10 min. Los vapores de los precursores fueron llevados mediante el gas de arrastre Argón (Ar) con una velocidad de flujo de 100 cm^3/min. y una presión entre 700-80 Torr.

Mediciones de respuesta del gas

El método de recubrimiento por secado (drop-coating) se empleó para el depósito del material sensible ($NTiO_2$/Pt-Pd) sobre el sustrato interdigitado (ver Fig. 1). Se tomó una alícuota de la mezcla de $NTiO_2$/Pt-Pd y glicerol seguido del depósito directo en el sustrato. El sensor se sometió a 170 °C durante 1 h y después a un recocido de 400 °C por 2 h.

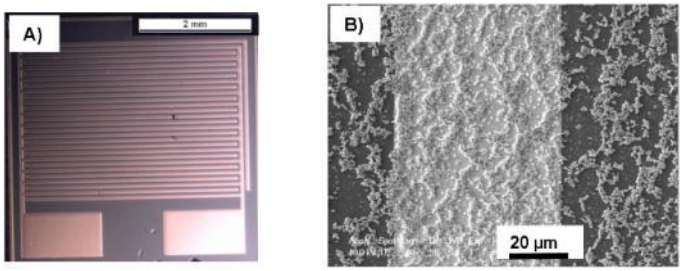


Fig. 1 Interdigitado de Silicio. A) Imagen óptica de la configuración del sustrato y B) Dispersión del material sensible ($NTiO_2$/Pt-Pd) sobre el sustrato.

La evaluación de respuesta del sensor en presencia de vapores de C_2H_6O se realizó a cabo empleando un dispositivo de flujo de gas de dos brazos con dos controladores de flujo másico. Las mediciones eléctricas se registran por medio de un multímetro digital (Keithley modelo 6430) las cuales son enviadas a una PC para su posterior análisis. Las concentraciones evaluadas fueron a partir de 50 ppm hasta 1000 ppm. El tiempo de exposición del gas sobre el sensor fue de 1 minuto. Para generar los vapores de C_2H_6O se utilizó un matraz Schlenk el cual contiene 200 cm^3 del líquido a estudiar. Este se somete a un procedimiento de baños de agua con una temperatura de evaporación constante de 30 °C, con el objetivo de fijar la presión parcial del vapor de etanol.

Caracterización de materiales

Las propiedades estructurales y morfológicas de los nanomateriales sintetizados y decorados fueron investigados usando un microscopio electrónico de transmisión (TEM, JEOL JEM-ARM200CF) y difracción de rayos X (DRX, Siemens D5000 usando radiación Cu-Kα).

RESULTADOS

Caracterización estructural y morfológica de $NTiO_2$ y $NTiO_2$/Pt-Pd

El difractograma de las muestras $NTiO_2$ y $NTiO_2$/Pt-Pd es presentado en la Figura 2. Como se puede observar en el patrón de difracción de $NTiO_2$ (Fig. 2a) aparecen varias reflexiones. Donde cuatro de ellas se exhiben en las posiciones 2θ= 9.53°, 24.5°, 37.64° y 48.15° las cuales han sido asignadas a los nanotubos de TiO_2. De acuerdo a la bibliografía, la característica principal encontrada en el análisis estructural de los $NTiO_2$ es que la reflexión a bajos ángulos (2θ<10°) se ha asignado a la distancia entre las paredes de la estructura nanotubular [7-9]. Esto sugiere que las nanopartículas originales de la fase anatasa han sido transformadas en una estructura cristalina diferente.
Por otro lado, las intensidades de los picos del patrón de difracción DRX ubicadas en 2θ= 25.26°, 54.13°, 62.77°, 68.49°, 69.86°, 75.08° y 82.56° corresponden a la estructura original tetragonal del precursor de TiO_2 fase anatasa (JCPD No. 89-4203). Este comportamiento puede ser atribuido a la cristalización de los nanotubos al ser sometidos a altas temperaturas de recocido [10].

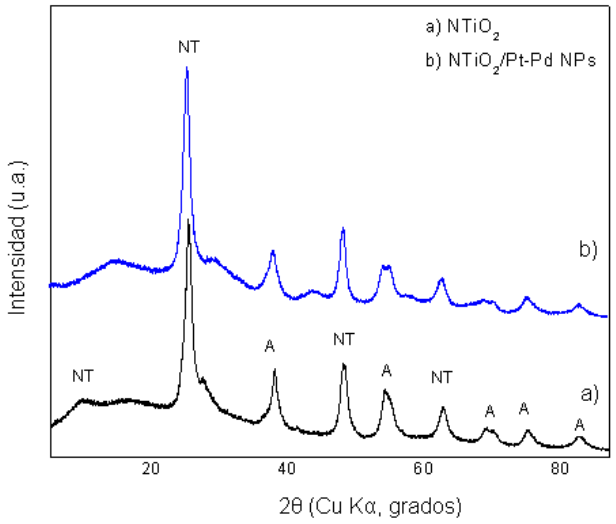


Figura 2. Patrones de difracción. a) $NTiO_2$ y b) $NTiO_2$/Pt-Pd (1% peso).

El patrón de DRX de la muestra $NTiO_2$/Pt-Pd se presenta en la Figura 2b. Realizando una comparación de ambos difractogramas con y sin partículas metálicas no hay cambio, es decir no se observan las reflexiones características de las nanopartículas de Pt o Pd, posiblemente es debido a

la baja concentración metálica (1% wt). Así mismo, de acuerdo a estos resultados la incorporación de la fase metálica no modifica la estructura tubular del material.

La morfología y estructura tubular de los materiales sintetizados de TiO_2 fueron confirmados mediante microscopia electrónica de transmisión (TEM). La Figura 3a exhibe una micrografía de los $NTiO_2$ sintetizados, las longitudes que alcanzan los materiales son de varias decenas de micrómetros y el diámetro promedio es de 13.29 nm. La Figura 3b presenta una imagen TEM a baja magnificación donde se observa la medición de la distancia interplanar de 0.35 nm que corresponde al plano (101) de TiO_2 fase anatasa.

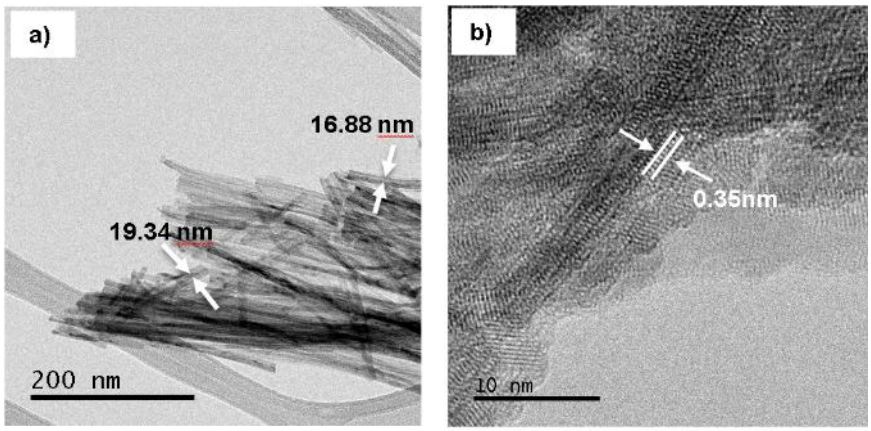


Figura 3. Micrografías de TEM. a) $NTiO_2$ y b) imagen a baja magnificación de $NTiO_2$ en donde se puede apreciar la distancia interplanar del material.

El tamaño de partícula de la fase metálica Pt-Pd fue determinado mediante la medición directa de las imágenes de TEM (Fig. 4 a-b), demostrando que el tamaño promedio de partícula es alrededor de 4.3 nm. La distribución y la cantidad de nanopartículas sobre los $NTiO_2$ es heterogénea, hay zonas donde hay presencia de ellas y zonas donde no hay evidencia de éstas. Posiblemente este comportamiento es debido a cantidad de precursor que se utilizó para la síntesis de las NPs (1%wt). La forma de las nanopartículas es esférica y se pueden encontrar nanopartículas desde 2.53 nm hasta 7.65 nm.

La micrografía de la Figura 4b se presenta una imagen de una nanopartícula individual y su amplificación, como se puede observar la distancia interplanar es de 0.23 nm la cual corresponde apropiadamente al plano (111) del Pd de acuerdo a la tarjeta JCPD No. 046-1043. En la Figura 4c se puede comprobar la presencia de una nanopartícula de Pt, la distancia interplanar medida (0.295 nm) corresponde al plano (111) del Pt de acuerdo a la carta cristalográfica JCPD No. 004-0802.Estos resultados sugieren que algunas nanopartículas pueden ser monometálicas, es decir que son solamente de Pt o de Pd. De acuerdo a la bibliografía [11] se reportan cuatro posibles subestructuras de nanopartículas cuando se emplean dos diferentes precursores metálicos. En este estudio las nanopartículas sintetizadas fueron Au-Pd. Las subestructuras que se pueden generan son: estructura core-shell, solución sólida, partícula monometálica y cluster-in-cluster

Caracterización eléctrica de los materiales

En la Figura 5 se observa el cambio de resistencia que presentaron los sensores $NTiO_2$/Pt-Pd. Los materiales fueron sensibles a todas concentraciones que fueron evaluadas de 50 ppm hasta 1000 ppm a temperatura ambiente. Las mediciones se repitieron tres veces para asegurar la respuesta del sensor. La intensidad de las señales es directamente proporcional a la concentración evaluada. No obstante, en la concentración de 1000 ppm disminuyo la intensidad del pico. Este comportamiento probablemente puede ser atribuido a la saturación del sensor ya que las evaluaciones fueron realizadas a temperatura ambiente. Una alternativa que ha demostrado ser eficiente para la recuperación del sensor es someterlo a un tratamiento térmico o exponerlo a rayos UV

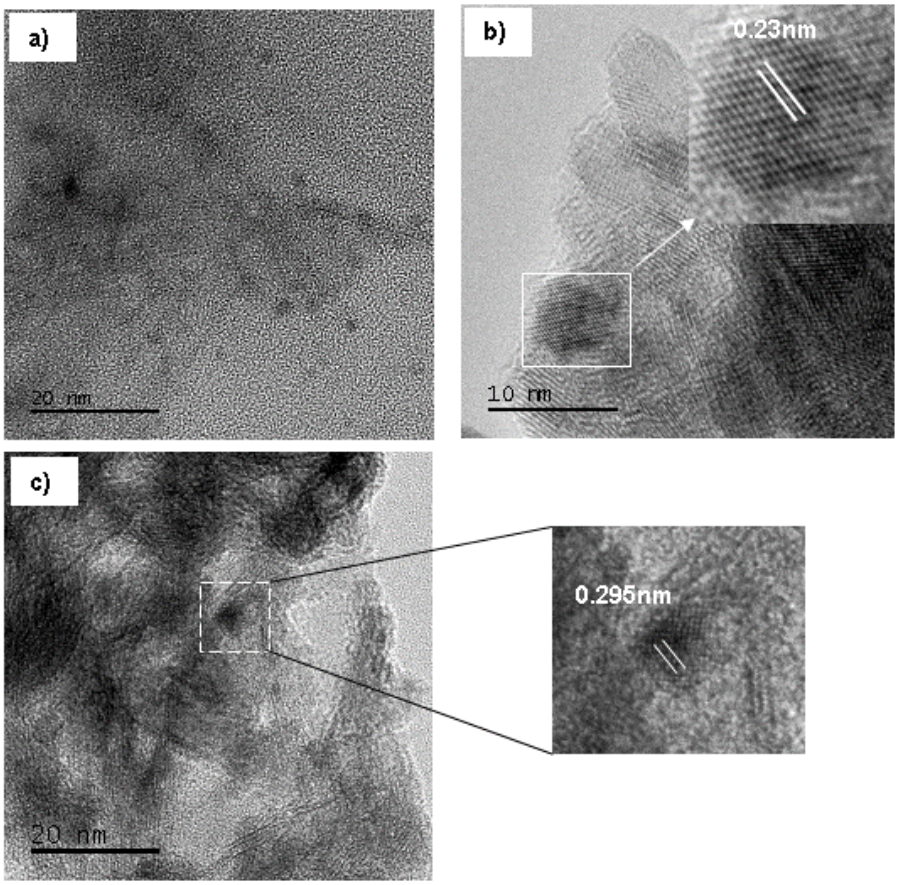


Figura 4. Micrografías TEM a) Distribución de NPs Pt-Pd, b) imagen a baja magnificación de Pd NPs individual donde se puede observar la distancia interplanar y c) Pt NPs con su respectiva medición de la distancia interplanar.

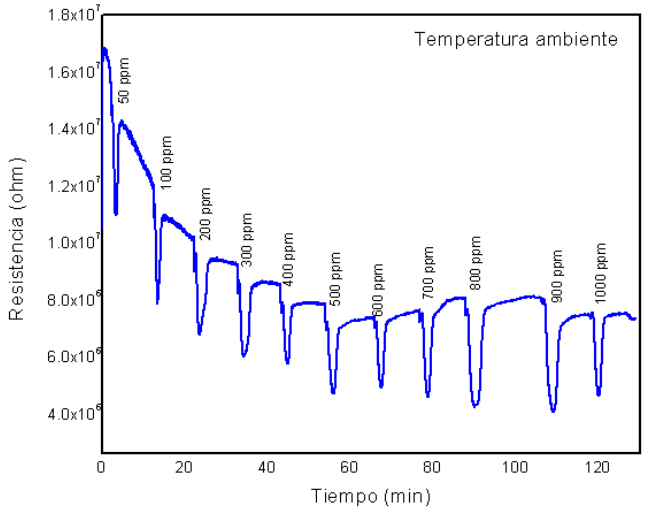


Figura 5. Cambio de resistencia del sensor NTiO2/Pt-Pd NPs ante vapores de C_2H_6O a diferentes concentraciones operado a temperatura ambiente.

CONCLUSIONES

Se sintetizaron nanotubo de TiO_2 exitosamente mediante el método hidrotérmico. Se incorporaron a las paredes del nanotubo nanopartículas metálicas de Pt y Pd mediante el método MOCVD. Se demostró mediante TEM y DRX la presencia de $NTiO_2$, donde el tamaño promedio de diámetro fue de 13.29 nm. Mediante TEM se corroboró la existencia de Pt-Pd NPs. Los sensores detectaron vapores de C_2H_6O a diferentes concentraciones. La sensibilidad fue directamente proporcional a la concentración evaluada, sin embargo, a 1000 ppm se observa una disminución de resistencia probablemente debido a que se saturo el sensor. $NTiO_2$/Pt-PdNPs son materiales capaces de detectar vapores de C_2H_6O a temperatura ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Y. Know, H. Kim, S. Lee, I. Joo, T.Yeon, W. In, C. Lee, “Enhanced ethanol sensing properties of TiO2 nanotube sensors”, Sensors and Actuators B., Vol. 173, 2012, pp. 441-446.
2. P.X. Zhao, T.Tang, J. Mao, Y.X. Chen, H. Song, J.W. Wang, Y. Song, Y.Q. Liang, X.M. Zhang, “One dimensional MoS2-decorated TiO2 nanotubes gas sensors for efficient alcohol sensing”, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 674, 2016, pp. 252-258.
3. S. Taha, S.Begum, V.N. Narwade, D. Halge, J. W. Dadge, M.P. Mahabole, R.S. Khairnar, K. A. Bogle, “Titanium dioxide nanostructure based alcohol vapor sensor” Conference Proceeding, Vol. 2220, 020195, 2020, pp. 1-5.
4. .L.Xia, L.S. Lian, C.Q. Yun, Y. S. Zhuo, “A review on TiO2 nanotube arrays: fabrication, properties and sensing applications, Chinese Science Bulletin, Vol. 55, 4-5, 2010, pp 331-338.
5. L.V.Tasyurek, E.Isik, I.Isik, N. Kilinc, “Enhancing the performance of TiO2 nanotube-based hydrogen sensors through crystal Tiempo (minutos) l electrode” International jounal of hydrogen energy, Vol. 54, 2024, pp
6. E. Torres, S. Capula, E. Villagarcía, C. Juárez, “Degradación fotocatítica de pigmentos textiles en sistemas acuosos empleando nanotubos de titania”, Avances de la Ciencia en México, 7, pp. 3627-3633.
7. M. Sugita, M.Tsuji, M. Abe, “Synthetic Inorganig ion-exchange materials. LVIII. Hydrothermal synthesis of a new layered lithium titanate and its alkali ion exchange”, Bull. Chem. Soc. Jpn. Vol. 63, 7, 2006 pp1978-1984
8. Q. Chen, W.Z. Zhou, G.H. Du, L.M. Peng, “Trititanate nanotubes made via single alkali treatment” Adv. Mater. Vol.14, 17, 2002, pp 1208-1211.
9. Z.Y. Yuan, B.L. Su, “Titanium oxide nanotubes, nanofibers and nanowires”, Colloids Surf. A Vol. 241,1-3, 2004, pp173-183.
10. Y.Known, H. Kim, S. Lee, I. Chin, T. Yeon, W. In, C. Lee, “Enhanced ethanol sensing properties of TiO2 nanotube sensors”, Sensors and Actuators B: Chemical. Vol 173, 2012, pp 441-446
11. N. Nitani, M. Yuya, T. Ono, T. Nakagawa, s. Seino, K. Okitsu, Y Mizukoshi, S. Emmura, T.A. Yamamoto, “Sonochemically synthesized core-shell structured Au-Pd nanoparticles supported on γ-Fe2O3 particles”, Vol. 8, 2006, pp. 951-958

SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO (DDB) A BAJA TEMPERATURA Y PRESIÓN: RUTA ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE

Jorge Morales Hernández[1], Eugenia Josefina Aldeco Pérez[1], Antonia Sandoval González[1], Coraquetzali Magdaleno López[2], Héctor Herrera Hernández[3]

[1]Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica s.c. Parque Tecnológico Querétaro s/n, Sanfandila Pedro Escobedo, Querétaro, C.P.76703, México [2]Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, Blv. Cuitzeo de los Naranjos 401, Col. Cuitzeo de los Naranjos, Guanajuato, C.P. 36976, México. [3]Centro Universitario UAEM Valle de México, Blvd. Universitario s/n, Predio San Javier, Atizapán de Zaragoza, Estado de México, México.
jmorales@cideteq.mx

RESUMEN

Los recubrimientos del tipo Diamante Dopado con Boro (DDB) son ampliamente utilizados sobre sustratos de titanio en los procesos de oxidación avanzada, para la degradación de contaminantes recalcitrantes y otros contaminantes complejos, dada la alta estabilidad de este tipo de electrodos y la gran ventana de potencial en la que pueden trabajar, con respecto a los electrodos de Rutenio y Tantalio; siendo éstos últimos de alto costo y muy contaminantes.

Es muy común que la síntesis de Diamante Dopado con Boro (DDB) se realice a través de la técnica de Deposición de Vapor Química (CVD singles en inglés) a muy altas presiones (< 20 MPa) y temperatura superior a los 1200 °C.

Al promover un cambio de hibridación del grafito de Sp2 a Sp3 se logra la transformación de la estructura del carbono tipo diamante (DLC, diamond like carbon); reportándose una relación Sp2/Sp3 del orden de 0.6.

En la presente investigación fue posible lograr el cambio de hibridación natural del carbono, al doparlo con boro y someterlos a un proceso de deformación continua bajo condiciones normales de presión y temperatura, por medio de la técnica de Molienda Mecánica de alta energía; donde es posible generar una alta densidad de defectos estructurales, incrementando la entalpía y entropía del sistema hasta obtener un material meta estable.

Experimentalmente, para promover la hibridación del grafito en una estructura tipo diamante característica del DDB, se utilizaron tres concentraciones de boro (5, 7.5 y 17% at B) como medio de dopaje y las mezclas fueron sometidas a un proceso de deformación mecánica en un molino del tipo planetario durante 80 h continuas bajo una atmósfera inerte.

La relación de hibridación Sp2/Sp3 cambio de 2.7 inicialmente a 0.61 después de 80 h de molienda, a través de identificar el cambio en intensidad relativa del pico en la posición 43.72 (2Θ grados) por medio de DR-X y por Espectroscopia Raman con una longitud del láser de 638 nm.
La morfología de los polvos después de molienda fue del tipo esférico con un tamaño de cristal promedio de 2.19 nm.

La síntesis de la estructura tipo diamante DLC en el estado sólido a baja temperatura y presión, represente un alto ahorro de energía y protección al ambiente comparado con el método tradicional de CVD, lo que hace que el desarrollo de electrodos de titanio con DDB permita el tratamiento de aguas complejas de alto impacto social, económico y ambiental en el mundo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las aguas residuales de diferentes sectores industriales tales como el aeronáutico, automotriz, farmacéutico, metal-mecánico e incluso la agricultura, generan aguas complejas recalcitrantes con altas concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos de moléculas largas

y complejas que son difíciles de degradar. Los métodos fisicoquímicos convencionales para el tratamiento de aguas residuales, han llegado al límite de su capacidad para el cumplimiento de las normas oficiales, lo que limitará en los próximos años la capacidad de tratar y de verter las aguas residuales, con serios problemas sociales y ecológicos.

Los diferentes métodos de oxidación avanzada son una alternativa a la solución de este problema, sin embargo, la inyección de ozono, oxígeno en altas cantidades, peróxido de hidrógeno entre otros agentes oxidantes, hace que los procesos sean caros y poco rentables.

Los procesos de oxidación electroquímica avanzada (EAOP siglas en inglés) han cobrado mayor importancia en los últimos años. Estos procesos son una alternativa para el tratamiento de efluentes industriales que presentan un alto contenido de contaminantes orgánicos, como consecuencia de la contaminación antropogénica del agua y el bajo rendimiento de los métodos convencionales. Los EAOP han permitido no solo el tratamiento adecuado de sustancias recalcitrantes sino también, la eliminación de patógenos presentes en el agua, con una alta eficiencia y bajos costos [5]. La oxidación electroquímica (OE) es llamada también como oxidación anódica, donde se requiere de equipo sencillo, fácil de controlar y combinar con otras tecnologías electroquímicas.

Durante las primeras etapas de desarrollo de la OE específicamente en contaminantes complejos, se emplearon electrodos de titanio recubiertos con Óxido de Rutenio y Tantalio, sin embargo, desde su origen han sido electrodos de muy alto costo debido a la escasees de este tipo de sales de importación, así como una alta dependencia tecnológica del extranjero para la manufactura de este tipo de electrodos.

La NOM-001-SEMARNAT-2021 referente a la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores, disminuirá el valor del DQO a 150 mg/L, lo que generará incumplimiento a la norma con la tecnología dispone en México y serios problemas de contaminación ambiental en la próxima década.

El diseño de los nuevos reactores electroquímicos, demanda la reducción de energía, el incremento de la eficiencia de remoción de los contaminantes y una alta selectividad. Los reactores electroquímicos continuos de un paso para el tratamiento de diferentes matrices, han incorporado a los electrodos de diamante dopados con boro (DDB) los cuales son químicamente inertes, con una buena estabilidad electroquímica, buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión; sin embargo, hay que poner especial cuidado en el contenido de boro, en la relación sp2/sp3, el tipo de sustrato y espesor del recubrimiento de DDB; los cuales influyen en la capacidad de oxidación y eficiencia del proceso.

El diamante dopado con boro (DDB) es un material cerámico que ha demostrado ser de alta eficiencia como recubrimiento en electrodos de titanio, para su uso en la oxidación electroquímica de aguas residuales de los sectores petrolero y aeronáutico. Comparado con otros recubrimientos como el óxido de rutenio, iridio y tantalio, los cuales son costosos y contaminantes, el DDB es más eficiente, pudiendo lograr eficiencias del 99% en el tratamiento de aguas residuales complejas por medio de electro oxidación, sin embargo, la síntesis comercial del DDB se lleva a altas temperaturas y presiones (< 20 MPa y >1200 °C) de tal manera que los procesos son poco rentables por sus altos costos. Una ruta alternativa para lograr el cambio de hibridación del grafito (Sp2) a la estructura del diamante (Sp3) con un menor consumo de energía, es por medio de la mecanosíntesis de alta energía.

A diferencia del método de síntesis CVD a alta temperatura y presión, la fuerza motriz para lograr el cambio de hibridación del grafito es posible a través de la alta energía de deformación que puede acumularse en la estructura del grafito. Esta alta energía de deformación promueve en una primera etapa la formación de una gran cantidad de defectos estructurales tales como vacancias y dislocaciones lo que posteriormente, permite la difusión atómica, el movimiento de planos cristalográficos y el cambio de estructura de hexagonal del grafito a una nueva estructura tretragonal,

junto con el cambio de hibridación Sp3, a lo que vamos de definir como la estructura tipo diamante (Diamond Like Carbon, DLC).

Los electrodos de DDB en sustratos de titanio, vienen a remplazar por eficiencia, durabilidad y costo a los electrodos de óxido de rutenio, iridio y tantalio; los cuales son altamente contaminantes en su proceso de síntesis, de baja disponibilidad y de alto costo. Debilidades que deben ser consideradas en un nuevo desarrollo tecnológico enfocado al diseño de electrodos de titanio recubiertos con DDB; cuya ciencia de frontera se enfoca en la síntesis del diamante dopado con boro fuera del estado de equilibrio, a través de modificar la hibridación del grafito (Sp2) al diamante (Sp3) por medio de la mecanosíntesis en estado sólido.

TEORÍA

Estructura Del Carbono

Cuatro electrones desapareados son los que definen el comportamiento del carbono en millones de compuestos, sin que ninguno de ellos tenga preferencia o mayor capacidad de reacción. La única forma que se ha encontrado para explicar este comportamiento es por medio de la teoría de la hibridación (mezclar).

Si se mezcla el orbital 2s con los tres orbitales 2p, se tendrán cuatro orbitales híbridos, 2sp3, que tienen la misma energía y donde los electrones colocados en dichos orbitales tendrán la misma capacidad de reacción, como ocurre en todos los compuestos con enlace covalente sencillo.

El átomo de carbono en su estado fundamental posee seis electrones, cuya configuración es 1s2 2s22p2. es decir, dos electrones ocupan el nivel 1s (dos electrones), dos electrones el 2s y parcialmente los dos electrones restantes el 2p (los dos electrones restantes) de acuerdo al Principio de Aufbau.

En su nivel sp, solamente se tienen 4 electrones (sp, tiene un número de saturación de 8 electrones). Por la tendencia de los elementos químicos a formar enlaces estables, y por esta especial característica del carbono, estos átomos tienen la característica de ceder o admitir los 4 electrones, para estabilizar sus órbitas, lo que le permite actuar con las valencias +4 y -4.

El carbono es un elemento muy importante, ya que puede crear moléculas muy complejas, con gran cantidad de átomos. Esto es debido a su estructura atómica y las propiedades químicas que esta estructura le proporciona.

Los átomos de valencia del carbono, independientemente de su subnivel, tienen la misma capacidad de reacción; sin embargo, según el subnivel energético en que se realicen los enlaces, por efectos de la hibridación (combinación de los orbitales s con los orbitales p, que nos dan cuatro orbitales 2sp [2sp, 2sp1, 2sp2, 2sp3]) pueden crear diferentes enlaces estructurales entre átomos de carbono, que puede darse en forma natural o ser modificados en el laboratorio.

Así tenemos que cuando los enlaces se dan en el subnivel energético 2sp3, la estructura tiende a ser prismática, tetraédrica y cristalina; correspondiente a la estructura del diamante en la naturaleza. Es decir, la hibridación 2sp3 consiste en la formación de cuatro orbitales “híbridos” a partir de los orbitales 2s, 2px, 2py y 2pz puros. Así, se tiene el acomodo de los electrones en el nivel 2, donde existen cuatro electrones disponibles para la formación de cuatro enlaces y se ordenan de forma paralela para tener la menor energía y mayor estabilidad.

En el laboratorio se ha logado controlar los subniveles de unión de las estructuras para que adquieran ciertas características, como pueden es el caso de los fullerenos o los nanotubos.

Los fullerenos son estructuras huecas formadas por átomos de carbono con una forma esférica (poliedro de múltiples caras). Cada átomo de carbono se encuentra enlazado a otros tres átomos

por lo que posee un estado de hibridación 2sp2 similares al grafito y al grafeno, con una desviación en el ángulo de hibridación de 90 a 101 grados lo que genera un cierto nivel de tensión y cambios en la geometría de su estructura.

Estos cambios en las estructuras del carbono, obedecen a las leyes de la termodinámica donde el aumento de entropía puede promover la presencia de esfuerzos residuales en la estructura que permita el movimiento atómico en base al estado de hibridación en el que se encuentre, de tal manera, que la energía interna jugará un papel importante en la definición de un determinado arreglo. Por ejemplo, el fullereno C60 inicialmente se sintetizó por medio de un proceso de evaporación de grafito, empleando un láser y posteriormente un arco de alto voltaje entre dos electrodos de grafito, en una atmósfera de helio; logrando eficiencias del orden del 40% con respecto al material evaporado.

En este proyecto de investigación, partimos de la estructura del grafito de forma triangular o hexagonal con la hibridación 2sp2, la cual será modificada a la hibridación 2sp3 tipo diamante a través de agregar una gran densidad de defectos lineales en su estructura por medio de aplicar una alta energía mecánica que se traduce en una alta energía de deformación estructural.

Hibridación sp2/sp3

La eficiencia de mineralización electroquímica de los electrodos DDB también depende de la relación sp3 /sp2 en la superficie del electrodo de película DDB; se prefiere una mayor concentración de sp3 (diamante) que sp2 (grafito) para una mayor generación de radicales en la superficie del electrodo que son los responsables de oxidar los compuestos orgánicos a CO2, agua e iones inorgánicos (Espinoza, 2018). Sin embargo, si se tiene una mayor concentración de sp2, la evolución del O2 se ve más favorecida promoviendo la oxidación directa de compuestos orgánicos en la superficie del DDB. El carbono sp2 en el electrodo DDB actúa como impureza para promover la conversión electroquímica y da como resultado una mayor producción de O2 (Espinoza, 2018). Además, el nivel de dopaje con boro es un parámetro importante que determina la transferencia de carga, el ancho de la ventana de potencial y el rendimiento electro analítico en el electrodo DDB. Una carga más alta de boro puede aumentar el nivel de impureza sp2 en el electrodo. Sin embargo, más allá de un nivel óptimo de dopaje con boro, el número de portadores de carga para la conducción disminuye y reduce el potencial de oxidación de los electrodos (Karim, 2021).

La mayor impureza de carbono sp2 produce una mayor humectabilidad de los electrodos, y también la naturaleza hidrófila que podría alterar el comportamiento de adsorción de la superficie (A. F. Azevedo, 2013). La adsorción de especies químicas no deseadas en la película de DDB podría enfrentar problemas de incrustaciones. El carbono sp2 presente en la red de diamante actúa como modulador durante las reacciones de transferencia de carga, de forma similar a los electrodos de carbono vítreo (Duo, 2003).

(Duo, 2003) informaron el comportamiento dual del ánodo BDD basado en la relación sp3 /sp2. Cuando el contenido de sp3 era alto en la película de DDB, mostraba un comportamiento de "ánodo no activo"; el sistema podría lograr la mineralización completa de los contaminantes. Por otro lado, cuando las impurezas sp2 eran altas en la red del diamante, mostraba el comportamiento de "ánodo activo" y participaba en el proceso de conversión electroquímica (formación de muchos intermedios) debido a la adsorción de reactivos en el carbono sp2. (Watanabe, 2014) afirmaron que un mayor contenido de carbono sp2 en la película DDB genera especies reactivas de ozono al actuar como sitios activos de adsorción. Esto aumenta las reacciones de interacción entre el átomo de oxígeno y las moléculas de oxígeno, lo que favorece las reacciones de generación de ozono (Nidheesh, 2019).

Mecanosíntesis de nuevos Materiales

La mecanosíntesis, es una técnica de molienda en el estado sólido y de alta energía a partir de sus componentes elementales, capaz de generar cambios estructurales a través de introducir una gran cantidad de energía de deformación en la estructura y que puede correlacionarse con un aumento exponencial de la entropía almacenada en la estructura de los materiales. Este cambio en el estado

de energía de los átomos, permitirá que cada átomo de carbono se encuentre enlazado a otros cuatro átomos, representado por un estado de hibridación 2sp3 característica del diamante, en una condición de mínima energía y de equilibrio termodinámico.

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés en el uso de la molienda mecánica de alta energía (MMAE) para la producción de diversos materiales, debido a que se considera como un método mecanoquímico libre de disolventes, y por lo tanto una técnica amigable con el medio ambiente (Içli et al., 2009). La primera vez que se utilizó el método de molienda mecánica fue en 1970, cuando se mezcló accidentalmente una serie de materiales (níquel, hierro y oxido de aluminio) en un molino aprisionador, lo que dio como resultado una nueva aleación (Yadav et al., 1992). Un punto importante a resaltar es que en la molienda mecánica existen diversas variables y parámetros a controlar, como el tipo de molino, el tiempo de molienda, la velocidad, la relación en peso bola/muestra, el diámetro de la bola, el medio de molienda (seco o húmedo), la forma de los contenedores, la temperatura, el tipo de atmósfera, etc. (Shin, Lee et al., 2013). Aunque todas estas variables harían parecer complicado el proceso, en realidad lo vuelven una técnica versátil en la síntesis de materiales. Al tener control sobre los parámetros experimentales se pueden combinar para producir aleaciones y materiales con una alta calidad y con características específicas (Martínez-González, 2022).

Actualmente, se conocen tres tipos de molinos de alta energía: el molino vibratorio, el planetario y el micro-molino vibratorio unidireccional. Sea uno u otro, los molinos se han utilizado para mezclar, pulverizar y reducir el tamaño de diversos materiales (Martínez-González, 2022).

La molienda mecánica debido a la alta energía mecánica generada puede inducir a cambios estructurales en el material, como la rotura de enlaces químicos y la reorganización de los átomos, lo que puede conducir a cambios en la hibridación de los átomos de ciertos elementos. Por ello se implementará la molienda mecánica como una alternativa prometedora para la fabricación del DDB mediante un análisis exhaustivo de las características y ventajas de dicha técnica comparándolo con los métodos convencionales como CVD Y HPHT para proporcionar una comprensión más profunda de como la molienda mecánica puede revolucionar la producción del DDB.

Las ventajas de la molienda mecánica para la síntesis del DDB son las siguientes:

- La molienda mecánica ofrece un control más preciso sobre el proceso de dopaje y modificación de la estructura del diamante. Esto se debe al ajustar parámetros como la duración, velocidad de molienda y el tamaño de partícula para obtener resultados específicos (Smith J. , 2020).
- En términos de costo, la molienda mecánica suele ser más económica que las técnicas de CVD y HPHT. Esto la hace más accesible para la mayoría de los laboratorios y empresas que buscan realizar modificaciones en el diamante dopado con boro (Liu, H et al., 2018).
- La escalabilidad de la molienda mecánica la hace ideal para la producción en grandes cantidades de diamante dopado con boro con propiedades específicas. Esta capacidad de adaptación para aplicaciones industriales es una ventaja significativa (Wang, Y. et al., 2019).

Síntesis del Diamante Dopado con Boro

Los materiales de carbono dopados con boro han mostrado tener propiedades físicas sobresalientes, que posibilitan un mayor número de aplicaciones tecnológicas en el desarrollo de dispositivos electrónicos como atenuador de altas frecuencias en dispositivos al alto vacío, supercapacitores, electrodos para la generación de energía o como electrodos para el tratamiento de aguas residuales complejas con una alta eficiencia de remoción, siendo este último el caso de interés de este proyecto. El dopaje con boro ha mostrado grandes ventajas en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de grafito [4].

Con un dopaje del orden de 1 a 3% at B, el diamante puede tener una conductividad eléctrica similar a la de un metal a temperaturas elevadas, mientras que a temperatura ambiente puede comportarse como un superconductor. Esta característica eléctrica junto con algunos propiedades físicas y químicas hacen de diamante dopado con boro (DDB) un material para una amplia gama de aplicaciones en electrónica, electromecánica, como electrodos y como recubrimientos duros en herramientas de corte.

La síntesis del diamante dopado con boro no es posible de lograr por medio de la implantación iónica del boro ya que se tiende a la grafitización de la superficie de diamante; por ello son necesarios los procesos a alta temperatura y presión, sin embargo, no podemos partir de diamante y boro ya que se logra una baja concentración del dopado con boro, por ello la relevancia en el estudio sobre la cristalización del diamante dopado con boro por métodos alternativos de bajo costo como lo es la mecanosíntesis a partir de grafito y boro.

El diamante dopado con boro (DDB) se ha logrado sintetizar a partir de grafito y carburo de boro a altas presiones superiores a los 8 GPa y temperaturas entre los 2300 y 2500 °C, superior al punto eutéctico del sistema B-C (2075 °C). Teniendo como referencia que la transición directa del grafito a diamante requiere presiones superiores a los 12 GPa y temperatura superior a los 2000 °C.

El diamante policristalino que se logra durante el proceso de solidificación, puede tener en su estructura hasta un 4% at B con un cambio en su parámetro de red de 3.567 a 3.578 Å.

La síntesis de DDB a alta presión y temperatura a partir de la mezcla de adamantano (C10H16) y carborano (B10H10C2H2) se realizó a 8 GPa y 1700°C. Las muestras obtenidas se caracterizaron con difracción de rayos X (XRD), espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), espectroscopía Raman (Raman) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los resultados de DRX y MEB en las figuras 1a y 2a muestran los picos característicos del carburo de boro proveniente del carborano, con pequeños cristales en forma de prismas triangulares que tienden a conglomerarse. Las figuras 1b y 2b muestran los picos característicos del grafito proveniente del adamantano, con una morfología laminar y con terminaciones redondeadas. Las figuras 1c y 2c muestras los picos característicos del diamante cristalino con un parámetro de red de 3.5766 Å y con microcristales de diamante con una morfología de prismática.

Los resultados de espectroscopia Raman en la figura 2, muestra las bandas características del diamante con un alto grado de boro dopado, en un ancho de banda con un máximo de 492 cm-1 y otras bandas a 1000, 1213 y 1297 cm-1, lo que se relaciona a una concentración de boro de 2 a 2.5% at.

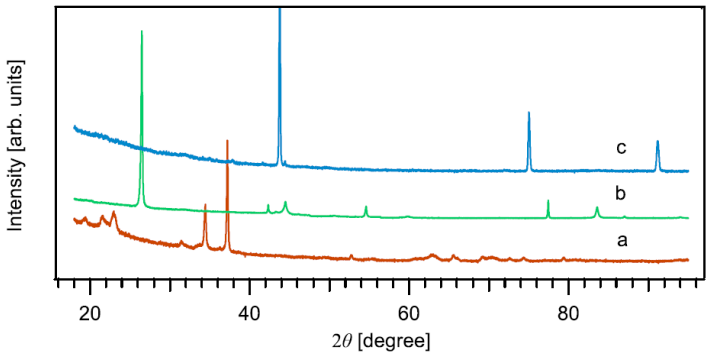


Figura 1. Patrón de difracción de rayos-X de las muestras obtenidas a 8 GPa/1700 °C. a) carborano, b) adamantano y c) diamante de la mezcla de adamantano y carborano (Chen, G., 2004).

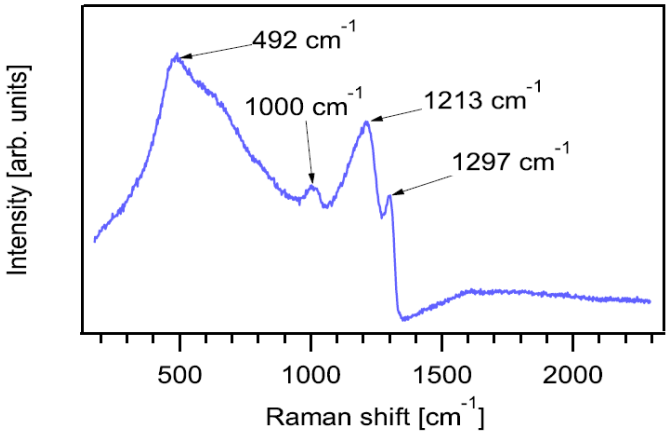


Figura 2. Espectro Raman de diamante obtenido a 8 GPa/1700 °C a partir de la mezcla de adamantano y carborano (relación atómica B:C 5:95) (Migliorini, 2011).

PARTE EXPERIMENTAL

Se prepararon dos muestras diferentes utilizando 250 gr de grafito como material base. Cada muestra contenía un porcentaje especifico de boro siendo estos 5% y 7.5% atómico respectivamente. Durante la mecanosíntesis de DDB se llevaron a cabo los siguientes pasos descriptivos, que de igual manera son mostrados en la figura 3.

1. Se utilizó una relación de peso entre los medios de molienda (bolas de acero) y la mezcla en polvo de 4:1, esto es crucial ya que determina la eficiencia del proceso de molienda y la calidad del material final.

2. Los componentes ya pesados fueron colocados en el interior de una caja de guantes para ser introducidos en el molino planetario, junto con los medios de molienda en un ambiente libre de oxígeno. Después de aplicar varias secuencias de vacío e inyección de gas argón en la caja de guantes, se colocan los polvos y las esferas de acero (medio de molienda) para posteriormente cerrar el molino.

3. Ya que el recipiente estaba libre de aire se tapó perfectamente para evitar fugas y se llevó al molino de bolas planetario donde se hizo el aleado mecánico hasta cumplir un tiempo de 80 h de molienda, con una velocidad de rotación de 350 rpm.

4. Después de 80 hrs de molienda, los polvos fueron caracterizados mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopia Raman y Microscopia electrónica de barrido (SEM) (Figura 3).

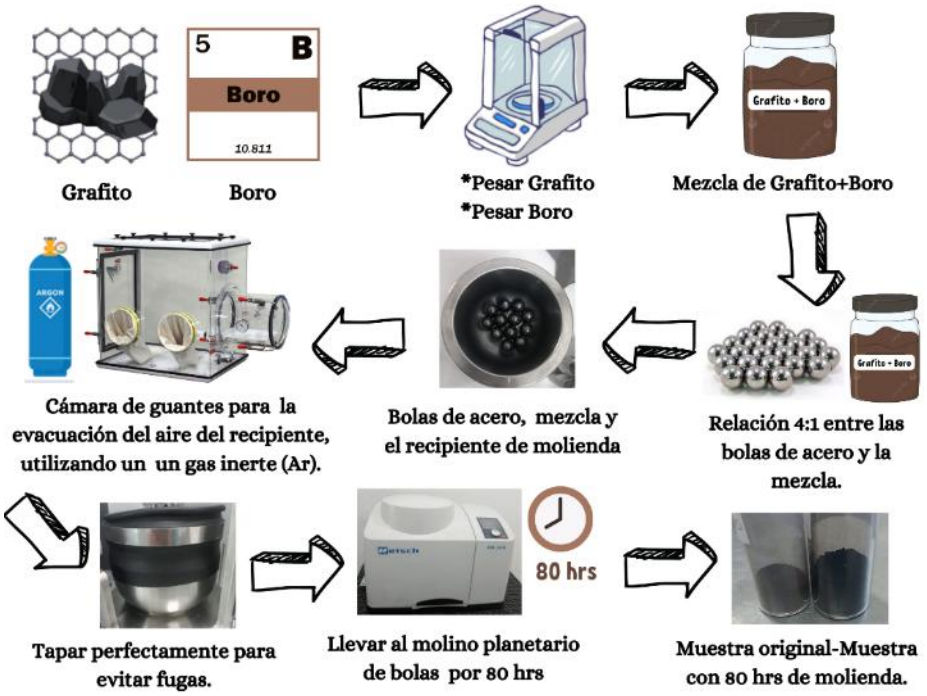


Figura 3. Proceso para realizar la molienda mecánica del DDB y la obtención de las muestras a analizar.

RESULTADOS

Las mezclas de grafito con 5, 7.5 y 15% at de B fueron sometidas a 80 horas de molienda continua en un equipo tipo planetario a 350 rpm. La figura 4a muestra los patrones de difracción de cada una de las mezclas en su condición original (sin molienda) donde se puede observar el pico característico del grafito en la posición de 28 grados (2θ). Después de 80 horas de molienda el comportamiento cristalino cambia derivado de la deformación, por lo que el pico en la misma posición tiende a ensancharse como resultado de la reducción del tamaño de cristal, así como presentar una disminución en su intensidad relativa con respecto a la muestra sin moler. El pico de grafito que se encuentra en la posición de 45 grados (2θ) en la muestra sin moler es muy pequeño, el cual no tiene la capacidad de difractar; sin embargo, después del tiempo máximo de molienda, su intensidad relativa aumenta significativamente de tal manera que su altura es similar al pico en la posición de 28 grados (2θ) para un 15%at de boro como elemento de dopaje (Figura 4b).

Este aumento en intensidad relativa representa un cambio de textura, pero también está relacionado con un cambio de estructura que como se había mencionado, donde se busca el cambio de la estructura hexagonal a la estructura tetragonal.

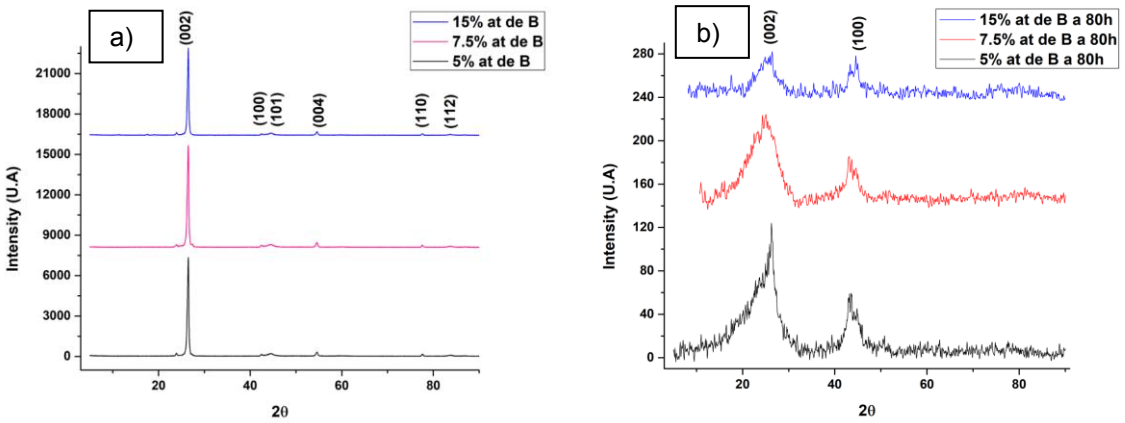


Figura 4. Patrones de Difracción de Rayos-X de a) la mezcla original con diferentes porcentajes de boro y b) la mezcla después de 80 h de molienda con diferentes porcentajes de boro

La tabla 1 muestra los valores del tamaño de cristal antes y después de la molienda donde se observa una reducción significativa del 88.98% de su tamaño por el efecto de la molienda. Así mismo, se observa un aumento en su parámetro reticular principal del 111 %, lo que corresponde con el cambio de estructura ya que no se pierde el comportamiento cristalino del grafito.

Tabla1. Tamaño de cristal y parámetro reticular del grafito con el efecto de la molienda.

Contenido de boro [% at]	Tamaño de cristal inicial [nm]	Parámetro reticular inicial [Å]	Tamaño de cristal final [nm]	Parámetro reticular final [Å]
5	18.11	2.2679	2.00	3.8724
7.5	21.48	2.2735	2.20	5.3424
15	20.05	2.2686	2.38	5.1243

La morfología de los polvos fue caracterizada por Microscopía Electrónica de Barrido donde se observa después de molienda una morfología conglomerada con una dispersión en el tamaño de partícula, independientemente del contenido de boro como se muestra en la figura 5.

Algunos autores han reportado que la hibridación del grafito mediante Raman se encuentra en la posición de 1600 cm^{-1} para la hibridación Sp2 y en la posición de 1300 cm^{-1} para la hibridación Sp3 como se muestra en la figura 6a. En la figura 6b podemos observar como con cero horas de molienda para la mezcla con el 15%at de boro, la intensidad relativa de la hibridación Sp3 del grafito es muy pequeña.

Conforme se aumenta el tiempo de molienda, hay una competencia entre la intensidad relativa de la hibridación Sp2 y Sp3 de tal manera que, al tiempo máximo de molienda, es mayor la intensidad de la hibridación Sp3, lo que corresponde a una mayor presencia de la estructura tipo diamante (DLC) del tipo tetragonal con respecto a la estructura hexagonal del grafito de tipo hexagonal.

Calculando el área bajo la curva de las hibridaciones Sp2 y Sp3 con el tiempo de molienda, se observa que aumenta significativamente esta relación Sp3/Sp3 hasta en un 300% con respecto al valor inicial sin deformación, lo que habla de una mayor presencia de la estructura tipo diamante con respecto a la estructura del grafito.

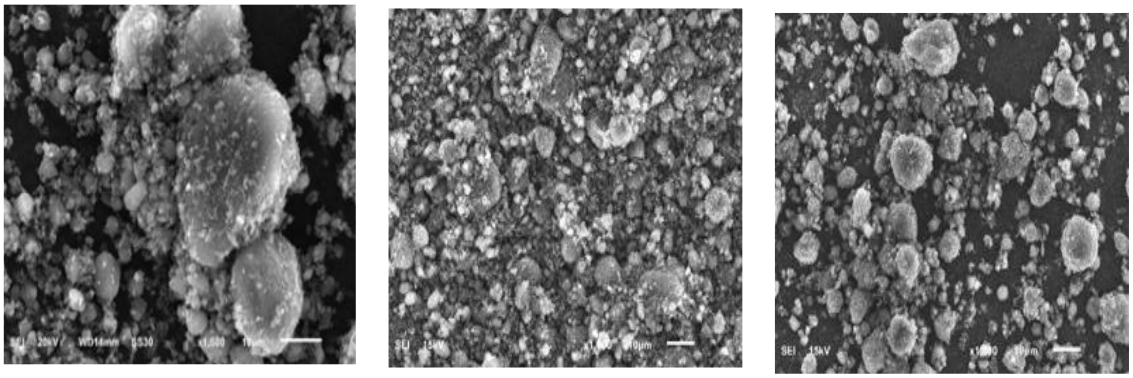


Figura 5. Morfología de las diferentes mezclas en función del contenido de boro (5, 7.5 y 15 %at respectivamente).

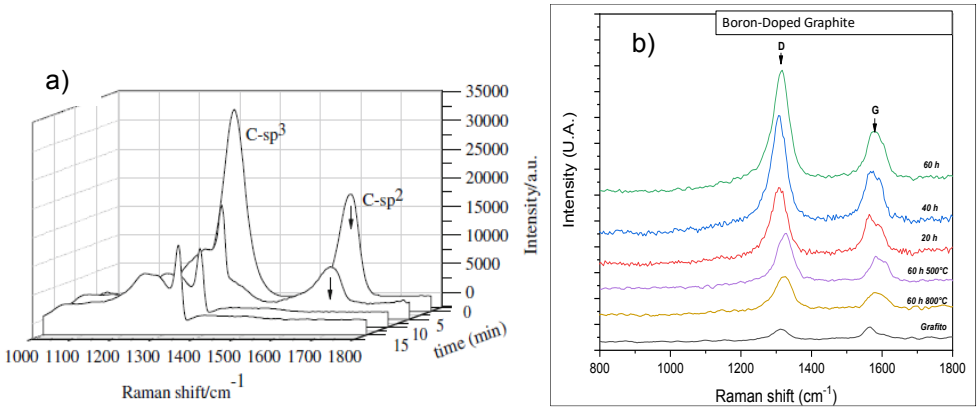


Figura 6. a) Espectro Raman reportado en la literatura indicando la posición de los picos característicos de cada hibridación (Alejandro M., et al. (2012) y b) Intensidad relativa de cada hibridación con respecto al tiempo de molienda

Tabla 2. Relación de hibridación Sp3/Sp2 al tiempo máximo de molienda para las diferentes concentraciones de boro

Contenido de boro [at %]	Relación inicial Sp3/Sp2	Relación final Sp3/Sp2
5	0.41	1.63
7.5	0.84	1.60
15	0.35	1.65

CONCLUSIONES

Es posible la síntesis de la estructura de carbono tipo diamante (DLC) en estado sólido debido al aumento de defectos estructurales, que promueven cambios significativos en la relación de hibridación del grafito (Sp_3/Sp_2) hasta un valor promedio de 1.63.

El aumento de la intensidad relativa y ensanchamiento del pico en la posición 44° (2Ɵ) corresponde al cambio de la estructura cristalina del grafito de hexagonal a tetragonal, correlacionado con un aumento del parámetro reticular.

Los electrodos de diamante dopado con boro (DDB) se consideran los ánodos más potentes para la oxidación anódica (OA), debido a su estabilidad química y electroquímica, alta eficiencia de corriente, larga vida útil y una amplia ventana de potencial para el tratamiento de vertidos de agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. Smith, J. (2020). Environmental Pollution: Causes, Effects, and Control Measures. Environmental Pollution.
2. SAGARPA. (2017). Diagnóstico sobre la Contaminación del Agua en México.
3. Torres, E., et al. (2020). Tratamientos físico-químicos para la remoción de contaminantes
4. Montiel, M., et al. (2018). Electrooxidation for the treatment of industrial wastewater: A critical review. Chemical Engineering Journal.
5. Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Ferro-García, M. Á., Prados-Joya, G., & Ocampo-Pérez, R. (2013). Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. Chemosphere, 93(7), 1268-1287
6. Frontistis, Z., Brebou, C., Venieri, D., Mantzavinos, D., & Katsaounis, A. (2011). BDD anodic oxidation as tertiary wastewater treatment for the removal of emerging micro-pollutants, pathogens and organic matter. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 86(10), 1233-1236
7. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and purification Technology, 38(1), 11-41
8. Migliorini, F. L., Braga, N. A., Alves, S. A., Lanza, M. R. D. V., Baldan, M. R., & Ferreira, N. G. (2011). Anodic oxidation of wastewater containing the Reactive Orange 16 Dye using heavily boron-doped diamond electrodes. Journal of hazardous materials, 192(3), 1683-1689.
9. Mitadera, M., Spataru, N., & Fujishima, A. (2004). Electrochemical oxidation of aniline at boron-doped diamond electrodes. Journal of applied electrochemistry, 34, 249-254.
10. Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Electrochemical methods: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
11. Bagotzky, V., Vassiliev, Y., & Vasilevskiy, D. (2006). Electrochemical kinetics: theoretical aspects. Springer Science & Business Media.
12. Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I., & Scialdone, O. (2015). Single and coupled electrochemical processes and reactors for the abatement of organic water pollutants: a critical review. Chemical reviews, 115(24), 13362-13407
13. Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A., & Panizza, M. (2014). Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review. Environmental Science and Pollution Research, 21, 8336-8367.
14. Ammar, H. B., Brahim, M. B., Abdelhédi, R., & Samet, Y. (2016). Green electrochemical process for metronidazole degradation at BDD anode in aqueous solutions via direct and indirect oxidation. *Separation and Purification Technology*, *157*, 9-16.
15. Qiao, J., & Xiong, Y. (2021). Electrochemical oxidation technology: A review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants. Journal of Water Process Engineering, 44, 102308.

16. Alulema-Pullupaxi, P., Fernández, L., Debut, A., Santacruz, CP, Villacis, W., Fierro, C., & Espinoza-Montero, PJ (2021). Degradación fotoelectrocatalítica de glifosato sobre dióxido de titanio sintetizado mediante sol-gel/recubrimiento por rotación sobre diamante dopado con boro (TiO2/BDD) como fotoánodo. Quimiosfera , 278 , 130488.
17. Yong, KONG, WANG, ZL, Yu, WANG, Jia, YUAN y CHEN, ZD (2011). Degradación del naranja de metilo en aguas residuales artificiales mediante oxidación electroquímica utilizando electrodo de grafito exfoliado. Nuevos materiales de carbono, 26 (6), 459-464.
18. Abdalrhman, AS, Ganiyu, SO y El-Din, MG (2019). Cinética de degradación y relación estructura-reactividad de ácidos nafténicos durante la oxidación anódica en electrodos de grafito. Revista de Ingeniería Química, 370 , 997-1007.
19. Kumari, S., & Kumar, R. N. (2021). River water treatment using electrocoagulation for removal of acetaminophen and natural organic matter. Chemosphere, 273, 128571
20. Devilliers, D., & Groult, H. (1998). Matériaux anodiques pour électrolyseurs. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 76(6), 991-999.
21. Ken, D. S., & Sinha, A. (2021). Dimensionally stable anode (Ti/RuO2) mediated electro-oxidation and multi-response optimization study for remediation of coke-oven wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(1), 105025.
22. Geng, P., Su, J., Miles, C., Comninellis, C., & Chen, G. (2015). Highly-ordered Magnéli Ti4O7 nanotube arrays as effective anodic material for electro-oxidation. Electrochimica Acta, 153, 316-324.
23. Ganiyu, S. O., Oturan, N., Raffy, S., Esposito, G., Van Hullebusch, E. D., Cretin, M., & Oturan, M. A. (2017). Use of sub-stoichiometric titanium oxide as a ceramic electrode in anodic oxidation and electro-Fenton degradation of the beta-blocker propranolol: degradation kinetics and mineralization pathway. Electrochimica Acta, 242, 344-354.
24. Zhang, Q., Chen, Y., Zhang, L., & Guo, Z. (2013). Graphite and its application in corrosion protection: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 19(1), 1-11.
25. YV Pleskov , Russ. J. Electroquímica. 2002 , 38 , 1275 – 1291
26. JV Macpherson, Phys. Química. Química. Física. 2015, 17 , 2935 – 2949
    A. Kraft, Int. J. Electroquímica. Ciencia. 2007
27. Garcia-Segura, S., Dos Santos, E. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2015). Role of sp3/sp2 ratio on the electrocatalytic properties of boron-doped diamond electrodes: a mini review. Electrochemistry Communications, 59, 52-55.
28. Brosler, P., Girão, A. V., Silva, R. F., Tedim, J., & Oliveira, F. J. (2023). Electrochemical Advanced Oxidation Processes Using Diamond Technology: A Critical Review. Environments, 10(2), 15.
29. Watanabe, T., Honda, Y., Kanda, K., & Einaga, Y. (2014). Tailored design of boron-doped diamond electrodes for various electrochemical applications with boron-doping level and sp2-bonded carbon impurities. physica status solidi (a), 211(12), 2709-2717.
30. Suzana, M. D. O., Araújo, D. M., Nascimento, T. D. V., Martínez-Huitle, C. A., & Linares, J. J. (2020). Evaluation of the toxicity reduction of an ionic liquid solution electrochemically treated using BDD films with different sp3/sp2 ratios. Electrochemistry Communications, 118, 106792.
31. Parsons, SA; Williams, M., IWA Publishing, Londres (Reino Unido), 2004.
32. Mayra Rodríguez Peña & Carlos Eduardo Barrera Díaz (2020). Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua
33. Gligorovski, S. et al. (2014). “Environmental Implications of Hydroxyl Radicals (•OH)2” en Chemical Reviews, vol. 115, núm. 24.
34. Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44(23), 2577-2641.
35. MALDONADO, M.I.; BLANCO. J.; MALATO. S.; FERNÁNDEZ – IBÁÑEZ, P.; ALARCÓN. D.; GERNJAK W.; "Review off easible solar energy applications to water processes", Rene. Sust. Energ Rev, 13 (2009) 1437.
36. Rodríguez, E., & Acedo, B. (2019). Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales industriales. Ingeniería y Ciencia, 15(30), 47-69.

37. Gómez, M., Plaza, F., & Garrido, J. M. (2018). Procesos de oxidación avanzada para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas residuales urbanas. Boletín Geológico y Minero, 129(3), 537-552.
38. Monge, Sarai & Torres Pinto, André & Ribeiro, Rui & Silva, Adrián & Bengoa, Christophe. (2018). Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación Avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales.
39. Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44(23), 2577-2641.
40. Torres, C. et al. (2018). Electrochemical Advanced Oxidation Processes: An Overview of the Main Processes and Applications in Wastewater Treatment. Journal of Electrochemical Science and Engineering, 8(1), 13-28.
41. Santos, M. C., Antonin, V. S., Souza, F. M., Aveiro, L. R., Pinheiro, V. S., Gentil, T. C. & Lanza, M. R. (2022). Decontamination of wastewater containing contaminants of emerging concern by electrooxidation and Fenton-based processes–A review on the relevance of materials and methods. Chemosphere, 135763.
42. Compton, R.G., Banks, C.E., & Understanding, R.G.C. (2018). Understanding Voltammetry: Simulation of Electrode Processes (4th ed.). Imperial College Press.
43. Wang, A., Jassby, D., & Halden, R. U. (2019). Plastics in the aquatic environment: Evidence for and challenges in evaluating solutions for the contamination of the aquatic food web. Current Opinion in Biotechnology, 57, 55-61.
44. Comninellis, C. (Ed.). (2006). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. Springer.
45. Chen, X., & Wang, Y. (2019). Electrochemical degradation of organic pollutants in water using metal oxide and metal-based electrodes: A review.
46. Li, Z., Wang, L., & Zhang, G. (2017). Electrocatalysis in water treatment: Achievements, challenges, and perspectives. Chemical Society Reviews, 46(22), 7124-7142.
47. García, A., López, B., & Martínez, C. (2020). Advanced oxidation processes for water purification and recovery: Fundamentals and applications. Elsevier.
48. Gülle, M. (2018). Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment and Resource Reclamation. Elsevier.
49. Bockris, J. O'M., & Reddy, A. K. N. (1973). Modern Electrochemistry: Volume 2: Electrodics in Chemistry, Engineering, Biology and Environmental Science. Springer Science & Business Media
50. (Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. Wiley).
51. (Bard, A. J., & Faulkner, L. R. 2001). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. Wiley).
52. García-Gómez, J., Gómez-Quero, S., & García-Herruzo, F. (2020). Sub-stoichiometric titanium oxide electrodes obtained by anodizing processes: a review. Journal of Solid State Electrochemistry, 24(2), 239-258.
53. Karunakaran, C., & Viswanathan, B. (2018). Electrochemical advanced oxidation processes: an overview of the current applications to actual industrial effluents. In J. Pawłowski (Ed.), Water treatment processes (pp. 137-166). InTechOpen.
54. Cai, J., Zhou, M., Pan, Y., & Lu, X. (2020). Degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by anodic oxidation and electro-Fenton using BDD anode: Influencing factors and mechanism. Separation and Purification Technology, 230, 115867.
55. Sopaj, F., Rodrigo, M. A., Oturan, N., Podvorica, F. I., Pinson, J., & Oturan, M. A. (2015). Influence of the anode materials on the electrochemical oxidation efficiency. Application to oxidative degradation of the pharmaceutical amoxicillin. Chemical Engineering Journal, 262, 286-294.
56. Espinoza, L. C., Henriquez, A., Contreras, D., & Salazar, R. (2018). Evidence for the production of hydroxyl radicals at boron-doped diamond electrodes with different sp3/sp2 ratios and its relationship with the anodic oxidation of aniline. Electrochemistry Communications, 90, 30-33.

57. Karim, Ansaf V., Puthiya Veetil Nidheesh y Mehmet A. Oturan. "Electrodos de diamante dopados con boro para la mineralización de contaminantes orgánicos en aguas residuales reales". Opinión actual en electroquímica 30 (2021): 100855.
58. Azevedo, A. F., M. R. Baldan, and N. G. Ferreira. "Doping level influence on chemical surface of diamond electrodes." Journal of Physics and Chemistry of Solids 74.4 (2013): 599-604.
59. Duo, I., A. Fujishima, and Ch Comninellis. "Electron transfer kinetics on composite diamond (sp3)–graphite (sp2) electrodes." Electrochemistry communications 5.8 (2003): 695-700.
60. de Araujo, D. M., Canizares, P., Martínez-Huitle, C. A., & Rodrigo, M. A. (2014). Electrochemical conversion/combustion of a model organic pollutant on BDD anode: Role of sp3/sp2 ratio. Electrochemistry communications, 47, 37-40
61. Jan-Otto Carlsson, Peter M. Martin, en Manual de tecnologías de deposición para películas y revestimientos (tercera edición), 2010.
62. Macpherson, J. V. (2015). A practical guide to using boron doped diamond in electrochemical research. Physical Chemistry Chemical Physics, 17(5), 2935-2949.
63. S. Morooka, T. Fukui, K. Semoto, T. Tsubota, T. Saito, K. Kusakabe, H. Maeda, Y. Hayashi y T. Asano, Diamond Relat. Mater., 1999, 8, 42-47.
64. JE Butler, YA Mankelevich, A. Cheesman, J. Ma y MNR Ashfold, J. Phys.: Condens. Asunto, 2009, 21, 364201.
65. OA Williams, relación diamante. Mater., 2011, 20, 621–640.
66. PW May y YA Mankelevich, J. Phys. Química. C, 2008, 112, 12432–12441.
67. Bundy FP, Hall HT, Strong H., Wentorf RH. 1955. Man-made diamonds. Nature 176: 51–55
68. Bundy FP, Hall HT, Strong H., Wentorf RH. 1955. Man-made diamonds. Nature 176: 51–55
69. Ekimov EA, Sidorov VA, Bauer ED, Mel'nik NN, Curro NJ, et al. 2004. Superconductivity in diamond. Nature 428(6982): 542–45
70. Cobb, S. J., Ayres, Z. J., & Macpherson, J. V. (2018). Boron doped diamond: a designer electrode material for the twenty-first century. Annual review of analytical chemistry, 11, 463-484.
71. Zhang, F., Koeck, F. A., Neves, A. J., Gicquel, A., & Turner, S. (2019). Boron-doped diamond synthesis at moderate microwave power density by linear antenna plasma enhanced chemical vapor deposition. Diamond and Related Materials, 96, 10-17.
72. Koizumi, S., Shintani, M., Umezawa, H., Kamo, M., Kitabayashi, Y., Kurihara, K., ... & Kawarada, H. (2000). Synthesis of high-quality diamond films by dc plasma chemical vapor deposition using filament substrate heating. Journal of Applied Physics, 87(3), 1342-1346.
73. Miyoshi, K., Shintani, M., & Kawarada, H. (2000). Growth of boron-doped diamond using methane–hydrogen–boron mixed gas. Diamond and Related Materials, 9(3-6), 731-734.
74. Collins, A. T., & Williams, O. A. (2004). Boron-doped diamond. Materials Today, 7(6), 28-33.
75. Hemley, R. J., Mao, H. K., Yan, C. S., Liang, Q., Liu, Z., Shu, J., ... & Huang, F. (2000). High-pressure boron doping of superconducting diamond. Science, 287(5458), 1253-1255.
76. Zhao, J., Xu, B., Tang, C., Zhao, X., Gou, H., Zhang, H., ... & Tian, Y. (2019). High-Pressure High-Temperature Growth of Boron-Doped Diamond Single Crystals with Color Centers. Crystal Growth & Design, 19(8), 4531-4538.
77. Liu, Q., Luo, J., & Liu, J. (2017). High-pressure synthesis and characterization of heavily boron-doped diamond. Diamond and Related Materials, 75, 47-54.
78. Linares, R. C., & McMillan, P. F. (2000). "Synthesis and Characterization of Boron-Doped Diamond". Chemical Reviews, 100(12), 4233-4254.
79. Gruen, D.M., & Narayan, J. (Eds.). (2001). Diamante: Síntesis, propiedades y aplicaciones. Springer Science & Business Media.
80. Davydov, V.Y., & Shenderova, O. (2016). Diamante: Materiales avanzados y aplicaciones. Springer.
81. Nebel, C.E., & Stutzmann, M. (Eds.). (2008). Diamante: Propiedades, síntesis y aplicaciones. Wiley-VCH.
82. Collins, A.T. (Ed.). (2011). Diamantes Dopados con Boro. Springer Science & Business Media.
83. Gracio, J. J., Fan, Q. H., & Madaleno, J. C. (2010). Diamond growth by chemical vapour deposition. Journal of Physics D: Applied Physics, 43(37), 374017.

84. Martínez-González,J.,FloresGil,A.,Reyes-Contreras,D.,Vigueras Santiago, E.,& GarcíaOrozco,I.(2022). Síntesis de nanoestructuras de carbono por molienda mecánica. Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente (pp . 201-238) . Barcelona, España: OmniaScience
85. Rai, A. K., Anh, L. T., Gim, J., Mathew, V., Kang, J., Paul, B. J. et al. (2013). Facile approach to synthesize CuO/reduced graphene oxide nanocomposite as anode materials for lithium-ion battery. Journal of Power Sources, 244, 435-441.

DESENTRALIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN COMUNIDADES RURALES MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

José de Jesús Colín-Robles[1], Nataly Villanueva-Serrano[1], Noelia Elizabeth Hernández-López[1], María Guadalupe Ordaz-Cervantez[1], José Luis López-Ramírez[1], Víctor Alcaraz González[2], Miguel Ángel Rosales-Ramírez[1].

[1]Tecnológico Nacional de México/ ITS de Purísima del Rincón, [2]Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería / Universidad de Guadalajara.

jesus.cr@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

En la actualidad la sociedad se enfrenta a problemas medio ambientales que han ido empeorando a lo largo del tiempo debido al consumo de combustibles fósiles. En ese sentido, el presente trabajo muestra el impacto que tiene el desarrollo de biotecnología para la producción de combustibles limpios y generación de energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, es importante mencionar el problema de la distribución de la energía eléctrica en el país donde las comunidades rurales presentan problemas de suministro de energía eléctrica derivado de una falta de infraestructura. Particularmente el presente artículo describe detalladamente cómo es posible producir electricidad a partir del tratamiento desde el punto de vista matemático de aguas residuales mediante el uso de una celda microbiana la cual puede ser utilizada para producir hidrógeno o electricidad. Se ha encontrado que el uso de sistemas biotecnológicos ha permitido ofrecer una alternativa sostenible para la producción de energías limpias. Por otro lado, el uso de tales sistemas ofrece la capacidad de solucionar los problemas derivados de la contaminación en ríos, lagos y cuerpos de agua potable sin mencionar el calentamiento global. De tal manera, que es posible resolver los problemas medio ambientales que enfrenta actualmente la humanidad mediante la implementación de biotecnología. Respecto a la producción de hidrógeno limpio, el uso de sistemas biotecnológicos también representa una alternativa bastante atractiva debido a que dicho elemento es considerado como el sustito más atractivo para remplazar a los combustibles fósiles como medio principal para abastecer las necesidades de consumo de combustibles para impulsar vehículos y generar electricidad. En la literatura se ha encontrado que el hidrógeno es 2.75 veces más eficiente que cualquier combustible fósil y que su combustión genera agua de tal manera que es posible establecer un ciclo regenerativo de dicho combustible.

De tal manera se concluye que la implementación de energía mediante estas celdas microbianas contribuirá el desarrollo de comunidades autosustentables, en las cuales será más eficiente el uso de energías limpias, así como darles un segundo uso a las aguas.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista social la disponibilidad de la energía eléctrica es muy limitada en las zonas rurales, por lo que es necesario implementar alternativas sostenibles como el uso de sistemas biotecnológicos acoplados con la finalidad de generar este tipo de energía a partir de los residuos ricos en materia orgánica presentes en aguas residuales generadas por el sector doméstico y agropecuario en lugares poco accesibles. Por lo cual, los sistemas biotecnológicos pueden ser empleados para satisfacer las necesidades en zonas rurales que van desde la obtención de sus desechos hasta la producción de energía basado en la obtención de hidrogeno para la generación y distribución de energías limpias, aumentando la calidad de vida para la población que se encuentra en esa zona.

Otro valor agregado consiste en tener un mayor control sobre el manejo de aguas residuales domésticas, ya que en zonas rurales se encuentran muy pocas plantas de tratamiento que permitan aprovecharlas y desecharlas de la manera correcta. Gracias a este esquema de producción

descentralizada de energía eléctrica, es posible aprovechar aguas residuales para riego o alimentación de cuerpos de agua de las zonas cercanas, además de la generación de energía limpia a un costo accesible.

Los sistemas biotecnológicos representan una alternativa sostenible para producir combustibles limpios a una escala industrial con la capacidad energética suficiente como para remplazar a los combustibles fósiles reduciendo impacto ecológico que conlleva el consumo de estos últimos. En ese sentido, Los fermentadores Obscuros (DFP por sus siglas en inglés) y las celdas de electrólisis microbianas (MEC, por sus siglas en inglés) son considerados como los dos tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales con mayor rendimiento para producir energía en forma de electricidad, metano e hidrógeno, siendo este último un combustible de alto rendimiento energético por unidad de masa (142.35KJ g^{-1}) [1] que no contamina ya que su combustión produce agua.

Las ruralidades y la energía

La ruralidad según el Banco Mundial ha disminuido casi un 20% desde la década de los sesenta, con una representación del 43% hasta el año 2023 [17]. Los datos revelan que la población rural se encuentra mayormente en los países periferia en gran parte de África y el sur de Asia. En cuanto al uso de energías sostenibles el mismo organismo menciona que el porcentaje ha incrementado del 16.66% en la década de los noventa al 3.11% en el año 2020.

En ese sentido, las ruralidades en México según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [12] para el año 2024 se concentran en el noreste, centro occidente y sur de México y hay más de 184 mil localidades con más de 26 millones de habitantes. El 60% cuenta con agua potable. El 12% dispone de red de drenaje con más del 40% de la población rural y solo el 46% cuenta con alumbrado público proveniente de un organismo público con un 97.3%, 2.4% de paneles solares y .3% de otra fuente. La cobertura de telecomunicaciones es del 72.4%. La mayor problemática en la ruralidad de México se concentra en la sequía con un 79.7% y le sigue la helada o granizada con un 34.5% y un 18.4% con carencia y mala calidad del agua.

Según el Banco Mundial en el país en la década de los noventa el porcentaje de uso tecnologías sostenibles era de más de 14% disminuyendo considerablemente a principios del 2005 llegando a 9% en el 2012 el punto más bajo [17]. En el 2020 logró el 13%, la fluctuación del movimiento se desconoce, sin embargo, se estima que sea por la política y la reglamentación, no por la normativa, dado que el país tiene un robusto marco legislativo sobre las energías sostenibles y cuidado del medioambiente (Ley de transición energética, comisión reguladora de energía). El mismo organismo menciona que el país ha logrado una cobertura del 100% progreso registrado desde la década de los noventa, donde ya se tenía el 93%, en cuanto al acceso a la electricidad es de un 99.7%. Así mismo, se registra una pérdida del 12% en la producción del insumo. En cuanto a las ruralidades se menciona una cobertura del 99.1%. Con una producción de electricidad con fuentes renovables (excluida la hidráulica) incrementó de 5.13 a 47.36 mil millones kilovatio por hora.

Por otro lado, el Instituto Mexicano para la Competitividad [13] menciona que el porcentaje no ha llegado a la meta realizada por la Secretaría de Energía (SE) pues, es del 24.3% falta aún 10.7%. En ese mismo tenor, según la SE solo el 4.1% es bioenergía (gabazo de caña con mayor aportación) comparada con un 32.8% fotovoltaica [16]. En ese sentido según el CONAHCYT la capacidad instalada por tecnología solo el .5% corresponde a biotecnologías donde el 39.5% es de ciclos combinados, con las mismas posiciones esta la generación de energía [15]. En cuanto a los propietarios de la generación de energía el 29.2% le corresponde a la instancia privada, 41.1% pública (CFE)

Aunado a lo anterior, desde la administración pasada en la Secretaría del Bienestar se tipificaron las zonas de alta prioridad, las cuales considera áreas extensas con indicadores de pobreza y marginación igual o mayor al 50% [11]. Según Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) en México hay 46.8 millones de personas en situación de pobreza [14]. Según los datos registrados se tiene acceso e infraestructura para cubrir las ruralidades del

país, sin embargo, no se cuenta con los recursos económicos para tener el beneficio, lo que se convierte en atraso en todos los sentidos.

TEORÍA

Se pueden encontrar en la literatura diferentes enfoques para la producción de hidrógeno como la fermentación obscura la cual permite manejar gran diversidad de sustratos, son menos costosos debido a que no requieren de luz ni de aire y los métodos de optimización son relativamente sencillos, sin embargo, la fermentación obscura está limitada estequiométricamente ya que produce (4mmol – H_2)/(mol - glucosa) representando un 30% de rendimiento. Por otro lado, un esquema de sistemas acoplados donde el DFP se usa para producir un ácido graso volátil (AGV) el cual es utilizado para alimentar a una MEC, es posible producir hidrógeno con una eficiencia del 80%. Por esta razón es recomendable acoplar un DFP con una MEC para mejorar el tratamiento de aguas residuales y la producción de hidrógeno [8, 9] (Véase la Figura 1).

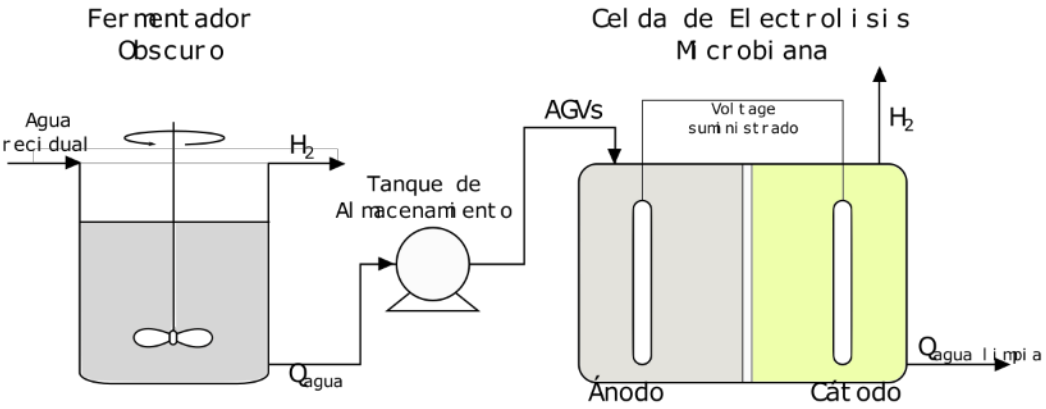


Figura 1: Sistema de fermentación obscura acoplado a una MEC.

Modelo del DFP

Un Fermentador obscuro consiste principalmente en un reactor de flujo continuo el cual contiene en su interior una población de bacterias con la capacidad de degradar materia orgánica presente en aguas residuales. Para asegurar una concentración homogénea dentro del biorreactor, se utiliza una propela para agitar el contenido de materia orgánica, agua residual y bacterias. Mediante la ley de la conservación de la materia y la energía es posible modelar el comportamiento del fermentador obscuro. El siguiente modelo matemático basado en un balance de masas describe lo anteriormente dicho:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= (S_{in} - S)D - \mu(x)D \\ \frac{dx}{dt} &= -x + \mu(S)x \\ \frac{dA}{dt} &= (A_{in} - A)D + k\mu(S)x\end{aligned} \tag{1}$$

Donde $[S, x, A]^T$ representan respectivamente las concentraciones de sustrato o materia orgánica presente en el agua residual ($g\,L^{-1}$), bacterias ($g\,L^{-1}$) y acetato producido ($mmol\,L^{-1}$). el término α es una constante adimensional y k es la constante de rendimiento ($mmol\,g^{-1}$). Los procesos de consumo y producción contemplados por el modelo están descritos por la ecuación de Monod que se presenta a continuación:

$$\mu(s) = \mu_{\max} s \frac{S}{k_s + S}, \tag{2}$$

Donde $\boldsymbol{\mu_{\max S}}$ es la tasa de crecimiento máximo ($\boldsymbol{d^{-1}}$) y $\boldsymbol{k_S}$ es la constante de saturación media ($\boldsymbol{g\ L^{-1}}$). Para determinar las condiciones óptimas de operación del fermentador obscuro que lleven a una máxima eficiencia, es necesario obtener una función de productividad del acetato que dependa de una variable susceptible a ser controlada. En este caso se observó que es posible utilizar la tasa de dilución como variable de control. La siguiente ecuación determina cómo se comporta la productividad de acetato en función de dicha tasa de dilución:

$$\boldsymbol{P_A(t) = A(t) \cdot D(t),} \tag{3}$$

Donde $\boldsymbol{P_A}$ representa la variable de productividad implícita en el tiempo que se usará como criterio de optimización para llevar al fermentador obscuro a su máxima productividad.

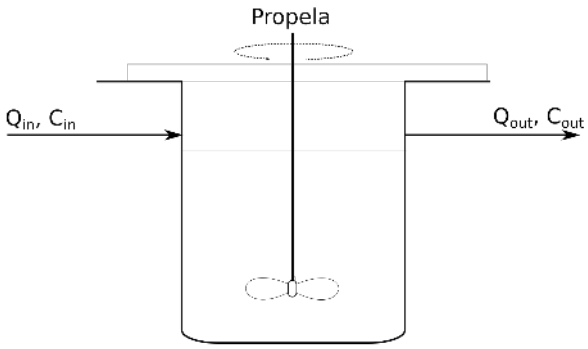


Figura 2: Proceso de fermentación obscura.

Modelo de la MEC

Una Celda de Electrolisis Microbiana (MEC) consiste principalmente en dos cámaras separadas por una membrana catódica (véase la Figura 3) [6]. En la cámara anódica, se encuentra un electrodo llamado ánodo el cual está recubierto por una biopelícula donde se considera la existencia de bacterias anodofílicas ($\boldsymbol{x_a}$) y metanogénicas ($\boldsymbol{x_m}$) en disputa por la degradación del acetato. Las bacterias $\boldsymbol{x_a}$ pueden producir protones de hidrogeno y electrones mientras que las bacterias $\boldsymbol{x_m}$ producen metano. Considerando la inhibición de bacterias $\boldsymbol{x_m}$, los protones pasan atreves de una membrana iónica hacia la cámara catódica, donde se produce el hidrogeno. Se suministra un voltaje relativamente pequeño al sistema, generando una diferencia de potencial entre los dos electrodos, lo que permite que los electrones liberados en el ánodo por las bacterias anodofílicas circulen y pasen al cátodo para combinarse con los protones de hidrogeno quienes llegaron atravesando la membrana permeable. El comportamiento antes descrito se modela mediante el siguiente sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODEs):

$$\begin{aligned}
\frac{\boldsymbol{dA}}{\boldsymbol{dt}} &= \boldsymbol{(A_{in} - A)D - k_a \mu_a x_a - k_m \mu_m x_m} \\
\frac{\boldsymbol{dx_a}}{\boldsymbol{dt}} &= \boldsymbol{\mu_a x_a - k_{da} x_a - \propto D x_a} \\
\frac{\boldsymbol{dx_m}}{\boldsymbol{dt}} &= \boldsymbol{\mu_m x_m - k_{dm} x_m - \propto D x_m}
\end{aligned} \tag{4}$$

Donde:

- $\boldsymbol{A}$ es la concentración de acetato producido por el DFP ($\boldsymbol{Mg/L^{-1}}$).
- $\boldsymbol{x_a}$ y $\boldsymbol{x_m}$ son las concentraciones de microorganismos anodofílicos y metagonicos, respectivamente ($\boldsymbol{Mg/L^{-1}}$).
- $\boldsymbol{D}$ es la tasa de dilución $\boldsymbol{D = F_{in}/V_{reac}}$ ($\boldsymbol{d^{-1}}$).
- $\boldsymbol{F_{in}}$ es la tasa de flujo de entrada ($\boldsymbol{L/d^{-1}}$).
- $\boldsymbol{V_{reac}}$ es el volumen del reactor (L).
- $\propto_a$ y $\propto_m$ son las constantes adimensionales de retención de biopelícula

Los términos $\boldsymbol{\mu_a}$ y $\boldsymbol{\mu_m}$representan las tasas de crecimiento para los microorganismos anodofilicos y metanogénicos respectivamente.

$$\boldsymbol{\mu_a} = \boldsymbol{\mu_{max,a}} \frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{K_{sa}+A}} \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{1+e^{-\frac{F}{RT}n}}} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\mu_m} = \boldsymbol{\mu_{max,m}} \frac{\boldsymbol{A}}{\boldsymbol{K_{sm}+A}} \quad (6)$$

Donde:

- $\boldsymbol{\mu_{max,a}}$ y $\boldsymbol{\mu_{max,m}}$ son las tasas de crecimientos máximas ($\boldsymbol{d^{-1}}$).
- $\boldsymbol{K_{sa}}$ y $\boldsymbol{K_{sm}}$ son las constantes de crecimiento medio ($\boldsymbol{Mol/Mg^{-1}}$).
- $\boldsymbol{F}$ es la constante de Faraday (C $\boldsymbol{mol^{-1}\, e^{-1}}$).
- $\boldsymbol{R}$ es la constante de gas ideal ($\boldsymbol{J\, mol^{-1}\, k^{-1}}$).
- $\boldsymbol{T}$ es la temperatura (K).
- $\boldsymbol{n = E_{anode} - Eka}$ es el potencial local, donde $\boldsymbol{E_{anode}}$ es el potencial del ánodo (V) y $\boldsymbol{Eka}$ es el potencial del Aceptor de Electrones Anódico (V) .

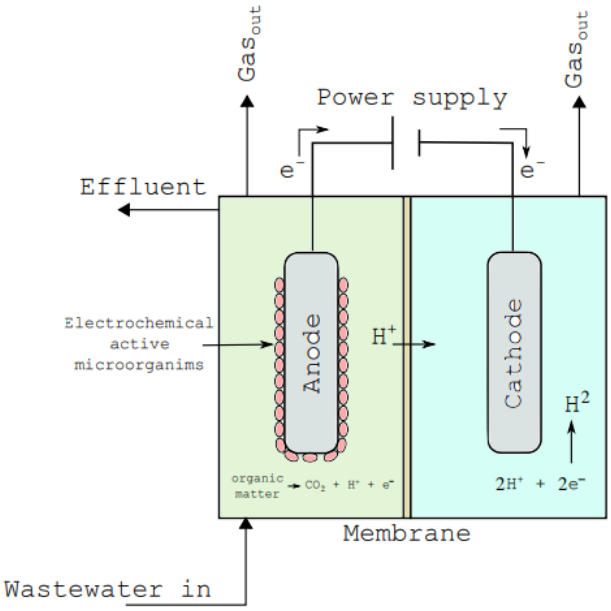


Figura 3. Diagrama esquemático de la MEC.

En este caso el para determinar las condiciones de máxima productividad, se modela la tasa de flujo de hidrogeno producido por la MEC mediante la ecuación:

$$\boldsymbol{Q_{H2} = Y_{H2} 2 A_a} \frac{\boldsymbol{I_{MEC}}}{\boldsymbol{mF}} \frac{\boldsymbol{RT}}{\boldsymbol{PV_{reac}}} \quad (7)$$

Donde:

- $\boldsymbol{Y_{H2}}$ es la eficiencia catódica sin dimensión.
- $\boldsymbol{A_a}$ es el área del ánodo ($\boldsymbol{m^2}$).
- $\boldsymbol{m}$ es el número de electrones por mol de especie ($\boldsymbol{mol\, e^- mol^{-1} m^{-1}}$).
- $\boldsymbol{P}$ es la presión dentro de la cámara catódica (atm).

En esta ecuación, se considera que solo los microorganismos anodofílicos son responsables de la degradación del acetato, mientras que el consumo por parte de los microorganismos metanogénicos se descarta.
La corriente $\boldsymbol{I_{MEC}}$ se modela como:

$$I_{MEC} = \left(\gamma_S k_a \mu_a x_a L_f (1 - f_s^0) + \gamma_x b x_a L_f\right) A_a \quad (8)$$

Donde los parámetros restantes se pueden consultar en [3].

Estrategias de optimización

El desarrollo de cualquier sistema biotecnológico requiere de acciones que permitan su máximo rendimiento con el costo mínimo de tal manera que su implementación sea rentable. Para el DFP la estrategia de optimización se basa en encontrar la máxima productividad de acetato en función de la tasa de dilución la cual como ya se dijo anteriormente, es la entrada controlada mediante una bomba peristáltica. Respecto a la MEC, se utiliza el mismo enfoque, utilizar la tasa de dilución, pero con la finalidad de mejorar la productividad de hidrógeno. Por otro lado, se deben cumplir ciertas condiciones que aseguren la máxima productividad como se especifica a continuación.

Los modelos (1) y (4) se pueden rescribir de la siguiente manera:

$\frac{d\eta}{dt} = f(\eta, u, w)$; $\eta(0) = \eta_0$,
$y(t) = h(\eta(t), u, w)$,

Donde $u = D$ es la entrada controlada para ambos sistemas. w es la entrada desconocida o perturbación, donde $w = S_{in}$ es para el DFP y para la MEC $w = A_{in}$.El vector de estados $\eta = [S, x, A]^T$ es para el DFP y para la MEC es $\eta = [A, x_a, x_m]^T$. Finalmente $y(t) = P_A$es la función de productividad para el DFP y para la MEC $y(t) = Q_{H_2}$. Habiendo aclarado esto se presentan las siguientes suposiciones:

Suposición 1: Existe una función $l(u)$, si y solo si$f(\eta^*, u, w) = 0$, donde $\eta^* = l(u)$.
Suposición 2: El punto de equilibrio $\eta^* = l(u)$ es local y asintóticamente estable para cada valor de u y w en una región de operación donde el DFP o la MEC se limitan a operar.
Suposición 3: EL mapeo entrada-salida $P_A(l(u), u)$ y $Q_{H2}(l(u), u)$ son convexos y unimodales.
Suposición 4: Existe una entrada u tal que:

$\frac{\partial y(t)}{\partial u} = 0$,

$\frac{\partial^2 y(t)}{\partial u^2} < 0$,

Al considerar estas suposiciones se asegura que $y(t)$ es susceptible a optimización en función de la entrada controlada u . Por lo tanto, el problema de optimización se reduce a encontrar un valor de la tasa de dilución dentro de la región de operación de cada sistema donde se asegura la máxima productividad en estado estacionario.

Partiendo de las suposiciones anteriores, el DFP y la MEC pueden ser optimizadas mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$P_A = \left(A_{in} + kS_{in} - k\frac{k_s \alpha D}{\mu_{\max s} - \alpha D}\right) D, \quad (9)$$

$$Q_{H_2} = \frac{l_f A_{sur} Y_{H_2} A_a RTD}{mFPV_r} (A_{in} - A^*) \left[\gamma_s (1 - f_s^0) + \frac{\gamma_x b (k_s + A^*)}{k_a \mu_{\max a} A^*}\right]. \quad (10)$$

PARTE EXPERIMENTAL

Para encontrar los valores máximos de productividad de P_A y Q_{H_2}en términos de u y w es necesario definir un rango de operación para cada sistema. En ese sentido, el DFP tiene un rango de operación

$\boldsymbol{u} = [\mathbf{0}, \mathbf{1.5}](\boldsymbol{d^{-1}})$ y $\boldsymbol{w} = [\mathbf{0}, \mathbf{100}](\boldsymbol{gL^{-1}})$. para la MEC el rango se define como$\boldsymbol{u} = [\mathbf{1}, \mathbf{3}](\boldsymbol{d^{-1}})$ y $\boldsymbol{w} = [\mathbf{2000}, \mathbf{6000}](\boldsymbol{mgL^{-1}})$.

Para un valor de $\boldsymbol{u}$ y $\boldsymbol{w}$ que pertenezca al rango de operación de cada sistema biotecnológico definido anteriormente, es posible calcular el valor de máxima productividad $\boldsymbol{y_{max}}$ utilizando la ecuación (9) para el DFP y la ecuación (10) para la MEC de tal manera que este enfoque nos permita determinar el valor óptimo de la entrada controlada $\boldsymbol{u_{opt}}$.

Encontrar $\boldsymbol{u_{opt}}$ de forma analítica, implica resolver el problema optimización mediante la solución de la siguiente expresión matemática:

$$\frac{\partial y(t)}{\partial u} = \mathbf{0}, \tag{11}$$

El cual a su vez implica derivar las ecuaciones (9) y (10) en términos de $\boldsymbol{u}$ para después encontrar la solución que conduce al cálculo de $\boldsymbol{u_{opt}}$ que satisface la igualdad (11). El método analítico requiere de demasiado esfuerzo e innecesario procesamiento de cómputo para encontrar la solución, para resolver estos inconvenientes, es posible emplear otros métodos más efectivos que se limitan a encontrar $\boldsymbol{u_{opt}}$ mediante la evaluación iterativa las ecuaciones (9) y (10) sin necesidad de calcular la derivada parcial en términos de $\boldsymbol{u}$.

Algorithm 1 Algoritmo GSS

Require: u_l, u_s, $tolerance$
Ensure: (y_{max}, u_{opt})
  $u_1 = u_l + d$
  $u_2 = u_s - d$
  $y_1 = f(u_1)$
  $y_2 = f(u_2)$
  while $error > tol$ **do**
    if $(y_1 > y_2)$
    $u_l = u_2$
    $u_2 = u_1$
    $u_1 = u_l + d$
    $y_2 = y_1$
    $f_1 = f(u_1)$
    $u_{opt} = u_1$
    else
    $u_s = u_1$
    $u_1 = u_2$
    $u_2 = u_s - d$
    $y_1 = y_2$
    $y_2 = f(u_2)$
    $u_{opt} = u_2$
  end while

Algoritmo de búsqueda dorada

El algoritmo de búsqueda dorada (GSS, por sus siglas en inglés) es un proceso iterativo que permite el cálculo de $(\boldsymbol{y_{max}}, \boldsymbol{u_{opt}})$ evaluando de forma iterativa las expresiones (9) y (10). Si se asegura la existencia de un valor máximo dentro de la región de operación de cada proceso biotecnológico para cada valor de $\boldsymbol{w}$, es posible utilizar el Algoritmo 1 para resolver el problema de optimización planteado en este trabajo. Por otro lado, es importante recalcar que existen alternativas diferentes al algoritmo GSS como el uso de métodos de análisis numéricos como falsa posición, bisección o el método de Newton Raphson, pero requieren de la evaluación la derivada por cada iteración hasta encontrar el valor optimo de u.

Como se puede observar en el Algoritmo (1) no se requiere de la derivada. Los términos $\boldsymbol{u_l}$ y $\boldsymbol{u_s}$ representan los límites mínimo y máximo de la entrada u correspondientes al rango de operación de

cada sistema, las variables $\boldsymbol{u_1}$ y $\boldsymbol{u_2}$ son valores calculados dentro de $\boldsymbol{u_l}$ y $\boldsymbol{u_s}$ en términos de la constante de optimización $\boldsymbol{d} = \mathbf{1.618033}$ ... la cual es considerada como una constante natural que se presenta en diversas estructuras naturales y permite modelar el comportamiento evolutivo de algunas especies de seres vivos. Esta constante está definida por la siguiente imagen:

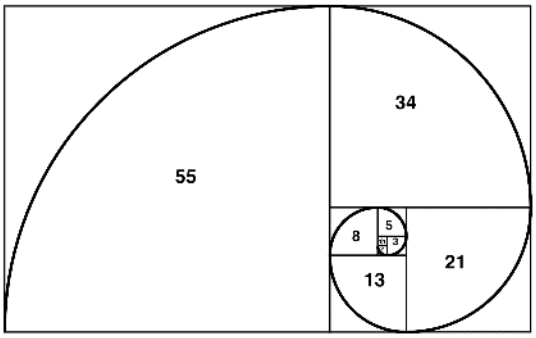


Figura 4: Representación del número áureo mediante la serie de Fibonacci.

La eficacia del DFP acoplado a la MEC para degradar la materia orgánica presente en aguas residuales se traduce en un máximo rendimiento en la productividad de acetato e hidrógeno respectivamente, esto implica determinar un valor optimo de la tasa de dilución $\boldsymbol{u_{opt}}$ que garantiza la máxima eficiencia de productividad $\boldsymbol{y_{max}}$ de manera que sea posible llevar a cabo la implementación sistemas biotecnológicos para la generación de energía y combustibles limpios.

Mediante el enfoque presentado en este trabajo es posible realizar estrategias de optimización robusta que lleven a los sistemas DFP y MEC a una máxima productividad de hidrógeno [9] considerando otros factores como el hecho de que los parámetros de operación y el comportamiento de las bacterias está sujeto a incertidumbres que no pueden ser fácilmente controladas (véase [2, 3, 4]) además de otros inconvenientes.

Algoritmos de control y estimación

Considerando que las dinámicas de la mayoría de los procesos biotecnológicos son lentas, es importante complementar al esquema de optimización presentado en este trabajo con algoritmos de control y estimación dado que no es posible tener un sensor disponible para medir en tiempo real la concentración de carga orgánica en aguas residuales o para medir la concentración de población de bacterias [10]. Todos estos inconvenientes hacen difícil implementar esta tecnología en la práctica sin embargo el desarrollo de controladores y estimadores ha madurado tanto que se pueden resolver estos inconvenientes utilizando estimación de estados basada en el modelo.

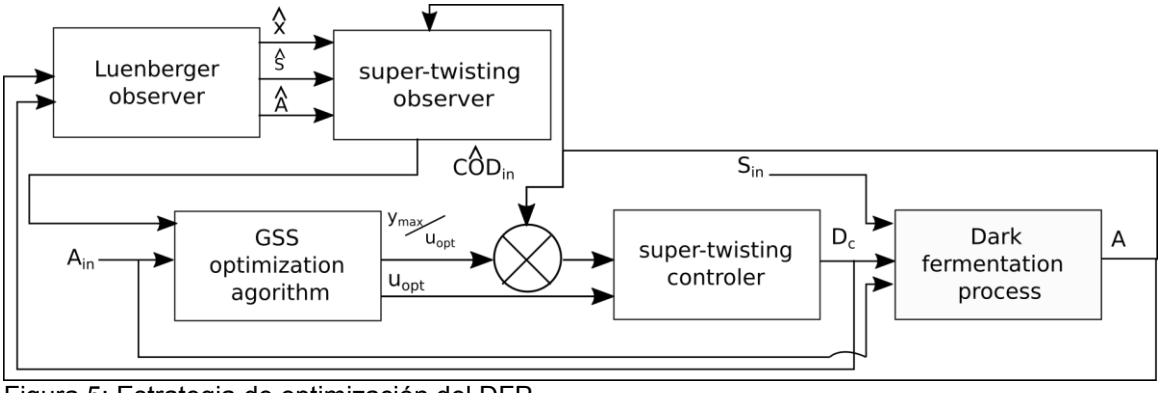


Figura 5: Estrategia de optimización del DFP.

Para el DFP se presenta la estrategia de optimización descrita en la siguiente figura la cual consiste en un controlador denominado super-twisting, un esquema de observadores acoplados y el algoritmo GSS. Los observadores estiman la concentración de sustrato presente en aguas residuales de tal manera que es posible para el algoritmo GSS calcular el punto $(\boldsymbol{u_{opt}, y_{max}})$ que sirve como referencia para el controlador. Este esquema resuelve el problema de la carencia de sensores y la incertidumbre en los parámetros del sistema que pueden afectar el comportamiento del DFP.

Por otro lado, para la MEC se tiene un esquema de optimización más sencillo dado que es posible medir en tiempo real la concentración de acetato a la entrada, facilita el diseño de un esquema de optimización. La Figura (5) describe dicho esquema el cual está integrado por el mismo algoritmo GSS quien nuevamente calcula el punto $(\boldsymbol{u_{opt}, y_{max}})$ de tal manera que el controlador súper-twisting genera la acción de control para alcanzar la máxima productividad en tiempo finito.

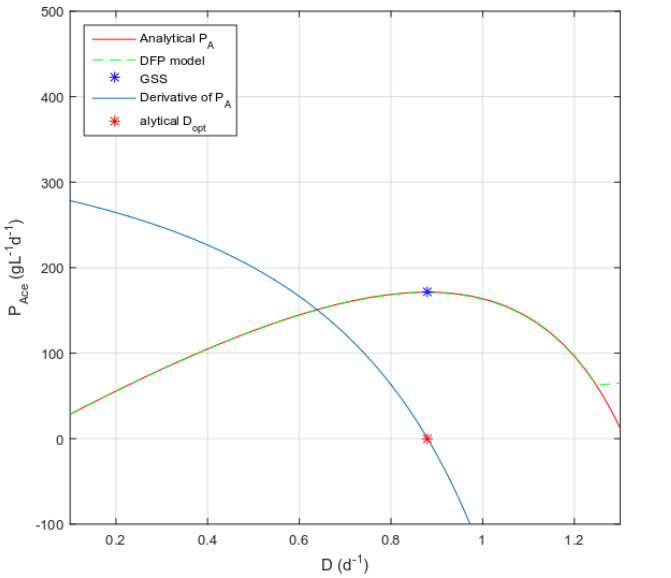


Figura 6: Productividad de acetato tasa de dilución optima en el DFP.

RESULTADOS

Mediante la metodología presentada en la sección anterior, es posible establecer una técnica de optimización simple donde se obtienen los valores de productividad en estado estacionario y se aplica el algoritmo GSS para verificar los resultados. Las pruebas de verificación se realizaron utilizando los modelos (1) y (4) los cuales fueron resueltos mediante análisis numérico para modelar el comportamiento en estado estacionario del DFP y de la MEC respectivamente de tal manera que la productividad $\boldsymbol{y(t)}$ de cada proceso calculadas mediante las ecuaciones (9) y (10) es posible observar el punto de máxima productividad en todo el rango de operación.

Los resultados mostrados en las Figuras (6) a (8) demuestran el correcto funcionamiento del algoritmo GSS para determinar el punto $(\boldsymbol{u_{opt}, y_{max}})$ en cada proceso. Es importante destacar que los modelos obtenidos fueron parametrizados utilizando datos experimentales de tal manera que describen el comportamiento del DFP y de la MEC con buena precisión.

Por otro lado, en todo el rango de operación de cada sistema es posible determinar una superficie de respuesta que permita demostrar la veracidad de las proposiciones matemáticas que dan sustento al esquema de optimización presentado en este trabajo de tal manera que sea posible aplicar sistemas digitales a los procesos de DFP y de la MEC para obtener rendimientos óptimos en tiempos relativamente cortos.

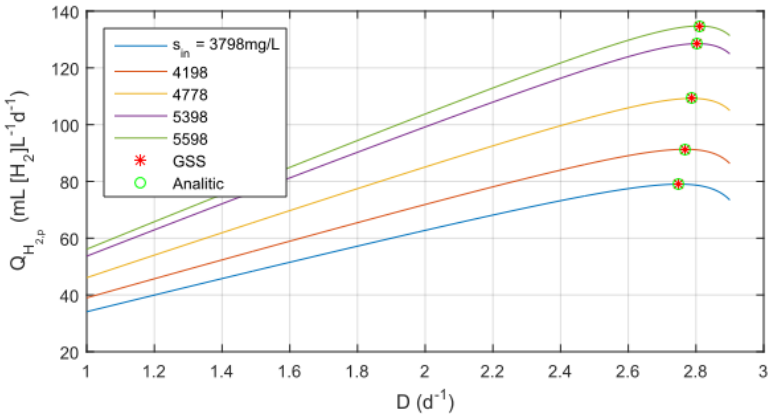


Figura 7: Productividad de hidrógeno en la MEC.

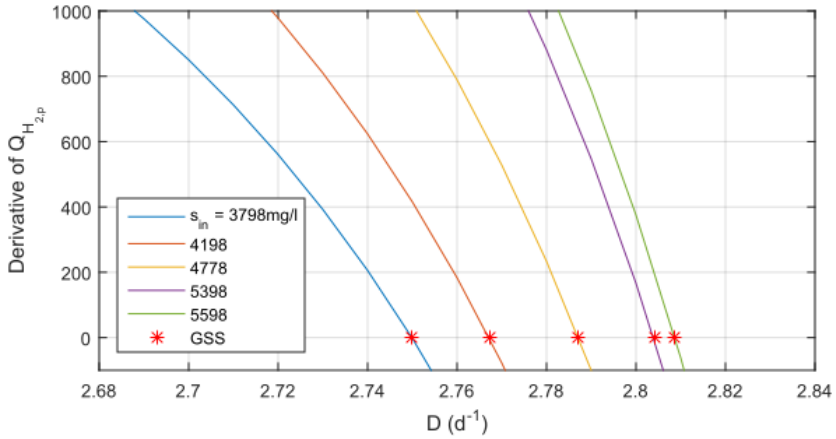


Figura 8: Tasa de dilución optima de la MEC.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que es posible utilizar los conceptos matemáticos relacionados con la optimización, se presentó un esquema completo de optimización de la productividad de hidrógeno partiendo de un sistema de procesos biotecnológicos acoplados donde en una primera etapa se maximizó la productividad de acetato de tal manera que se puede llegar a consumir el sustrato orgánico en un 70%. Por otro lado, se abordaron los problemas relacionados a la incertidumbre paramétrica y a la falta de sensores para medir la concentración de sustrato a la entrada algunas variables de estado en el DFP. Para concluir con este trabajo, el hidrógeno producido puede ser empleado en la producción de energía eléctrica mediante su combustión para impulsar generadores o motores térmicos o también puede ser empleado para alimentar celdas de combustible que convierten la energía de dicho combustible en electricidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Luis Blanco-Cocom, Andrés Guerrero-Álvarez, Jorge Domínguez-Maldonado, Eric Ávila-Vales, and Liliana Alzate-Gaviria. Mathematical model for a continuous hydrogen production system: Stirred fermenter connected to a biocatalyzed electrolysis cell. Biomass and Bioenergy, 48:90–99, 2013.
2. Colín-Robles, J. D. J., Torres-Zúñiga, I., Ibarra-Manzano, M. A., & Alcaraz-González, V. (2021). FPGA-based implementation of an optimization algorithm to maximize the productivity of a microbial electrolysis cell. Processes, 9(7), 1111.

3. de Jesús Colín-Robles, J., Torres-Zúñiga, I., Ibarra-Manzano, M. A., Aviña-Cervantes, J. G., & Alcaraz-González, V. (2024). FPGA-embedded optimization algorithm to maximize the acetate productivity in a dark fermentation process. Journal of Process Control, 144, 103323.
4. Torres-Zúñiga, I., de Jesús Colín-Robles, J., Cea-Barcia, G., & Alcaraz-Gonzalez, V. (2024). Online Optimization of Microbial Electrolysis Cells. In Wastewater Exploitation: From Microbiological Activity to Energy (pp. 165-184). Cham: Springer Nature Switzerland.
5. Nuri Azbar and Richard E Speece. Two-phase, two-stage, and single-stage anaerobic process compa rison. Journal of Environmental Engineering, 127(3):240–248, 2001.
6. Flores-Estrella, R. A., Rodríguez-Valenzuela, G., Ramírez-Landeros, J. R., Alcaraz-González, V., & González-Álvarez, V. (2020). A simple microbial electrochemical cell model and dynamic analysis towards control design. Chemical Engineering Communications, 207(4), 493-505.
7. Ulrich Lüttge and GM Souza. The golden section and beauty in nature: The perfection of symmetry and the charm of asymmetry. Progress in biophysics and molecular biology, 2018.
8. Nath, K., & Das, D. (2004). Improvement of fermentative hydrogen production: various approaches. *Applied microbiology and biotechnology*, *65*, 520-529.
9. Marone, A., Ayala-Campos, O. R., Trably, E., Carmona-Martínez, A. A., Moscoviz, R., Latrille, E., ... & Bernet, N. (2017). Coupling dark fermentation and microbial electrolysis to enhance bio-hydrogen production from agro-industrial wastewaters and by-products in a bio-refinery framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(3), 1609-1621.
10. Zúñiga, I. T., Villa-Leyva, A., Vargas, A., & Buitrón, G. (2018). Experimental validation of online monitoring and optimization strategies applied to a biohydrogen production dark fermenter. *Chemical Engineering Science*, *190*, 48-59.
11. Diario Oficial de la Federación. (DOF, 2023). Decreto por el que se formula la Declaratoria de las Zonas de Atención Prioritaria para el año 2024, publicado en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/893694/2023_11_25_VES_BIENESTAR.pdf.
12. Obras complementarias publicadas por el INEGI sobre el tema: ¿Qué hay en los pueblos de México? Catalogación en la fuente INEGI: 304.601072 Censo de Población y Vivienda (2020), publicado en https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463915119.pdf.
13. Instituto Mexicano para la Competitividad, (6 de junio del 2024), Prodesen 2024-2038: El sistema eléctrico mexicano, Centro de investigación en política pública, recuperado el 28 de abril del 2024 de https://imco.org.mx/prodesen-2024-2038-el-sistema-electrico-mexicano/#:~:text=En%202024%20se%20pronostica%20que,un%20crecimiento%20anual%20de%201.9%25.
14. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, (26 de julio del 2023), resultados de pobreza en México 2022, recuperado el 28 de abril del 2024 de https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2022.aspx.
15. Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, Capacidad y generación, recuperado el 28 de abril del 2024 de https://energia.conahcyt.mx/planeas/electricidad/capacidad-generacion.
16. Secretaría de Energía, Reporte de avance de Energías Limpias 2024 publicado en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/927403/RAEL.pdf
17. Grupo Banco Mundial, Estimaciones de personal del Banco Mundial sobre la base de las Perspectivas de la urbanización mundial de las Naciones Unidas, recuperado el 28 de abril del 2025 de https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS?end=2023&start=1960&view=chart

EFECTO DE UN INHIBIDOR NATURAL ELABORADO A BASE DE FLORES DE JACARANDA SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE UN ACERO API 5L GRADO B ENVEJECIDO ARTIFICIALMENTE EN AGUA CONGÉNITA

Manuela Díaz Cruz [a], Arturo Cervantes Tobón [a*], Antonieta García Murillo [b], Felipe de Jesús Carrillo Romo [b].

[a] Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México. [b] Instituto Politécnico Nacional-CIITEC Azc., Cerrada de Cecati s/n, Sta. Catarina, Azc., C.P. 02250, Ciudad de México, México. arcervmx@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación está enfocada en estudiar el comportamiento electroquímico del efecto que tiene la adición de un inhibidor natural sobre la velocidad de corrosión de un acero API 5L Grado B expuesto a un medio corrosivo (agua congénita) con un flujo de 18 litros/min en un modelo físico denominado cámara de impacto en el cual además se puede variar el ángulo de incidencia del fluido corrosivo para 90 y 45°. El inhibidor se obtuvo a partir de flores de un árbol llamado jacaranda, el cual se adicionó al medio corrosivo para observar el efecto de este con respecto a la velocidad de corrosión del acero, de manera adicional se determinó la velocidad de corrosión sin la presencia del inhibidor para poder observar posteriormente la eficiencia con la presencia del inhibidor natural en presencia de agua congénita.

La prueba electroquímica utilizada para determinar la velocidad de corrosión fue; la técnica de la Resistencia a la Polarización Lineal (RPL). Con esta técnica, se pudo observar para el acero API 5L Grado B una disminución de la velocidad de corrosión en la presente investigación. Por otra parte, la caracterización de los productos de corrosión se llevó a cabo mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos x (DRX) donde se determinó que los principales productos de corrosión formados son principalmente sulfuros, óxidos y carbonatos, los cuales resultaron ser muy adherentes y capaces de brindar una protección adecuada para la superficie del acero en presencia del inhibidor empleado. En términos generales se puede afirmar que es muy notable el efecto de la disminución de la velocidad de corrosión con el empleo de las flores de jacaranda, por lo cual podrían ser utilizadas como un inhibidor natural en alguna aplicación futura para prevenir la corrosión del acero API 5L Grado B.

INTRODUCCIÓN

Los inhibidores de corrosión son sustancias que se utilizan para prevenir o reducir la corrosión de las superficies metálicas en entornos corrosivos. Existen dos tipos de inhibidores de corrosión: naturales y sintéticos [1]. Los inhibidores naturales, derivados de plantas y minerales, son ecológicos, biodegradables y de baja toxicidad. Algunos ejemplos son los aceites vegetales, los taninos y el ácido salicílico. Sin embargo, pueden tener una eficacia limitada y pueden no ser adecuados para entornos de corrosión severa. Además, sus costos pueden ser más elevados en comparación con los inhibidores sintéticos [2]. A pesar de estas limitaciones, los inhibidores naturales están ganando popularidad como alternativas sostenibles y ecológicas a los inhibidores sintéticos que se pueden utilizar en diversas aplicaciones, como en la industria del petróleo y el gas y para preservar artefactos históricos [3]. Los inhibidores naturales son renovables, biodegradables y seguros para la exposición humana, lo que los hace apropiados para industrias como la alimentaria y la farmacéutica [4].

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La Figura 1 muestra el desarrollo experimental para obtener la velocidad de corrosión y la caracterización de los productos de corrosión que se formaron en la superficie de las probetas mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X.

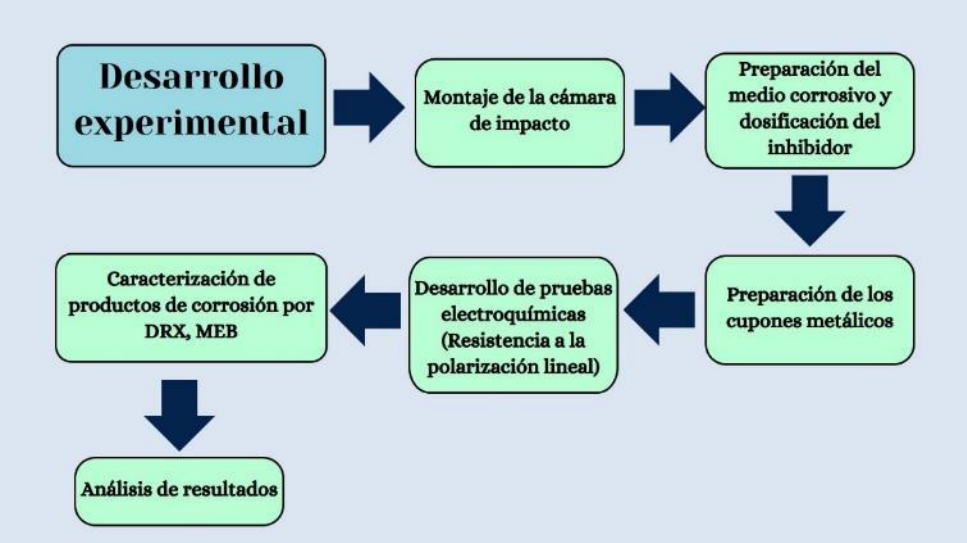


Figura 1. Metodología experimental para obtener la velocidad de corrosión y caracterización de los productos de corrosión.

Preparación de las probetas

Se llevó a cabo el corte de un tubo de acero API 5L Grado B y fueron maquinadas para las pruebas electroquímicas probetas rectangulares (electrodos de trabajo) con dimensiones de 1 x 0.5 x 1 cm con un área expuesta de 0.5 cm2. Las probetas de acero fueron envejecidas artificialmente durante 500,1000 y 1500 hr para simular un tiempo de vida útil (14,35 y 42 años respectivamente) de una tubería que transporta hidrocarburos la cual se elabora con dicho acero.

Condiciones experimentales

Las condiciones experimentales que se emplearon para esta investigación se muestran en la Tabla 1. Estos factores son planteados para estudiar el efecto que tienen sobre la velocidad de corrosión en presencia de agua congénita y la adición de 200 ppm del inhibidor natural elaborado a base de flores de jacaranda.

Tabla 1. Condiciones experimentales.

Variable	
Velocidad del medio	18 L/min (2.36 m/s)
Ángulo de inclinación	90° y 45°
Tiempo	1 – 9 horas

Preparación del inhibidor

La preparación del inhibidor natural a partir de flores de jacaranda se llevó a cabo mediante el procedimiento que se describe en la Figura 2.



Figura 2. Obtención del inhibidor de flores de jacaranda.

Para llevar a cabo las pruebas electroquímicas para obtener la velocidad de corrosión del acero empleado en la presente investigación (acero API 5L Grado B) se elaboraron probetas rectangulares, las cuales fueron sometidas a un medio corrosivo de agua congénita cuya composición se describe en la Tabla 2. Posteriormente se adicionan 200 ppm de inhibidor natural elaborado a partir de flores de jacaranda y se obtienen los valores de la velocidad de corrosión, empleando un dispositivo denominado cámara de impacto el cual se muestra en la Figura 3.

Tabla 2. Composición del agua congénita empleada.

Compuesto	Cantidad
Cl-	9952 mg
CO3	13.4 mg
SO4	20.7 mg
Ácido acético	1.89 ml
Aforar a un litro	

En la Figura 3, se observa además el arreglo de los cupones montados, en donde, el electrodo de Calomel saturado (KCl) hace la función de Electrodo de Referencia (ER), el acero API 5L Grado B de Trabajo (ET) y la barra de grafito como Contra electrodo (CE).

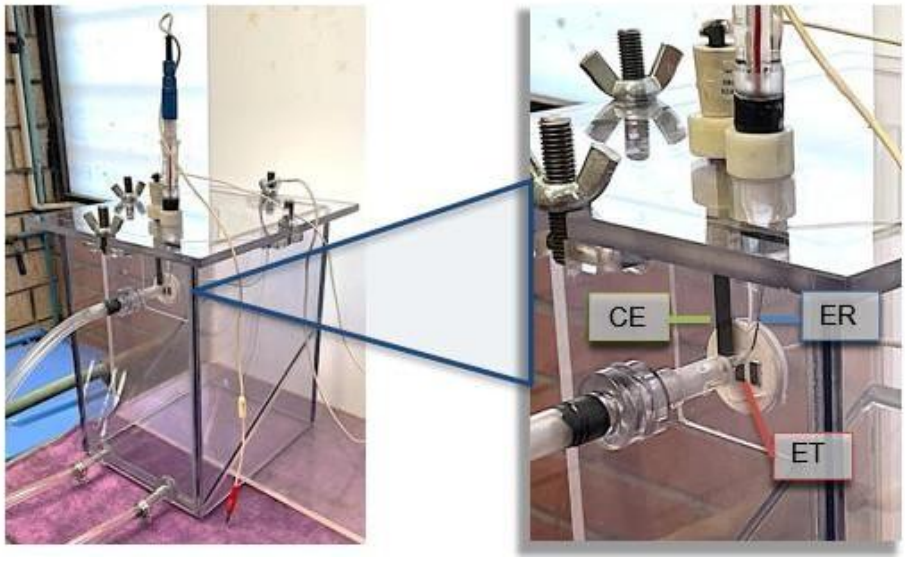


Figura 3. Arreglo de electrodos dentro de la cámara de impacto (celda electroquímica).

RESULTADOS OBTENIDOS

La Figura 4 muestra los resultados para el ángulo de 90° y los tres tiempos de envejecido del acero, en donde se puede observar que conforme se incrementa dicho tiempo del tratamiento la velocidad de corrosión tiende a disminuir. Por lo anterior se tiene un efecto significativo del inhibidor empleado para dicho ángulo.

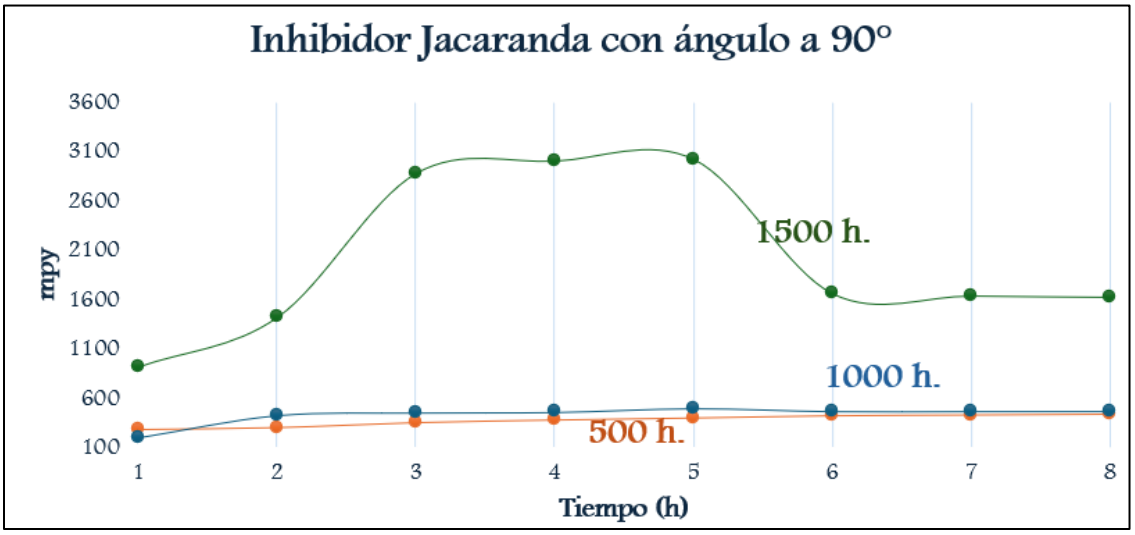


Figura 4. Velocidad de corrosión a un flujo de 18l/min en presencia de agua congénita con 200 ppm e inhibidor de flores de jacaranda para un ángulo de 90° y tres tiempos de envejecido del acero.

La Figura 5 muestra para un ángulo de 45° a 500 y 1500 h de tiempo de envejecido el efecto de la adición del inhibidor de jacaranda, en donde se puede apreciar que el inhibidor elaborado con flores de jacaranda tiene una velocidad de corrosión mucho menor para un tiempo de envejecido de 500 horas.

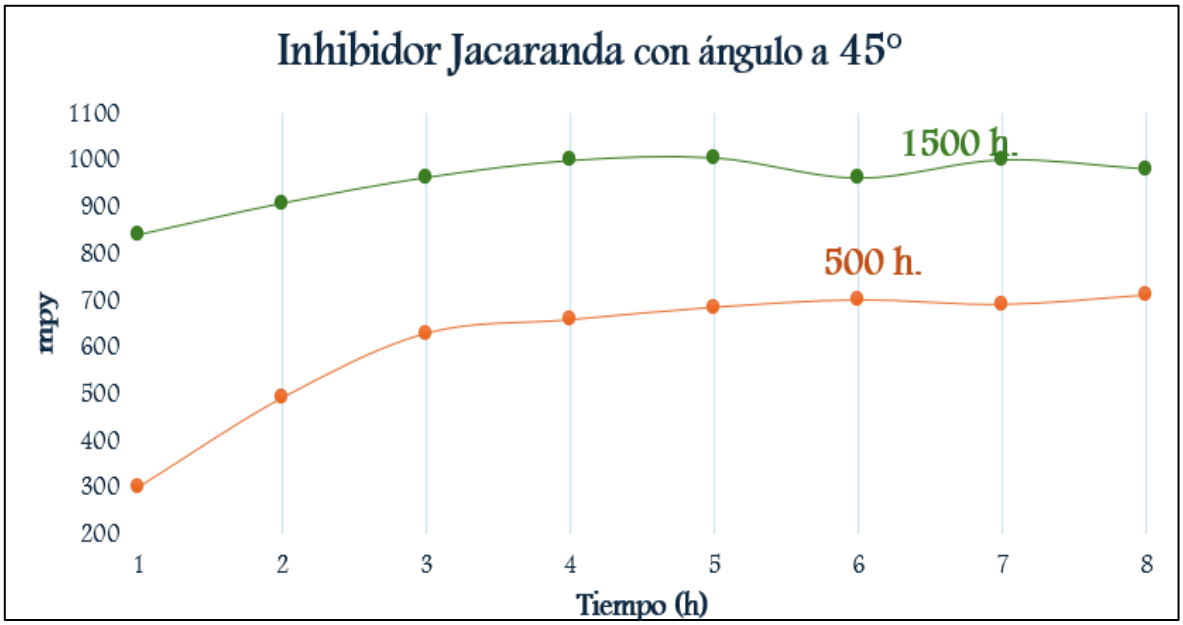


Figura 5. Velocidad de corrosión a un flujo de 18l/min en presencia de agua congénita con 200 ppm de inhibidor de flores de jacaranda para un ángulo de 45°.

La Figura 6 muestra la velocidad de corrosión para un caudal o flujo de 18l/min y 500 h de envejecido empleando agua congénita como medio corrosivo donde se puede observar que la velocidad de corrosión es menor para el ángulo de 45° y además con una tendencia de mantenerse de manera uniforme conforme pasa el tiempo, por lo tanto el inhibidor tiene un efecto notable al disminuir el ángulo de impacto de las muestras.

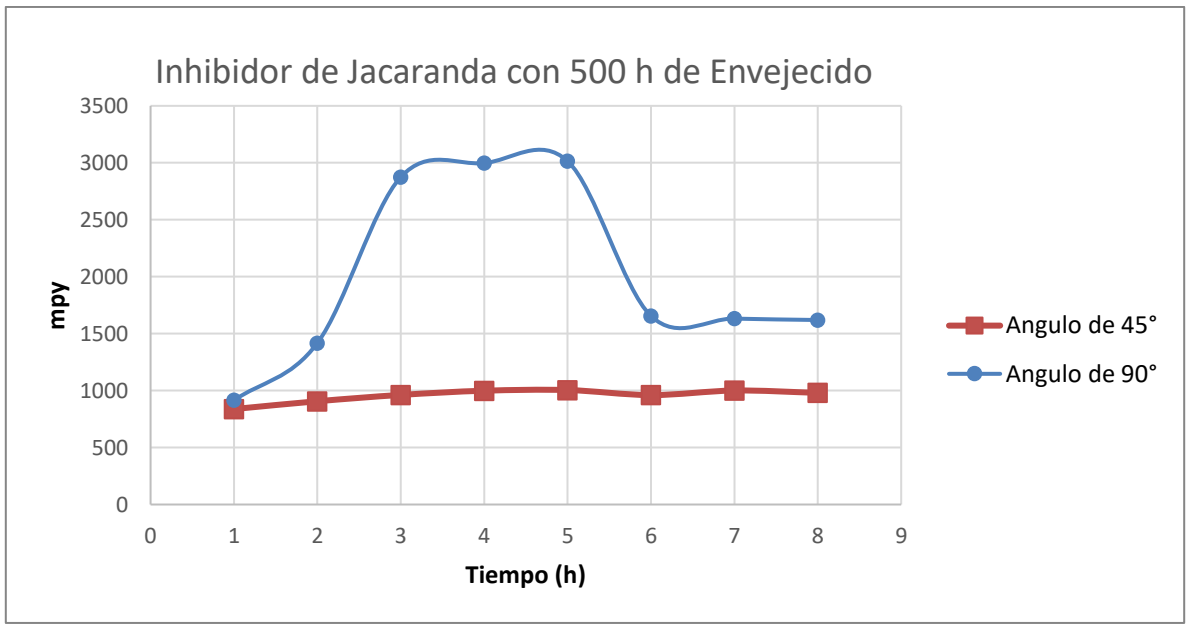


Figura 6. Velocidad de corrosión a un flujo de 18l/min en presencia de agua congénita con 200 ppm de inhibidor de flores de jacaranda para los ángulos de 90 y 45° con 500 h de envejecido.

Caracterización de los productos de corrosión formados en la superficie del acero, mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

La Figura 7 muestra la distribución de los productos de corrosión en la superficie del acero para un flujo de 18l/min para el ángulo de 90°(a) y 45° (b) que fue el que obtuvo el mejor comportamiento con inhibidor, donde se observa el efecto del mismo el cual permite que se forme una capa mucho más uniforme y presenta un mayor aglomerado de los productos de corrosión por lo que la velocidad de corrosión disminuye considerablemente, ambas imágenes fueron obtenidas a 2000 aumentos.

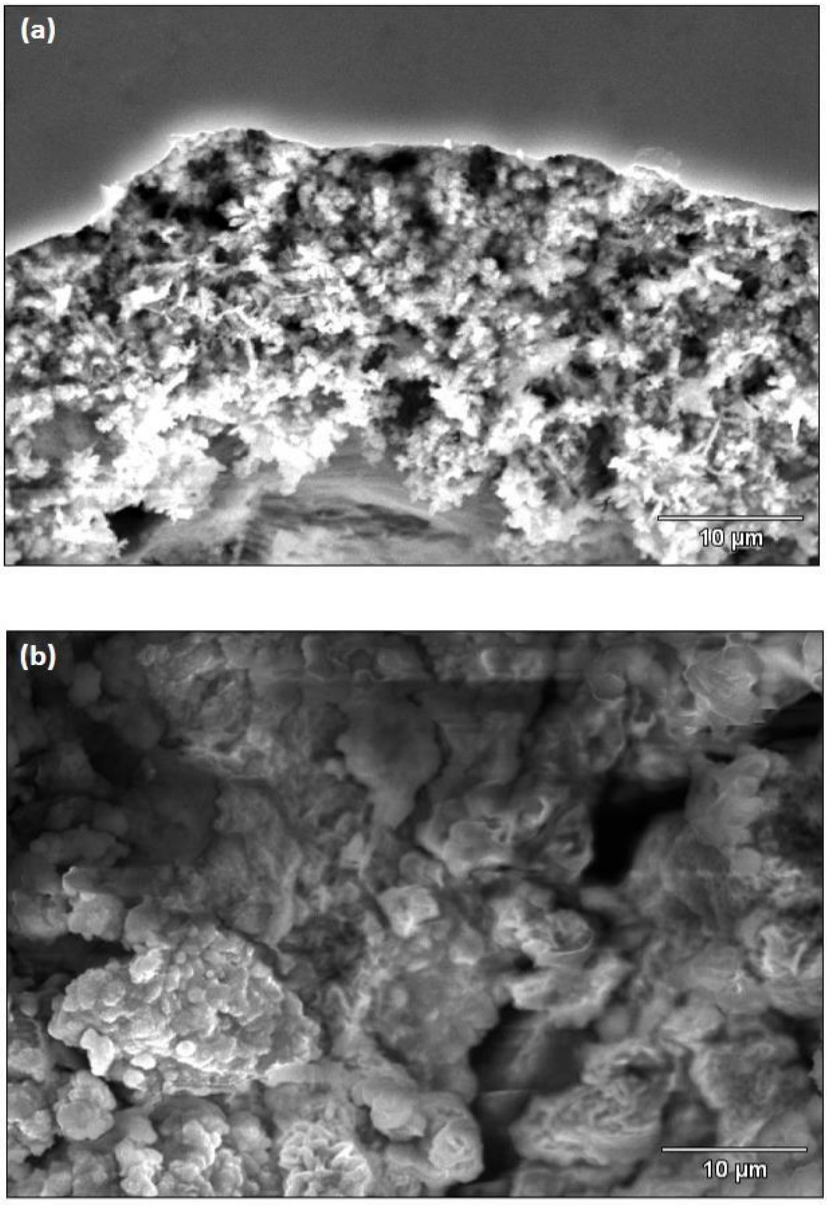


Figura 7. Micrografías a 2000 aumentos de la superficie del acero a un flujo de 18 l/min (a) 90° y (b) 45° con inhibidor natural elaborado con flores de jacaranda.

Caracterización de los productos de corrosión formados en la superficie del acero, mediante difracción de rayos X (DRX).

En la Figura 8 se muestran los patrones de difracción para un ángulo de 90° y tiempos de envejecido de 500, 1000 y 1500 horas, donde se puede apreciar que aunque se presentan fases cristalinas similares en los tres casos es a 1500 horas donde se tiene una mayor presencia de sulfuros como lo son la troilita y la pirita que resultan ser protectores de acuerdo a la literatura, por ende la velocidad de corrosión disminuye como se observó en la gráfica de la Figura 4.

Además, debido a la presencia del cobre inmerso en la solución a causa del desgaste de la bomba, se encuentran productos de corrosión asociados con este elemento, estos productos han sido reportados tales como el sulfuro de cobre (Cu_2S) y la digenita (Cu_9S_5), los cuales tienen propiedades protectoras.

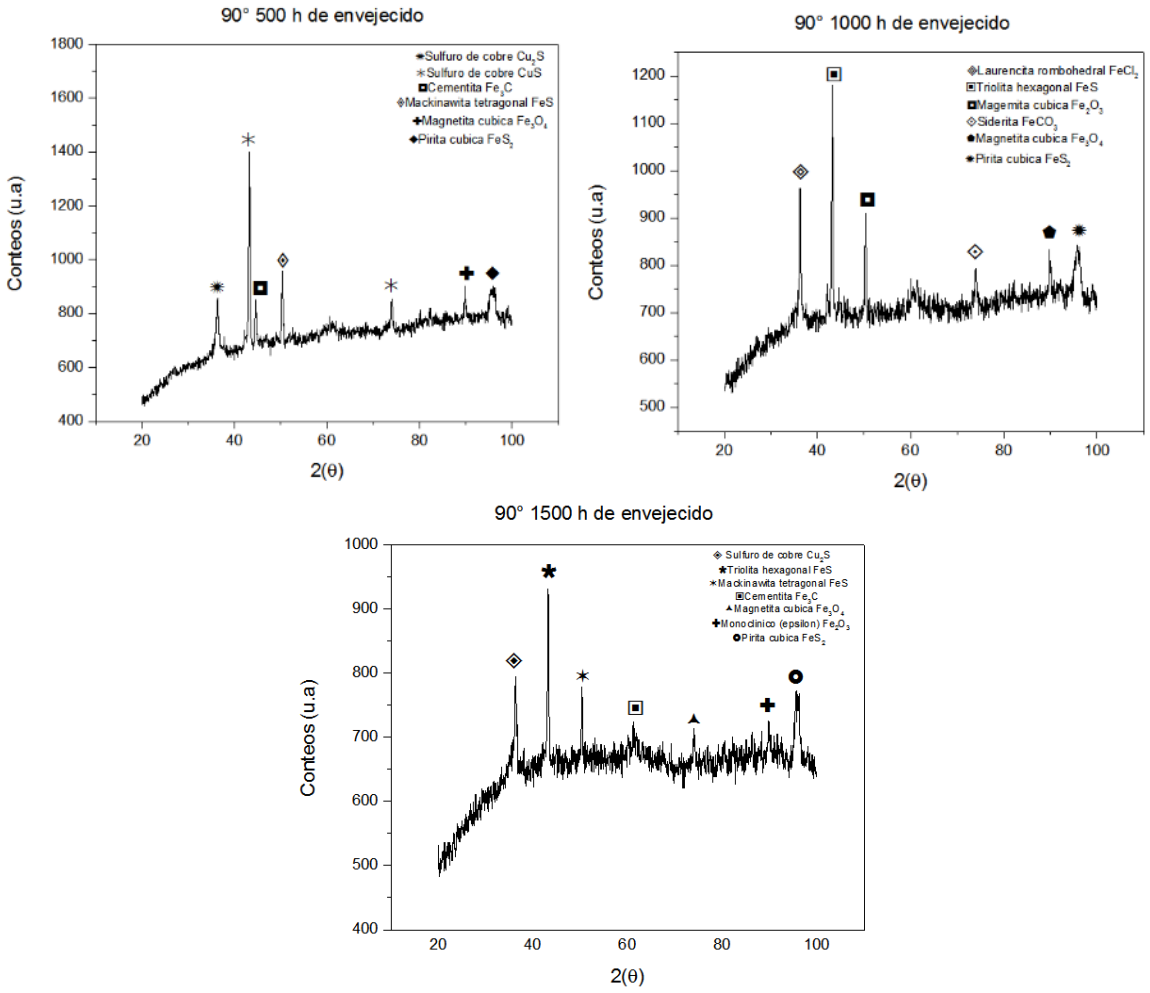


Figura 8. Patrones de difracción de las superficies del acero a 90° expuestas a un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita e inhibidor de flores de jacaranda.

La Figura 9 muestra los patrones de difracción para un tiempo de envejecido de 500 horas para los ángulos de 45 y 90° en donde se puede observar que el ángulo de 45° posee una mayor gama de fases cristalinas de sulfuros de hierro junto con los de cobre que en conjunto resultan ser aún más protectores y por ende el ángulo de 45° resulta ser mucho más eficiente que el de 90° para 500 horas de tiempo de envejecido.

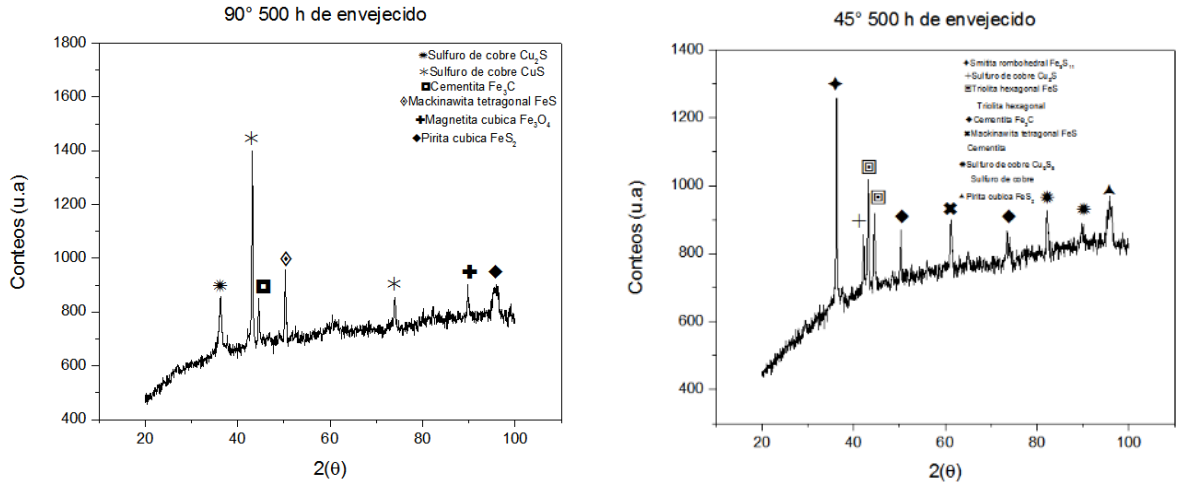


Figura 9. Patrones de difracción de las superficies del acero a 90° y 45° expuestas a un flujo de 18 l/min en presencia de agua congénita e inhibidor de flores de jacaranda.

CONCLUSIONES

Fue posible elaborar un inhibidor natural a base de flores de jacaranda.

Conforme se agrega una cantidad de inhibidor (200 ppm), la formación de productos de corrosión tienden a formar una capa uniforme y adherente, por lo que la velocidad de corrosión tienda a disminuir como en el caso del ángulo de 90° conforme se incrementa el tiempo de envejecido.

Para el caso de 500 horas de envejecido para los ángulos de 90 y 45° este último presenta una velocidad de corrosión menor.

Los principales productos de corrosión que se forman son una mezcla de óxidos y sulfuros, los cuales tienden a adherirse en la superficie del acero, dando como resultado un mejor comportamiento sobre la velocidad de corrosión, ya que los sulfuros principalmente son más protectores de acuerdo a la literatura.

REFERENCIAS

[1] Int. J. Corros. 2012 2012, 380217.

[2] Ahmed, ES; Junaid; Ganesh, GM Una descripción general completa de la corrosión en RCC y su prevención mediante diversos inhibidores de corrosión ecológicos. *Buildings* 2022, *12*, 1682.

[3] Tamalmani, K.; Husin, H. Revisión sobre inhibidores de corrosión para problemas de corrosión en petróleo y gas. *Appl. Sci.* 2020, *10*, 3389.

[4] Zakeri, A.; Bahmani, E.; Sabour Rouh Aghdam, A. Extractos de plantas como inhibidores de corrosión sostenibles y ecológicos para la protección de metales ferrosos en medios corrosivos: una mini revisión. *Corros. Commun.* 2022, *1*, 6–17.

INNOVACIÓN EN EL DISEÑO DE EMPAQUES PARA MATERIALES PELIGROSOS: SEGURIDAD Y SOSTENIBILIDAD EN EL MANEJO DE SOSA CÁUSTICA UTILIZANDO LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Omar Alejandro Montes Rivera[1], María Isabel Ponce Sánchez Ponce Sánchez[2], Wendy Paola Ponce Sánchez[3], María del Carmen Chacón Olivares[4]

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato
LIS22110598@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Las compañías se topan con importantes retos logísticos al asegurar la seguridad y calidad de productos altamente reactivos y corrosivos, como la sosa cáustica. El propósito de este proyecto es crear un empaque optimizado que respete las regulaciones internacionales y reduzcan los riesgos vinculados a su manejo, traslado y almacenaje.

El método implica un estudio de las características para transportar y almacenar la sosa, determinando su clasificación según el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) para valorar sus riesgos inherentes y necesidades de empaquetado. Posteriormente, se lleva a cabo una revisión de las normativas internacionales aplicables a contenedores para sustancias peligrosas, garantizando que el diseño cumpla con pruebas de hermeticidad, resistencia mecánica y etiquetado conforme a estándares de seguridad industrial.

Se desarrollan propuestas de diseño en software CAD, asegurando que las soluciones planteadas cumplan con los requerimientos técnicos y operativos.

Las propuestas de diseño se validan a través de simulaciones computacionales avanzadas, utilizando inteligencia artificial para modelar escenarios de estrés mecánico, exposición química y condiciones de transporte. La solución más eficiente es materializada en un prototipo impreso en 3D, permitiendo pruebas experimentales para verificar su desempeño real.

El análisis de múltiples iteraciones y pruebas probabilísticas determinó una eficiencia preliminar del 85%, optimizando la seguridad y funcionalidad del empaque. Como resultado, se ha logrado una solución de ingeniería que no solo mejora la integridad estructural y la hermeticidad del envase, sino que también contribuye a la eficiencia logística y la seguridad operativa en la gestión de este compuesto químico crítico.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las organizaciones se enfrentan problemáticas de distinta índole dentro de la actividad logística. Una de las más relevantes es respaldar que los productos lleguen a los clientes con las especificaciones requeridas y el mejor estado posible. Este reto se intensifica en el manejo de materiales peligrosos, donde las normativas internacionales adquieren gran alcance. Un caso emblemático es el de la sosa cáustica en escamas (hidróxido de sodio), un material en extremo reactivo y corrosivo, empleado ampliamente en industrias como la química, alimentaria y papelera.
La clase de peligrosidad de este producto exigen una observación especial en los ejes principales de la actividad logística: manejo, transporte y almacenamiento. En el caso específico de la sosa cáustica en escamas, su capacidad de absorber humedad y generar calor al contacto con agua representa un desafío particular. Estos empaques deben cumplir con normativas internacionales y directrices del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA). Esto incluye el uso de tapas con sistemas herméticos que evite la exposición a la humedad y el diseño de etiquetas claras que cumplan con las normas y presente en la ficha técnica del producto.

El presente proyecto plantea la importancia de diseñar un empaque seguro y funcional para la sosa cáustica, atendiendo las normativas internacionales y promoviendo la seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte de este material peligroso. La metodología incluye una investigación documental en fuentes primarias, así como un análisis exploratorio que identifica áreas de oportunidad para integrar materiales idóneos.

El resultado esperado es un diseño que emplea materiales seguros, validados mediante simulaciones apoyadas en tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial. De esta manera, se busca no solo mejorar la seguridad en las operaciones logísticas, sino también optimizar los procesos y reducir el impacto ambiental asociado al transporte de este químico. Este proyecto favorece una mayor conciencia sobre la importancia de respetar la vida y el medio ambiente, contribuyendo a establecer prácticas logísticas más sustentables.

Objetivo general
Desarrollar una propuesta de diseño de empaque especializado para sosa cáustica que garantice la seguridad en el transporte y almacenamiento.

Objetivos específicos
1) Revisar y aplicar normativas nacionales e internacionales.
2) Diseñar un empaque con materiales anticorrosivos y sistema de cierre hermético en programa SolidWorks.
3) Validar el diseño mediante pruebas de calidad y seguridad en condiciones reales.

TEORÍA

Sosa cáustica
Según Grupo Pochteca (2021), la sosa cáustica es un hidróxido de sodio sólido cristalino, inodoro y que tiene la capacidad de liberar grandes cantidades de calor cuando se diluye en agua. Su principal característica es que es corrosiva porque reacciona con muchos materiales, desintegrando estructuras químicas y en algunos casos, degradando superficies, incluyendo la piel, ojos y tejidos. La sosa cáustica se utiliza tanto en el hogar como en la industria, algunos ejemplos dentro de casa: destapar desagües, limpiar superficies; en la industria: fabricación de jabones, papel, detergentes, producción de metales, lavado y maceración de telas, etc., (Grupo Pochteca, 2021).

Logística
La logística es el procedimiento de llevar productos a donde son requeridos. La administración logística asegura que la cantidad correcta de productos llegue de manera segura a esos sitios, en el instante exacto en el que se requiere. La logística va más allá de simplemente el traslado de productos del lugar A al lugar B. Es un ámbito mucho más extenso que incluye numerosas actividades vinculadas con la administración de una empresa (Shopify, 2024).

Empaque
De acuerdo con Kotler (1999) en su libro *Dirección de Mercadotecnia: Análisis, Planeación, Implementación y Control,* define el empaque como la función y producción del contenedor o envoltura de un producto y es la quinta P del marketing mix. Los tipos de empaques son:
- *Empaque primario,* un frasco de perfume.
- *Empaque secundario,* la caja del frasco.
- *Empaque de embarque,* caja de cartón corrugado.

Transporte
Según el Diccionario de la lengua española, el transporte son sistemas de medios para conducir y llevar cosas o personas de un lugar a otro.
Dentro de la logística, el transporte se refiere al movimiento de mercancías de un lugar a otro, el cual se puede realizar por diferentes medios, como el transporte terrestre, marítimo, ferroviario, fluvial, aéreo o multimodal. Tiene el propósito de entregar los productos en tiempo y forma **(CEUPE, s.f.)**.

Almacenamiento
Según (Tompkins y Smith, 2008, como se citó en Castaño, 2021), el almacenamiento es la parte de la logística que tiene como obejtivo proveer el espacio para que sea una zona segura y ordenada de la mercancía, utilizando sistemas que coordine de manera efectiva y ahorrando los costes de las actividades, la planta de producción y los trabajadores para el control total.

Contenedores
Un contenedor es un recipiente carga de gran tamaño, rectangular y fabricado de un material tenaz, que se emplea para el transporte de mercancías en medios terrestres, marítimos o aéreos. Estos contenedores son estandarizados bajo la normativa ISO-668, permiten un transporte más seguro, rápido y económico (CEUPE, s.f.).

Manipulación
La manipulación de mercancías abarca todas las acciones físicas que se realizan sobre los productos durante su paso por la cadena de suministro. Esto incluye operaciones como carga, descarga, traslado, clasificación, estiba, desestiba y embalaje. La correcta manipulación es esencial para evitar daños en los productos, optimizar espacios y mejorar la eficiencia en los procesos logísticos. Se utilizan equipos como montacargas, grúas, bandas transportadoras y carretillas para facilitar estas actividades (Martinez de Irujo, K, 2013).

PARTE EXPERIMENTAL

Este trabajo se realizó mediante una investigación documental de las normativas internacionales y nacionales aplicables al transporte y almacenamiento de materiales peligrosos, en este caso para la sosa cáustica, particularmente corrosivo de Clase 8 según el SGA (Sistema Globalmente Armonizado).

Para comenzar, según el Grupo Cydsa en su hoja de datos de seguridad de la sosa cáustica, algunas precauciones que se deben considerar para un manejo seguro es: Evitar el contacto con la sustancia, se recomienda utilizar Equipo de Protección Personal; para la protección respiratoria, utilizar un respirador de media cara con filtros N95, en caso de presentarse irritación en los ojos se requiere una máscara de cara completa; para la protección de la piel, utilizar ropa protectora que cubra todo el cuerpo, guantes y botas resistentes a químicos; para la protección de los ojos, se recomienda utilizar lentes de seguridad en conjunto con la protección facial donde exista riesgo de salpicaduras. Así mismo, para garantizar un manejo seguro, se debe evitar ingerir o consumir alimentos y bebidas mientras se maneja esta sustancia. Si necesita diluir, agregar lentamente el agua, nunca lo haga a la inversa para evitar la generación de calor y salpicaduras. Se debe almacenar en un lugar fresco, seco y bien ventilado, mantener los envases bien cerrados e identificados y almacenar lejos de materiales incompatibles como lo son los ácidos, metales, compuestos halógenos y otros (Industria Química de Istmo, 2018).

Por otro lado, dentro de los requisitos para el transporte de sosa cáustica está la Documentación del vehículo y del transporte, este apartado tiene que contar con la verificación vigentes de revisión técnica del camión, seguros vigentes y el certificado de registro de precursores químicos vigente del transportista. Las placas de identificación del producto son importantes durante su traslado, debe llevar rótulos de riesgo en la parte trasera, lateral derecho y lateral izquierdo del transporte. Para los conductores, es importante tener la licencia de conducir vigente, certificado de manejo de sustancias peligrosas y documentación acreditada del seguro de accidentes laborales vigente y contar con el Equipo de Protección Personal (Efice, s.f.).

Normativas nacionales e internacionales.
Dentro de las Normativas Nacionales se encuentran:
A) NOM-018-STPS-2015 (Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.)
Establece los sistemas para la identificación y comunicación de peligros por sustancias químicas en los lugares de trabajo. Se basa en el Sistema Globalmente Armonizado (SGA), el cual incluye:

- Pictograma GHS05 (corrosivo): fondo blanco, borde rojo, símbolo negro.
- Frases de advertencia:
  - H290: Puede ser corrosivo para los metales.
  - H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares.
- Indicaciones de precaución. (Secretaría del Trabajo y Previsión Social. , 2015).

B) NOM-003-SCT/2011 (Características de las etiquetas de envases y embalajes, destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.)
Regula el transporte terrestre de materiales peligrosos. La sosa cáustica sólida está clasificada como:

- ONU: UN 1823 (sólida) / UN 1824 (líquida).
- Clase de riesgo: 9 (corrosivo).
- Grupo de embalaje: II (peligro medio)

Exige etiquetado visible, embalaje certificado y documentación con hoja de datos de seguridad (SDS) (Secretaría de Comunicaciones y Transportes. , 2011)
C) NOM-052-SEMARNAT-2005 (Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.)
Identifica las características de los residuos peligrosos.

- La sosa cáustica puede clasificarse como corrosiva (C) si tiene un PH >12.5.

El manejo incluye almacenamiento temporal, transporte con empresas autorizadas y disposición en instalaciones aprobadas. La neutralización debe realizarse bajo control técnico especializado

Dentro de las Normativas Internacionales se encuentran:
A) ONU – Manual de Pruebas y Criterios (Rev. 7).
Establece los métodos de ensayo para clasificar sustancias peligrosas. Requiere que los embalajes estén homologados (UN Certified) y cumplan con pruebas como caída libre, apilamiento y hermeticidad (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE, 2019).
B) Reglamento ADR (Europa).
Regula el transporte de mercancías peligrosas por carretera. Clasificación de sosa cáustica:

- UN 1823
- Clase 8
- Grupo de embalaje II.

Marcado de embalaje ejemplo: UN 1H2/Y1.8/100

- 1H2: Tambor plástico abierto.
- Y: Grupo II.
- 1.8 Densidad específica.
- 100: Presión de prueba en kPa (Regulaciones ADR , 2023).

C) EPA (EE. UU.) – RCRA.
El RCRA regula el tratamiento y disposición de residuos peligrosos en EE. UU. La sosa caustica es corrosivo y debe manejarse con medidas específicas, almacenamiento en contenedores compatibles, etiquetado según 40 CFR, y disposición en instalaciones con EPA ID Number (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1976).
D) ISO 8317:2015.
Norma internacional que regula los envases con cierre de seguridad a prueba de niños para sustancias peligrosas. Es aplicable en mercados donde se requieren protección infantil para productos químicos domésticos como limpiadores con hidróxido de sodio (International Organization for Standardization, 2015).

Diseño de empaque en SolidWorks®.
Para este trabajo, se realizó un diseño detallado de un tambo de acero inoxidable especializado para el transporte y almacenamiento de la sosa cáustica. En la Figura 1 se observa un plano técnico de un contenedor cilíndrico para residuos peligrosos. Este plano muestra vistas ortogonales (frontal,

lateral y superior), lo que permite estimar una mejor forma tridimensional. El tamaño general del contenedor son 900mm de altura y 600mm de diámetro, con un diseño de una cubierta con orificio de 36mm de diámetro.

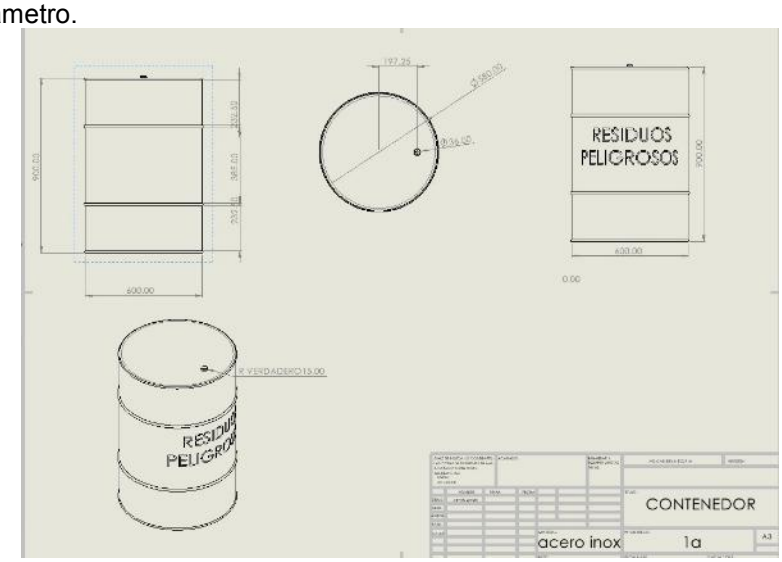


Figura 1. Plano técnico. Elaboración propia en SolidWorks®.

Pruebas de calidad y seguridad en condiciones reales.

En la Figura 2, se puede observar una vista lateral de la aplicación de fuerza en la cubierta del bote. Además, se visualiza los vectores de esfuerzo (flechas rojas) repartidos en la superficie del cilindro, utilizados para aplicar cargas o analizar la deformación. El entorno examinado se presenta en forma de cilindro (barril), con dos refuerzos circulares intermedios distintivos de contenedores de metal. La zona superior muestra niveles de esfuerzo (alta densidad de vectores de carga rojos), lo que indica una situación crítica. Parece que la base está sujeta o con restricciones totales (flechas verdes), lo que podría provocar una zona de concentración de esfuerzos en el lado contrario (superior). Se pueden observar vectores de carga normal aplicados de manera radial (probablemente debido a presión interna o externa).

Además, existen flechas de carga orientadas axialmente hacia abajo, lo que indica una fuerza axial extra (como el peso individual u otra carga concentrada). La deformación plástica se manifiesta en la región superior, posiblemente a causa de la acumulación de esfuerzos debido a discontinuidades geométricas (como uniones o soldaduras).

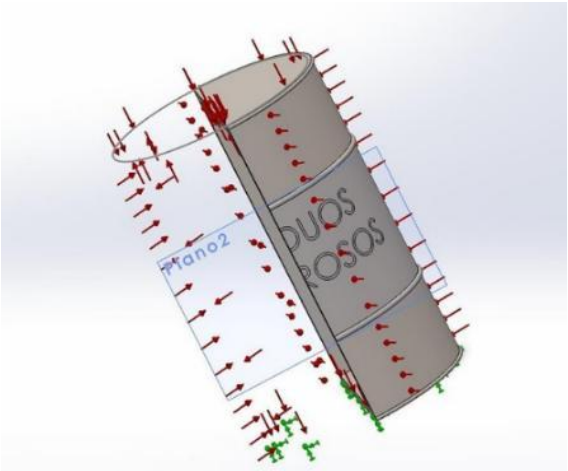


Figura 2. Barril sometido a presión en cubierta. Elaboración propia en SolidWorks®.

En la Figura 3, se observa la deformación plástica en zona superior debido a esfuerzo combinados (fuerza - presión). El tipo de resultado evaluado fue la tensión de von Mises, criterio útil para predecir la falla por fluencia en materiales dúctiles. El material utilizado para este modelo fue acero inoxidable, seleccionado por sus excelentes propiedades mecánicas y químicas, ideales para contener sustancias corrosivas como la sosa cáustica. En la primera simulación se aplicó una presión interna de 16 GPa, lo cual excede en gran medida el límite de resistencia del material. El análisis evidenció una falla estructural con un máximo de tensión de 8.268 × 10^8 Pa, superando ampliamente el límite elástico del acero inoxidable (1.7 × 10^8 Pa). Esta sobrecarga provocó deformación plástica localizada en la zona superior del cilindro, claramente visible en la región coloreada de rojo en la simulación.

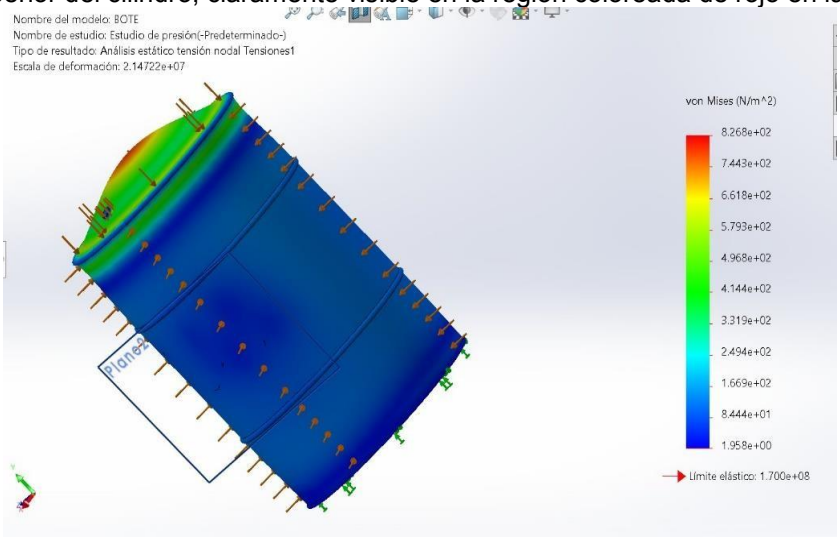


Figura 3. Deformación plástica en zona superior. Elaboración propia en SolidWorks®.

Cálculo del cubicaje para el espacio en tarima.

Para realizar estos cálculos, se utilizó el programa Quick Pallet Maker® donde se muestran los parámetros de entrada para una unidad de carga. En la Figura 4, se muestra la Información del empaque primario de forma cilíndrica, la información de las cajas, así como las dimensiones de las paletas.

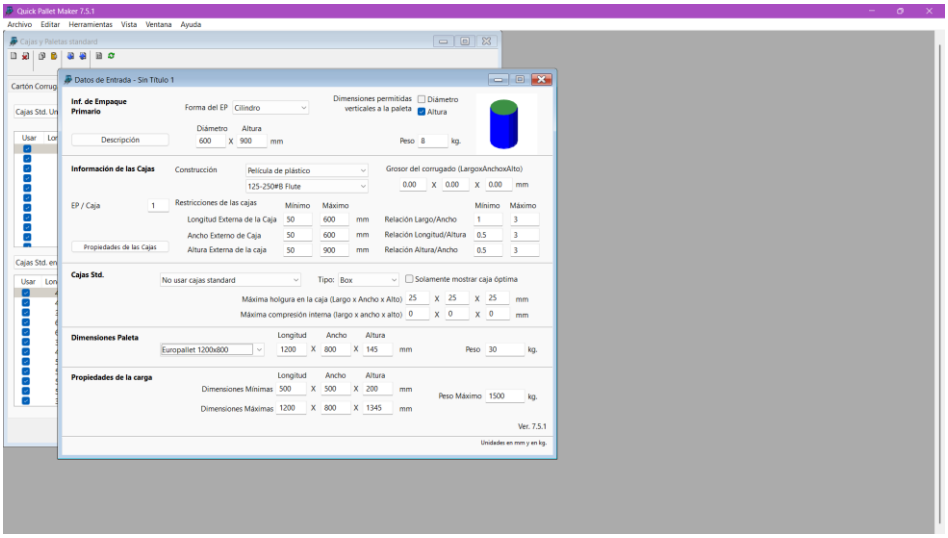


Figura 4. Datos de entrada. Elaboración propia en Quick Pallet Maker®.

En la Figura 5, se muestra el Llenado del contenedor; se utilizó un Contenedor Dry Cargo 48 ya que éste tiene una eficiencia de área del 95% y optimiza el uso del espacio. La tarima es Europallet

y en cada una se encuentran 2 botes. Se muestra información como el total de paletas, número total de cilindros, largo, ancho y alto de la carga, entre otros.

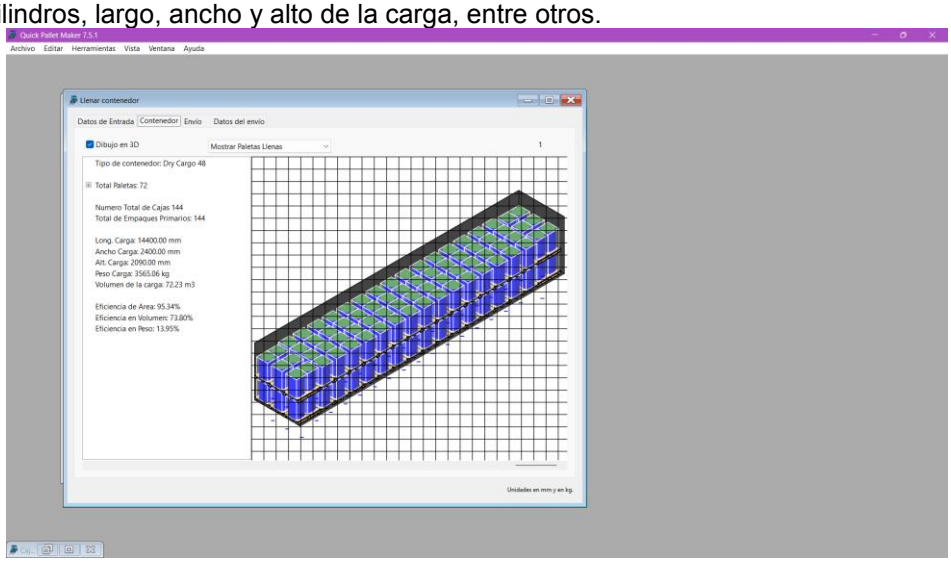


Figura 5. Llenado de contenedor. Elaboración propia en Quick Pallet Maker®.

RESULTADOS

El avance en el diseño del embalaje especializado para sosa cáustica permitió detectar oportunidades fundamentales de optimización en términos de seguridad, hermeticidad y eficacia logística. se creó un modelo cilíndrico en acero inoxidable utilizando el software SolidWorks®, con dimensiones precisas y reforzamientos estructurales para resistir situaciones de tensión.

Las simulaciones efectuadas utilizaron cargas radiales y axiales que eran representativas de situaciones reales de transporte y almacenaje. se notó que, frente a una presión interna desmedida (16 gpa), el diseño mostraba una deformación plástica en la zona superior, lo que provocó modificaciones estructurales en el modelo para incrementar su resistencia.

Además, se llevó a cabo un estudio del cubicaje y se mejoró el espacio en tarima utilizando la herramienta Quick Pallet Maker®. Se estableció una disposición eficaz en contenedores Dry Cargo 48, empleando euro pallets con dos unidades por tarima, consiguiendo un rendimiento de área del 95%.

Los hallazgos de la simulación mostraron que el diseño alterado aumentó su eficacia estructural, alcanzando un rendimiento inicial del 85% en aspectos de resistencia, funcionalidad y seguridad en exámenes simulados. El modelo se adhiere a las regulaciones nacionales e internacionales y constituye una alternativa factible para el manejo seguro de un compuesto químico de alta corrosión.

CONCLUSIONES

Este proyecto evidencia que se puede innovar en la creación de embalajes para materiales peligrosos mediante el uso de tecnologías como la inteligencia artificial y la simulación computacional. El diseño sugerido no solo se ajusta a las regulaciones internacionales pertinentes, sino que también incrementa notablemente la seguridad al manipular sosa cáustica.

Se demostró que la utilización de materiales apropiados, como el acero inoxidable, unido a un diseño sólido y a pruebas en condiciones extremas, posibilita la obtención de un embalaje fiable para el transporte y guardar. Igualmente, la aplicación de instrumentos de cubicaje ayudó a mejorar el espacio logístico, disminuyendo los gastos operacionales y el efecto en el medio ambiente. Para concluir, este progreso no solo satisface una demanda industrial inmediata, sino que también fomenta prácticas sustentables, eficaces y responsables en el campo de la logística química. La

incorporación de técnicas sofisticadas como el diseño asistido por computadora y la simulación mecánica genera nuevas oportunidades para abordar desafíos parecidos en otras industrias.

BIBLIOGRAFÍA

1. CEUPE. (s.f.). *¿Qué es el transporte en logística? Importancia y objetivos*. Obtenido de CEUPE: https://www.ceupe.com/blog/transporte-en-logistica.html
2. CEUPE. (s.f.). *¿Qué es un contenedor en logística? Características e importancia*. Obtenido de CEUPE: https://www.ceupe.com/blog/contenedor-en-logistica.html#:~:text=En%20log%C3%ADstica%2C%20un%20contenedor%20es,medios%20terrestres%2C%20mar%C3%ADtimos%20o%20a%C3%A9reos.
3. Efice. (s.f.). *Requisitos para el Transporte de Soda Cáustica Escamas*. Obtenido de Efice: https://www.efice.uy/iso9000/RT-75-11.pdf
4. Grupo Pochteca. (15 de octubre de 2021). *Conoce qué es la sosa cáustica y para qué sirve*. Obtenido de Grupo Pochteca: https://mexico.pochteca.net/conoce-que-es-la-sosa-caustica-y-para-que-sirve/
5. Industria Química de Istmo. (marzo de 2018). *IQUISA Sosa Escamas / IQUISA Sosa Granulada* . Obtenido de Industria Química de Istmo: https://www.iquisa.com.mx/pdfs/2_HDS_HIDROXIDO_DE_SODIO_ESCAMAS_4.pdf
6. International Organization for Standardization. (2015). *ISO 8317*. Obtenido de Child-resistant packaging*.: https://www.iso.org/standard/55513.html
7. Martinez de Irujo, K. (2013). *manual de Logìstica integral.* ESIC Educaciòn .
8. Regulaciones ADR . (2023). *European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road* . Obtenido de https://unece.org/transport/dangerous-goods/adr
9. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. . (2011). *NOM-003-SCT/2011*. Obtenido de Transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos*. Diario Oficial de la Federación.: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4619/sct/sct.htm
10. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. . (2015). *NOM-018-STPS-2015*. Obtenido de Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo*. Diario Oficial de la Federación.: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6217/stps/stps.htm
11. Shopify. (06 de Octubre de 2024). *¿Qué es la logística? Significado, ventajas y ejemplos*. Obtenido de Shopify: https://www.shopify.com/es/blog/logistica
12. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1976). *. Resource Conservation and Recovery Act (RCRA).* Obtenido de https://www.epa.gov/rcra
13. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE. (2019). *Manual de Pruebas y Criterios (Rev. 7).* Obtenido de https://unece.org/transport/dangerous-goods/un-manual-tests-and-criteria

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UN TERMOPAR INALAMBRICO PARA EVALUACION TERMICA DE HORNOS DE CERAMICA

José Alberto Valdez López[1], José Eduardo Frías Chimal[1], Sergio Alonso Romero[1], Luis Angel Ortíz Lango[1], Juan Carlos García Valadez[1], Roberto Abdiel Sánchez Negrete[1], Paola Hernández Gandarillas[1].

[1]Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), avaldez@ciatec.mx

RESUMEN

La fabricación de cerámica requiere un control preciso de la temperatura en los hornos, ya que las fases de cocción (secado, reacción química y vitrificación) dependen de perfiles térmicos específicos que alcanzan temperaturas de hasta 1300 °C1. Los sistemas tradicionales de monitoreo suelen ser cableados, lo que dificulta la instalación en hornos de gran escala o la adaptación a entornos dinámicos. Con el avance del Internet de las Cosas (IoT), los dispositivos inalámbricos como el ESP32, combinados con protocolos como MQTT, ofrecen una alternativa para medir y registrar temperaturas de manera remota2. Este trabajo propone un sistema basado en estas tecnologías, adaptado a las exigencias térmicas de hornos cerámicos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y calidad del proceso. Incorporar dispositivos de fácil adquisición y código abierto, permiten la fácil incorporación de estas tecnologías para el desarrollo de proyectos para la transmisión de datos con diversos tipos de sensores en forma remota y que generen datos para su análisis.

INTRODUCCIÓN

La fabricación de cerámica requiere un control y distribución precisa de la temperatura en los hornos, ya que las fases de cocción (secado, reacción química y vitrificación) dependen de perfiles térmicos específicos que alcanzan temperaturas de hasta 1300 °C [1]. Los sistemas tradicionales de monitoreo suelen ser cableados, lo que dificulta la instalación en hornos de gran escala o la adaptación a entornos dinámicos. Con el avance del Internet de las Cosas (IoT), los dispositivos inalámbricos como el ESP32, combinados con protocolos como MQTT, ofrecen una alternativa para medir y registrar temperaturas de manera remota [2]. Este trabajo propone un sistema basado en estas tecnologías, adaptado a las exigencias térmicas de hornos cerámicos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y calidad del proceso.

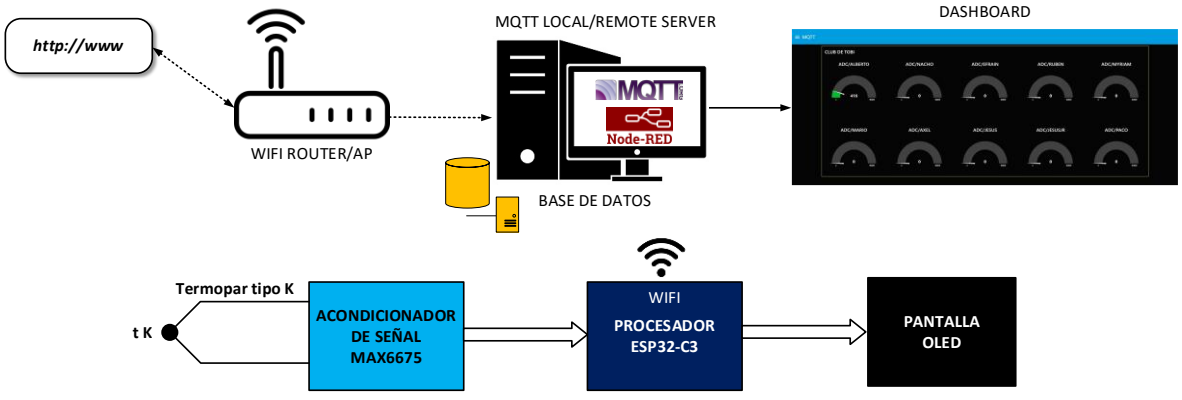


Figura 1: Modelo conceptual del sistema remoto de medición de temperatura.

TEORIA

El termopar tipo K, compuesto por cromel y alumel, es ideal para hornos de cerámica debido a su rango de medición (-200 °C a 1350 °C) y resistencia a ambientes oxidantes[3]. Su señal de salida, en el orden de milivoltios, requiere un amplificador como el MAX31855, que soporta temperaturas altas y ofrece una interfaz digital compatible con microcontroladores. El ESP32, con su capacidad Wi-Fi y bajo consumo, facilita la transmisión inalámbrica de datos [4]. El protocolo MQTT, basado en un modelo publicador-suscriptor, permite enviar lecturas de temperatura a un broker en la nube (como Mosquitto), donde pueden ser procesadas o visualizadas [5]. Este enfoque es particularmente útil en hornos cerámicos, donde la uniformidad térmica y el seguimiento en tiempo real son esenciales. Poder contar con un sistema flexible y de rápida integración y sin el uso de cables para transmitir la información a un servidor o registro de datos, permite una rápida instalación y mayor versatilidad en el manejo de la información.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Conexión del hardware: El termopar tipo K se acopló al módulo MAX318552. El módulo se conectó al controlador ESP32C3 (Figura 2 A). El controlador se programó para:

    - Establecer conexión Wi-Fi.
    - Leer la temperatura del termopar cada 2 minutos.
    - Enviar los datos a el servidor MQTT (Mosquitto).

3. Infraestructura en la nube: Se configuró un servidor Mosquitto como broker MQTT. Un dashboard en Node-RED se suscribió al topic para visualizar el perfil térmico en tiempo real. Se genera una base de datos con registro cada 2 minutos de la temperatura medida por el termopar, así como los datos de fecha y hora (Figura 2 C). En este experimento, se utilizó un servidor local para poder probar y determinar su configuración correcta, quedando listo para poder configurar un servidor remoto o en la nube de forma rápida y simple con base en lo programado en el servidor local.

4. Pruebas: El sistema se instaló en una cámara de prueba que genera temperaturas entre 30 y 100°C, comparando las lecturas con un termómetro de referencia Fluke 52-II. El objetivo es calibar el termopar para poder realizar una fase de prueba futura en condiciones reales.



A) B) C)

Figura 2: A) Prototipo, B) Visualización y C) Base de datos.

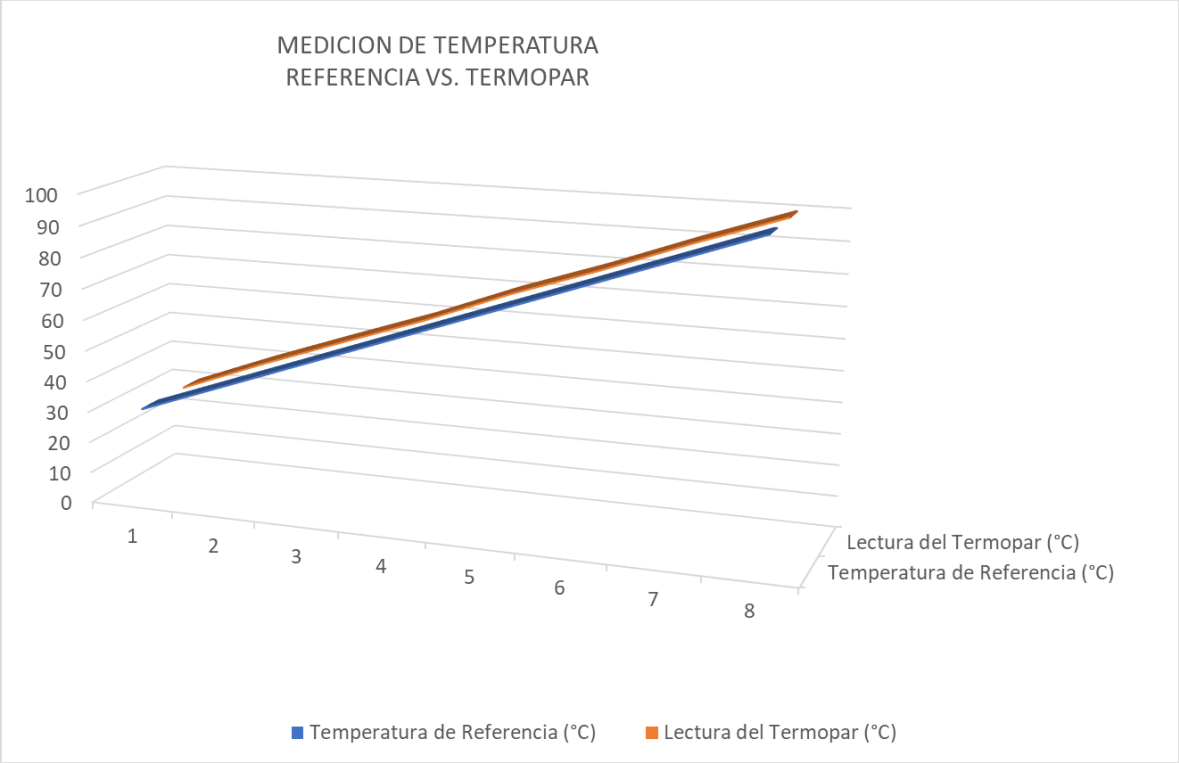
RESULTADOS

Los resultados demostraron que el sistema es funcional, estable, de bajo costo y escalable, siendo viable para aplicaciones industriales o ambientales que requieran monitoreo remoto. Se pueden colocar múltiples sensores en forma simultánea. La siguiente tabla, muestra los valores obtenidos por el termopar y el error de lectura en referencia al termómetro digital empleado como referencia.

Temperatura de Referencia (°C) Fluke 52-II	Lectura del Termopar (°C)	Error (°C)	Precisión (%)
30.0	29.8	-0.2	±0.2%
40.0	40.3	+0.3	±0.3%
50.0	50.1	+0.1	±0.1%
60.0	59.7	-0.3	±0.3%
70.0	70.4	+0.4	±0.4%
80.0	79.9	-0.1	±0.1%
90.0	90.2	+0.2	±0.2%
100.0	99.8	-0.2	±0.2%

Tabla 1: Resultados obtenidos de la medición de temperatura.

La latencia promedio de transmisión fue de 250 ms, suficiente para monitoreo en tiempo real durante un ciclo de cocción de 8 horas.



Gráfica 1: Gráfica de medición de temperatura (Termopar Vs. Termómetro de referencia).

CONCLUSIONES

El Termopar Inalámbrico es una solución efectiva para monitoreo remoto, integrando hardware accesible, económico y de fácil adquisición empleando tecnologías IoT (MQTT, Mosquitto, Node-RED). La precisión y baja latencia lo hacen apto para aplicaciones industriales, como son los hornos cerámicos y ladrilleros. Futuras mejoras incluyen almacenamiento local en desconexiones, crear un algoritmo para corregir la no linealidad de la medición y optimización energética del sistema de control. Este desarrollo valida el uso de MQTT y Node-RED en sistemas IoT. ofreciendo monitoreo remoto y datos en tiempo real con un costo reducido. La implementación en Arduino simplificó el desarrollo, mientras que el MAX31855 garantizó mediciones confiables en rangos extremos. Aunque el sistema cumple con los requisitos de la industria cerámica, mejoras como sensores adicionales o algoritmos de compensación podrían optimizar su precisión en transiciones térmicas rápidas. Este enfoque tiene potencial para escalarse a múltiples puntos de medición en hornos industriales. En una segunda fase de prueba, se probará directamente en condiciones reales de medición en un horno de cerámica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Richerson, D. W., "Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design," CRC Press, 2005.
2. Gubbi, J., et al., "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," Future Generation Computer Systems, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
3. Webster, J. G., "The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook," CRC Press, 1999.
4. Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual," 2023.
5. Light, R. A., "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," Journal of Open Source Software, vol. 2, no. 13, 2017.

SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN VISUAL UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL CON PYTHON

Citlali García Hernández, César Manuel Hernández Mendoza

TECNM/ ITS de Irapuato
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La Inteligencia Artificial (IA) es una de las tecnologías de vanguardia más innovadoras y que ha provocado un impacto significativo en distintos sectores, desde el entretenimiento, la mejora de productividad, la investigación, el desarrollo científico, entre otros. En la industria automotriz, la IA ha revolucionado los procesos de manufactura, la inspección de calidad, la automatización, el aprovechamiento de recursos y la productividad, proporcionando soluciones eficientes y precisas para optimizar el rendimiento de los sistemas en una línea de producción.

Este proyecto pretende contribuir al desarrollo de habilidades que son fundamentales para el Ingeniero en Sistemas Automotrices, por lo que se tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema inteligente de visión por computadora que, utilizando técnicas de aprendizaje automático, permita identificar y contabilizar en tiempo real diferentes herramientas o piezas en una línea de producción, y enviar dichos conteos a una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) para su monitoreo y análisis remoto, contribuyendo así a la automatización y optimización de procesos en entornos industriales.

Se siguió un enfoque basado en aprendizaje automático utilizando Python. En primer lugar, se recopilaron imágenes de diversas piezas y herramientas del sector automotriz (bujías, baleros, sensores, pinzas, desarmadores, puntas, etc.) y se generó una base de datos fotográfica bajo distintas condiciones de iluminación y ángulos de cámara para cada una de estas piezas.Posteriormente, se emplearon librerías de Python (OpenCV, TFLite, etc.) para entrenar un modelo de clasificación que procesa en vivo la señal capturada por la cámara web. El sistema final envía los conteos de cada herramienta a una plataforma IoT para su monitoreo y análisis remoto (optimización de procesos). Se hicieron ajustes iterativos del modelo, añadiendo más imágenes y validando su precisión.

Los resultados obtenidos han sido altamente satisfactorios, demostrando que el sistema puede identificar con precisión las piezas y herramientas en diferentes condiciones de operación, en este caso se utilizó un umbral del 0.8 para identificar las herramientas de manera eficiente. Además, se ha observado que la implementación de esta tecnología fomenta el aprendizaje multidisciplinario práctico de herramientas avanzadas en un entorno accesible y adaptable a distintos niveles de programación, consolidando el conocimiento en IA aplicada a la manufactura y mantenimiento automotriz. Se concluye que este proyecto contribuye al desarrollo de la Industria 4.0 en el sector automotriz y desde una perspectiva académica se facilita la adquisición de competencias en aprendizaje automático e innovación tecnológica, mientras que a nivel industrial los resultados evidencian una integración de las habilidades requeridas para automatizar y optimizar procesos con resultados satisfactorios.

INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) es una tecnología que requiere de diversas ciencias provenientes del área de la informática tales como el computo en la nube o la ciencia de datos, y que tiene como finalidad el desarrollar sistemas que sean capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el reconocimiento de patrones y la toma de decisiones en base a un entrenamiento de datos para generar un modelo. Un modelo en términos de IA, es básicamente un "*modelo matemático*" entrenado con datos o imágenes que puede identificar patrones para clasificar,

predecir o reconocer objetos. Al día de hoy, la IA ha evolucionado al pasar de modelos simples basados en reglas a sistemas avanzados que utilizan aprendizaje automático (Machine Learning) y redes neuronales profundas (Deep Learning) que se han puesto en práctica para resolver problemas, satisfacer necesidades o facilitar procesos en la industria, la seguridad, la salud o la manufactura. Uno de los subcampos más importantes de la IA es la visión por computadora, ya que permite a las máquinas analizar e interpretar imágenes y videos, el ejemplo más práctico es poder identificar rostros utilizando los modelos matemáticos que procesan imágenes en tiempo real, según la cámara que se esté utilizando.

El presente proyecto pretende generar y desarrollar conocimientos con las ciencias involucradas, así como lograr el cumplimiento del objetivo planteado, el cual es automatizar la identificación de componentes mecánicos en tiempo real de diversas piezas automotrices como bujías, baleros, sensores, filtros de aire, etc., para entrenar un modelo de clasificación de imágenes bajo diversas condiciones de iluminación y ángulos de la cámara. Además, se aprovecharon los recursos existentes en internet para identificar el rostro de algunos compañeros que nos permitió generar un software para identificarlos y poner en práctica el entrenamiento de los modelos, optimizando procesos de inspección visual y clasificación en entornos educativos. Como parte del desarrollo, se tiene una base de datos de imágenes provenientes de piezas automotrices en escala de grises, un modelo entrenado y el software que permite identificarlos.

TEORÍA

En la actualidad, OpenCV (Open Source Computer Vision) es una de las bibliotecas más utilizadas para el procesamiento de imágenes en visión por computadora. Su flexibilidad y compatibilidad con otros entornos la convierten en una herramienta esencial para proyectos de IA, desde la detección de rostros hasta la automatización en la industria manufacturera (Bradski, 2000). En particular, los modelos preentrenados como Haar Cascades y DNNs (Deep Neural Networks) han sido fundamentales para la identificación y clasificación de imágenes en tiempo real, reduciendo los tiempos de procesamiento y mejorando la precisión de los sistemas de reconocimiento (Zhao, Huang, & Liu, 2019).

Desde una perspectiva educativa, el desarrollo de proyectos de IA en ambientes de formación universitaria fortalece habilidades clave en los estudiantes, tales como la programación, el análisis de datos y el pensamiento computacional. Investigaciones recientes destacan la importancia de incluir cursos de visión por computadora y aprendizaje automático en la educación superior para preparar a los futuros ingenieros en la Industria 4.0 (García-Peñalvo, 2022). Además, la integración de herramientas como Python y OpenCV en proyectos prácticos no solo facilita la comprensión de conceptos complejos, sino que también fomenta la creatividad y la resolución de problemas en entornos tecnológicos en constante evolución (Aljohani & Clarke, 2020).

Con la creciente demanda de automatización y sistemas inteligentes, el conocimiento de estas tecnologías se ha convertido en un factor determinante para la inserción laboral en el sector tecnológico (Huang, Rust, & Maksimovic, 2021).

Elementos utilizados para el desarrollo del sistema:

- Python 3.10

  Es el lenguaje de programación principal utilizado para desarrollar el sistema, ya que Python es fácil de usar y tiene un amplio soporte para desarrollar Inteligencia Artificial mediante librerías como face_recognition y OpenCV.

- PyCharm (IDE para programar en Python)
  Es el entorno de desarrollo que se utilizó para escribir el código generado, las características de este entorno, permitió llevar una mejor organización del proyecto, pese a ser un poco

complicado de entender al principio, sus herramientas permiten llevar una mejor organización del proyecto, ya que se utiliza una única carpeta con todos los elementos, herramientas y recursos utilizados a lo largo del proyecto.

- OpenCV (cv2) - Procesamiento de Imágenes
  Es una librería que se utiliza para procesar imágenes y manejar cámaras de video en Python, básicamente es el dispositivo de entrada por el cual se capturan las imágenes de la cámara en tiempo real para su posterior identificación. Cabe recalcar que las imágenes se convierten a escala de grises para mejorar el rendimiento. Cabe recalcar que la detección de rostros en OpenCV se basa en la intensidad de los píxeles, no en los colores, es decir, una imagen en color tiene como ya es sabido, tres canales (B, G, R), lo que hace que el procesamiento sea más pesado, mientras que una imagen en escala de grises tiene solo un canal (intensidad), lo que reduce el procesamiento hasta en un 66%.
  Ejemplo:Imagen en color (RGB): (255, 0, 0) = Azul
  Imagen en escala de grises: 127 = Gris intermedio

- face_recognition - Detección y Reconocimiento Facial
  Es una librería basada en dlib que permite detectar y reconocer rostros, entre sus funciones principales, se destaca que detecta ubicaciones de rostros en imágenes, extrae características únicas del rostro, además compara rostros con imágenes registradas para identificarlos.

- face_recognition_models - Modelos Preentrenados
  Esta herramienta contiene los modelos de redes neuronales preentrenados que usa face_recognition para funcionar, cabe recalcar que, sin estos modelos, face_recognition no puede detectar ni comparar rostros, por lo que su instalación es obligatoria.

- dlib-bin - Librería para Procesamiento de Imágenes
  Es una librería que contiene algoritmos avanzados de visión por computadora, face_recognition usa dlib internamente para extraer las características únicas de los rostros.

- CMake - Herramienta de Compilación
  Esta herramienta es necesaria para compilar dlib en Windows.

- Visual Studio con C++ (Compilador)
  Se requiere instalar Visual Studio con el módulo "Desktop Development with C++" para compilar dlib, ya que, sin este compilador, dlib no podrá instalarse en Windows.

- Git - Descarga de Paquetes desde GitHub
  face_recognition_models debe descargarse desde GitHub, pero Git no estaba instalado en el sistema.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo del proyecto comienza cuando la cámara de video integrada en el equipo se activa, por lo que entra en acción OpenCV, el cual se encarga de detectar los rostros en la imagen utilizando la librería face_recognition, la cual ya está basada en modelos preentrenados de redes neuronales y que son públicos. Posteriormente se comparan los rostros detectados con una base de datos de imágenes registradas previamente, para lo cual es necesario obtener varias fotografías de la persona a la que se desea detectar, por lo que cada persona tiene alrededor de 20 a 30 fotografías. Con esto, el programa puede identificar a la persona y muestra su nombre en pantalla, se recalca el rostro de la persona en un recuadro. En este sentido, el equipo de investigación pone en práctica el uso de técnicas avanzadas de IA, como la aplicación de redes neuronales para reconocimiento facial, el procesamiento de imágenes con OpenCV y la implementación de modelos de IA en entornos reales.

Para llevar a cabo el proyecto presentamos en la Figura 1, la metodología que se llevo a cabo, la cual consiste en el desarrollo de cinco etapas.

Fuente: Elaboración propia



Figura 1. Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto

En la **Fase 1**, se tuvo como objetivo definir el propósito y el alcance del proyecto, estableciendo sus aplicaciones y requerimientos técnicos, por lo que se hizo una exploración por diversas aplicaciones de la Inteligencia Artificial, específicamente en la seguridad biométrica, así como determinar el uso de PyCharm, OpenCV y face_recognition para el desarrollo del mismo. En esta etapa también se definió crear un sistema capaz de detectar e identificar personas y herramientas en tiempo real, registrarlos y llevar a cabo un control de detecciones para ejecutar acciones al reconocer los elementos involucrados.

En la **Fase 2**, se planteó como propósito preparar el entorno de trabajo con las herramientas necesarias para la implementación del reconocimiento facial, se instaló y utilizó PyCharm para estructurar el código y gestionar las dependencias, el equipo de investigación optó por usar una laptop con cámara integrada, así como una cámara externa para realizar otras pruebas, posteriormente se instalaron algunas dependencias, como se presenta a continuación:

La instalación de PyCharm es el primer paso que se realizó en la Fase 2, ya que posteriormente se fueron instalando los complementos o requerimientos necesarios, algunos por línea de comandos y otros desde sitios web por medio de asistentes de instalación. En la Figura 2 se presenta la interfaz gráfica de PyCharm.

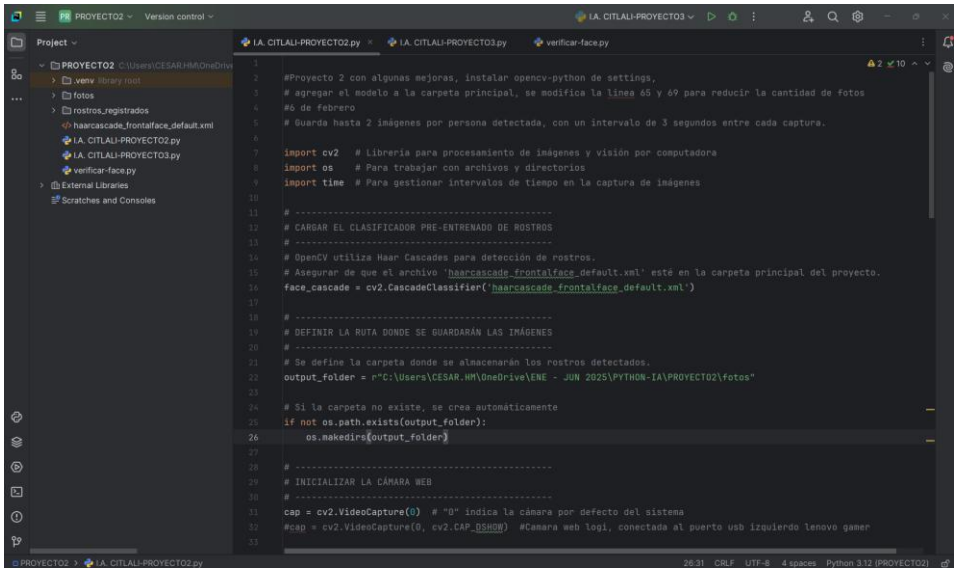


Figura 2: Interfaz gráfica de PyCharm

De la misma manera, en la Figura 3, se presentan los paquetes y herramientas instaladas en el proyecto de PyCharm, cabe destacar que cada una de estas herramientas se deben instalar o habilitar cada vez que se abre un proyecto nuevo.

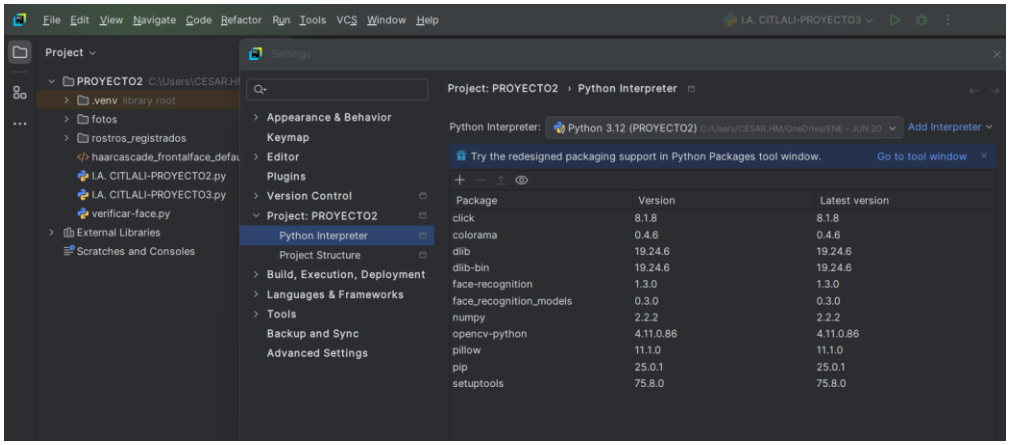


Figura 3: Bibliotecas y complementos instalados en el proyecto de PyCharm

Este proyecto simula cómo los sistemas de reconocimiento facial desarrollados son utilizados en aplicaciones de seguridad y control de accesos en entornos industriales y representan una herramienta clave para la digitalización y automatización de procesos en la manufactura y la industria, específicamente en la automotriz.

A continuación, en la Tabla 1, se presenta un resumen de las cuestiones técnicas que se atendieron para el desarrollo del software, el cual está planteado a modo de pasos a seguir:

Problema detectado	Problema con la Instalación de **"face_recognition"**
Mensaje en PyCharm	vbnet ModuleNotFoundError: No module named 'face_recognition'
Significado	Esto indicaba que la librería no estaba correctamente instalada en el entorno virtual de Python.

	1. face_recognition depende de dlib, una biblioteca que requiere compilación y que puede fallar si no están instaladas las herramientas adecuadas. 2. El sistema no encontraba face_recognition_models, el paquete con los modelos preentrenados. 3. Python 3.12 no es 100% compatible con algunas versiones de dlib, lo que generaba errores al compilar.
Solución aplicada	Se instaló dlib-bin en lugar de dlib, que ya incluye la versión precompilada: bash pip install dlib-bin Se reinstaló face_recognition con los modelos preentrenados: bash pip install face-recognition-models pip install face-recognition Se verificó la instalación correcta con: bash import face_recognition print("face_recognition está funcionando correctamente")

Problema detectado	Problema con Git y la instalación de “face_recognition_models” desde GitHub
Mensaje en PyCharm	Cuando se intentó instalar face_recognition_models desde GitHub, se recibio el error: bash ERROR: Cannot find command 'git' - do you have 'git' installed and in your PATH?
Significado	Esto indicaba que Git no estaba instalado o no estaba configurado en el PATH del sistema. Causas del Problema: 1. Git no estaba instalado en tu sistema o no estaba accesible desde la terminal de Python. 2. El sistema no encontraba el ejecutable git en la variable de entorno PATH.
Solución aplicada	Se instaló Git en el sistema desde git-scm.com.Se agregó Git al PATH durante la instalación, seleccionando la opción correcta:"Git from the command line and also from 3rd-party software"Se verificó la instalación de Git con: bash

	git --version Se reinstaló face_recognition_models desde GitHub usando Git ya instalado: bash pip install git+https://github.com/ageitgey/face_recognition_models

Problema detectado	Problema con CMake y la compilación de dlib
Mensaje en PyCharm	Cuando se intentó instalar dlib, apareció este error: pgsql CMake is not installed on your system!
Significado	Esto significaba que CMake, una herramienta necesaria para compilar dlib, no estaba instalada. Causas del Problema: 1. CMake no estaba instalado en Windows. 2. No se tenía un compilador de C++ adecuado, necesario para compilar dlib.
Solución aplicada	Se instaló CMake desde su sitio web oficial cmake.org.Se instaló Visual Studio con el compilador de C++ adecuado (Desktop development with C++).Se verificó la instalación con: bash cmake --version Se reinstaló dlib después de esto: bash pip install dlib-bin

Problema detectado	**Problema con la Detección de la Cámara**
Mensaje en PyCharm	Ninguno – simplemente la cámara no encendía
Significado	En algunos intentos, la cámara no se abría correctamente, y OpenCV no capturaba imágenes. Causas identificadas del Problema: 1. No se estaba seleccionando el índice correcto de la cámara (0 para la externa, 1 para la integrada). 2. Observamos que algunas cámaras requieren cv2.CAP_DSHOW para funcionar bien en Windows. 3. Otras aplicaciones o intentos previamente abiertos estaban usando la cámara, bloqueando su acceso desde OpenCV.

Solución aplicada	Se probó con diferentes índices (0, 1, 2, etc.) hasta encontrar el correcto, en nuestro caso:
	cap = cv2.VideoCapture(1) # Cámara integrada
	cap = cv2.VideoCapture(0, cv2.CAP_DSHOW) #Cámara externa

	Se agregó cv2.CAP_DSHOW para mayor compatibilidad en Windows. Se verificó si la cámara estaba ocupada por otra aplicación y también se probó con una cámara externa diferente.

Tabla 1. Principales problemas técnicos y de programación que se obtuvieron

En la **Fase 3**, y tomando en consideración algunos programas de prueba generados para la toma de fotografías, se logró crear una base de datos con imágenes de rostros para entrenar el sistema, además se aseguraron diferentes condiciones de iluminación y ángulos para mejorar el modelo y tener una amplia gama de posibilidades, así como mejorar las posibilidades de acertar en diversos entornos. En esta etapa el código logro convertir las fotografías a escala de grises enfocándose únicamente al rostro de cada imagen. Finalmente se creó la carpeta que serviría como repositorio y se asignaron nombres de las personas que participaron en este proyecto.

En la **Fase 4**, se logró programar la detección y reconocimiento de rostros en tiempo real, implementando el primer código funcional utilizando Haar Cascades de OpenCV, con el cual se detectaban rostros, pero aún no se realizaba correctamente el reconocimiento. Posteriormente se integró face_recognition para comparar rostros detectados con la base de datos, se optimizo la detección de rostros mejorando la velocidad de respuesta y se implementó la función para registrar las detecciones en un archivo de texto indicando la hora y el nombre de la persona que se detectó.

Finalmente, en la **Fase 5**, se evaluó el desempeño del sistema en tiempo real y se ajustaron detalles finales, ajustando el código al uso de la cámara externa HD, así como los parámetros necesarios para configurar la velocidad. Se cargaron imágenes de varias personas en la carpeta: “rostros_registrados” y se validó que el sistema identificara correctamente a las personas. Así mismo se evitó que el nombre de la persona desapareciera demasiado rápido. Además en esta última fase, el equipo de investigación considero transferir el software a un dispositivo más pequeño como una Raspberry, con la finalidad de brindar portabilidad al proyecto, sin embargo, se optó por no utilizarlo, ya que no era factible (al menos con las características presentadas) debido a que el procesamiento sería más lento, al no tener el mismo rendimiento que un equipo de cómputo (procesador, memoria), por lo que el procesamiento de las imágenes en la Raspberry sería más lento con el código actual. Además, la biblioteca “face_recognition” y la herramienta de aprendizaje dlib consume bastante procesamiento, por otra parte, en un equipo de cómputo, OpenCV puede usar la GPU de la tarjeta gráfica, mientras que, en la Raspberry, todo el procesamiento es en la CPU, haciéndola más lenta.

Se presenta a continuación la versión estable para el reconocimiento de rostros:

```
import cv2   # Librería para procesamiento de imágenes y visión por computadora
import os    # Para trabajar con archivos y directorios
import time  # Para gestionar intervalos de tiempo en la captura de imágenes

face_cascade = cv2.CascadeClassifier('haarcascade_frontalface_default.xml')
# Se define la carpeta donde se almacenarán los rostros detectados.
output_folder = r"C:\Users\CESAR.HM\OneDrive\ENE - JUN 2025\PYTHON-IA\PROYECTO2\fotos"

# Si la carpeta no existe, se crea automáticamente
if not os.path.exists(output_folder):
    os.makedirs(output_folder)

cap = cv2.VideoCapture(0)  # "0" indica la cámara por defecto del sistema

# Diccionarios para controlar la cantidad de fotos por persona y el tiempo de la última captura
fotos_por_persona = {}  # Contará cuántas fotos se han guardado por persona
ultimo_tiempo = {}  # Guardará el último timestamp de captura por persona
```

```
    while True:
        # Capturar un fotograma de la cámara
        _, img = cap.read()

        # Convertir la imagen a escala de grises (mejora la eficiencia de detección)
        gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

        # Detectar rostros en la imagen
        faces = face_cascade.detectMultiScale(gray, scaleFactor=1.05, minNeighbors=5)

        # Recorrer cada rostro detectado en la imagen
        for (x, y, w, h) in faces:
            # Dibujar un rectángulo alrededor del rostro detectado en la imagen original
            cv2.rectangle(img, (x, y), (x + w, y + h), (81, 246, 141), 2)

            # Creamos un "ID" para la persona basado en su posición en la imagen
            face_id = f"{x//50}_{y//50}_{w//50}_{h//50}"
            # La división por 50 agrupa valores similares para evitar IDs cambiantes en cada frame
      if fotos_por_persona.get(face_id, 0) < 2:
          tiempo_actual = time.time()  # Obtener el tiempo actual

          # Si no ha pasado suficiente tiempo (3 segundos), no guardar otra foto
          if face_id not in ultimo_tiempo or (tiempo_actual - ultimo_tiempo[face_id]) > 3:
              # Extraer la región del rostro detectado
              rostro = img[y:y+h, x:x+w]  # Se extrae en color para mejor calidad

              # Definir el nombre del archivo con el ID y el número de foto
              rostro_filename =
os.path.join(output_folder, f"{face_id}_foto{fotos_por_persona.get(face_id, 0)}.jpg")

              # Guardar la imagen del rostro en la carpeta definida
              cv2.imwrite(rostro_filename, rostro)
              print(f"Guardado: {rostro_filename}")

              # Actualizar contador de fotos y registrar el tiempo de la última captura
              fotos_por_persona[face_id] = fotos_por_persona.get(face_id, 0) + 1
              ultimo_tiempo[face_id] = tiempo_actual

    cv2.imshow('Detección de Rostros', img)

    # Salir del bucle cuando el usuario presione la tecla ESC (código ASCII 27)
    k = cv2.waitKey(30)
    if k == 27:
        break
cap.release()  # Liberar la cámara
cv2.destroyAllWindows()  # Cerrar todas las ventanas de OpenCV
```

RESULTADOS

En la figura 4, se presenta una imagen en donde el programa identifica y reconoce a las personas que están en cámara en tiempo real, puede observar que asigna el nombre adecuadamente y cuando el modelo no reconoce a la persona le asigna el nombre: “desconocido”.

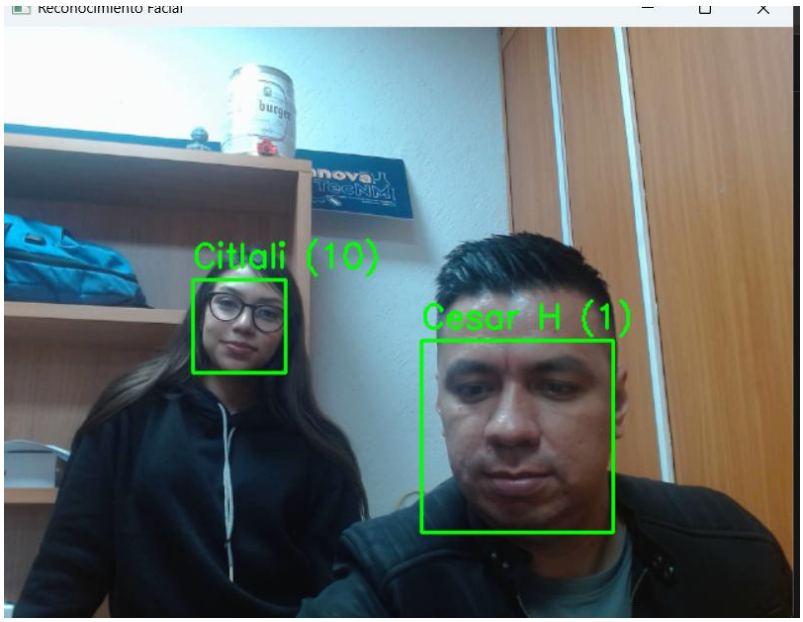


Figura 4: Reconocimiento e identificación de rostros en tiempo real (equipo de investigación).

En cuanto aspectos técnicos, el presente estudio nos permitió obtener la experiencia suficiente para instalar los requerimientos en otros equipos de cómputo, destacando, por ejemplo: Instalar face_recognition puede ser complicado porque depende de dlib, que a su vez requiere compilación y herramientas adicionales como CMake y Visual Studio instalado en los equipos.

Desde la perspectiva técnica podemos destacar los siguientes resultados:

- Se logro establecer un entorno de desarrollo funcional con todas las librerías necesarias.Se configuraron las cámaras para pruebas con OpenCV.
- Se generó una base de datos de imágenes con rostros etiquetados.Se aseguraron diferentes condiciones de captura para mejorar la precisión.
- Se pasó de un código básico de detección a un sistema completo de identificación facial.Se optimizó el código para mejorar la velocidad y precisión.
- El sistema fue capaz de identificar rostros conocidos con alta precisión.Se redujo el tiempo de procesamiento optimizando la detección de rostros.Se logró una implementación estable y lista para ser utilizada.

Se proporcionan las siguientes recomendaciones al desarrollar este tipo de proyectos con las herramientas utilizadas:

Git debe estar instalado en el equipo y en el PATH para descargar paquetes desde GitHub, además de debe verificar en base a comandos su correcta instalación. Algunas versiones de Python pueden ser incompatibles con dlib, y es mejor usar versiones anteriores a la 3.12. En otro punto, las cámaras pueden necesitar configuraciones especiales**,** como cv2.CAP_DSHOW, y hay que probar diferentes índices (0, 1, 2) para que funcionen. Siempre es recomendable probar cada instalación con un código corto antes de ejecutarlo en un programa grande y robusto, en este caso para comprobar la correcta instalación de cada librería.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto ha permitido consolidar un conjunto de habilidades técnicas y competencias en Inteligencia Artificial (IA)**,** visión por computadora y desarrollo de software, con un enfoque orientado a la industria automotriz y la automatización de procesos. A través de la experimentación con bibliotecas avanzadas como OpenCV y face_recognition, el equipo de

investigación ha fortalecido su capacidad para diseñar e implementar sistemas inteligentes de identificación y clasificación visual**.**

La realización de este proyecto ha fomentado competencias clave en el ámbito de la programación en Python, la gestión de entornos de desarrollo y la optimización de modelos de aprendizaje automático. Se presentaron diversos retos y se resolvieron problemas complejos como la instalación y configuración de herramientas especializadas (CMake, Visual Studio, dlib, Git y PIP**),** lo que le ha permitido comprender en profundidad los requerimientos técnicos para la implementación de sistemas basados en IA.

Además, el trabajo realizado demuestra la importancia de la prueba y validación en entornos reales**,** así como la necesidad de adaptar los modelos a diferentes condiciones de iluminación, hardware y procesamiento. Se logro desarrollar un pensamiento crítico y analítico al evaluar la viabilidad del sistema en diferentes plataformas, identificando las limitaciones de rendimiento en hardware de menor capacidad como la Raspberry y comprendiendo la importancia del uso eficiente de recursos computacionales.

Finalmente, este proyecto representa un paso significativo en la formación profesional de la estudiante colaboradora, preparándola para afrontar retos de automatización, control de calidad e implementación de tecnologías emergentes en la industria automotriz. Su capacidad para integrar teoría, experimentación y optimización de algoritmos de IA le permite posicionarse como un talento en desarrollo dentro del campo de la visión por computadora y la IA aplicada a la manufactura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aljohani, N. R., & Clarke, D. (2020). *Integrating Artificial Intelligence into Computer Science Education: Challenges and Opportunities*. International Journal of Computer Science Education, 4(1), 45-63. https://doi.org/10.1007/s10956-020-09842-x
2. Bradski, G. (2000). *The OpenCV Library*. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 25(11), 120-126.
3. García-Peñalvo, F. J. (2022). *Artificial Intelligence in Higher Education: Challenges and Perspectives*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73426-1
4. Huang, M. H., Rust, R. T., & Maksimovic, V. (2021). *The Impact of Artificial Intelligence on Service*. Journal of Service Research, 24(1), 3-7. https://doi.org/10.1177/1094670520908224
5. Zhao, R., Huang, J., & Liu, W. (2019). *Deep Learning-Based Image Recognition for Industrial Applications*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(2), 789-798. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873057

OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN ASISTIDA POR MICROONDAS DE BETALAÍNAS DE LA PULPA DE PITAYA (*Stenocereus Spp.*)

Paulina Aguirre Lara[1,3], José Arturo Olguín Rojas[2], Miguel Ángel García Alvarado[1], Ceferino Adrián Carrera Fernández[3], Gerardo Fernández Barbero[3], Guadalupe del Carmen Rodríguez Jimenes[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz/Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos (UNIDA). M.A. de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, C.P. 91860, Veracruz, Ver., México, [2]Ingeniería en Alimentos, Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Avenida Universidad Tecnológica 1, Col. La Villita, CP. 75483 Tecamachalco, Puebla, México, [3]Departamento de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz. Avda. República Saharaui s/n. C.P. 11510, Puerto Real, Cádiz, España.

guadalupe.rj@veracruz.tecnm.mx

RESUMEN

Las pitayas (*Stenocereus* spp.) son frutos de cactáceas columnares originarias de México que representan una alternativa productiva, económica y social para diversas regiones del país con climas áridos y semiáridos no aptos para otros cultivos. El característico color rojo de la pulpa de la pitaya se debe a las betalaínas, pigmentos nitrogenados solubles en agua, inodoros e insípidos, derivados del ácido betalámico. Se ha demostrado que estos pigmentos presentan actividad antiinflamatoria, propiedades antioxidantes y potencial anticancerígeno. Por esta razón, el presente trabajo propone la optimización de un método de extracción asistida por microondas (MAE) para la extracción de las betalaínas totales (BT) presentes en la pulpa de pitaya. Se realizó un diseño experimental Box–Behnken para determinar la influencia de la temperatura (50, 75, 100 °C), la composición del disolvente (0, 20, 40 % de etanol en agua) y la relación sólido-solvente (0.1, 0.2, 0.3 g de muestra: 25 mL) en la extracción de BT, generando una matriz experimental conformada por 15 tratamientos. Las extracciones fueron realizadas en un equipo de microondas CEM MARS 6 con una potencia de 800 W y el contenido de BT se cuantificó por espectrofotometría mediante la absorbancia de los extractos a 538 y 483 nm. Por último, se estableció el tiempo óptimo de extracción evaluando el contenido de BT resultantes de las cinéticas que oscilaron entre 5 y 15 minutos utilizando las condiciones óptimas de extracción. Los resultados obtenidos a partir del ANOVA permitieron identificar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los factores de extracción sobre la variable de respuesta, determinando que la temperatura y el efecto cuadrático del disolvente son los factores que ejercen un efecto significativo en el proceso de extracción, obteniendo una recuperación estimada de BT de 2.59 mg/g y experimental de 2.44 ± 0.023 mg/g. Las condiciones óptimas para la extracción de acuerdo con el análisis de superficie de respuesta fueron: 14 % de etanol en agua, 50 °C y 0.14 g de pulpa de pitaya deshidratada en 25 mL de disolvente. El método optimizado para la obtención de BT a través de MAE representa una alternativa eficiente, ofreciendo ventajas significativas como la reducción del tiempo de extracción y el uso de un disolvente más amigable con el medio ambiente, y cuya implementación podría contribuir a la valorización de la pitaya como un recurso natural con valor agregado fomentando el desarrollo sostenible en regiones donde es cultivada.

INTRODUCCIÓN

Las pitayas son cactáceas columnares originarias de México, cuyos frutos son bayas poliespermáticas de forma globosa u ovoide, con espinas caducas (Figura 1); la pulpa puede ser de color rojo, anaranjado, amarillo, o púrpura. Existen más de 22 especies de pitayas (*Stenocereus* spp.) nativas de México, de las cuales 20 son especies endémicas (Arreola, 1999). El color característico de los frutos de pitaya se debe a la presencia de betalaínas, pigmentos naturales hidrosolubles derivados del ácido betalámico. Las betalaínas se dividen en dos grupos: betacianinas, que brindan tonalidades rojas y betaxantinas que proporcionan coloraciones amarillas. Estos compuestos ayudan en la prevención de cáncer; evitan la oxidación de los lípidos de la membrana

debido a sus propiedades antioxidantes y no presentan efectos tóxicos en humanos como algunos pigmentos sintéticos (Abogado y Castañeda, 2010; Quíroz *et al*., 2018).
La pitaya representa una fuente de ingresos, y una alternativa productiva, económica, ecológica y social para diversas regiones del país cuyas condiciones climáticas impiden el desarrollo de otros cultivos. Además, su valor nutritivo y los compuestos bioactivos que la caracterizan provocan interés en su aprovechamiento



Figura 1. Morfología vegetativa de *Stenocereus* spp. A. Planta arborescente. B. Flores. C. Frutos ovoides.

La aplicación de métodos de extracción no convencionales ha cobrado creciente relevancia en el ámbito de la ciencia de los alimentos y la ingeniería de procesos, debido a su capacidad para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la recuperación de compuestos bioactivos. Entre ellos, la extracción asistida por microondas destaca no solo por su rapidez, sino también por su capacidad para preservar la integridad de moléculas sensibles al calor, como las betalaínas, gracias a un calentamiento selectivo y controlado (Sadeghi *et al*., 2017; Bagade *et al*., 2019). Este enfoque, al combinarse con herramientas de optimización como la metodología de superficie de respuesta, permite ajustar variables críticas para alcanzar condiciones ideales de extracción. Así, se logra una mejora significativa en la calidad del extracto y una reducción en el uso de recursos. Tomando en cuenta lo anterior, el presente trabajo propone la optimización de un método de extracción asistida por microondas para la extracción de las betalaínas totales presentes en la pulpa de pitaya.

TEORÍA

Desde principios de la década de los años sesenta y hasta la actualidad, ha existido una gran tendencia y demanda por conseguir productos que contengan características atractivas en cuanto a color. El uso de agentes químicos como aditivos y hasta colorantes de origen sintético para la obtención de diferentes colores de interés industrial se debe a su bajo costo de producción y la buena estabilidad que poseen (Mathias y Ah-Hen, 2014). No obstante, instituciones como la FDA (Food and Drug Administration, por sus siglas en inglés), sugieren que estos colorantes son potencialmente nocivos para la salud y bienestar humano. Sin embargo, las escasas alternativas de pigmentos naturales con características favorables a los procesos industriales siguen sin satisfacer los criterios de las industrias.

Las cactáceas han provisto de forraje, fármacos, gomas, jabón, colorantes, cercas vivas, leña, ornato, y proteínas y grasas de las semillas de algunas especies desde la época prehispánica hasta la actualidad. Entre los grupos étnicos y la población rural, las cactáceas han sido apreciadas como un recurso alimenticio importante, especialmente por la gran cantidad de pigmentos de sus frutos. (Abogado y Castañeda, 2010). Un ejemplo de ello es el caso de las pitayas, de ellas se extraen colorantes y pectinas presentes en la cáscara y la pulpa del fruto. Contienen betalaínas, que son pigmentos hidrosolubles, similares a los que se extraen del betabel, utilizados tanto en alimentos como en cosméticos, y que imparten coloraciones que van del rojo al amarillo (Reynoso *et al*., 1997; Beltrán-Orozco *et al*., 2009). Las betalaínas son pigmentos nitrogenados hidrosolubles derivados del aminoácido tirosina y pueden ser definidos químicamente por la inclusión del ácido betalámico

como el cromóforo central (Tanaka *et al*., 2008). Las betalaínas se subdividen en betacianinas, responsables de las tonalidades rojas y betaxantinas, las cuales producen tonalidades amarillas (Abogado y Castañeda, 2010; Quiroz *et al*., 2018; Ceja-López, 2021). Estos pigmentos poseen diversas actividades biológicas, entre las que destacan su actividad antiinflamatoria (Vidal *et al*., 2014), evitan la oxidación de la membrana de los lípidos debido a sus propiedades antioxidantes y posee también propiedades anticancerígenas (Zou *et al*., 2005; García-Cruz *et al*., 2017), además no presentan efectos tóxicos en humanos como algunos pigmentos sintéticos (Sumaya-Martínez *et al*., 2010); y también se utilizan en la industria alimentaria y cosmética (Abogado y Castañeda, 2010; Rivera *et al*., 2010). A comparación de otros pigmentos como las antocianinas y carotenoides que se excluyen como materia prima prioritaria debido a sus características frente a factores como pH, y temperatura, y más relevantemente, porque son de baja estabilidad en los procesos industriales (Zhoh, 2010), las betalaínas tienen cualidades prometedoras para su aplicación en la industria; entre estas destacan una alta solubilidad en agua, alta estabilidad, variabilidad de color con base a condiciones de pH (3 - 7), además de la atractiva característica de ser inodoras e insípidas (Neelwarne, 2012). En la actualidad muchos gobiernos, en particular en Europa, han fomentado el uso de compuestos orgánicos y naturales, tanto en ropa como en alimentos.

La extracción de compuestos bioactivos ha evolucionado desde métodos tradicionales, como maceración, reflujo o soxhlet. Estos métodos están bien establecidos, pero suelen implicar un mayor consumo de disolventes y tiempos de procesamiento más prolongados. Enfoques más recientes, como la extracción asistida por ultrasonido, los campos eléctricos pulsados, la extracción con fluidos supercríticos y la extracción asistida por microondas son más eficientes energéticamente, generan menos residuos y se consideran más respetuosos con el medio ambiente. Las investigaciones actuales se centran en optimizar estos métodos e integrarlos con el fin de obtener mayores rendimientos, una mejor preservación de la bioactividad y un menor impacto ambiental (Sadeghi *et al*., 2017; Bagade *et al*., 2019; Nour *et al*., 2021)

En este sentido la extracción asistida por microondas utiliza energía de microondas para calentar la mezcla de disolvente y muestra, las microondas hacen que las moléculas polares presentes en la muestra y en el disolvente vibren, generando calor de forma rápida y uniforme en toda la mezcla. Este calentamiento acelerado incrementa la presión dentro de las estructuras celulares o vegetales, provocando su ruptura y la liberación de su contenido al disolvente. El proceso mejora la penetración del disolvente en la matriz de la muestra, favoreciendo la transferencia de masa de los compuestos objetivo hacia el disolvente (Eskilsson y Björklund, 2000; Kaufmann y Christen, 2002; Gonzalez-Gonzalez *et al*., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

Materia Prima

La pitaya utilizada (*Stenocereus* spp.) como materia prima fue recolectada de parcelas pertenecientes a la comunidad de Dolores Hidalgo, Puebla. Se seleccionaron frutos sanos sin imperfecciones ni protuberancias, la condición fisiológica de la fruta corresponde a la madurez comercial, que ocurre cuando las espinas se desprenden fácilmente y la piel se vuelve brillante.
La cáscara de la fruta fue removida, y se hizo pasar la pulpa a través de un despulpador marca Polinox S.A. modelo D-7 para homogeneizarla y remover las semillas. El puré resultante fue empacado en bolsas de polietileno al vacío y almacenados a –32°C hasta análisis. Previo al análisis las muestras se descongelaron a 4°C por 24 h.

Extracción de betalaínas asistida por microondas

Las extracciones fueron realizadas en un equipo de microondas CEM MARS 6 con una potencia de 800 W de acuerdo con un diseño experimental Box–Behnken para determinar la influencia de la temperatura, la composición del disolvente y la relación sólido-solvente en la extracción de betalaínas totales, generando una matriz experimental conformada por 15 tratamientos (Tabla 1). El tiempo de extracción establecido para estos tratamientos fue de 10 minutos. Tras definir las condiciones óptimas de extracción, se procedió a determinar el tiempo mínimo necesario para obtener las

mayores concentraciones de betalaínas totales a partir de muestras de puré de pitaya. Las extracciones se llevaron a cabo por duplicado (n = 2) con tiempos que oscilaron entre 5 y 15 minutos.

Tabla 1. Factores y rango de valores utilizados para el Diseño Box-Behnken de la extracción asistida por microondas.

Factor	-1	0	+1
X1: Etanol en agua (%)	0	20	40
X2: Temperatura (°C)	50	75	100
X3: Relación sólido–solvente (g:25 mL)	0.1	0.2	0.3

Determinación de betalaínas por espectrofotometría UV-Vis

El contenido de betacianinas y betaxantinas se cuantificó según lo descrito por Castellanos-Santiago y Yahia (2008), mediante la absorbancia de los extractos a 538 para la determinación de betacianinas y 483 nm para las betaxantinas en un espectrofotómetro Agilent Technologies Cary 60. Para la conversión de las unidades de absorbancia en unidades de concentración se utilizó la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$\boldsymbol{BT}_{\left(mg/g\right)} = \frac{\boldsymbol{A\ FD\ PM\ V}}{\boldsymbol{\varepsilon\ P_d\ L}} \qquad \text{Ecuación 1}$$

dónde BT es betacianinas o betaxantinas, A es la absorbancia a 538 nm para betacianinas y 483 nm para betaxantinas, FD es el factor de dilución al momento de leer en el espectrofotómetro, PM es el peso molecular (Betanina = 550 g/mol e Indicaxantina = 308 g/mol), V_d es el volumen del extracto, ε es el coeficiente de extinción molar (Betanina = 60 000 L/ mol.cm, e Indicaxantina = 48 000 L/mol.cm), Pd es el peso de la pulpa seca (g) y L es la longitud de la celda.

Análisis estadístico

La optimización del proceso de extracción de betalaínas totales se llevó a cabo a través de la metodología de superficie de respuesta utilizando un diseño Box-Behnken, el cual permite evaluar la correlación entre las variables independientes (composición del disolvente, temperatura, relación sólido-solvente), así como sus interacciones con la variable de respuesta (betalaínas totales). Los datos obtenidos se ajustaron a un modelo de regresión cuadrático múltiple (Ecuación 2).

$$\boldsymbol{y_j = \beta_{0j} + \beta_{1j}x_1 + \beta_{2j}x_2 + \beta_{3j}x_3 + \beta_{11j}x_1^2 + \beta_{22j}x_2^2 + \beta_{33j}x_3^2 + \beta_{12j}x_1x_2 + \beta_{13j}x_1x_3 + \beta_{23j}x_2x_3} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde $\boldsymbol{y_j}$ representa el contenido de betalaínas totales, $\boldsymbol{x_1}$, $\boldsymbol{x_2}$, $\boldsymbol{x_3}$, son las variables independientes codificadas correspondientes al porcentaje de etanol en agua, temperatura de extracción y relación sólido-solvente, respectivamente. Los coeficientes $\boldsymbol{\beta_n}$ corresponden a los efectos lineales, cuadráticos e interactivos estimados mediante regresión múltiple. El ajuste del modelo, la significancia estadística de los coeficientes y la validación del modelo se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab 16 (Minitab Inc., State College, PA, EE. UU.).

RESULTADOS

La recuperación experimental resultante de betalaínas totales osciló entre 0.56 y 2.58 mg/g de pulpa seca (Tabla 2), mientras que la recuperación estimada fue de 2.59 ± 0.023 mg/g. Estos rendimientos son similares a los obtenidos por Pérez-Loredo *et al*. (2016) de 2.97 ± 0.06 mg/g en *S. stellatus*, en este caso la extracción de betalaínas se realizó por maceración utilizando como solvente metanol acuoso al 80%. Por otro lado, García-Cruz, *et al*. (2013) cuantifico 3.473 ± 0.21 mg de betalaínas totales/g muestra seca en *S. griseus*, utilizando el mismo método de extracción y solvente que Pérez-Loredo *et al*. (2016). En ambos casos la cuantificación se realizó por espectrofotometría. Es

importante destacar que en el método desarrollado en este trabajo se obtuvieron rendimientos similares o ligeramente inferiores utilizando como solvente etanol acuoso entre 0 y 40%, el cual está aprobado para uso alimentario y farmacéutico y tiene una menor toxicidad que el metanol.

Tabla 2. Rendimientos obtenidos en los 15 tratamientos realizados con los factores y rango de valores utilizados en el diseño Box-Behnken de la extracción asistida por microondas.

Tratamiento	% ETOH	Temperatura (°C)	Relación sólido- solvente (g:25 mL)	Betalaínas Totales (mg/g)
1	20	75	0.2	2.22
2	0	50	0.2	2.46
3	20	50	0.3	2.01
4	20	75	0.2	2.25
5	0	75	0.1	1.48
6	40	75	0.3	1.85
7	20	50	0.1	2.58
8	0	100	0.2	0.93
9	40	100	0.2	0.56
10	20	100	0.1	1.09
11	20	75	0.2	2.24
12	20	100	0.3	1.17
13	40	50	0.2	1.61
14	40	75	0.1	1.46
15	0	75	0.3	1.45

El análisis ANOVA de los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, de acuerdo con ellos la temperatura y el efecto cuadrático de la composición del disolvente son los factores que ejercen un efecto significativo ($p < 0.05$) en el proceso de extracción. Considerando la presencia de grupos funcionales polares en las betalaínas, como grupos hidroxilo (-OH) y grupos carboxilo (-COOH), los cuales provocan que estos pigmentos sean altamente solubles en agua, así como su sensibilidad térmica, pues pueden degradarse a temperaturas elevadas, era de esperarse que estos factores tuvieran un efecto durante la extracción de betalaínas totales. Se presenta también la ecuación polinómica (Ecuación 3) que considera los coeficientes de los factores y sus interacciones para estimar el contenido total de betalaínas.

$$BT = 2.23667 - 0.10500x_1 - 0.61375x_2 - 0.01625x_3 - 0.49958x_1^2 + 0.12000x_1 x_2 + 0.10500 x_1 x_3 - 0.34708 x_2^2 + 0.16250 x_2 x_3 - 0.17708x_3^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Tabla 3. Resultados de ANOVA obtenidos (modelo cuadrático) para betalaínas totales extraídos por microondas utilizando un diseño Box-Behnken.

Termino	Coeficiente	*p*-valor
β_0	2.23667	0.000
β_1	-0.10500	0.352
β_2	-0.61375	0.002
β_3	-0.01625	0.880
β_{11}	-0.49958	0.021
β_{22}	-0.34708	0.069

β_{33}	-0.17708	0.293
β_{12}	0.12000	0.445
β_{13}	0.10500	0.501
β_{23}	0.16250	0.312

El gráfico de superficie de respuesta (Figura 3) construido utilizando los coeficientes de la Tabla 2 permite visualizar los valores óptimos para las variables independientes los cuales fueron de 14% etanol-agua, temperatura de 50 °C y 0.14 g/25 mL como relación sólido-solvente.

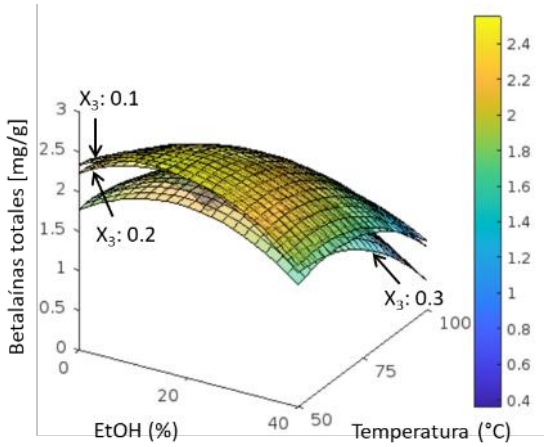


Figura 2. Efecto de las variables independientes (%EtOH, temperatura y relación sólido-solvente) evaluadas por DBB y MSR sobre la recuperación de betalaínas totales obtenidas por extracción asistida por microondas.

El análisis estadístico de los rendimientos obtenidos para los distintos tiempos de extracción mostró que este factor no tuvo un impacto significativo en la recuperación de betalaínas ($p \geq 0.05$). Por lo tanto, se estableció 5 minutos como el tiempo óptimo para el proceso de extracción.

CONCLUSIONES

El método optimizado para la obtención de betalaínas totales a través de extracción asistida por microondas representa una alternativa eficiente, ofreciendo ventajas significativas como la reducción del tiempo de extracción y el uso de un disolvente más amigable con el medio ambiente, y cuya implementación podría contribuir a la valorización de la pitaya como un recurso natural con valor agregado fomentando el desarrollo sostenible en regiones donde es cultivada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abogado, P.B., y Castañeda, V.J. (2010). Pitayas y pitahayas (*Stenocereus* spp. e *Hylocereus* spp.), recursos agrícolas en el Valle de Tehuacán Puebla.
2. Arreola, H., 1999, Taxonomía del pitayo (*Stenocereus* spp.), en Pimienta-Barrios, E. (comp.), El pitayo en Jalisco y especies afines en México, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.
3. Bagade, S. y Patil, M. (2019). Recent Advances in Microwave Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Complex Herbal Samples: A Review. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 51, 138 - 149. https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1686966.
4. Beltrán-Orozco, M. C., Oliva-Coba, T. G., Gallardo-Velázquez, T., y Osorio-Revilla, G. (2009). Ácido ascórbico, contenido fenólico, y capacidad antioxidante de las variedades roja, cereza, amarilla y blanca del fruto del cactus de la pitaya (*Stenocereus stellatus* Riccobono). Agrociencia, 43(2), 153-162.

5. Ceja-López, J.A., Guillén-Chable, F., Rodríguez, L.C., y Castaño - De La Serna, E. (2021). Stenocereus queretaroensis, una cactácea nacional, fuente biológica de betalainas: una alternativa a los colorantes sintéticos. En Desde el Herbario CICY 13: 199–203. ISSN: 2395-8790
6. Eskilsson, C., y Björklund, E. (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. Journal of chromatography. A, 902 1, 227-50. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00921-3.
7. García-Cruz, L., Dueñas, M., Santos-Buelgas, C., Valle-Guadarrama, S., y Salinas-Moreno, Y. (2017). Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. pruinosus* and *S. stellatus*). Food Chemistry, 234, 111-118.
8. Gonzalez-Gonzalez, M., Yerena-Prieto, B. J., Carrera, C., Vázquez-Espinosa, M., González-de-Peredo, A. V., García-Alvarado, M. Á., y Barbero, G. F. (2023). Determination of gingerols and shogaols content from ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) through microwave-assisted extraction. Agronomy, 13(9), 2288.
9. Kaufmann, B., y Christen, P. (2002). Recent extraction techniques for natural products: microwave-assisted extraction and pressurised solvent extraction. Phytochemical analysis: PCA, 13 2, 105-13. https://doi.org/10.1002/PCA.631.
10. Mathias-Rettig K. y Ah-Hen K. 2014. El color en los alimentos un criterio de calidad medible. AgroSur 42(2): 57−66.
11. Neelwarne B. (Ed.). 2012. Red beet biotechnology: Food and pharmaceutical applications. Springer Science & Business Media. 443 pp.
12. Nour, A., Oluwaseun, A., Nour, A., Omer, M., y Ahmed, N. (2021). Microwave-Assisted Extraction of Bioactive Compounds (Review). Microwave Heating - Electromagnetic Fields Causing Thermal and Non-Thermal Effects.
13. Quiroz, B., García-Mateos, M., Corrales Garcia, J., Colinas y Leon, M. (2018). Pitaya (*Stenocereus* spp.): An under-utilized fruit. Journal of the Professional Association for Cactus Development. 20. 82-100. 10.56890/jpacd.v20i.30.
14. Reynoso, R., Garcia, F. A., Morales, D., y Gonzalez de Mejia, E. (1997). Stability of betalain pigments from a cactacea fruit. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45(8), 2884-2889.
15. Rivera, G., Bocanegra-García, V., y Monge, A. 2010. Traditional plants as source of functional foods: a review. CyTA–Journal of Food 8:159-167
16. Sadeghi, A., Hakimzadeh, V., & Karimifar, B. (2017). Microwave Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Food: A Review. International Journal of Food Science and Nutrition Engineering, 7, 19-27.
17. Sumaya-Martinez, M. T., Cruz-Jaime, S., Madrigal-Santillan, E., Garcia-Paredes, J. D., Carino-Cortes, R., Cruz-Cansino, N., Alanis-Garcia, E. (2011). Betalain, acid ascorbic, phenolic contents, and antioxidant properties of purple, red, yellow, and white cactus pears. Intl. J. Molec. Sci., 12(10), 6452-6468. https://doi.org/10.3390/ijms12106452
18. Tanaka Y., Sasaki N., y Ohmiya A. 2008. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. The Plant Journal 54(4): 733−749.
19. Vidal, P.J., López-Nicolás, J.M., Gandía-Herrero, F., & García-Carmona, F. (2014). Inactivation of lipoxygenase and cyclooxygenase by natural betalains and semi-synthetic analogues. Food Chemistry, 154, 246-254.
20. Zhoh C., Kwon H. y Ahn S. 2010. Antioxidative and antimicrobial effects to skin flora of extracts from peel of Allium cepa L. Asian Journal of Beauty & Cosmetology 8: 49–58.
21. Zou, D-M., Brewer, M., García, F., Feugang, J.M., Wang, J., Zang, R., Liu, H., Zou, C., 2005. Cactus pear: a natural product in cancer chemoprevention. Nutrition Journal 4, 25–37.

SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS CON TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA

Ortiz Vega, María Joseline[1], Sánchez Niño, Francisco[1], Núñez Olvera, Oscar Fernando[1], Briones Andrade, Edna Guadalupe[1], Rodríguez Salas, Lorena[1]

[1]IICO – UASLP, Av. Karakorum 1470 Lomas 4ª sección, San Luis Potosí, S.L.P, 78210, México.
Ortizvegajoseline@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de radar basado en tecnología ultrasónica, orientado a la detección y visualización de obstáculos en tiempo real. El sistema emplea un sensor ultrasónico **HC-SR04**, controlado por un microcontrolador **Arduino UNO**, el cual gestiona tanto la adquisición de datos de distancia como la transmisión de los mismos a una computadora para su visualización. Para ampliar el campo de escaneo, el sensor se monta sobre un **servomotor SG90**, lo que permite realizar un barrido angular del entorno. Los datos recopilados se procesan mediante la plataforma de programación **Processing**,un entorno de programación de código abierto orientado a la visualización de datos y gráficos interactivos**,** que permite representar gráficamente en tiempo real la ubicación de los objetos detectados. Adicionalmente, se implementa un sistema de alerta sonora utilizando un **buzzer activo KY-012**, que se activa cuando un obstáculo se encuentra dentro de un umbral predefinido, mejorando así la interacción usuario-sistema.

El sistema desarrollado permite representar de forma visual e intuitiva la presencia de objetos en el entorno cercano, integrando sensado, procesamiento y alerta en una solución de bajo costo y fácil implementación. Este enfoque resulta aplicable en sistemas de asistencia, robótica móvil, y entornos donde la detección de obstáculos es crítica.

INTRODUCCIÓN

La detección de obstáculos en tiempo real es un componente esencial en el desarrollo de sistemas inteligentes aplicados en áreas como la robótica móvil, la automatización industrial, la asistencia a personas con discapacidad visual y los vehículos autónomos. Entre las tecnologías más utilizadas para este propósito, los sensores ultrasónicos destacan por su bajo costo, simplicidad de implementación y capacidad para medir distancias con precisión razonable en entornos controlados [1], [2].

Estos sensores emiten ondas ultrasónicas y calculan la distancia al objeto en función del tiempo de eco recibido, lo que permite identificar la presencia y ubicación de obstáculos con un margen de error aceptable [3]. Su eficacia ha sido ampliamente documentada en aplicaciones de navegación autónoma, evitando colisiones y ajustando trayectorias de manera dinámica [2], [4]. Además, su integración en plataformas abiertas como Arduino y Processing permite el desarrollo de soluciones accesibles, didácticas y escalables [1].

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de radar ultrasónico que aprovecha estas ventajas tecnológicas para realizar escaneo angular del entorno, generar una visualización gráfica en tiempo real y emitir alertas acústicas ante la detección de objetos cercanos. La propuesta busca ofrecer una herramienta funcional, de bajo costo y fácil implementación, aplicable en entornos educativos y de investigación en ingeniería electrónica, mecatrónica y ciencias aplicadas.

TEORÍA

A medida que los sistemas inteligentes y automatizados se integran a la vida cotidiana, la detección de obstáculos se vuelve fundamental para garantizar la seguridad en entornos dinámicos. El uso de tecnología ultrasónica ha permitido desarrollar sistemas que replican la capacidad humana de identificar objetos cercanos, sin contacto físico ni necesidad de visión directa [1], [5].

El sensor ultrasónico HC-SR04 emite pulsos de alta frecuencia y recibe el eco reflejado, calculando la distancia según el tiempo de ida y vuelta sin verse afectado por la luz. Su eficiencia se maximiza con un servomotor SG90 que permite escanear el entorno angularmente, funcionando de manera similar a un radar [10].

Los datos de distancia y ángulo obtenidos por el sensor ultrasónico HC-SR04 y el servomotor SG90, respectivamente, son procesados por un microcontrolador Arduino UNO. Este microcontrolador se encarga de gestionar la lectura continua del sensor, controlar el movimiento angular del servomotor y transmitir la información a una computadora. La visualización de estos datos en tiempo real se realiza mediante la plataforma **Processing**, que permite representar gráficamente los objetos detectados dentro del campo de escaneo del radar [6].

Processing, como se mencionó anteriormente, es un entorno de desarrollo integrado (IDE) y un lenguaje de programación de código abierto orientado a la creación de gráficos interactivos [9]. Su estructura simplificada facilita la representación visual dinámica de datos provenientes de sensores, haciendo posible el desarrollo de interfaces accesibles y eficientes para proyectos de prototipado rápido y divulgación tecnológica [7].

Por último, se incluye un buzzer KY-012, que emite una alarma cuando un objeto entra en un rango crítico, combinando la alerta visual con una sonora, lo que mejora la respuesta ante posibles riesgos. Este proyecto demuestra cómo es posible integrar tecnologías accesibles para crear sistemas eficientes de detección de objetos en diversos entornos [8].

PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto se centra en la construcción de un sistema de radar ultrasónico montado sobre un servomotor, controlado por un microcontrolador Arduino UNO. Su funcionamiento permite detectar obstáculos en su entorno y visualizarlos en tiempo real mediante una interfaz gráfica [5]. Para lograr esto se emplearon:

- Arduino UNO
- Sensor ultrasónico HC-SR04
- Servomotor SG90
- Buzzer KY-012
- Plataforma processing

El radar realiza un escaneo angular utilizando el servomotor SG90, mientras que el sensor HC-SR04 mide distancias a medida que gira. Esta información es enviada desde el arduino a la computadora, donde se genera la representación gráfica en la plataforma “processing” simulando una pantalla de radar. El programa fue desarrollado en el entorno de arduino IDE y utiliza la biblioteca Servo.h para controlar el movimiento del servomotor SG90. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del programa realizado en Arduino, el cual se explica a continuación: se definen tres pines,1) un pin para enviar el pulso ultrasónico (trigPin), 2) el segundo pin para recibir el eco (echoPin) y 3) el tercer pin para el buzzer (buzzerPin). En la función Setup(), se inicializan los pines y se establece la comunicación en serie a 9600 baudios. También se vincula el servomortor al pin 12. El sistema ejecuta un barrido angular 15° a 165° cuando el sensor esta en movimiento con el servomotor y asi midiendo la distancia en cada posición donde se envían en tiempo real para ser graficados en Processing.

La función CalculateDistance() emite un pulso ultrasónico y mide el tiempo que tarda en regresar con esto calcula la distancia al obstáculo, la función activarBuzzer() enciende el buzzer como alerta sonora; de lo contrario permanecería apagado este ciclo se repite continuamente, primero en sentido ascendente y luego descendente, simulando el escaneo de un radar.

Por último, el programa Processing se encarga de recibir datos enviados por Arduino mediante el puerto serie, interpretar ángulos y distancias escaneados y lo representa gráficamente en forma de radar esta se configura con el puerto Serial myPort, donde se define la velocidad de comunicación y se indica que los datos se extraen mediante el ángulo y la distancia donde los convierte en enteros y los utiliza para graficar. En la Figura 2 se puede observar el diagrama de flujo del programa realizado en la plataforma Processing.

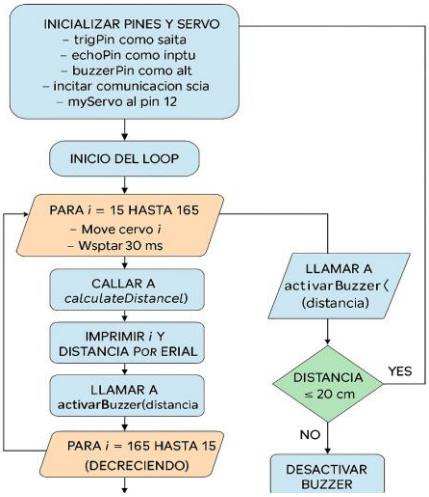


Figura 1. Diagrama de flujo de programa cargado en Arduino IDE para el correcto funcionamiento del sistema.

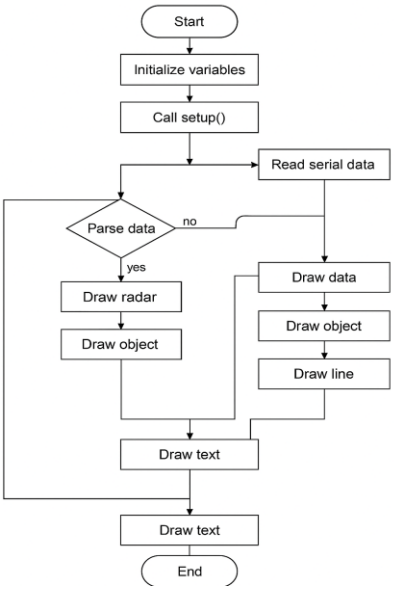


Figura 2. Diagrama de flujo programa para la programación del sistema en la plataforma “Processing”.

RESULTADOS

Durante la ejecución del proyecto, se logró satisfactoriamente el funcionamiento del sistema de detección y visualización de obstáculos mediante la integración entre Arduino y Processing. El sensor ultrasónico HC-SR04 fue capaz de detectar objetos dentro de un rango aproximado de 2 a 40 cm con buena precisión dando asi como resultado los datos de distancia y ángulos de forma estable al entorno grafico permitiendo su visualización en tiempo real mediante el radar implementado en Processing.

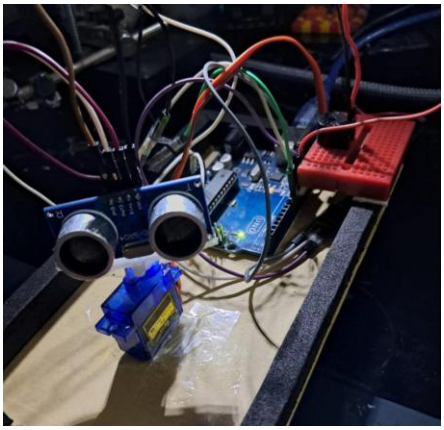


Figura 3. Ensamblaje de sensores y componentes electrónicos

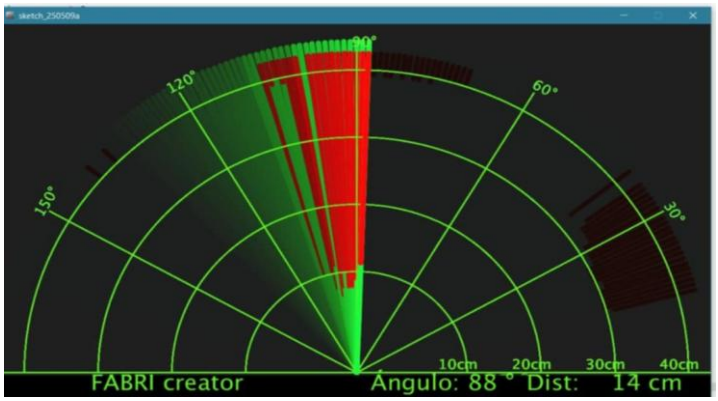


Figura 4. Visualización grafica del radar en funcionamiento.

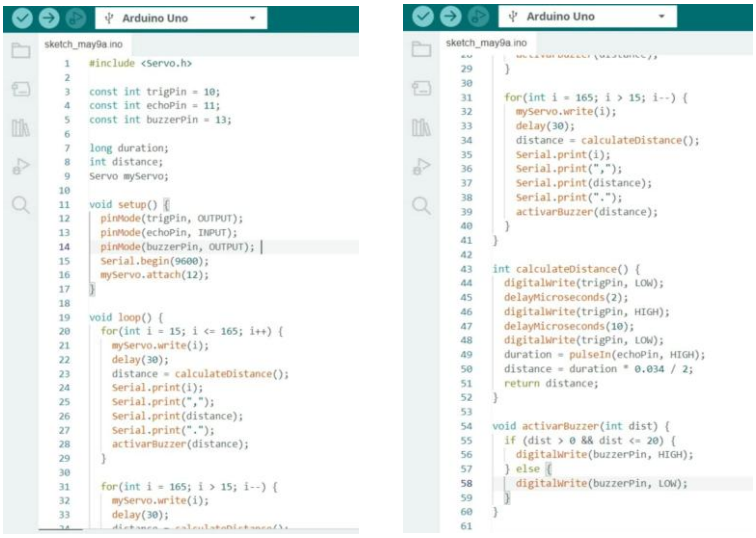


Figura 5.Programa arduino ejecutándose correctamente



Figura 6. Código abierto en plataforma “processing”

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema de detección de obstáculos con tecnología ultrasónica controlado por arduino y visualizado por Processing permitió demostrar la viabilidad sobre la integración de hardware y software para aplicaciones de detección en tiempo real. La respuesta del sensor, junto con el servo y el buzzer, facilito un monitoreo visual y sonoro de manera eficiente. Además, la interfaz gráfica proporciono una representación clara y dinámica del entorno escaneado. Este proyecto evidencio la utilidad de herramientas accesibles como Arduino para la implementación de soluciones prácticas, reforzando los conocimientos de electrónica, programación y visualización de datos dando

asi como resultado el cumplimiento de los objetivos propuestos y logrando una experiencia de control, análisis y funcionalidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. *J. Azeta, O. O. Ogbodo, E. Adetiba, A. U. Adoghe, "Obstacle Detection Using Ultrasonic Sensor for a Mobile Robot," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2019*.
2. Y. Koren, "Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensors," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1985.
3. Menezes, P., et al., "Low Cost Sensor Based Obstacle Detection and Description," Carnegie Mellon University, 1998.
4. S. Kim, B. K. Kim, and J. Bae, "Mobile Robot Obstacle Detection Using an Overlapped Ultrasonic Sensor Ring," *Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 2010.
5. *Arduino. (15 de 03 de 2024). Arduino Libraries. Obtenido de Arduino Libraries: https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries*
6. *Bega, Q. (30 de 04 de 2012). mosaic.uoc.edu. Obtenido de mosaic.uoc.edu: https://mosaic.uoc.edu/2012/04/30/introduccion-a-processing/*
7. *Foundation, P. (12 de 11 de 2024). Libraries Processing. Obtenido de Libraries Processing.: https://processing.org/reference/libraries/*
8. *Lozano, R. (8 de 06 de 2018). taloselectronics.com. Obtenido de taloselectronics.com: https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/buzzer-activo*
9. *Telerik.com. (s.f.). Obtenido de telerik.com: https://www.telerik.com/kendo-angular-ui/components/charts*
10. *Ultrasónica, D. d. (s.f.). Medtronic (MX). Obtenido de Medtronic (MX): https://www.medtronic.com/covidien/es-mx/products/ultrasonic-dissection.html*

SENSOR DE FIBRA ÓPTICA TIPO MACH-ZEHNDER PARA SOLUCIONES DE PH DE 5 A 9 UTILIZANDO LA TÉCNICA DE DESPLAZAMIENTO DEL NÚCLEO

Mario Angel Rico Mendez[1,2], Oxana Vasilievna Kharissova[1], Norma Patricia Puente Ramírez[2] , Romeo Selvas[1], Ricardo Chapa García[1]

[1]Facultad de Ciencias Fısico-Matematicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66455 San Nicolas de los Garza, México, [2]Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66455 San Nicolas de los Garza, Mexico.
mricom@uanl.edu.

RESUMEN

Este trabajo presenta un novedoso sensor de pH basado en un interferómetro de fibra óptica tipo Mach-Zehnder (MZI), diseñado para medir soluciones con pH entre 5 y 9, evaluadas incrementalmente en pasos de una unidad. La estructura consiste en un filtro MZI de dos secciones fabricado con fibra SMF-28 mediante la técnica de desplazamiento lateral del núcleo, con un descentrado de 30 µm y una longitud de interacción de 2 cm. Una fuente de luz de banda ancha (1480–1600 nm) induce interferencia intermodal entre los modos del núcleo y la cubierta, generando dos decaimientos característicos de detección en 1510 nm y 1545 nm. Técnicas de detección de picos identificaron alteraciones en las muescas espectrales en función del pH, mientras que modelos de regresión cuantificaron la sensibilidad del sensor en cada decaimiento de 0.426 nm/pH y 3.436 nm/pH, respectivamente. Estos resultados demuestran una fuerte correlación entre las variaciones de pH y los desplazamientos de longitud de onda, sugiriendo la viabilidad de usar sensores de fibra óptica basados en MZI para monitoreo de pH en tiempo real. Los resultados experimentales indican que el sensor MZI propuesto exhibe alta sensibilidad, posicionándolo como un candidato prometedor para aplicaciones de detección bioquímica y monitoreo ambiental. Los desplazamientos espectrales observados brindan información valiosa sobre la interacción entre modos guiados y radiados, la cual podría optimizarse para mejorar el rendimiento de detección. Futuros trabajos se enfocarán en ampliar el rango espectral, validar la respuesta del sensor bajo condiciones de temperatura variable y explorar modelos de regresión no lineal para mejorar la precisión. Este estudio resalta el potencial de la interferometría de fibra óptica para desarrollar sensores de pH miniaturizados y altamente sensibles, con aplicaciones en diagnósticos industriales, médicos y ambientales.

INTRODUCCIÓN

Los sensores de fibra óptica representan una solución versátil en una amplia gama de aplicaciones, debido a su tamaño reducido, su naturaleza liviana y su viabilidad económica. Al exhibir una alta sensibilidad a perturbaciones físicas externas, como la temperatura[1-3], la deformación[4,5], la curvatura[6-8], y la torsión[9-10] entre otras, el rendimiento de estos sensores se incrementa sustancialmente mediante la incorporación de técnicas de interferometría[11-16].

El interferómetro MZI se distingue como un instrumento diseñado para detectar variaciones en la fase relativa y la longitud de onda de la luz. Funcionando con base en el principio de un divisor de haz que bifurca y posteriormente recombina un haz óptico coherente en dos trayectorias distintas, el MZI es reconocido por su alta precisión y sensibilidad, lo que lo convierte en un elemento indispensable para sistemas de sensores sofisticados.

Dentro del ámbito químico y biológico, la medición precisa del pH es esencial para el monitoreo de la calidad del agua, procesos industriales, sistemas fisiológicos y aplicaciones biomédicas[17]. El pH constituye una medida logarítmica que refleja la concentración de iones hidrógeno en una solución, representando un parámetro crucial para caracterizar las propiedades ácidas o básicas de un entorno[18,19]. Las fluctuaciones del pH inciden directamente sobre el índice de refracción de los líquidos, permitiendo su detección óptica mediante cambios espectrales en dispositivos como interferómetros. La implementación de sensores de fibra óptica con capacidad de detección de pH

resulta particularmente ventajosa debido a su inmunidad electromagnética, capacidad de miniaturización e integración en entornos hostiles o de difícil acceso[20].

Esta investigación presenta un innovador MZI, diseñado meticulosamente mediante la unión por empalme de dos segmentos de 20 mm de fibra monomodo SMF-28, utilizando la técnica de desplazamiento del núcleo[21,22]. Este método consiste en un desplazamiento preciso del núcleo de la fibra de 30 µm. Posteriormente, el filtro se empalma con dos segmentos adicionales de SMF-28 en cada extremo, con los empalmes estratégicamente posicionados en el centro.

PARTE EXPERIMENTAL

Se propuso el uso de fibra monomodo (SMF-28e, de Corning) para la implementación de este sensor. El sensor fue fabricado manualmente mediante el empalme de fibras ópticas utilizando una empalmadora por fusión con alineación por núcleo Fitel S178A, configurada con los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Parámetros	Valor
Arc Power	100
Pre-Fusion Time (ms)	160
Arc Duration (ms)	750
Cleaning Time (ms)	200

La fase inicial del proceso consistió en empalmar cuatro segmentos (A, B, C, D) de fibra SMF-28. Los segmentos extremos (A y D) tienen una longitud aproximada de 400 mm, mientras que los segmentos centrales (B y C) miden L = 20 mm cada uno. Para los segmentos B y C se empleó la técnica de desplazamiento del núcleo (core offset) [7, 8], que consiste en un desplazamiento preciso del núcleo de la fibra de $\Delta s = 30$ µm, como se muestra en la Figura 1. Esta técnica es un paso crítico, ya que permite la formación de los patrones de interferencia deseados dentro del filtro MZI (Figura 2).

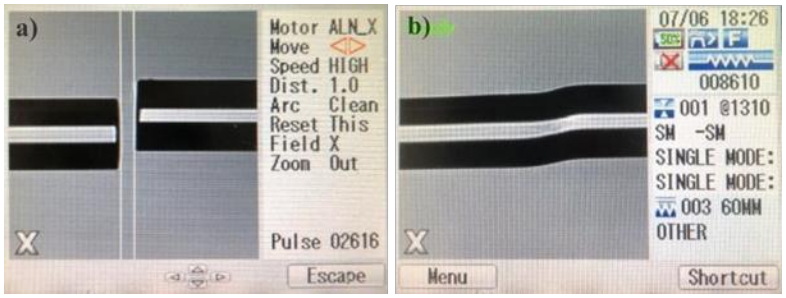


Figura 1 La técnica de empalme del núcleo se ve en el monitor de la empalmadora. a) Conjunto de fibras SMF-28e con 30 um entre núcleos antes del empalme. b) Fibras ópticas después de ser empalmadas.

El empalme se realizó de forma meticulosa con el fin de minimizar las pérdidas de señal y asegurar una transmisión óptica confiable. En el siguiente paso, se integraron dos secciones adicionales de fibra SMF-28 en cada extremo del conjunto con sus respectivos conectores, completando así la estructura del filtro.

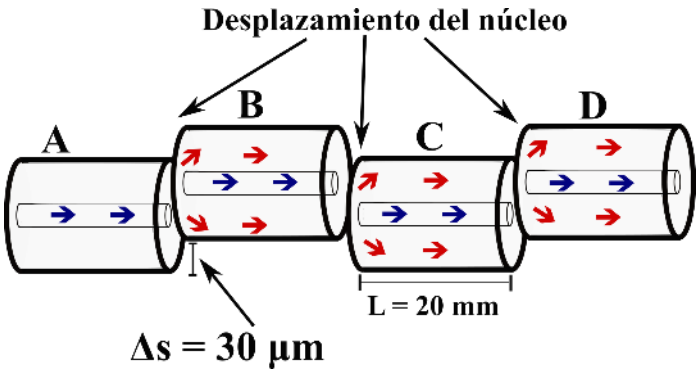


Figura 2 Diagrama esquemático del MZI basado en la técnica de empalme core-offset

RESULTADOS

La respuesta espectral del sensor se evaluó en el rango de 1480 a 1600 nm, con soluciones de pH entre 5 y 9. Se observaron múltiples mínimos de transmisión (notches) en la salida óptica, cuyas posiciones variaron con el pH debido a cambios en el índice de refracción del medio circundante. En la Figura 3 se muestran los espectros correspondientes para cada pH, con un recuadro que amplía el área crítica entre 1521 y 1528 nm.

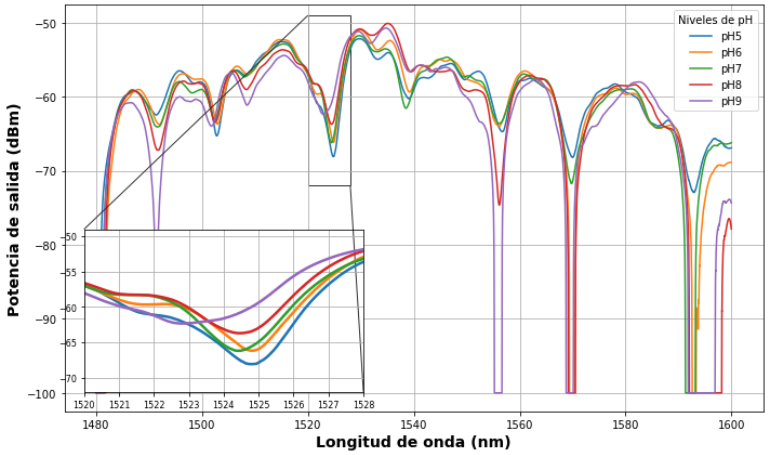


Figura 3 Espectros de transmisión del sensor para soluciones con diferentes niveles de pH (5 a 9).Se observa la variación en la posición y profundidad de los mínimos espectrales (notches) a lo largo del rango de longitud de onda de 1480 a 1600 nm. El recuadro resalta una de las zonas críticas entre 1521 y 1528 nm, donde se presenta un alto grado de sensibilidad al pH, lo que permite su análisis detallado para cuantificación

El presente análisis cuantitativo examina dos rangos espectrales específicos, para el rango de 1511 a 1525 nm, se observó un desplazamiento lineal descendente del mínimo espectral en correlación con el incremento del pH. El modelo lineal ajustado resultante fue:

$$\lambda_{min} = -0.426pH + 1527.236$$

con una sensibilidad de 0.426 nm/pH, lo cual indica un comportamiento estable y predecible en esta región Figura 4.

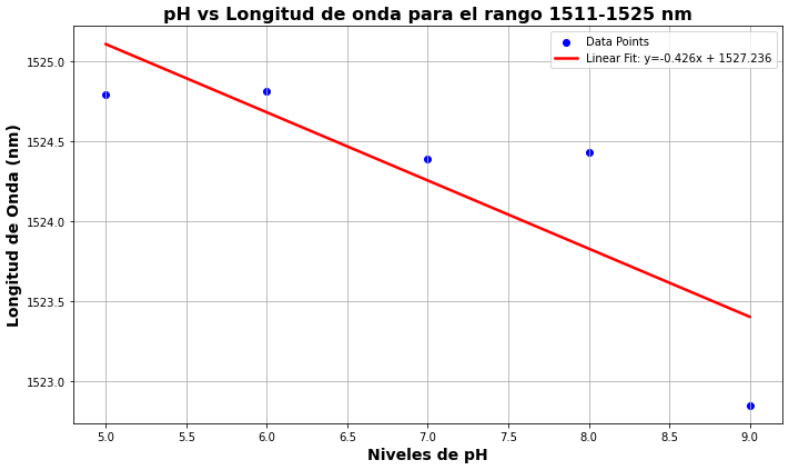


Figura 4 Desplazamiento del mínimo espectral en función del pH para el intervalo de 1511 a 1525 nm. La representación gráfica revela una tendencia lineal decreciente conforme se incrementa el valor del pH, con una sensibilidad determinada de 0.426 nm/pH.

En el rango de 1526 a 1545 nm: A diferencia del rango anterior, este intervalo demostró una tendencia al aumento en relación con el pH, presentando una sensibilidad significativamente superior:

$$\lambda_{min} = 3.436pH + 1507.886$$

Esta región del espectro proporciona una mayor resolución, lo que la convierte en una zona valiosa para aplicaciones que demandan intervalos de detección reducidos mostrado en la Figura 5. Ambos análisis indican que la estructura del sensor no solo es funcional, sino que también permite la optimización de la zona de operación de acuerdo con los requisitos de sensibilidad o estabilidad espectral. El diseño es sencillo y reproducible, gracias a los empalmes controlados, lo que convierte a este tipo de sensor en una opción atractiva para aplicaciones en el monitoreo ambiental, el análisis químico o en sistemas portátiles.

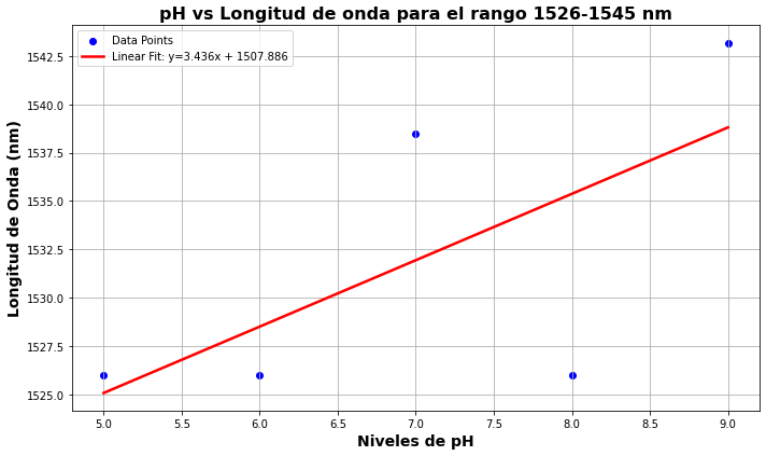


Figura 5 Se observa una relación entre el pH y la longitud de onda correspondiente al mínimo espectral en el rango de 1526 a 1545 nm. En contraste con la Figura 4, se presenta una tendencia ascendente con una sensibilidad evaluada en 3.436 nm/pH. Este hallazgo sugiere una mejor resolución espectral para la detección de pH.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la estructura del sensor propuesto presenta una respuesta espectral efectiva para la detección de soluciones con distintos niveles de pH. La presencia de múltiples mínimos espectrales (*notches*) dentro del rango de 1480 a 1600 nm valida la correcta formación del filtro MZI, siendo estos mínimos producto de la interferencia generada por el acoplamiento modal entre el núcleo y el revestimiento.

Se identificaron dos regiones espectrales con comportamiento lineal ante cambios de pH: el rango de 1511–1525 nm con una sensibilidad de 0.426 nm/pH y el rango de 1526–1545 nm con una sensibilidad mayor de 3.436 nm/pH. Este contraste en sensibilidad puede deberse a diferencias en la interferencia modal predominante en cada rango, afectado por la geometría del desplazamiento del núcleo y la longitud de los segmentos.

Aunque ambos rangos exhiben una respuesta lineal significativa, la región de mayor sensibilidad (1526–1545 nm) ofrece un desplazamiento espectral más pronunciado ante pequeñas variaciones en el pH. Esto puede ser aprovechado para mejorar la resolución del sensor, siempre que el sistema espectral utilizado posea una precisión adecuada. Por ejemplo, empleando un espectrómetro capaz de resolver desplazamientos de 0.1 nm, sería factible detectar una variación mínima de 0.03 unidades de pH, en comparación con 0.23 unidades en el rango de menor sensibilidad. Esta discrepancia subraya la importancia de seleccionar estratégicamente la región espectral de operación, en función del nivel de precisión requerido para la aplicación específica.

El proceso de fabricación es accesible y reproducible utilizando equipo estándar de laboratorio, eliminando la necesidad de técnicas complejas de fabricación, lo que posiciona a este sensor como una opción viable para aplicaciones en monitoreo ambiental, análisis químico y bioingeniería. Se podrían enfocar futuras mejoras en la estabilidad térmica del dispositivo, su encapsulación para ambientes hostiles, y su integración con plataformas portátiles de lectura espectral.

BIBLIOGRAFÍA

1. Roriz, P., Silva, S., Fraz˜ao, O., and Novais, S., “Optical fiber temperature sensors and their biomedical applications,” Sensors 20(7), 2113 (2020).
2. Wang, S.-n., Lv, R.-q., Zhao, Y., and Qian, J.-k., “A mach-zehnder interferometer-based high sensitivity temperature sensor for human body monitoring,” Optical Fiber Technology 45, 93–97 (2018).
3. Liu, Y., Peng, W., Liang, Y., Zhang, X., Zhou, X., and Pan, L., “Fiber-optic mach–zehnder interferometric sensor for high-sensitivity high temperature measurement,” Optics Communications 300, 194–198 (2013).
4. Morgese, M., Wang, C., Ying, Y., Taylor, T., and Ansari, F., “Stress–strain response of optical fibers in direct tension,” Journal of Engineering Mechanics 149(7), 04023037 (2023).
5. Dong, X., Du, H., Sun, X., Luo, Z., and Duan, J., “A novel strain sensor with large measurement range based on all fiber mach-zehnder interferometer,” Sensors 18(5), 1549 (2018).
6. Wang, Q. and Liu, Y., “Review of optical fiber bending/curvature sensor,” Measurement 130, 161–176 (2018).
7. Fu, H., Zhao, N., Shao, M., Li, H., Gao, H., Liu, Q., Yong, Z., Liu, Y., and Qiao, X., “High-sensitivity mach–zehnder interferometric curvature fiber sensor based on thin-core fiber,” IEEE Sensors Journal 15(1), 520–525 (2014).
8. Wang, J., Liu, M., Yun, K., Liu, Y., Li, C., Yang, C., and Xia, P., “A novel method of curvature demodulation for mach-zehnder interferometer optical fiber curvature sensors,” Measurement 200, 111607 (2022).
9. Budinski, V. and Donlagic, D., “Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: a review,” Sensors 17(3), 443 (2017).

10. Huerta-Mascotte, E., Sierra-Hernandez, J. M., Mata-Chavez, R. I., Jauregui-Vazquez, D., Castillo-Guzman,A., Estudillo-Ayala, J. M., Guzman-Chavez, A. D., and Rojas-Laguna, R., "A core-offset mach zehnder interferometer based on a non-zero dispersion-shifted fiber and its torsion sensing application," Sensors 16(6), 856 (2016).
11. Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., and Choi, H. Y., "Interferometric fiber optic sensors," sensors 12(3), 2467–2486 (2012).
12. Rao, Y. and Jackson, D., "Principles of fiber-optic interferometry," in [Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals], 167–191, Springer (2000).
13. Bahrampour, A. R., Tofighi, S., Bathaee, M., and Farman, F., "Optical fiber interferometers and their applications," Interferometry-Research and Applications in Science and Technology 1, 3–30 (2012).
14. Rajan, G., [Optical fiber sensors: advanced techniques and applications], CRC press (2017).
15. Shen, C., Wang, Y., Chu, J., Lu, Y., Li, Y., and Dong, X., "Optical fiber axial micro-displacement sensor based on mach-zehnder interferometer," Optics express 22(26), 31984–31992 (2014).
16. Fang, Z., Chin, K., Qu, R., and Cai, H., [Fundamentals of optical fiber sensors], John Wiley & Sons (2012).
17. Yu, Q., Tang, C., & Kuo, J. (2000). A critical review on methods to measure apoplastic pH in plants. Plant and Soil, 219(1), 29-40.
18. Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater.
19. Young, J. C., Clesceri, L. S., & Kamhawy, S. M. (2005). Changes in the biochemical oxygen demand procedure in the 21st edition of Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Water environment research, 77(4), 404-410.
20. Tiwari, R., & Mahalpure, G. S. (2024). A Detailed Review of pH and its Applications. Journal of Pharmaceutical and Biopharmaceutical Research, 6(2), 492-505.
21. Li, L., Xia, L., Xie, Z., and Liu, D., "All-fiber mach-zehnder interferometers for sensing applications," Optics express 20(10), 11109–11120 (2012).
22. Gao, S., Ji, C., Ning, Q., Chen, W., and Li, J., "High-sensitive mach-zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core-offset splicing technique," Optical Fiber Technology 56, 102202 (2020).

INTEGRACIÓN DE LEST Y REBA PARA DISEÑAR ESTACIONES DE TRABAJO SEGURAS Y EFICIENTES EN LA INDUSTRIA METALMECÁNICA

Gabriela Nava Vigil, Juan Antonio Magdaleno Zavala, Mónica Mendoza Khorts

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
gabriela.nv@Irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la evaluación y mejora ergonómica de estaciones de trabajo en áreas industriales de corte, soldadura y maquinados, procesos cruciales en el sector metalmecánico. Para diagnosticar con precisión las condiciones laborales y proponer soluciones de diseño que optimicen la seguridad y eficiencia operativa, se implementaron dos metodologías fundamentales: el método LEST (Load Ergonomic System Technique) y la evaluación REBA (Rapid Entire Body Assessment). El método LEST es esencial para cuantificar objetivamente el esfuerzo físico y las posturas forzadas a las que se exponen los trabajadores. En este estudio, se determinaron factores de riesgo que oscilaron entre el 7.95% y el 16.84%, permitiendo identificar cargas físicas que incrementan el riesgo de lesiones musculoesqueléticas. La evaluación REBA, por su parte, facilitó la detección de posturas inadecuadas durante la ejecución de tareas, evidenciando la necesidad de intervenciones inmediatas para corregirlas y reducir el riesgo global. Otro aspecto crítico fue la manipulación de materiales. En el área de CNC, los operadores deben mover láminas de acero cuyo peso varía entre 15 kg y 30 kg, excediendo en ocasiones el límite normativo de 25 kg. Esta situación aumenta significativamente el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y resalta la urgencia de incorporar dispositivos mecánicos de apoyo que faciliten el manejo de cargas pesadas. Como respuesta a estos hallazgos, se propuso una serie de intervenciones técnicas y de diseño: reorganizar el layout de las estaciones para mejorar la accesibilidad y minimizar movimientos repetitivos; instalar fuentes de iluminación adicionales en los puntos deficientes para alcanzar los niveles mínimos; incorporar equipos auxiliares, como soportes y sistemas de transporte mecánico, que reduzcan la carga física en áreas críticas; y ajustar las dimensiones de mesas y la distribución de herramientas basándose en datos antropométricos para favorecer posturas ergonómicas. La integración de los métodos LEST y REBA demuestra su importancia al permitir identificar y corregir deficiencias ergonómicas de forma precisa. La implementación de estas medidas se espera que reduzca el ausentismo laboral y las lesiones musculoesqueléticas, al tiempo que aumenta la eficiencia operativa, consolidando entornos laborales más seguros, productivos y sostenibles en el sector metalmecánico..

INTRODUCCIÓN

La industria metalmecánica presenta entornos laborales donde los operarios están frecuentemente expuestos a factores de riesgo ergonómico como movimientos repetitivos, posturas incómodas y manipulación de materiales pesados. Estas condiciones incrementan la posibilidad de desarrollar lesiones musculoesqueléticas y reducen el rendimiento laboral. En este contexto, el diseño ergonómico de las estaciones de trabajo se vuelve fundamental para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, así como para incrementar la productividad y eficiencia.

El presente trabajo se desarrolla en una empresa del sector metalmecánico, SYA Especiales, donde se identificaron condiciones no óptimas en estaciones de trabajo de corte CNC, soldadura y maquinados. Se aplicaron los métodos LEST (Lista de Evaluación de Salud en el Trabajo) y REBA (Rapid Entire Body Assessment) con el objetivo de realizar un diagnóstico detallado y proponer soluciones específicas.

TEORÍA

Ergonomía en entornos industriales

La ergonomía es la disciplina que estudia las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema, con el fin de optimizar el bienestar humano y el rendimiento global del sistema (ISO 6385). En los entornos industriales, el diseño ergonómico de los puestos de trabajo es fundamental para prevenir lesiones musculoesqueléticas, mejorar el confort de los trabajadores y aumentar la eficiencia de los procesos.

De acuerdo con Dul y Neumann (2009), una adecuada implementación de estrategias ergonómicas contribuye significativamente a las estrategias empresariales mediante la reducción de costos por accidentes, aumento de la productividad y mejora en la calidad del trabajo.

Lesiones musculoesqueléticas y factores de riesgo

Las lesiones musculoesqueléticas (LME) son uno de los principales problemas de salud ocupacional en sectores como el metalmecánico. Estas lesiones son causadas principalmente por factores como:

- Posturas forzadas.
- Movimientos repetitivos.
- Manejo manual de cargas pesadas.
- Tiempo prolongado en una misma posición.

En este contexto, la identificación y evaluación de los riesgos ergonómicos se vuelve crucial para intervenir de forma oportuna y eficaz (Karwoski, 2006).

Métodos de evaluación ergonómica: LEST y REBA

Método LEST (Lista de Evaluación de Salud en el Trabajo)

El método LEST es una herramienta semicuantitativa utilizada para realizar una evaluación inicial integral del ambiente de trabajo. Evalúa cuatro grandes dimensiones: carga física, carga mental, carga temporal y condiciones ambientales. Este método permite identificar los principales factores de riesgo y determinar si es necesario aplicar otros métodos más específicos (Mital & Nicholson, 1995).

En el presente estudio, LEST fue aplicado como primer filtro para identificar las estaciones con mayores niveles de riesgo y focalizar los esfuerzos en aquellas áreas con condiciones más críticas.

Método REBA (Rapid Entire Body Assessment)

El método REBA fue desarrollado por Hignett y McAtamney (2000) y es ampliamente utilizado para evaluar posturas de trabajo que implican riesgo para todo el cuerpo. Analiza posiciones de tronco, cuello, piernas, brazos y muñecas, considerando además la fuerza aplicada, el tipo de actividad y la interacción con objetos.

REBA se basa en la observación directa y puede emplearse de manera ágil en contextos industriales. Su aplicación en este estudio permitió cuantificar el nivel de riesgo en actividades específicas, como el corte láser, que requieren posturas prolongadas.

Normativa aplicable: NOM-036-1-STPS-2018

La Norma Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018, emitida por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, establece las condiciones de seguridad y salud para el manejo manual de cargas. Indica límites de peso, frecuencia, técnica de levantamiento y necesidad de implementar equipos auxiliares. Según esta norma, un trabajador no debe manipular cargas mayores a 25 kg de forma continua sin apoyos adicionales. En este estudio, se detectó que esta condición se incumple, por lo que se considera un factor prioritario de intervención.

Diseño ergonómico de estaciones de trabajo

El rediseño de estaciones de trabajo implica adaptar el entorno, herramientas y tareas a las características antropométricas de los trabajadores. Las propuestas de este proyecto consideran:

- Ajustes en la altura del plano de trabajo.
- Incorporación de mecanismos de elevación como tijeras hidráulicas.
- Integración de rodillos para facilitar el movimiento de materiales.
- Optimización del flujo de trabajo para reducir movimientos innecesarios.

PARTE EXPERIMENTAL

Se emplearon dos métodos principales de evaluación ergonómica:

Método LEST

Este método permite una primera valoración global de las condiciones de trabajo, abarcando aspectos como carga física, condiciones ambientales, organización del trabajo, entre otros. Es útil para determinar si se requiere un análisis más profundo y detallado con herramientas específicas.

Durante la aplicación del método LEST se identificaron como críticos los factores de carga física y dinámica, en particular debido a la manipulación de láminas de más de 25 kg, lo cual excede los límites permitidos por la NOM-036-1-STPS-2018.

Método REBA

El método REBA fue aplicado principalmente en el área de corte láser. Esta herramienta evalúa el riesgo ergonómico postural a partir de observaciones directas y entrevistas con los trabajadores. La puntuación obtenida fue de 7 puntos, lo cual indica riesgo medio, siendo necesario intervenir para evitar posibles lesiones.

A pesar de que el operador no maneja cargas superiores a 5 kg en esa estación específica, permanece durante aproximadamente cinco horas al día adoptando posturas que afectan negativamente su salud a largo plazo.

FASE 1: EVALUACIÓN ERGONÓMICA.

Etapa 1:

- Observación general de las áreas de trabajo. Mediante un gemba walk se realiza una primera evaluación de las áreas de trabajo, tomando como referencia los requisitos de cumplimiento de las NOM´s aplicables a la empresa. Derivado de esta evaluación se identifican condiciones de riesgo referentes a falta de iluminación en las áreas de maquinados CNC y maquinados convencionales (más adelante se realiza la evaluación con luxómetro para

obtener los datos reales), posturas inadecuadas, carga y manipulación de objetos de más de 25 kg (límite máximo permitido según NOM-036).

Etapa 2:

- Aplicación de evaluaciones ergonómicas a los trabajadores (encuestas, entrevistas, análisis de puestos).

Etapa 3:

- Análisis de los datos recolectados.
- Identificación de riesgos ergonómicos y problemas posturales.

Se realiza la evaluación al área de corte laser utilizando el método LEST, donde se evalúa; las cargas físicas, el entorno, la carga mental, el aspecto psicosocial y el tiempo de trabajo. Ilustración 1 Valoración LEST del área de laser.

AREA:LASER

EVALUACION ERGONOMICA - METODO LEST

DIMENCIONES	CARGA FISICA		ENTORNO FISICO				CARGA MENTAL			ASPECTO PSICOSOCIAL				TIEMPO DE TRABAJO
VARIABLES / ID	CARGA ESTATICA	CARGA DINAMICA	AMBIENTE TERMICO	RUIDO	ILUMINACION	VIBRACIONES	PRESION DE TIEMPO	ATENCION	COMPLEJIDAD	INICIATIVA	COMUNICACIÓN	RELACION CON EL MANDO	STATUS SOCIAL	TIEMPO DE TRABAJO
muestra 1	0	6	5	3	1	0	2	2	5	3	2	2	3	2

La siguiente tabla muestra el sistema de valoración aplicado y los colores asignados a cada valor para su representación gráfica.

Color	Nivel de riesgo
0, 1, 2	Situación satisfactoria.
3, 4, 5	Débiles molestias. Algunas mejoras podrían aportar más comodidad al trabajador.
6, 7	Molestias medias. Existe riesgo de fatiga.
8, 9	Molestias fuertes. Fatiga
10	Nocividad.

DIMENCIONES	CARGA FISICA		ENTORNO FISICO				CARGA MENTAL			ASPECTO PSICOSOCIAL				TIEMPO DE TRABAJO
VARIABLES / ID	CARGA ESTATICA	CARGA DINAMICA	AMBIENTE TERMICO	RUIDO	LUMINACION	VIBRACIONES	PRESION DE TIEMPO	ATENCION	COMPLEJIDAD	INICIATIVA	OMUNICACIÓ	RELACION CON EL MANDO	STATUS SOCIAL	TIEMPO DE TRABAJO
SATISFACTORIO	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%	100.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	100.00%	100.00%	0.00%	100.00%
DEBILES	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
MEDIAS	0.00%	100.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
FUERTES	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
NOCIVIDAD	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Ilustración 1 Valoración LEST del área de laser

Después de aplicar el método LEST, se concluye que los factores “carga física/carga dinámica” representan un punto a considerar teniendo en cuenta lo estipulado en la tabla 1 de la NOM – 036 – STPS – 2018 (tabla 4.34), el trabajador carga láminas de más de 25 kg por lo que se debe de tomar en cuenta algún apoyo adicional para la persona buscando que pueda levantar y mover más fácil las láminas.

Masa máxima **kg**	**Género**	**Edad (en años)**
7	Femenino	Menores de 18
	Masculino	
15	Femenino	Mayores de 45*
20	Femenino	Entre 18 y 45
	Masculino	Mayores de 45*
25	Masculino	Entre 18 a 45

Ilustración 2 Masa máxima que puede levantar o bajar un trabajador por edad y genero

- Recopilación de datos antropométricos de los trabajadores. (Medición de parámetros ergonómicos como posturas, movimientos repetitivos y medidas antropométricas.)

  La prueba REBA es una herramienta utilizada para evaluar el riesgo ergonómico en tareas laborales. En este caso, se evalúa la actividad de corte laser y a chorro, se considera dentro de esta evaluación las posiciones del cuello, piernas, brazos, antebrazos, muñeca y actividad muscular, y se obtuvieron los resultados de las figuras 3 posición del cuello, 4 posición del tronco, 5 posición de las piernas, 6 posición de la muñeca y 7 cargas.



Ilustración 3 Evaluación de posición de cuello



Ilustración 4 Evaluación de posición de tronco



Ilustración 5 Evaluación de posición de brazo



Ilustración 6 Evaluación de posición de muñeca

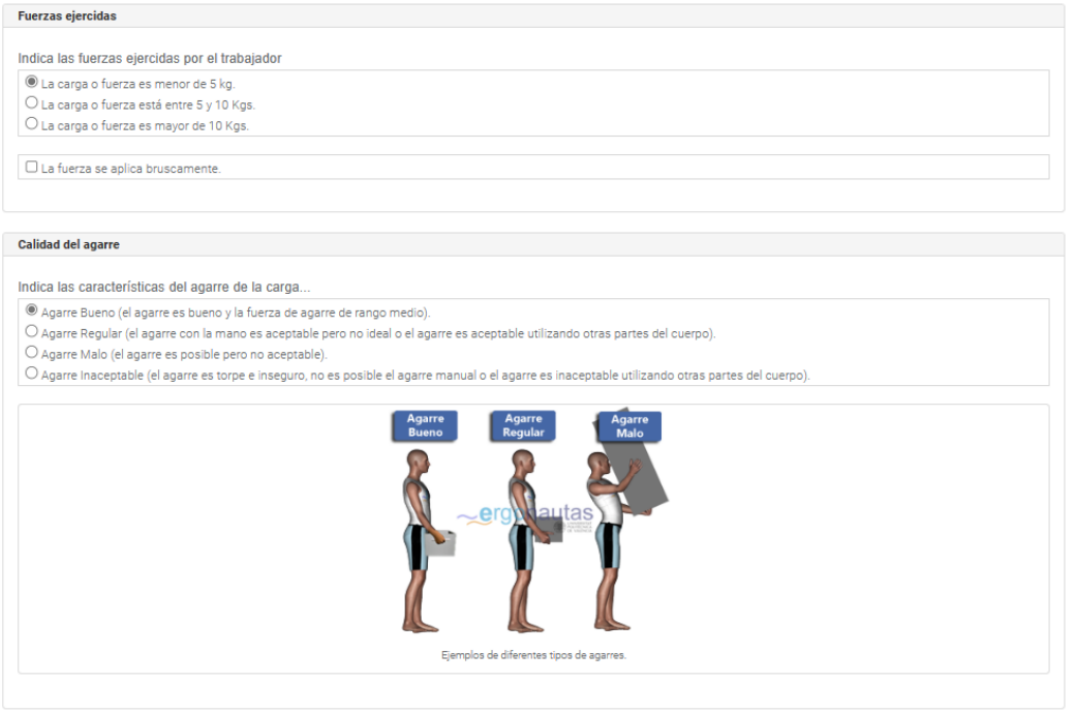


Ilustración 7 Evaluación de fuerzas ejercidas

En este caso, como se muestra en la figura 8 resultados, el operador ha obtenido una calificación de 7, lo que indica un riesgo medio. Es necesario tomar medidas para reducir ese riesgo y proteger la salud del operador.



Ilustración 8 Resultados

- Medición de factores físicos del ambiente de trabajo (ruido, iluminación, temperatura).

Para la evaluación de dicho riesgo se desarrolló la siguiente metodología tomando como base los aspectos establecidos en la NOM-025-STPS-2008: Condiciones de iluminación en los centros de

trabajo. Para determinar los valores de los factores de inconfort acústico implicados en las tablas 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 y 4.40, es preciso:

• Medir la intensidad lumínica con un luxómetro en cada puesto de trabajo
• Disponer de las características técnicas de las luminarias
• Observar la distribución relativa entre la posición de las lámparas y las ventanas respecto de la tarea y las pantallas de visualización de datos (PVD).

Teniendo en consideración lo anterior, se realizan las mediciones con ayuda de un luxómetro calibrado y certificado en los puntos identificados para medición y se obtienen los siguientes resultados Figura 9 Resultados de prueba de iluminación.

Identificacion del area/zona	Punto	Hora de la lectura	plano de trabajo luz incidente (lx)	Luz reflejante (lx)	N.M.I (lx)	cumple con el N.M.I	Kf (%)	N.M.P (%)	CUMPLE CON EL N.M.P	NOTA
ALMACEN	1	02:00	341	27.1	50	SI	7.95%	50.00%	SI	
TORNO 1	2	02:02	1539	158.9	750	SI	10.32%	50.00%	SI	
TORNO 2	3	02:04	685	75.4	750	NO	11.01%	50.00%	SI	EL NIVEL DE ILUMINACION ES MENOR QUE EL NIVEL MINIMO PERMISIBLE, SE RECOMIENDA AÑADIR UNA FUENTE DE ILUMINACION COMPLEMENTARIA
TORNO 3	4	02:06	923	141.5	750	SI	15.33%	50.00%	SI	
FRESA 1	5	02:08	1003	140	750	SI	13.96%	50.00%	SI	
FRESA 2	6	02:10	1201	125.7	750	SI	10.47%	50.00%	SI	
FRESA 3	7	02:12	931	94.7	750	SI	10.17%	50.00%	SI	
TORNO 4	8	02:14	3500	350	750	SI	10.00%	50.00%	SI	
TORNO 5	9	02:16	2210	318	750	SI	14.39%	50.00%	SI	
FRESA 4	10	02:18	1870	315	750	SI	16.84%	50.00%	SI	
MESA	11	02:20	2890	338	300	SI	11.70%	50.00%	SI	
CNC	12	02:22	2300	310	750	SI	13.48%	50.00%	SI	
TORNO 6	13	02:24	4100	510	750	SI	12.44%	50.00%	SI	

Ilustración 9 Resultados de prueba de iluminación.

Con base en las mediciones y las comparaciones con la NOM-025-STPS-1994, se ha evidenciado que los puntos 3, 5, 6, 7, 11 y 12 no cumplen con los niveles mínimos de iluminación requeridos para el trabajo realizado en dichas estaciones de trabajo. Es crucial abordar esta situación, ya que la iluminación adecuada y óptima en el puesto de trabajo tiene un impacto significativo en la productividad laboral, la prevención de accidentes, la reducción de errores, la fatiga visual, el ausentismo laboral y el confort visual. Se recomienda tomar medidas para mejorar la iluminación en estas áreas.

En el área de corte láser, operada únicamente por Ramón Zavala, se identificó un riesgo medio en la evaluación ergonómica. Aunque la carga física es baja (menos de 5 kg), el operador adopta posturas que pueden comprometer su salud a largo plazo, especialmente considerando que pasa 5 horas diarias en el puesto. El método REBA indica que es necesaria la actuación para corregir las posturas y prevenir el desarrollo de enfermedades musculoesqueléticas. Dado que Ramón tiene solo 2 meses en el puesto, es un buen momento para intervenir y establecer medidas ergonómicas que aseguren un mejor bienestar físico, evitando que la repetición de estas posturas inadecuadas se convierta en un problema crónico. Implementar recomendaciones ergonómicas en este punto podría mejorar la eficiencia operativa y la salud del trabajador a largo plazo.

Además, al aplicar el método LEST y considerando los factores de carga física/carga dinámica, se ha determinado que el trabajador carga láminas de más de 25 kg más de una vez al día. Por lo tanto, se sugiere utilizar equipos auxiliares manuales si el peso supera lo establecido en la tabla 5.1 de la NOM-036-1-STPS2018. Esto ayudará a reducir el riesgo ergonómico asociado con la manipulación de cargas pesadas.

En promedio, la mayoría de los trabajadores se encontraba en un riesgo alto según el método REBA. Por lo tanto, es necesario implementar un procedimiento de seguridad que incluya lo siguiente:
• Descripción técnica adecuada para realizar las actividades.
• Control que se debe aplicar en el desarrollo de las actividades.
• Medidas de seguridad específicas.
• Consideración de las características de la carga.

En el apartado de Entorno físico, especialmente en los puntos relacionados con el ambiente térmico se recomienda lo siguiente:
Para el ambiente térmico, según la NOM-015-STPS-2001, se deben utilizar sistemas de ventilación y/o aire acondicionado para mantener condiciones seguras. Además, se sugiere ofrecer agua combinada con electrolitos para mantener la hidratación del personal. Esto ayudará a mitigar los efectos del calor extremo del medio ambiente en el lugar de trabajo

Para el ambiente térmico, según la NOM-015-STPS-2001, se deben utilizar sistemas de ventilación y/o aire acondicionado para mantener condiciones seguras. Además, se sugiere ofrecer agua combinada con electrolitos para mantener la hidratación del personal. Esto ayudará a mitigar los efectos del calor extremo del medio ambiente en el lugar de trabajo.

Además, al aplicar el método LEST y considerando los factores de carga física/carga dinámica, se ha determinado que el trabajador carga láminas de más de 25 kg más de una vez al día. Por lo tanto, se recomienda utilizar equipos auxiliares manuales si el peso supera lo establecido en la tabla 5.2 de la NOM036-1-STPS-2018. Esto ayudará a reducir el riesgo ergonómico asociado con la manipulación de cargas pesadas.

FASE 2: DISEÑO DE SOLUCIONES ERGONÓMICAS

Etapa 4:

- Revisión de normas y criterios ergonómicos para el diseño de estaciones de trabajo.
- Tabulación y análisis de los datos recopilados durante la evaluación ergonómica.
- Identificación de los principales problemas ergonómicos y áreas de mejora en cada proceso.
- Búsqueda de soluciones ergonómicas para los problemas identificados.
- Diseño de prototipos de las estaciones de trabajo

Se debe priorizar la adecuación ergonómica de los puestos de trabajo, prestando especial atención al mobiliario y los equipos utilizados por los colaboradores. Esto puede implicar la revisión y actualización del mobiliario para garantizar que se ajusten adecuadamente a las necesidades individuales de cada colaborador. Se deben realizar evaluaciones ergonómicas periódicas y proporcionar capacitación sobre prácticas ergonómicas para garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable.
Se recomienda la implementación de programas de capacitación en seguridad y salud ocupacional, así como evaluaciones regulares de desempeño laboral. Estas iniciativas no solo ayudarán a mejorar el rendimiento y la productividad de los colaboradores, sino que también les proporcionarán las habilidades y conocimientos necesarios para mantener un entorno de trabajo seguro y ergonómico.

FASE 3: IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO

Etapa 5:

- Construcción e instalación de las nuevas estaciones de trabajo.
- Capacitación a los trabajadores en el uso de las nuevas estaciones.

La implementación de un material de apoyo para el movimiento de materiales pesados es fundamental debido a los resultados obtenidos en la evaluación ergonómica mediante el método REBA. Dicho análisis indica un nivel de riesgo alto, señalando que la postura adoptada al manipular cargas pesadas genera una carga postural significativa en varias partes del cuerpo, particularmente en el tronco, cuello, piernas y extremidades superiores.

La puntuación final revela la necesidad de una actuación inmediata, lo que implica que el trabajador está expuesto a posturas forzadas y al uso de fuerza superior a 10 kg, lo cual incrementa el riesgo de lesiones a largo plazo. Por lo tanto, implementar un material de apoyo, como un equipo de asistencia mecánica, reduciría el riesgo de carga física y ayudaría a preservar la salud y seguridad del trabajador, mejorando también su desempeño y disminuyendo el riesgo de accidentes laborales.

Según lo establecido en la NOM-036-1-STPS-2018, es recomendable utilizar equipos auxiliares para el manejo de cargas. En este sentido, se sugiere el uso de un equipo con las siguientes características:

1. Plataforma con rodillos: La parte superior de la estructura está compuesta por rodillos paralelos, diseñados para facilitar el transporte de materiales mediante un sistema de rodillos. Este tipo de diseño es común en líneas de producción o para el transporte de mercancías.
2. Mecanismo de tijera: La estructura principal del elevador incorpora un mecanismo de tijera, lo cual permite que la plataforma se eleve o descienda verticalmente. Este mecanismo es ideal para operaciones donde es necesario ajustar la altura para cargar o descargar productos.
3. Base con ruedas: La plataforma está equipada con ruedas en la base, lo cual la hace móvil y fácil de desplazar en entornos industriales o de trabajo.
4. Soporte estructural: La estructura, de color amarillo y hecha de metal, cuenta con soportes robustos para manejar cargas pesadas, e incluye una barra transversal conectada a un sistema de elevación, ya sea hidráulico o mecánico.

Este tipo de equipo es comúnmente utilizado para manipular y trasladar cargas pesadas o voluminosas de manera eficiente y ergonómica. Para ello se diseña la plataforma antes mencionada en la figura 10 Equipo auxiliar.

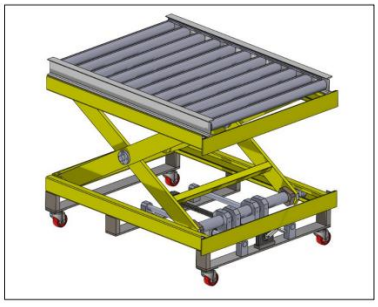


Ilustración 10 Equipo auxiliar.

RESULTADOS

Se identificaron las siguientes problemáticas clave:

- Posturas forzadas mantenidas por largos periodos de tiempo.
- Manipulación manual de láminas metálicas pesadas sin equipos de apoyo.
- Ausencia de adaptación del mobiliario a los datos antropométricos de los operarios.
- Flujo de trabajo poco eficiente que obliga a realizar movimientos repetitivos innecesarios.

Con base en los resultados obtenidos, se propuso el diseño de una plataforma ergonómica de apoyo que incluye:

- Rodillos superiores paralelos para facilitar el transporte de materiales.
- Mecanismo de tijera ajustable en altura, que permite adaptar el plano de trabajo a las necesidades del operario.
- Base con ruedas, que aporta movilidad en el entorno industrial.
- Soporte estructural robusto, con barra transversal y sistema de elevación hidráulico o mecánico, ideal para manejo de cargas pesadas.

Además, se emitieron recomendaciones para reorganizar el área de trabajo y ajustar los tiempos de operación, incluyendo descansos activos y rotación de tareas.

CONCLUSIONES

El estudio permitió identificar factores de riesgo que afectan tanto la salud de los trabajadores como la eficiencia de las operaciones. La aplicación de los métodos LEST y REBA proporcionó una visión integral de los problemas ergonómicos presentes en las estaciones analizadas.

Las soluciones propuestas no solo buscan minimizar riesgos físicos, sino también mejorar el rendimiento del personal y la organización del trabajo. La integración de tecnologías auxiliares, ajustes de mobiliario y capacitación en el uso correcto de herramientas es clave para una ergonomía aplicada de manera efectiva.

Este trabajo resalta la importancia de alinear el diseño industrial con los principios de ergonomía, normativa nacional (NOM-036) y estrategias de bienestar laboral para garantizar una productividad sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. G. Evans, “Perspectiva on the development of high-toughness ceramics”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, 2, 1990, pp. 187-206.
2. T. Kreis, “Speckle Metrology,” in *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996), Chapter 4, pp. 125-149. Dul, J., & Neumann, W. P. (2009). Ergonomics contributions to Company strategies. Applied Ergonomics, 40(4), 745-752.
3. Hedge, A. (2003). Ergonomics of the computerized office workstation. John Wiley & Sons.
4. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2024). Recuperado de https://www.insst.es/materias/riesgos/seguridad-en-el-trabajo
5. Karwoski, W. (2006). Ergonomics and human factors: The paradigms for science, engineering, design, technology, and management of human-compatible systems.
6. Mital, A., & Nicholson, A. S. (1995). Methods and metrics of matchmoving.
7. "Ergonomía", Etecé, Concepto.de. https://concepto.de/ergonomia/ (Consultado el 11 de marzo de 2024).
8. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. NOM-036-1-STPS-2018. Manejo manual de cargas – Condiciones de seguridad y salud en el trabajo.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO DE PUENTES SEMI-INTEGRALES EN MÉXICO

Eduardo Reyes Negrete, Bertha Alejandra Olmos Navarrete, José Manuel Jara Guerrero, Juan Ignacio López Pérez, Abel Martínez Silva

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
eduardo.negrete@umich.mx

RESUMEN

Debido a la constante modernización de la red carretera de la República Mexicana, se observa la necesidad de modernizar los puentes simplemente apoyados (PSA) tradicionalmente construidos de concreto reforzado (CR) a puentes semi-integrales, mediante la eliminación de las juntas de dilatación entre los múltiples tableros y su interfaz estribo-superestructura. Los puentes son puntos críticos en las vías de comunicación debido a que su falla representaría una discontinuidad del flujo vehicular, impactando directamente en los tiempos de traslado de personas y mercancías, lo que se puede reflejar en grandes pérdidas económicas. En el caso de PSA, en su vida útil estos requieren constante mantenimiento de las juntas de dilatación, lo que conlleva a altos costos que absorben las dependencias federales, como la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. La eliminación de juntas de dilatación genera presiones y desplazamientos en los estribos y pilas por efectos de temperatura que se transfieren por la continuidad del tablero. El objetivo de este trabajo es evaluar los efectos de gradientes de temperatura uniformes y lineales a que están expuestos los puentes semi-integrales de CR tradicionalmente construidos en México. Para alcanzar el objetivo se estudia un puente con longitud de 150 m y 20 m de altura, con superestructura conformada por una losa de concreto reforzado apoyada sobre un conjunto de vigas que descansan en una subestructura compuesta por una pila de CR de una sola columna. Mediante un análisis estadístico se determinan las temperaturas máximas extremas promedio que se han presentado en los últimos 30 años, lo que permitió evaluar los gradientes de temperatura uniforme y lineal esperados en los doce meses de un año. Los efectos de la temperatura se estudian tanto en la superestructura como en el resto de elementos estructurales que conforman la subestructura. El análisis de resultados nos permite concluir que los efectos de temperatura en puentes semi-integrales aumentan los desplazamientos y esfuerzos horizontales en los estribos y pilas, lo cual se refleja en las presiones pasivas a que está sujeto el suelo detrás de los estribos, por lo que es importante considerar los efectos por temperatura en la respuesta global de puentes semi-integrales.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han comenzado a construir puentes semi-integrales (PSI) de CR en varios países, principalmente en los más desarrollados tecnológicamente. México no es la excepción, ya que en los últimos años se ha optado por este tipo de estructuras. Los PSI se construyen con losas de CR continuas y con juntas de dilatación ubicadas solamente en sus extremos, es decir, en la conexión superestructura-estribo, lo que representa el caso más simple de los puentes tipo semi-integral. Como resultado, se tiene un comportamiento estructural más complejo con respecto al comportamiento de los puentes convencionales que se han construido en la República Mexicana desde 1910, ya que en estos puentes la superestructura se encuentra simplemente apoyada en la subestructura por medio de apoyos de neopreno, los cuales transfieren las cargas y movimientos.

Los PSI de CR al tener la losa de CR continua entre varios tableros genera dilatación y contracción del material ante los efectos por temperatura, ya que al estar el puente expuesto a la radiación solar durante el día, se incrementa su energía cinética promedio de las partículas que lo constituyen, en consecuencia la superestructura aumenta su dimensión longitudinal, transfiriendo esfuerzos y desplazamientos horizontales secundarios por temperatura a los estribos en el caso de existir alguna restricción al desplazamiento longitudinal de la superestructura. Para el caso en que la temperatura

ambiental disminuye durante el transcurso de la noche, la energía cinética de las partículas disminuye por lo que la superestructura se contrae. Los esfuerzos por temperatura generan presiones pasivas durante la dilatación de la superestructura, es decir, los estribos se desplazan horizontalmente ejerciendo presiones sobre el suelo detrás del mismo; estas presiones generalmente no son consideradas en el diseño de puentes simplemente apoyados. Mohamed y Col. (2018) mencionan que las presiones pasivas en estribos de PSI son función de la longitud del puente, del fenómeno cíclico de cambio de temperatura, tipo de estribo y de la rigidez del suelo detrás de los estribos. Además, los autores sugieren que la presión del suelo en reposo puede considerarse en los estribos integrales o completamente conectados a la superestructura, pero sin considerar el efecto de temperatura.

Por lo tanto, es importate considerar los efectos por temperatura en los PSI de CR, ya que su dilatación genera esfuerzos secundarios en los estribos y por consiguiente en el suelo de relleno, además es importante resaltar que la distribución de esfuerzos térmicos no es la misma en todos los puentes, ya que depende del tipo de orientación hacia el sol, geometría del puente, conectividad entre la superestructura-estribo, grado de exposición del puente y condiciones ambientales. Los efectos por temperatura influyen desde el inicio de la construcción de este tipo de estructuras, por lo que omitirlos durante esta etapa puede ser muy perjudicial para su desempeño estructural, ya que se puede presentar agrietamiento en sus elementos estructurales, lo cual implica una reducción de rigidez del sistema. Zhiyuan y Col. (2025) indican que los puentes en general experimentan distribuciones de temperatura desiguales en todos sus elementos estructurales, debido al grado de exposición al sol, temperatura ambiental, calor generado durante la hidratación del concreto y los constantes cambios de temperatura a lo largo del año y de su periodo de vida útil, dando lugar a efectos de temperatura complejos. Mencionan que los efectos por temperatura representan un riesgo a la estabilidad estructural de puentes principalmente en puentes construidos en voladizo. En el caso de puentes continuos curvos o viaductos con vigas en la superestructura, las deformaciones mayores se presentan en la parte externa de la curva radial del puente, por lo que la magnitud de las reacciones en los apoyos es desigual y aumenta la probabilidad de volcamiento de las vigas. Los autores mencionan que no existen reglamentos actuales que proporcionen de manera unificada una metodología para considerar los efectos por temperatura en puentes desde el inicio y hasta el fin del proceso constructivo.

En el caso de los PSI ante efectos por temperatura es importante considerar el tipo de suelo detrás de los estribos, así como el grado de compactación y su rigidez, ya que sí se coloca un suelo muy blando o muy deformable, los estribos experimentaran mayores desplazamientos horizontales y rotaciones ante el efecto de las presiones pasivas, no es recomendable colocar este tipo de suelo debido a la incertidumbre que existe en calcular la distribución de presiones que ejerce sobre el estribo, generalmente se recomienda colocar un suelo granular. Mohamed y Col. (2018) mencionan que a medida que se incrementa la temperatura en la superestructura del puente, se incrementan las presiones pasivas de manera no lineal y las fuerzas axiales en los elementos estructurales ante efectos térmicos. Entre mayor sea la rigidez del suelo detrás de los estribos, mayor es la presión pasiva, dado que le es más difícil desplazarse al estribo de manera longitudinal. Las etapas iniciales de construcción deben evaluarse cuidadosamente ante los efectos por temperatura, al igual que el tipo de cimentación de los estribos, ya que, dependiendo del tipo de suelo y condiciones topográficas del sitio, es posible construir una cimentación superficial o una profunda.

Para considerar los efectos por temperatura en PSI es necesario calcular las temperaturas ambientales promedio máximas y mínimas extremas en la región de construcción de este tipo de estructuras, con la finalidad de calcular el gradiente térmico. Generalmente se presentan gradientes uniformes por temperatura, gradientes lineales y no lineales. Dada la longitud de los PSI en comparación con su ancho de calzada, los efectos térmicos solamente se analizan en su sentido longitudinal, ya que es de interés la transferencia de esfuerzos secundarios térmicos hacia los estribos. Krkoška y Moravčík (2015) indican que se han realizado investigaciones sobre los efectos de temperatura en puentes principalmente en Estados Unidos y China, pero muy pocas han sido en puentes europeos. Hacen énfasis en la consideración de las cargas térmicas en puentes semi-

integrales e integrales, principalmente en puentes presforzados construidos por el método de voladizos sucesivos. Ya que sí la dilatación de la superestructura es restringida, se generarán esfuerzos térmicos, los cuales pueden ocasionar agrietamientos en los elementos estructurales y en consecuencia dejar expuesto al acero de refuerzo y que probablemente se presente corrosión. Los efectos por temperatura están en función de la orientación del puente, ubicación, material de construcción, geometría, dimensiones del puente y la superficie de rodamiento.

Los PSI presentan diversas ventajas con respecto a sus movimientos longitudinales ocasionados por efectos por temperatura, como lo es la libertad de moverse de manera longitudinal, ya que la superestructura no se encuentra conectada a la subestructura de manera rígida, sino que se encuentra simplemente apoyada. Además, es importante considerar los ciclos de deformaciones por efectos térmicos a lo largo de su etapa constructiva, ya que debido a la dilatación y contracción de sus elementos estructurales es posible que se generen agrietamientos, así como oquedades en el suelo detrás de los estribos como efecto de las presiones pasivas. Silva y Col. (2025) realizaron un análisis por temperatura del sistema estribo-superestructura de un PSI localizado en Texas, considerando la variación anual de la temperatura durante cincuenta años. Concluyendo que los mayores asentamientos en el suelo detrás de los estribos fueron en verano durante su etapa de construcción y los menores asentamientos se produjeron en invierno, siendo esta estación la mejor para construir y completar la construcción de este tipo de estructuras. El aumento de la temperatura en los ciclos condujo a mayores presiones pasivas sobre los estribos, todos los ciclos de temperatura involucran a largo plazo una acumulación de deformaciones en el suelo detrás de los estribos. Sugiriendo que, en puentes de longitud total corta, el suelo detrás de los estribos tiene una mayor posibilidad de experimentar asentamientos por efecto de los desplazamientos longitudinales en comparación con puentes con longitud total mucho más grande, ya que los asentamientos son menos dependientes del desplazamiento longitudinal de la superestructura por efectos de temperatura.

EFECTOS POR TEMPERATURA

Los efectos por temperatura en el PSI de CR en estudio, se evalúan considerando la temperatura uniforme en toda la sección transversal de la superestructura y la variación lineal de temperatura a lo largo del peralte de la superestructura (gradiente lineal de temperatura) con las siguientes hipótesis: a) la temperatura ambiental es la misma que la temperatura del PSI en estudio, b) no se consideran los efectos de la superficie de rodamiento respecto a la entrada de energía al sistema, c) el gradiente uniforme considera la misma temperatura en toda la sección transversal y longitudinal de la superestructura y d) el gradiente lineal de temperatura considera solamente la variación de temperatura a lo largo del peralte de la superestructura. Los efectos por temperatura descritos se representan matemáticamente por las ecuaciones 1 y 2:

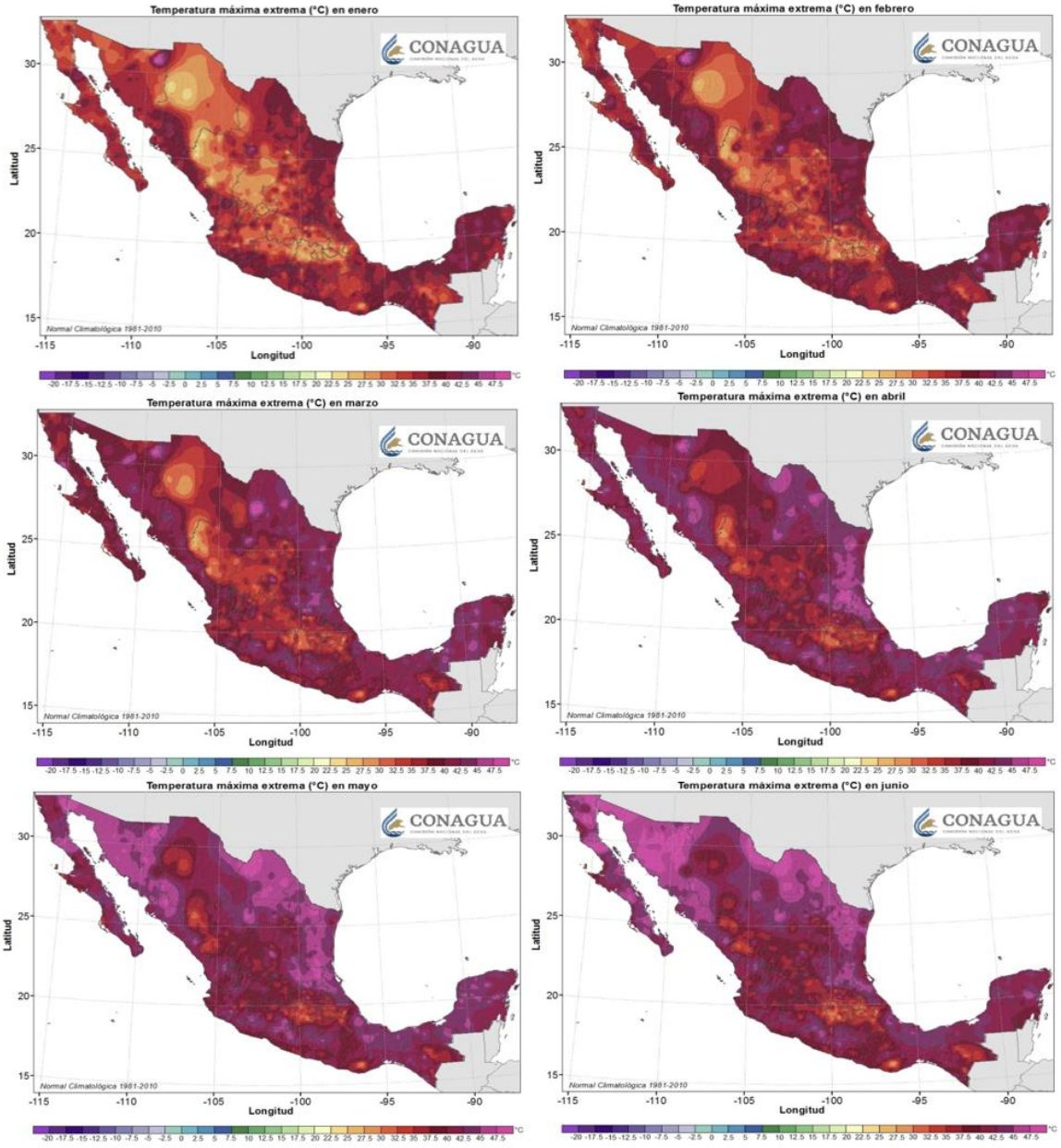
$$\boldsymbol{\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M = \frac{E \cdot \mathrm{I} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{h}} \tag{2}$$

DEMANDA TÉRMICA CONSIDERADA

Para evaluar los efectos por temperatura en el PSI en estudio es necesario calcular las temperaturas máximas extremas presentes en el Estado de Michoacán durante todos los meses del año, ya que con el fin de evaluar la variación de los esfuerzos y desplazamientos longitudinales que experimenta el PSI de CR con el cambio de estaciones en el año. En México la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) es la dependencia federal encargada de publicar la distribución de las temperaturas máximas extremas que se presentan en el país, esta cuenta con registros durante el periodo de 1981

y hasta el 2010, como se muestra en la Figura 1. Esta información se obtiene a partir de las diferentes estaciones climatológicas con que se cuenta en el país, incluyendo el Estado de Michoacán.



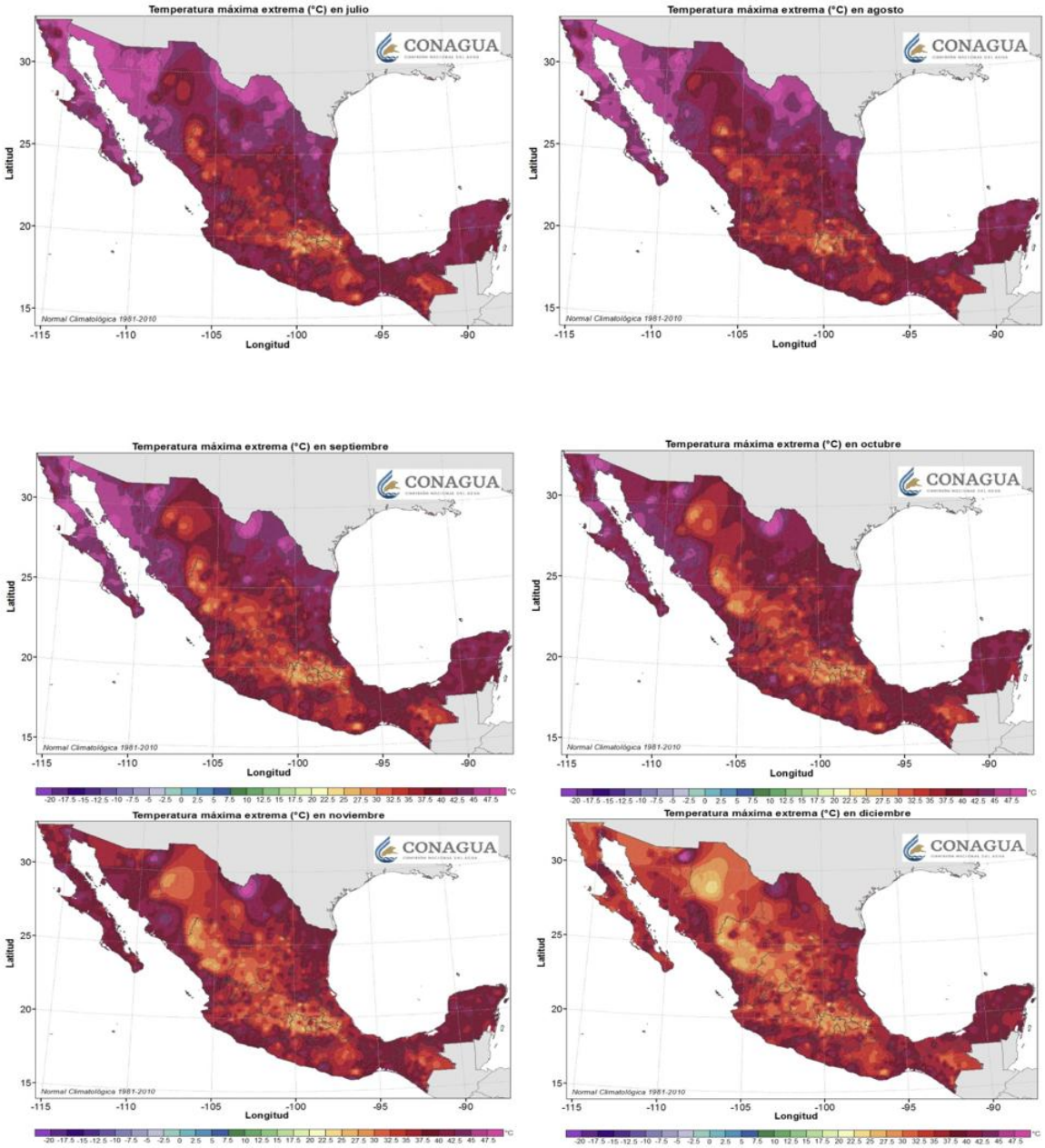


Figura 1 – Temperaturas máximas extremas promedio correspondiente al periodo de 1981-2010 (Tomada de CONAGUA).

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NÚMERICO

La Figura 2 representa el modelado numérico del puente analizado en este trabajo. El puente consta de cinco claros con longitud de 30 m, lo que lleva a una longitud total de 150 m. El ancho de los tableros es de 10.6 m que está conformado por siete vigas AASHTO I tipo IV con separación centro a centro de 1.4 m y longitud de 30 m. La losa de concreto reforzado presenta un espesor de diseño de 0.2 m, siendo totalmente continua en su longitud, es decir, no tiene ninguna junta de dilatación en su longitud. La subestructura está formada por dos estribos de concreto reforzado tipo alero abierto a 45° con altura de 5.3 m y ancho de 1 m, los tableros se encuentran simplemente apoyados en una pila tipo marco formada por una columna circular de concreto reforzado con un diámetro de 1.6 m y

altura de 20 m. La infraestructura se compone de losas de cimentación superficiales de concreto reforzado con un 1 m de espesor para los estribos, mientras que en las pilas se tienen 2 m de peralte.

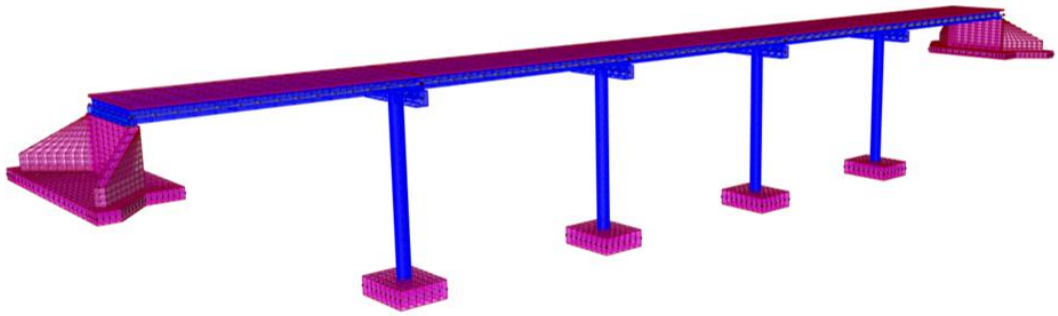


Figura 2 – Modelo numérico en el programa SAP2000 V26 (CSI,2000) del puente sometido a efectos por temperatura.

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL CONDIERANDO EFECTOS POR TEMPERATURA

Con base en los mapas de temperatura extrema, en la Tabla 1 se calculan las temperaturas máximas extremas promedio en el municipio de Lázaro Cárdenas perteneciente al Estado de Michoacán para cada mes del año, así como su gradiente uniforme y gradiente lineal de temperatura. El peralte de la superestructura en estudio es de 1.55 m.

Tabla 1 – Temperaturas máximas extremas, gradiente uniforme y lineal por mes, para un periodo de 1981-2010.

Mes	Temperatura Máxima Extrema °C	Gradiente uniforme °C (TU)	Gradiente lineal (°C/cm) (TG)
Enero	32.5	32.5	0.21
Febrero	33	33	0.21
Marzo	38	38	0.25
Abril	40	40	0.26
Mayo	42.5	42.5	0.27
Junio	39.5	39.5	0.25
Julio	38.5	38.5	0.25
Agosto	38	38	0.25
Septiembre	37.5	37.5	0.24
Octubre	36.5	36.5	0.24
Noviembre	34	34	0.22
Diciembre	32.5	32.5	0.21

Se evalúa la variación de los desplazamientos en cada una de las pilas del PSI ante efectos por temperatura, así como los desplazamientos en los apoyos de neopreno y los esfuerzos principales promedio en la parte superior de los estribos. La temperatura máxima extrema se presenta en el mes de mayo, en consecuencia, en este mes se presentan los mayores gradientes uniformes y lineales de temperatura. Los gradientes mínimos de temperatura uniforme y lineal se presentan en el inicio y final del año. Por lo tanto, los desplazamientos horizontales mayores por efectos de temperatura

uniforme y lineal en las pilas se presentan en el mes de mayo, mientras que los menores se registran en los meses de enero y diciembre. La Figura 3 muestra la identificación de las pilas del puente en estudio que se utiliza como referencia para reportar y discutir los resultados. Las Figuras 4 y 5 resumen la variación de los desplazamientos a que están sujetas las pilas a lo largo del año, asumiendo una variación uniforme (Figura 4), o un gradiente lineal de temperatura; los resultados muestran que las pilas extremas, pilas 1 y 4, son las que tienen un mayor desplazamiento horizontal por efecto del cambio de temperatura uniforme, mientras que en el caso de asumir un gradiente lineal de temperatura (Figura 5), la pila 4 es la que se encuentra sujeta a las mayores demandas de desplazamiento horizontal en el año, esto se debe a la flexión cóncava que experimenta la superestructura. Es claro que los desplazamientos horizontales son pequeños, debido a que los apoyos de neopreno absorben los movimientos de la superestructura inducidos por los efectos térmicos.

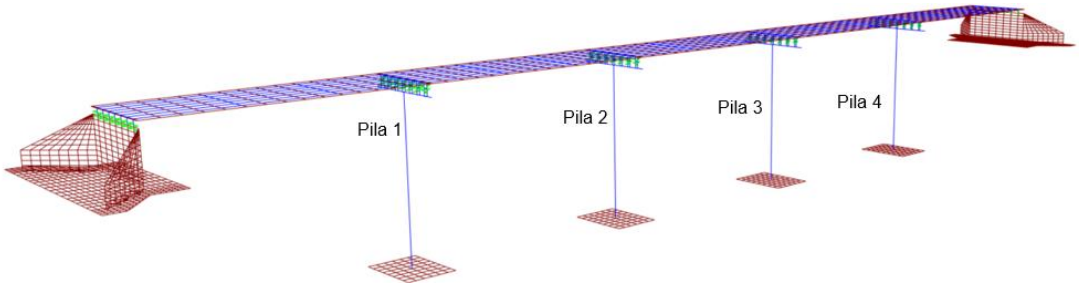


Figura 3 – Numeración de las pilas del puente semi-integral en estudio.

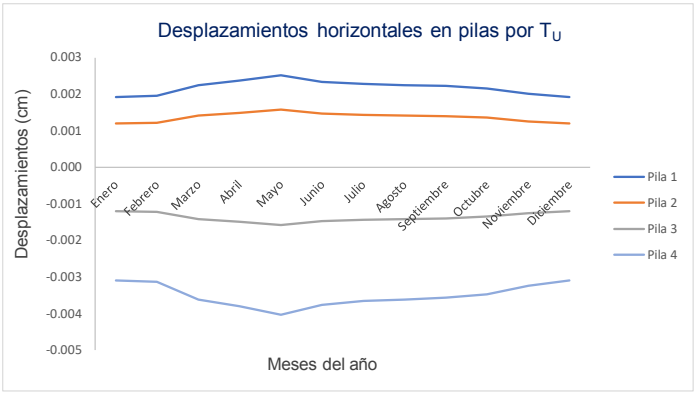


Figura 4 – Desplazamientos horizontales en las pilas ante efectos de temperatura uniformes.

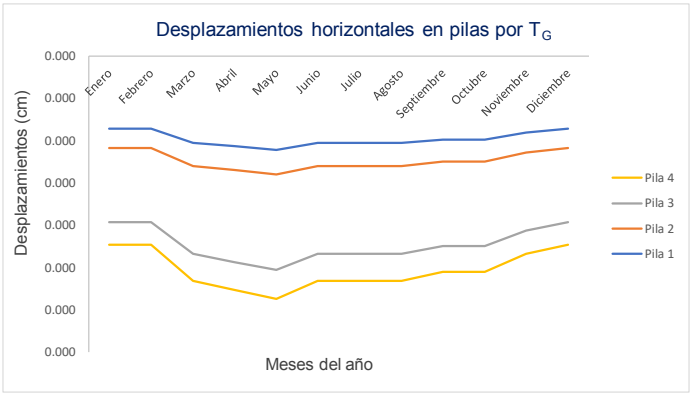


Figura 5 – Desplazamientos horizontales en las pilas ante gradientes lineales de temperatura.

En las Figuras 4 y 5 se observa que los efectos de temperatura uniforme son los que mayores desplazamientos horizontales ocasionan en las pilas con respecto a los gradientes térmicos lineales, lo cual se debe a que esta hipótesis asume que la superestructura está expuesta a la misma temperatura en toda su longitud y sección transversal, por lo que solamente el puente sufre dilatación longitudinal. En el caso de los gradientes lineales de temperatura, la superestructura experimenta flexión cóncava, induciendo así menores desplazamientos longitudinales en las pilas. Debido a que la losa de concreto es continua en su longitud de claro, es decir, no existen juntas de dilatación intermedias más que en la interfaz superestructura-estribos, los movimientos generados por los efectos de temperatura los toman totalmente los apoyos de neopreno localizados entre la losa y pilas y estribos. En consecuencia, los apoyos de neopreno que se localizan en los estribos experimentan desplazamientos horizontales que permiten la redistribución de los movimientos de la superestructura, así como la disipación de energía, que finalmente es la función para la que son diseñados estos elementos. Como se observa en las Figuras 6 y 7, los mayores desplazamientos horizontales en los apoyos de neopreno se localizan en los estribos para el mes de mayo, para ambos casos de temperatura, temperatura uniforme y gradientes lineales de temperatura. Los apoyos de neopreno extremos experimentan mayores desplazamientos horizontales en ambos casos debido a las deformaciones que experimenta la losa en voladizo, presentándose una mejor distribución de desplazamientos en los apoyos de neopreno internos a causa de la continuidad de la superficie de rodamiento. De igual forma que, en el caso de los desplazamientos horizontales en las pilas, los desplazamientos en los apoyos de neopreno son mayores ante los efectos por temperatura uniformes que asumiendo el gradiente lineal.

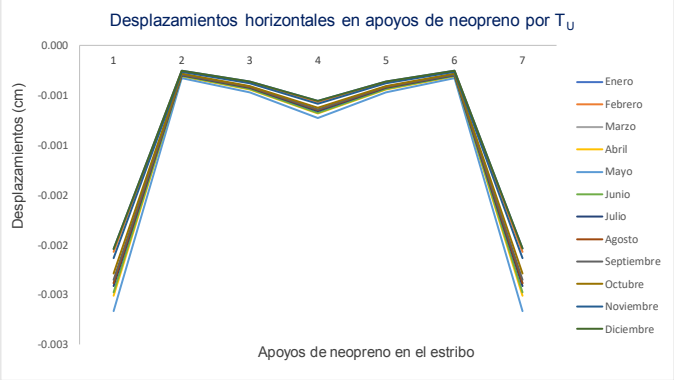


Figura 6 – Desplazamientos horizontales en los apoyos de neopreno localizados en los estribos ante efectos de temperatura uniforme.

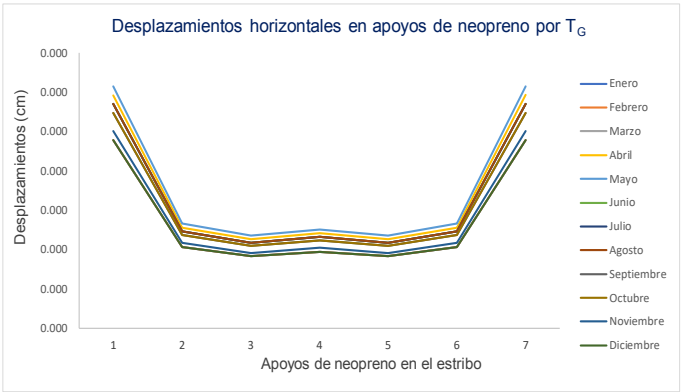


Figura 7 – Desplazamientos horizontales en los apoyos de neopreno localizados en los estribos ante gradientes lineales de temperatura.

Debido a la continuidad de la losa de CR, es necesario revisar los esfuerzos principales que se transmiten de la superestructura a los estribos, así como los esfuerzos generados en la losa. Para este caso solamente se muestra la distribución de esfuerzos principales por efectos de temperatura uniforme y lineal para el mes de mayo y enero, que son los meses con mayor y menor temperatura máxima extrema, por lo tanto, es donde se generan los máximos y mínimos esfuerzos principales en los diferentes elementos del PSI en estudio, respectivamente. Las Figuras 8-11 presentan la distribución de esfuerzos principales en el PSI al estar expuestos a las temperaturas máxima y mínima esperadas en el año, en los resultados se observan concentraciones de esfuerzos en la losa a nivel del estribo, debido a la ausencia de la junta de dilatación, por lo que no existe disipación de energía. Los esfuerzos principales son mayores ante los efectos por temperatura uniforme que en comparación con los gradientes lineales térmicos, tanto en la losa a nivel del estribo, como en los estribos. Los esfuerzos principales en los estribos son menores y no afectan la integridad estructural de los estribos, dado que los apoyos de neopreno absorben los desplazamientos generados por efectos de temperatura.

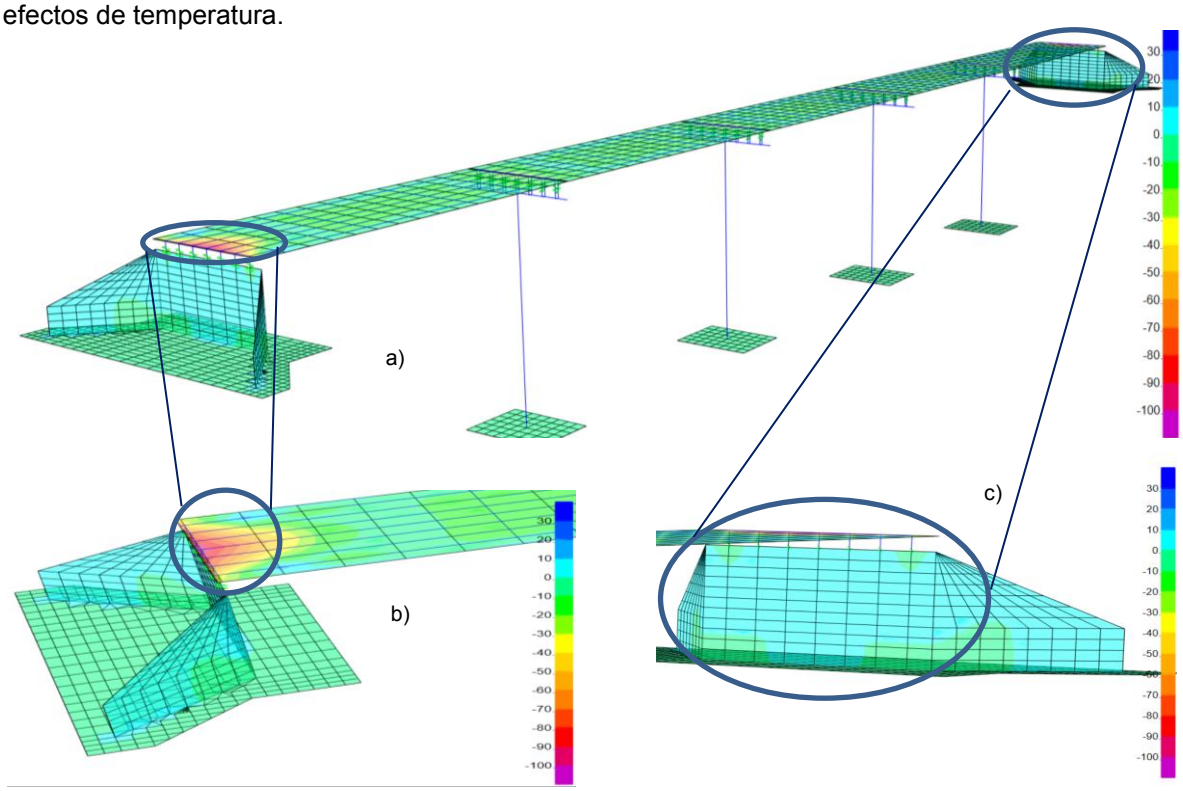


Figura 8 – Esfuerzos (kg/cm^2) por temperatura uniforme para el mes de mayo: a) puente en estudio, b) concentración de esfuerzos principales en la losa y c) esfuerzos principales en los estribos.

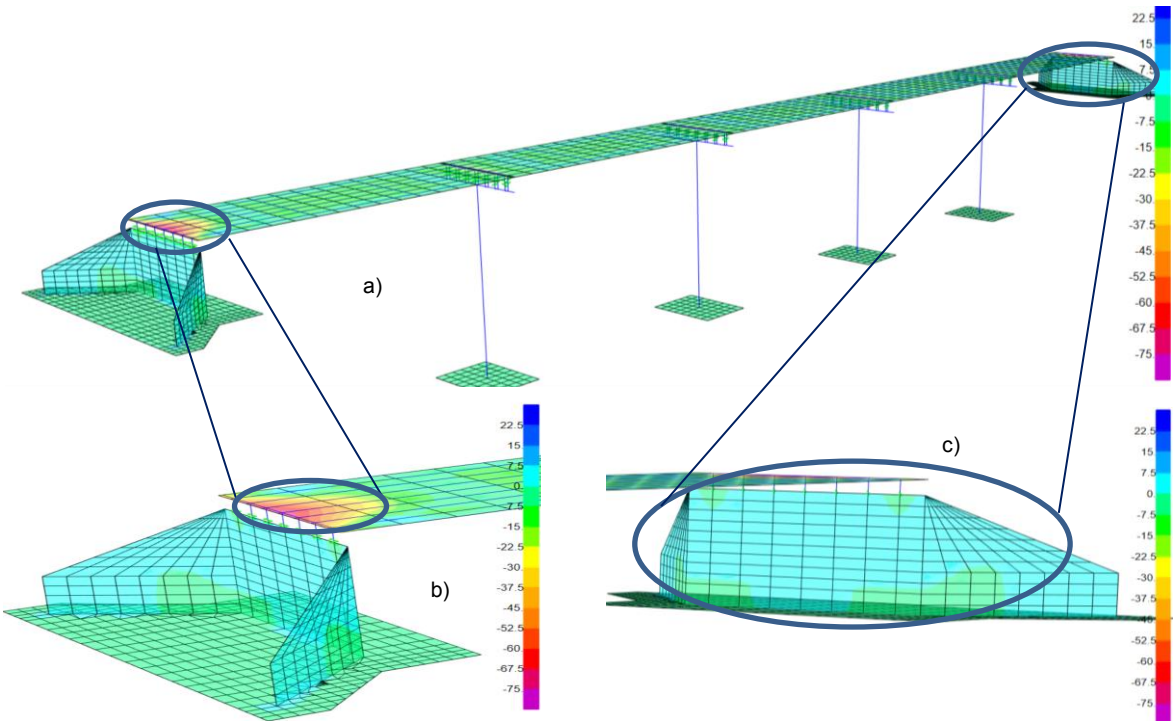


Figura 9 – Esfuerzos (kg/cm^2) por temperatura uniforme para el mes de enero: a) puente en estudio, b) concentración de esfuerzos principales en la losa y c) esfuerzos principales en los estribos.

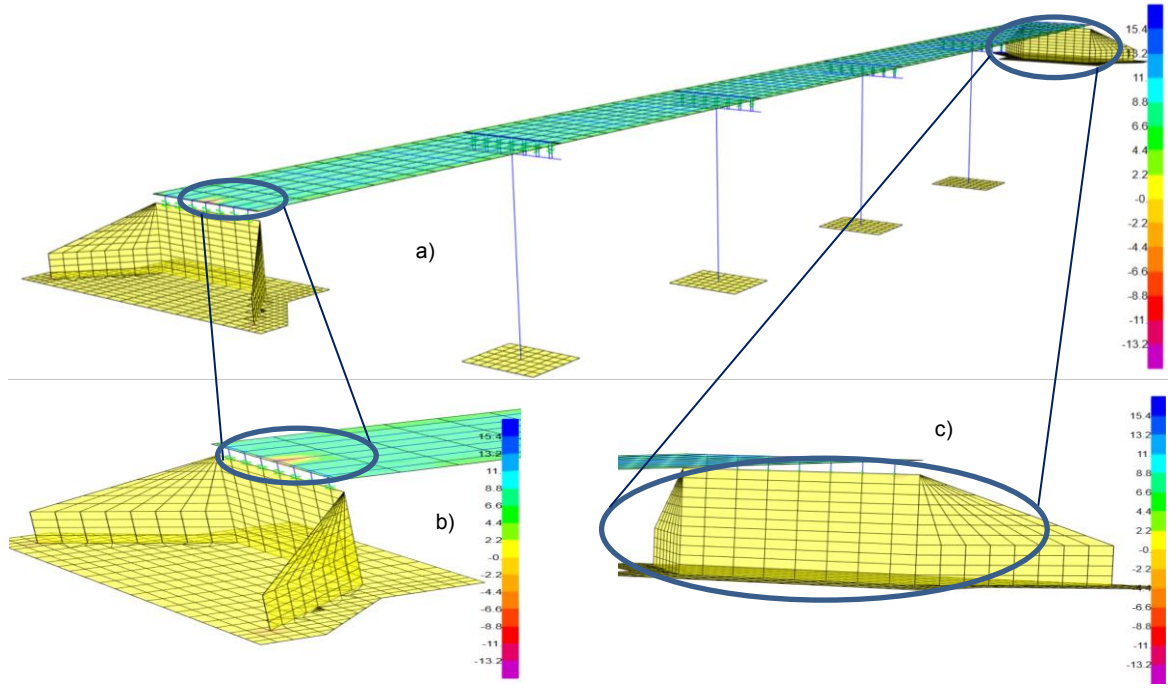


Figura 10 – Esfuerzos (kg/cm^2) por gradiente lineal de temperatura para el mes de mayo: a) puente en estudio, b) concentración de esfuerzos principales en la losa y c) esfuerzos principales en los estribos.

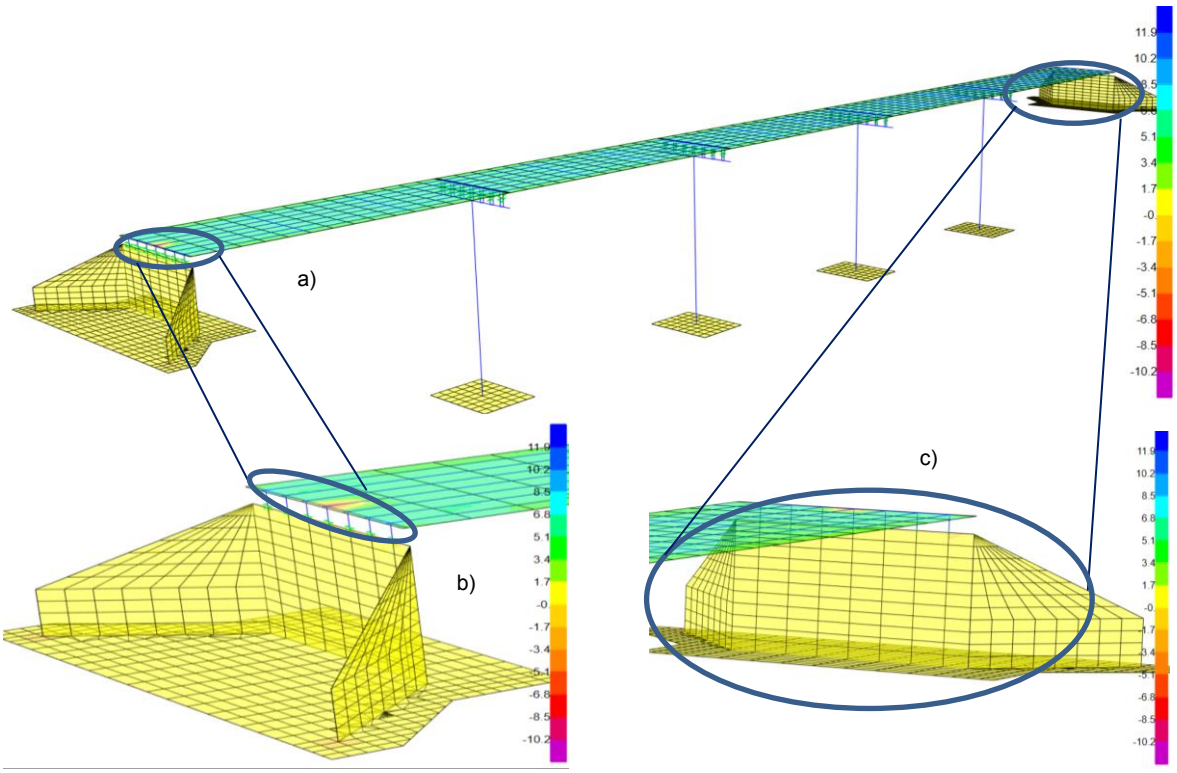


Figura 11 – Esfuerzos (kg/cm^2) por gradiente lineal de temperatura para el mes de enero, a) puente en estudio, b) concentración de esfuerzos principales en la losa y c) esfuerzos principales en los estribos.

CONCLUSIONES

La variación de los efectos por temperatura en PSI de concreto reforzado, donde la losa es continua, es decir no tiene juntas de dilatación intermedia más que en la interfaz losa-estribo, son una excelente opción para construir en México, ya sea como estructuras nuevas o para modernizar los puentes simplemente apoyados existentes. Ya que los efectos por temperatura, sean del tipo gradiente uniforme o gradiente lineal, no ocasionan desplazamientos horizontales significativos en los estribos, pilas y apoyos de neopreno, los cuales, los toman los apoyos de neopreno. Se presentan concentraciones de esfuerzos principales en las zonas de la losa donde deberían colocarse las juntas de dilatación, siendo mayores en el caso del gradiente uniforme; por lo que se debe revisar adecuadamente el diseño de la losa, principalmente para que no se presenten agrietamientos o levantamientos de la misma. Se debe prestar atención especial en la interfaz losa-estribo o losa-losa de acceso, ya que es el lugar en donde se presentan los máximos esfuerzos principales con variación importante a lo largo del año, y por lo tanto en la vida útil del PSI, estas variaciones cíclicas pueden ocasionar agrietamientos severos en las losas. Debido que los desplazamientos horizontales de los estribos son casi insignificantes, las presiones pasivas que se generan se pueden despreciar, siempre y cuando los estribos presenten un comportamiento rígido ante los efectos térmicos, ya que es importante mencionar que tanto en los PSI como en puentes convencionales actúan otros tipos de acciones externas, como son: terremotos, viento, frenado vehicular, entre otras. Es importante considerar los efectos por temperatura en el diseño de los apoyos de neopreno, ya que estos se encargan de acomodar los movimientos de la superestructura a causa del efecto de dilatación por cambios de temperatura. En la República Mexicana existe una gran cantidad de puentes convencionales donde las juntas de dilatación se encuentran en muy malas condiciones, por lo que representan un peligro para su integridad estructural y para los usuarios, por lo que es recomendable eliminar las juntas de dilatación brindando continuidad a la superficie de rodamiento. Esta acción no modifica significativamente a la subestructura ante acciones térmicas, por el contrario, se provee

mayor protección a los elementos estructurales de la subestructura, además de que los usuarios experimentan una mayor comodidad al transitar en los PSI. Es recomendable hacer investigaciones más detalladas sobre el comportamiento de los PSI e integrales ante efectos por temperatura y acciones sísmicas, con el objetivo de contar con mejores conocimientos respecto a su desempeño estructural, además de que puede incentivarse la modernización de puentes convencionales a PSI, así como a la construcción de nuevos PSI, ya que en países desarrollados se construyen con mayor frecuencia debido a que han observado un mejor comportamiento estructural y menores costos de mantenimiento con respecto de los puentes convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. CONAGUA, “Mapas de climatología 1981-2010”, Gobierno de México.,2025 https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010
2. L. Krkoška, M. Moravčík,” The analysis of thermal effect on concrete box girder bridge”, Procedia Engineering., Vol. 111, 2015, pp. 470-477.
3. M. Zhiyuan, Y. Liu, L. Jiang, L. Yi “Mitigation of thermal effects in bridges: A comprehensive review of control methodologies”, Journal of Traffic and Transportation Engineering., Vol.12,2,2025, pp. 215-235.
4. P.H.S. Silva, Y.D.J. Costa, C.M.L. Costa, J.G. Zornberg,” Parametric Analysis of the Long-Term Response of a Semi-Integral Bridge Abutment under Cyclic Thermal Movements”, Journal of Bridge Engineering”., Vol. 30,5,2025.
5. T. Mohamed, F. Abdel, T. Tarek, H. Amr, “Nonlinear Finite-Element Analysis of Integral Abutment Bridges due to Cyclic Thermal Changes”, Journal of Bridge Engineering., Vol.23,2,2018.
6. T. Mohamed, F. Abdel, T. Tarek, H. Amr, “Behavior of Integral Frame Abutment Bridges Due to Cyclic Thermal Loading: Nonlinear Finite-Element Analysis”, Journal of Bridge Engineering., Vol.23,2,2018.

BIOPLÁSTICOS FÚNGICOS MODIFICADOS CON ETILENGLICOL: SÍNTESIS, PROPIEDADES Y APLICACIONES

Diana Stephanie Ocegueda Vega, Nelly Flores Ramírez, Salomón Ramiro Vásquez García, Marco Antonio Vilchis García.

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
nelly.flores@umich.mx

RESUMEN

La crisis ambiental derivada del uso extensivo de plásticos convencionales ha impulsado la búsqueda de alternativas más sustentables. En este contexto, los bioplásticos fúngicos, han emergido como una opción prometedora debido a su carácter biodegradable y a su producción a partir de residuos agroforestales. No obstante; para su implementación a gran escala, requiere mejorar sus propiedades estructurales y físicas mediante el uso de plastificantes que optimicen su flexibilidad, resistencia y estabilidad estructural. En la presente investigación, se empleó el hongo *Pleurotus ostreatus* junto con residuos agroforestales como olote, astillas y aserrín de encino para la producción de bioplásticos. El micelio de *P. ostreatus* se cultivó en agar papa dextrosa y posteriormente se inoculó en los sustratos seleccionados: M1 (olote), M2 (astillas) y M3 (aserrín). Los bioplásticos resultantes fueron tratados con etilenglicol al 30 % como plastificante, con el propósito de evaluar su efecto en la estructura molecular y en propiedades físico-químicas clave, tales como densidad, dureza Shore A y comportamiento hidrofóbico/hidrofílico. El análisis estructural evidenció un desarrollo de células hifales continuas y distribuidas aleatoriamente, lo que sugiere una matriz homogénea dentro del bioplástico. Desde un punto de vista químico, el análisis espectroscópico por FTIR confirmó la presencia de los principales componentes del micelio y la incorporación exitosa del etilenglicol, identificándose señales características de este plastificante, lo que indica su interacción con la matriz fúngica. En cuanto a las propiedades físicas, se observó un incremento en la densidad y la dureza Shore A con la adición de etilenglicol, lo que puede atribuirse a una mejor cohesión entre las estructuras hifales. Sin embargo, se registró un aumento considerable en la absorción de agua y una disminución del ángulo de contacto, lo que evidencia una mayor afinidad de los bioplásticos con el agua, atribuida al carácter hidrofílico del plastificante. Estos hallazgos evidencian que el uso de etilenglicol como plastificante mejora las propiedades físico-químicas de los bioplásticos fúngicos. No obstante, su afinidad por el agua podría influir en su estabilidad, por lo que es fundamental evaluar estrategias adicionales para optimizar su desempeño en aplicaciones industriales.

INTRODUCCION

En las últimas décadas, el desarrollo de bioplásticos ha surgido como una alternativa ecológica frente a los plásticos convencionales. Estos materiales, obtenidos a partir de recursos biológicos, representan una solución potencial frente a la contaminación plástica y sus efectos adversos en el medio ambiente. En particular, los bioplásticos derivados de hongos, han adquirido creciente interés debido a su biodegradabilidad, bajo costo y versatilidad para ser aplicados en diversos sectores productivos (1). El micelio, con su estructura filamentosa, ramificada y flexible, tiene la capacidad de formar materiales con propiedades mecánicas ajustables, dependiendo del sustrato, las condiciones de cultivo y los aditivos utilizados (2). El interés en el micelio como matriz de biomateriales radica no solo en su origen renovable, sino en su capacidad para colonizar residuos agrícolas y forestales, transformándolos en estructuras cohesivas de alto valor agregado (Fig. 1). Esta cualidad convierte a los hongos en herramientas biotecnológicas clave para el desarrollo de materiales funcionales dentro de un modelo de economía circular. Sustratos como olote de maíz, aserrín y astillas de encino se han empleado con éxito en la producción de micelio, aportando características estructurales únicas al material final y mejorando la eficiencia del cultivo sin recurrir a fuentes costosas o contaminantes.

Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas, uno de los desafíos técnicos más relevantes en el desarrollo de bioplásticos fúngicos es la optimización de propiedades críticas como la elasticidad, resistencia mecánica, estabilidad térmica y durabilidad en ambientes húmedos. Estas propiedades son esenciales para que los bioplásticos puedan competir funcionalmente con sus contrapartes derivados del petróleo, y para asegurar su desempeño en aplicaciones más exigentes como empaques, materiales de construcción, textiles o incluso usos biomédicos.

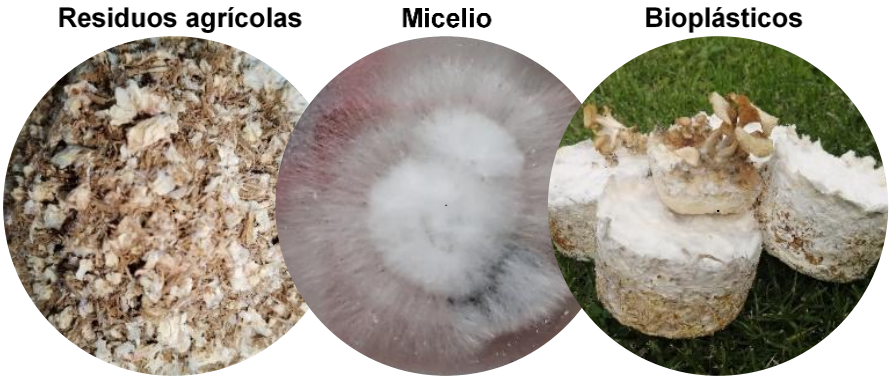


Figura 1. Bioplásticos producidos a partir de micelio fúngico y residuos agrícolas. Elaboración propia.

En este sentido, la incorporación de plastificantes en la matriz micelial se ha propuesto como una estrategia eficaz para mejorar la flexibilidad y procesabilidad del material. Tradicionalmente, aditivos como la glicerina han sido utilizados para esta finalidad. No obstante, el presente trabajo explora el uso del etilenglicol (EG), un alcohol dihidroxilado ampliamente utilizado en la industria de polímeros, como plastificante alternativo en la elaboración de bioplásticos fúngicos. Si bien el etilenglicol no ha sido previamente aplicado como plastificante en materiales miceliales, su eficacia comprobada en otros biopolímeros, como el almidón y la celulosa, lo posiciona como un candidato prometedor. El etilenglicol posee propiedades fisicoquímicas que favorecen su interacción con componentes poliméricos como β-glucanos, quitina y proteínas del micelio. Su inclusión puede disminuir las fuerzas intermoleculares dentro de la matriz, facilitando una mayor movilidad de las cadenas poliméricas y, en consecuencia, mejorando la ductilidad y flexibilidad del bioplástico sin comprometer su biodegradabilidad. Además, su bajo punto de ebullición y solubilidad en agua lo hacen fácil de manipular durante el proceso de fabricación. La propuesta de incorporar etilenglicol como plastificante en bioplásticos fúngicos representa una innovación metodológica con potencial para mejorar la calidad del producto final. Asimismo, se evalúa su efecto combinado con diferentes sustratos lignocelulósicos, como los mencionados residuos agroforestales, para identificar sinergias que fortalezcan la resistencia, estabilidad y funcionalidad del material. De este modo, el presente estudio no solo introduce un nuevo aditivo en el campo de los biomateriales fúngicos, sino que también aborda la sustentabilidad del proceso al utilizar subproductos naturales disponibles localmente, reduciendo el impacto ambiental y los costos de producción.

La investigación que se presenta tiene como objetivos principales: sintetizar bioplásticos fúngicos a partir de micelio cultivado en residuos agroforestales; modificar su matriz con etilenglicol; evaluar sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas; y explorar sus posibles aplicaciones. Este enfoque biotecnológico y multidisciplinario busca generar materiales innovadores que respondan a las exigencias de un mercado que demanda cada vez más soluciones sustentables, eficientes y adaptables.

TEORIA

El reino fungí y su relevancia en el desarrollo de bioplásticos

El reino Fungí comprende un grupo diverso de organismos eucariotas, tanto unicelulares (como las levaduras) como multicelulares (mohos y setas), que desempeñan un papel esencial en la

descomposición de materia orgánica. Estos organismos heterótrofos, con paredes celulares ricas en quitina, se reproducen por esporas y destacan por su rápida tasa de crecimiento y versatilidad metabólica (3). Estas características los convierten en candidatos ideales para el desarrollo de biomateriales sostenibles, como sustitutos del plástico, cuero y otros compuestos industriales de origen sintético o animal (2). En particular, los hongos filamentosos del grupo de los basidiomicetos, como *Pleurotus ostreatus*, generan una red micelial que puede cultivarse sobre residuos agrícolas y moldearse para producir materiales biodegradables.

El micelio, parte vegetativa del hongo, está compuesto por hifas que forman una estructura tridimensional porosa con propiedades mecánicas, térmicas y estructurales adecuadas para aplicaciones industriales (Fig. 2). La pared celular del micelio contiene diversos componentes bioquímicos que determinan sus propiedades funcionales. Entre ellos destacan:

- Quitina: polisacárido estructural similar a la celulosa, que aporta rigidez, resistencia y propiedades antimicrobianas. Su derivado, la quitosana, es más soluble y también biodegradable.
- Glucanos: principalmente β-1,3-glucano y β-1,6-glucano, que aportan flexibilidad y resistencia a la compresión, y forman una matriz junto con lípidos, melaninas y proteínas estructurales.
- Glicoproteínas: proteínas hidrofóbicas que modifican la interacción del material con el agua, influyendo en su comportamiento superficial y su grado de hidrofobicidad.

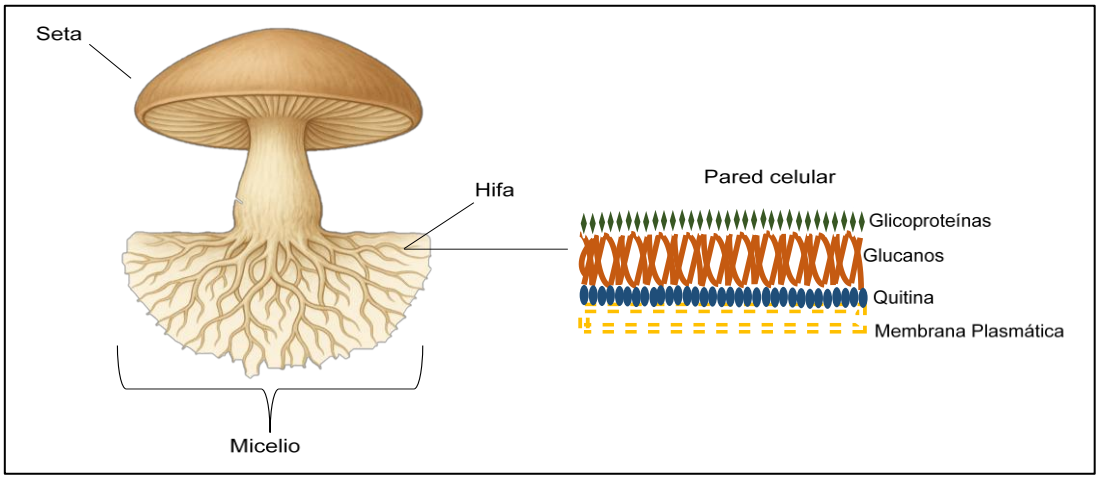


Figura 2. Componentes de la pared celular de los hongos. Elaboración propia

Además, la composición elemental del micelio (C, H, O, N) le confiere características compatibles con procesos de biodegradación. La naturaleza y estructura del sustrato de cultivo pueden afectar su densidad, porosidad, absorción de agua y apariencia final del bioplástico.

Selección del material inicial / sustratos orgánicos

El organismo formador de hongos (micelio), pueden crecer naturalmente sobre sustratos lignocelulósicos provenientes de residuos agroforestales, lo cual reduce el impacto ambiental tanto en la producción como en la disposición final del material. Los residuos lignocelulósicos más utilizados incluyen el bagazo de caña de azúcar, aserrín de madera, paja de trigo, cáscara de arroz, rastrojo de maíz, residuos de café, hojas de palma y virutas de bambú (4). Estos materiales contienen principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que sirven como fuente de carbono y soporte estructural para el crecimiento del micelio. Además, al tratarse de residuos de bajo costo y alta disponibilidad, permiten la producción descentralizada y accesible de materiales fúngicos. El aprovechamiento de estos residuos representa una estrategia de valorización de desechos agrícolas

y forestales, alineada con los principios de la economía circular. Como señalan Jatuwong et al., (5), la elección del tipo de residuo lignocelulósico incide directamente en la porosidad, densidad, resistencia al agua y tiempo de biodegradación del bioplástico fúngico, lo que permite diseñar materiales según requerimientos específicos.

Especies fúngicas utilizadas en la producción de bioplásticos

Diversas especies del Reino Fungí han sido empleadas en la elaboración de biomateriales, siendo las siguientes las más destacadas:

Ganoderma lucidum: también conocido como reishi, este hongo se ha utilizado por su capacidad para formar estructuras densas y resistentes. Su micelio es altamente cohesivo, lo que permite producir materiales con propiedades similares al cuero (6).

Pleurotus ostreatus: también conocido como hongo ostra por su peculiar forma de sombrero, esta especie es una de las más investigadas por su fácil cultivo, crecimiento rápido y tolerancia a diversos residuos lignocelulósicos. Su micelio es útil en la producción de empaques biodegradables y materiales aislantes (3) (7).

Trametes versicolor: también conocido como "cola de pavo", este hongo es importante por su capacidad de degradar lignina. Se ha explorado su uso para obtener materiales compuestos a partir de residuos agrícolas, así como para purificar sustratos antes de su uso en biomateriales (8).

La elección de la especie fúngica depende de factores como la disponibilidad, la velocidad de crecimiento, las propiedades mecánicas del micelio y la compatibilidad con los sustratos utilizados.

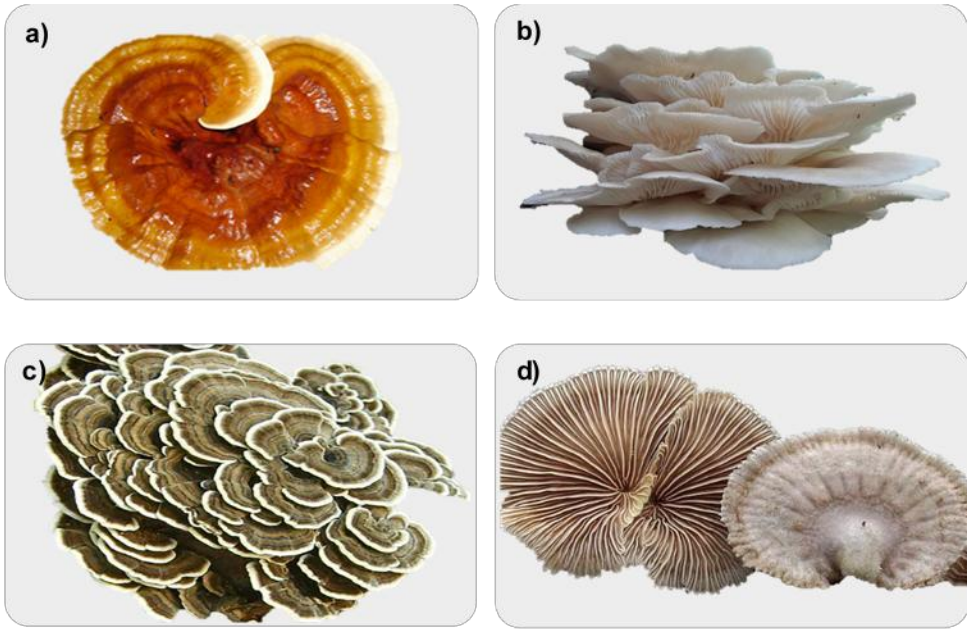


Figura 3. Especies fúngicas más utilizadas en el desarrollo de bioplásticos: a) *Ganoderma lucidum*, fuente:https://bahiablanca.conicet.gov.ar/boletin/boletin29/index5d2e.html, b) *Pleurotus ostreatus*, fuente: https://mexico.inaturalist.org/taxa/48496-Pleurotus, *c) Trametes versicolor*, Fuente: https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/trametes-versicolor , d) *Schizophyllum commune*, fuente: https://micoex.org/2016/09/17/schizophyllum-commune/.

Propiedades de los Bioplásticos Fúngicos

Los bioplásticos fúngicos son materiales innovadores que se obtienen a partir del micelio, y se están consolidando como una alternativa ecológica frente a los plásticos tradicionales derivados del petróleo. Una de sus principales propiedades es su biodegradabilidad, ya que pueden descomponerse de forma natural en semanas o meses sin dejar residuos tóxicos, lo que reduce el impacto ambiental de su uso (9).

Desde el punto de vista físico, estos bioplásticos presentan buena resistencia mecánica, especialmente a la compresión, y pueden moldearse fácilmente, aunque su resistencia puede ser inferior a la de los plásticos sintéticos (10). También destacan por su ligereza y su capacidad de funcionar como aislantes térmicos y acústicos debido a su estructura porosa. Otra propiedad importante es su compatibilidad ambiental: durante su producción y degradación no emiten sustancias tóxicas, lo que los hace seguros para el medio ambiente y para usos en sectores como el agrícola o alimentario. Sin embargo, presentan una impermeabilidad limitada, ya que tienden a absorber agua. Esta característica puede mejorarse mediante tratamientos o recubrimientos con sustancias naturales como ceras o biopolímeros (4).

Finalmente, una ventaja adicional es su versatilidad en el diseño, ya que pueden adaptarse a diferentes formas y texturas, e incluso mezclarse con pigmentos naturales o aditivos para obtener distintas propiedades visuales y funcionales.

Debido a estas características, los bioplásticos fúngicos se perfilan como una solución prometedora para sustituir materiales contaminantes en diversos sectores industriales.

Plastificantes utilizados en la producción de bioplásticos fúngicos

Los biomateriales fúngicos, presentan una estructura fibrosa y porosa que les otorga propiedades únicas como ligereza, biodegradabilidad y resistencia mecánica. Sin embargo, para mejorar su flexibilidad, durabilidad y procesabilidad, es común el uso de plastificantes durante o después del cultivo del micelio. Estos aditivos modifican las interacciones moleculares del material, reduciendo su fragilidad y permitiendo adaptaciones en su textura, resistencia al agrietamiento y elasticidad. En el caso de los bioplásticos fúngicos, los plastificantes deben ser compatibles con la matriz micelial, biodegradables y preferentemente de origen natural para mantener la sustentabilidad del producto final. En este contexto, los plastificantes más utilizados se muestran a continuación:

Glicerol: El glicerol es uno de los plastificantes más comunes debido a su alta compatibilidad con materiales de base biológica. Es un alcohol trihidroxilado que se mezcla fácilmente con la matriz micelial, permitiendo una distribución homogénea de la humedad y aumentando la flexibilidad del material (11).

Sorbitol y polioles: El sorbitol, un azúcar alcohol derivado de la glucosa, también se emplea como plastificante en composiciones miceliales, principalmente en láminas delgadas o películas. Al igual que el glicerol, facilita la retención de agua y mejora la maleabilidad. Otros polioles, como el manitol o el eritritol, han sido estudiados por su efecto en la mejora de la elasticidad de biomateriales fúngicos, aunque su eficacia depende del tipo de micelio y del método de secado (12).

Ácido cítrico: El ácido cítrico actúa como plastificante y también como agente reticulante, promoviendo la formación de enlaces cruzados entre las cadenas de polisacáridos del micelio. Esta doble función mejora la resistencia térmica del material y su durabilidad frente a la humedad, lo que es útil en aplicaciones como empaques o recubrimientos biodegradables (7).

Aceites vegetales: Ciertos aceites naturales, como el aceite de ricino o aceite de linaza, han sido explorados como plastificantes debido a su compatibilidad con matrices orgánicas. Aunque no son tan efectivos como los polioles en términos de flexibilidad, aportan propiedades hidrofóbicas al material, mejorando su resistencia al agua y a la descomposición prematura (8).

Etilenglicol: El etilenglicol (EG), o monoetilenglicol, es un alcohol dihidroxilado ampliamente utilizado como plastificante en polímeros sintéticos, debido a su capacidad para reducir la rigidez y aumentar la flexibilidad de las matrices poliméricas. Sin embargo, hasta la fecha, el etilenglicol no ha sido reportado como plastificante en la fabricación de biomateriales fúngicos. Dada las características químicas el etilenglicol ($HO–CH_2–CH_2–OH$) es un diol lineal de baja masa molecular que actúa principalmente como plastificante, es decir, un aditivo que reduce la rigidez y fragilidad del material polimérico. El etilenglicol se ha incorporado exitosamente en diversas formulaciones de bioplásticos, por ejemplo:

- Almidón termoplástico (TPS): Reduce la cristalización del almidón y mejora la homogeneidad de la mezcla.
- Ácido poliláctico (PLA): Aunque PLA es un polímero relativamente rígido y quebradizo, la adición de etilenglicol permite flexibilizarlo sin comprometer demasiado su resistencia mecánica.
- PVA (alcohol polivinílico): El etilenglicol mejora la tenacidad y reduce la pérdida de agua en materiales basados en PVA.

El etilenglicol presenta alta compatibilidad con polímeros hidrofílicos, como los derivados del almidón, celulosa, gomas naturales, gelatina y proteínas vegetales. Esta compatibilidad permite una buena dispersión del aditivo en la matriz polimérica, asegurando efectos plastificantes homogéneos. Además, es biodegradable en el ambiente en condiciones aerobias, pero su biodegradación depende de factores como la temperatura, la humedad y la actividad microbiana. Aunque su toxicidad es baja en sistemas controlados, en grandes concentraciones puede representar un riesgo ecológico para sistemas acuáticos. En aplicaciones biomédicas o alimentarias, se requieren grados de pureza específicos y evaluaciones toxicológicas rigurosas.

En esta investigación, se propone evaluar el etilenglicol como nuevo plastificante, considerando sus propiedades fisicoquímicas y su potencial para modificar las características mecánicas, térmicas y de hidratación de dichos materiales.

Aplicaciones

Por las propiedades como biodegradabilidad, baja densidad, resistencia mecánica ajustable y capacidad de crecer sobre residuos lignocelulósicos, los bioplásticos fúngicos encuentran aplicación en diversos sectores industriales y comerciales:

Empaques biodegradables
Empresas como Ecovative Design han desarrollado materiales de embalaje a base de micelio que sustituyen espumas de poliestireno en la protección de productos electrónicos, mobiliario o cosméticos (Fig. 4a). Estos empaques se degradan naturalmente en el suelo en pocas semanas, evitando la acumulación de residuos plásticos (13).

Materiales para construcción
En la industria de la construcción, los bioplásticos fúngicos se utilizan como paneles aislantes acústicos y térmicos, gracias a su estructura porosa y su resistencia al fuego (Fig. 4b). Estos materiales son livianos, reciclables y pueden cultivarse a la forma deseada en moldes, reduciendo el consumo energético en su fabricación (14).

Cuero fúngico y moda sostenible

Otra aplicación emergente es el desarrollo de "cuero vegano" a partir de micelio, una alternativa ecológica a los cueros animales y sintéticos (Fig. 4c). Este material, flexible y resistente, puede emplearse en la fabricación de ropa, calzado, bolsos y tapicería, con menor impacto ambiental y posibilidad de compostaje al final de su vida útil (15).

Agricultura y horticultura

Los bioplásticos fúngicos también se aplican en macetas biodegradables, bandejas de germinación y estructuras temporales para cultivos (Fig. 4 d,e) Al descomponerse en el suelo, estos productos enriquecen el sustrato y eliminan la necesidad de retiro o disposición posterior (16).

Aplicaciones biomédicas

En el campo biomédico, se investigan bioplásticos fúngicos para la fabricación de andamios para ingeniería de tejidos, apósitos, y dispositivos de liberación controlada de fármacos, debido a su biocompatibilidad, porosidad y capacidad de retención de humedad (Fig. 4f) (17). Estas aplicaciones aún se encuentran en fase experimental, pero muestran un alto potencial.

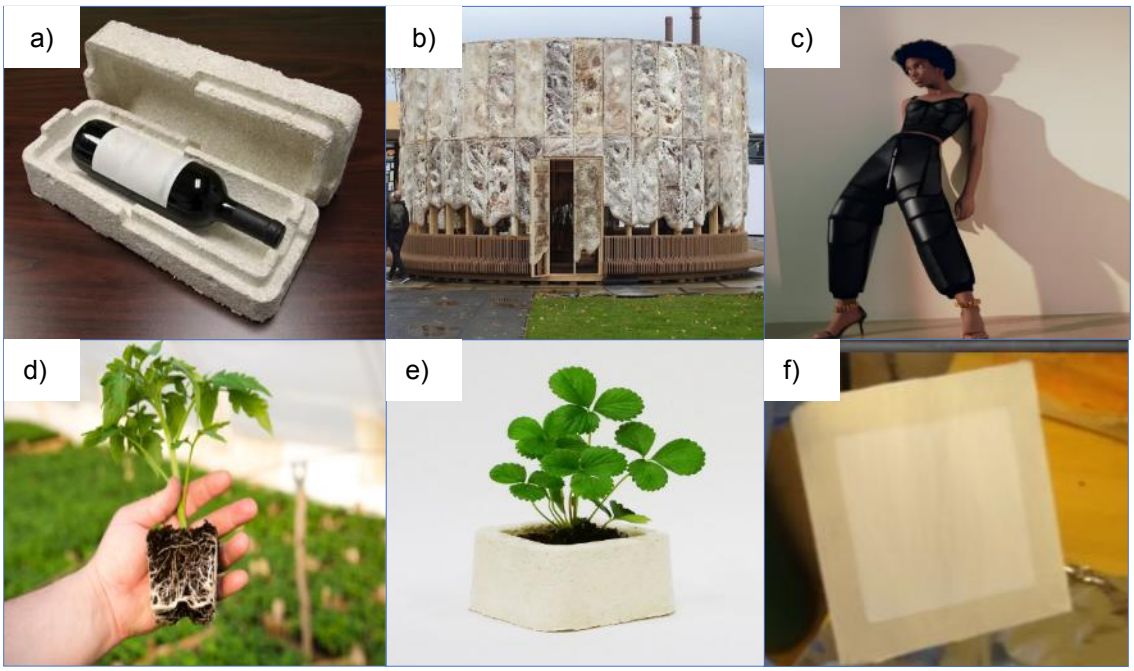


Figura 4. Aplicaciones de biomateriales Fúngicos: a) Embalaje, fuente: https://ecovative.com/ b) Construcción, fuente: https://arquitecturaviva.com/obras/the-growing-pavilion-eindhoven, c) moda ecológica, fuente: https://mx.fashionnetwork.com/news/Stella-mccartney-es-la-primera-marca-en-usar-una-alternativa-al-cuero-hecha-de-hongo-mylo-en-ropa,1288668.html, d) micorrizas en la agricultura, fuente: https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/04/25/uso-de-micorrizas-para-mejorar-la-produccion/ e) bandeja de hidroponía a base de hongo, fuente: https://www.gp-award.com/es/produkte/mycelium-products f) Biomaterial a base de hongo para aplicaciones médicas, fuente: https://ciqa.mx/BiomaterialesFibrosos.aspx.

Consideraciones futuras

A pesar de sus beneficios, el desarrollo de biomateriales fúngicos aún enfrenta desafíos técnicos y económicos. Uno de los principales obstáculos es la escalabilidad: producir grandes volúmenes de micelio con calidad homogénea requiere optimizar las condiciones de cultivo y automatizar procesos. Además, se necesitan normativas regulatorias claras que validen la seguridad y durabilidad de estos materiales en diversas industrias.

En términos de investigación, es esencial profundizar en el estudio genético y fisiológico de las especies utilizadas para identificar aquellas con mayor rendimiento, resistencia o adaptabilidad a distintos sustratos. Asimismo, la colaboración interdisciplinaria entre micólogos, ingenieros, diseñadores y empresarios será clave para consolidar al Reino Fungí como un pilar de la bioeconomía del futuro.

PARTE EXPERIMENTAL

Material inicial

- Hongo: *Pleurotus ostreatus*
- Sustratos: olotes de maíz, astillas y aserrín de encino
- Plastificante: Etilenglicol (EG)

Producción de bioplásticos

El experimento se diseñó utilizando tres tipos de sustratos: M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín. Los sustratos se prepararon ajustando el pH a 6.5, se hidrataron en agua y se esterilizaron. Posteriormente, en moldes cúbicos de 5 cm x 5 cm, se inoculó el micelio de *P. ostreatus* y se incubaron durante 30 días bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Al finalizar el periodo de incubación, los bioplásticos se desmoldaron y fueron sometidos a un proceso de secado a 60°C hasta alcanzar peso constante. Una vez obtenidos, los bioplásticos se recubrieron con una solución de etilenglicol al 30%, utilizado como plastificante. Para el análisis, se aplicó una capa uniforme del plastificante sobre toda la superficie del bioplástico, dejando reposar a temperatura ambiente durante 72 horas.

Caracterizaciones realizadas

Morfología por microscopia electrónica de barrido (MEB)
La morfología de los bioplásticos, con y sin plastificante de etilenglicol, fue analizada mediante MEB utilizando un equipo JEOL, modelo JSM-7600F, a un aumento de 2500x.

Densidad
La densidad se determinó por triplicado de acuerdo a la norma ASTM D 792-08, utilizando la siguiente formula: Densidad Kg/m^3 = masa / volumen.

Dureza Shore A
Por otra parte, la medición de dureza Shore A se llevó a cabo realizando las mediciones en 9 puntos diferentes en cada cara de las muestras cubicas, con un durómetro Shore A Positector SHD.

Ángulo de contacto
Se realizó una evaluación del ángulo de contacto para analizar la mojabilidad superficial, utilizando un tensiómetro óptico. Se aplicó una gota de agua ultrapura de 2,9 µl en cada una de las caras de las muestras cúbicas, de forma triplicada, y se registraron los valores promedio obtenidos. Durante la medición, se capturaron imágenes de la vista lateral de las gotas durante los primeros 10 segundos, y se utilizó el software AutoCAD 2020 para medir el ángulo de contacto.

Absorción de agua
Se determinó el porcentaje de absorción de agua por unidad de volumen, empleando la norma ASTM C272M-12 y utilizando la siguiente formula:

$$\text{Absorcion de agua por unidad de volumen } \frac{g}{cm^3} = \frac{W-D}{V} \text{ --------- Ec 1.}$$

Donde:
W = Masa de la muestra después de la inmersión en agua y secado, g
D = Masa de pre-inmersión de la muestra, g
V = volumen de la muestra cm^3

Caracterización química por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)
Se llevó a cabo el análisis de la estructura química de los bioplásticos utilizando un espectrómetro infrarrojo Perkin Elmer Spectrum 400, equipado con un accesorio de Reflectancia Total Atenuada (ATR). Este análisis abarcó un rango de 4000 a 650 cm^{-1}.

Diseño de experimentos
En los análisis físicos realizados densidad, dureza shore A, ángulo de contacto y absorción de agua, se realizó un diseño de experimentos de bloques dispersos al azar.

RESULTADOS

Morfología por MEB

Las imágenes obtenidas revelaron diferencias sustanciales en la microestructura dependiendo de la presencia o ausencia del plastificante (Fig. 6 a,b). En los bioplásticos sin etilenglicol, se observó una red micelial con hifas entrelazadas, formando ramificaciones irregulares sin un patrón uniforme, lo que dio lugar a una estructura amorfa y porosa. Esta morfología es típica en materiales compuestos fúngicos sin aditivos y ha sido reportada en estudios similares, donde la arquitectura abierta de las hifas favorece una menor densificación del material (9). Particularmente, los sustratos M1 (olote) y M3 (aserrín) favorecieron un mayor crecimiento del micelio, con estructuras más densamente entrelazadas y menor cantidad de vacíos interhifales. La microestructura más cerrada puede deberse a la composición química y la granulometría de estos sustratos, que proporcionan mejores puntos de anclaje y nutrientes para el desarrollo micelial.

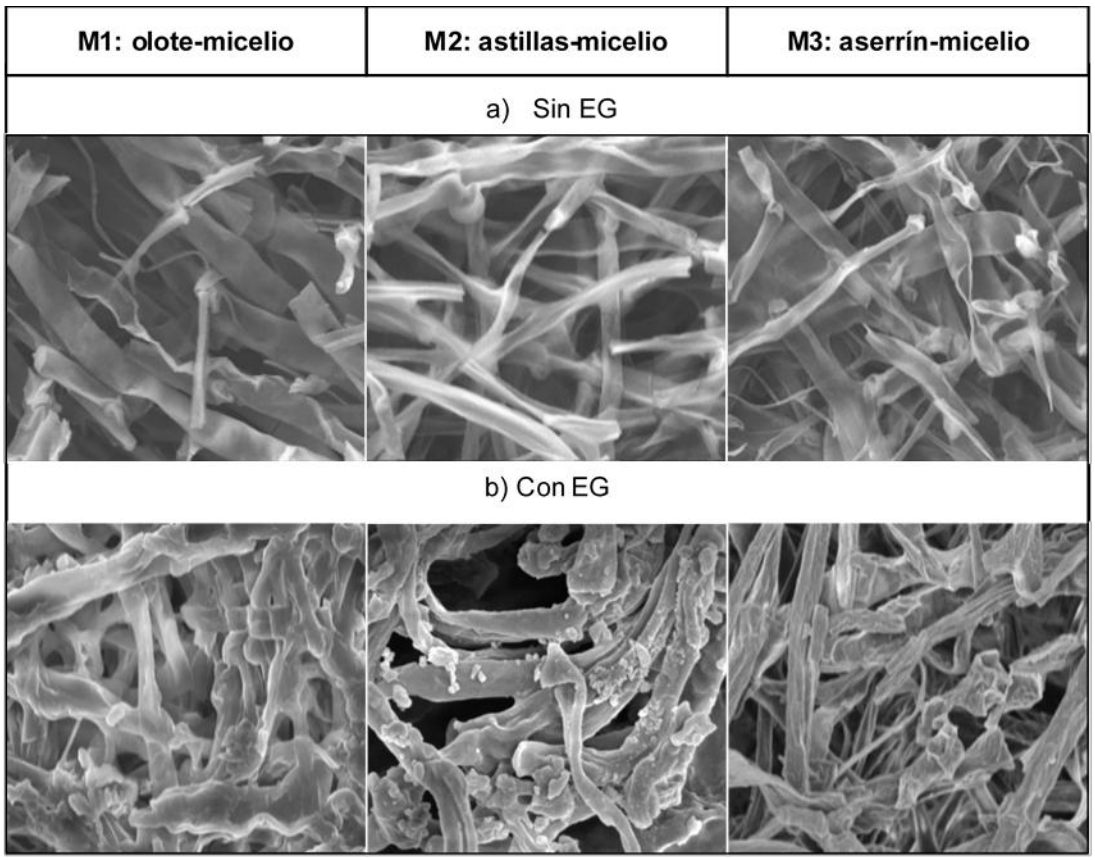


Figura 5. Micrografías de bioplásticos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas, M3: aserrín, por medio del MEB a 2500x.

En contraste, las imágenes de los bioplásticos con adición de etilenglicol (Fig. 6b) muestran una estructura más compacta y continua, con hifas que presentan superficies rugosas y menor presencia de vacíos aparentes. Esta morfología más densa sugiere que el etilenglicol actúa no solo como plastificante, sino también como agente estructurante al infiltrarse en los poros de la matriz micelial, rellenando los espacios vacíos y promoviendo una mejor cohesión entre las fibras fúngicas.

Densidad aparente

En la Fig. 7 se presentan los valores de densidad aparente obtenidos de los bioplásticos fúngicos elaborados con *P. ostreatus*, tanto con cómo sin plastificante de etilenglicol (EG). Los valores obtenidos para los bioplásticos sin plastificante oscilaron entre 93.1 kg/m³ y 181.2 kg/m³, siendo el bioplástico a base de astillas el que presentó la menor densidad (93.1 kg/m³), lo cual se correlaciona con su mayor porosidad. Esta baja densidad puede explicarse por la geometría irregular y el mayor tamaño de partícula de las astillas, lo que genera estructuras más abiertas y menos compactas, como también han reportado (10) en materiales con componentes vegetales de granulometría gruesa. Una vez añadido el etilenglicol, la densidad de los tres tipos de bioplásticos se incrementó significativamente, alcanzando valores de 341.1 kg/m³ para las astillas, 368.4 kg/m³ para el olote y 452.3 kg/m³ para el aserrín. Este incremento supera el 50% en todos los casos, destacando el tratamiento con astillas, que presentó un aumento del 266%. Este fenómeno se atribuye a una mayor retención de humedad por parte del plastificante, lo que promueve una mejor cohesión entre el micelio y el sustrato lignocelulósico, reduciendo la rigidez inicial del material y facilitando una estructura más densa. Resultados similares han sido observados por Appels et al. (8), quienes señalaron que la adición de agentes aglutinantes en biocompuestos fúngicos mejora la compactación estructural y sus propiedades físicas. De los tres sustratos utilizados, el aserrín fue el que presentó

la mayor densidad final, posiblemente debido a su textura fina y homogénea, que favorece la interacción con la red de micelio y permite una mayor compactación.

Los valores de densidad obtenidos en este estudio son comparables a los de algunos plásticos convencionales de baja densidad, como el poliestireno expandido (~10–30 kg/m³) y el poliuretano flexible (~30–300 kg/m³), lo que posiciona a los bioplásticos fúngicos como una alternativa viable en aplicaciones donde se requiere ligereza y flexibilidad. Además de su bajo impacto ambiental, estos materiales tienen el potencial de sustituir plásticos sintéticos en embalajes, aislamiento térmico o incluso diseño industrial biodegradable.

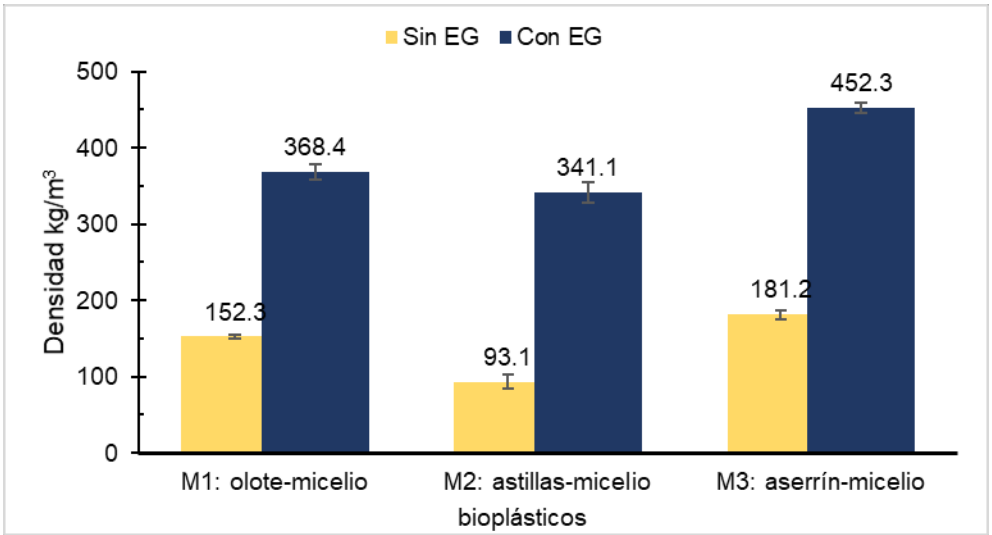


Figura 6. Promedios del análisis de densidad aparente, en bioplásticos fúngicos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín, con y sin la adición de plastificante de etilenglicol.

Dureza Shore A

En la Fig. 8 se muestran los valores de dureza Shore A obtenidos para los bioplásticos. La dureza Shore A es una propiedad mecánica clave que indica la resistencia superficial del material a la deformación, y está estrechamente relacionada con su rigidez y compacidad estructural. Los resultados indican que, en todos los casos, los bioplásticos sin EG presentaron mayor dureza que aquellos con EG, lo que evidencia el efecto plastificante del etilenglicol sobre la matriz micelial. El tratamiento sin plastificante que alcanzó el valor más alto fue el M3 (aserrín-micelio) con 37.2 Shore A, seguido de M1 (olote-micelio) con 36.13 y M2 (astillas-micelio) con 33.1. En contraste, los valores con EG fueron sustancialmente menores: 26.3, 20.6 y 16.2 Shore A, respectivamente. Este descenso en la dureza tras la adición de EG puede atribuirse a la mayor retención de agua que provoca una estructura más flexible y menos rígida. A nivel estructural, el etilenglicol interfiere con la red de enlaces hidrofóbicos del micelio, reduciendo la cohesión interna del bioplástico y facilitando su deformación superficial.

Si se comparan estos resultados con los de densidad (Fig. 7), se observa una tendencia inversa: mientras que la densidad aumentó con la adición de EG, la dureza disminuyó. Esto sugiere que, aunque el material se vuelve más compacto (mayor densidad), también se torna más elástico o blando a causa del plastificante. Entre los tres tipos de sustrato, el aserrín resultó nuevamente ser el más favorable en términos de resistencia superficial, incluso con plastificante, probablemente debido a su alta capacidad de compactación y retención estructural. Esto sugiere que la combinación de aserrín y micelio forma una red más robusta en comparación con los otros sustratos, comportamiento coherente con los valores más altos de densidad registrados en el tratamiento M3.

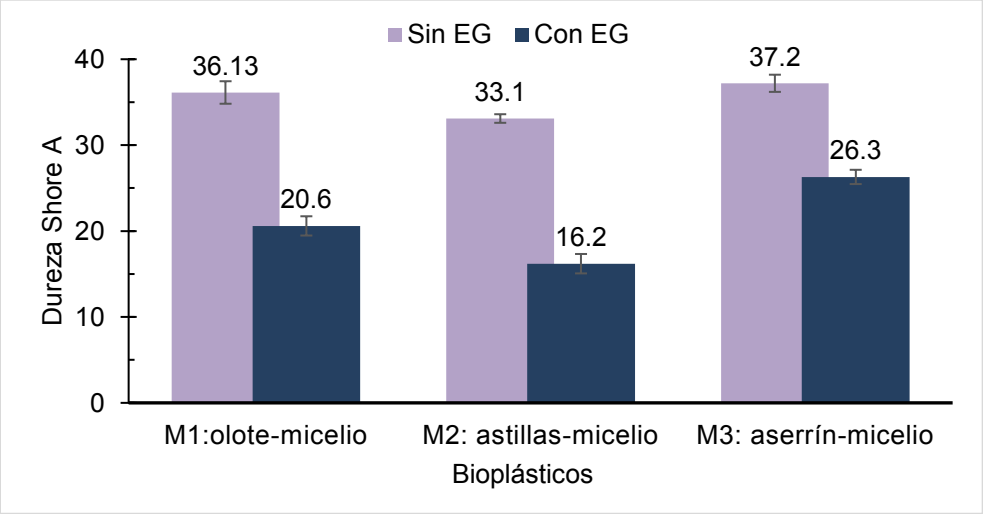


Figura 7. Promedios del análisis de dureza Shore A, en bioplásticos fúngicos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín, con y sin la adición de plastificante de etilenglicol.

Ángulo de contacto

El ángulo de contacto (AC) es un indicador clave para evaluar la hidrofobicidad superficial de un material: valores mayores a 90° indican superficies hidrofóbicas, mientras que valores menores a 90° revelan una tendencia hidrofílica. En los bioplásticos de micelio evaluados, se observó que la adición de etilenglicol (EG) reduce significativamente el ángulo de contacto en todos los tratamientos, lo cual sugiere una transformación de la superficie hacia un comportamiento más hidrofílico (Fig. 9). Sin EG, los bioplásticos elaborados con olote (M1), astillas (M2) y aserrín (M3) presentaron ángulos de contacto de 110.7°, 107.7° y 109.3°, respectivamente. Estos valores superan el umbral de 90°, confirmando que, en su estado base, los materiales presentan una superficie hidrofóbica, probablemente debido a la composición química del micelio, rica en quitina, proteínas hidrofóbicas y una estructura microtexturizada que favorece la repulsión del agua (11). Esta hidrofobicidad es deseable para aplicaciones como empaques alimentarios o materiales expuestos a humedad ambiental. Al incorporar EG, los valores de AC disminuyeron a 76° para olote, 22° para astillas y 64° para aserrín, lo cual indica una clara modificación en las propiedades superficiales del bioplástico.
El caso más notable es el del tratamiento con astillas, cuyo ángulo se redujo drásticamente a 22°, indicando una superficie altamente hidrofílica. Este cambio puede deberse no solo al EG, sino también a una mayor exposición de sitios polares o a una estructura más porosa que retiene humedad superficial, como lo sugieren estudios en biocomposites lignocelulósicos (4).

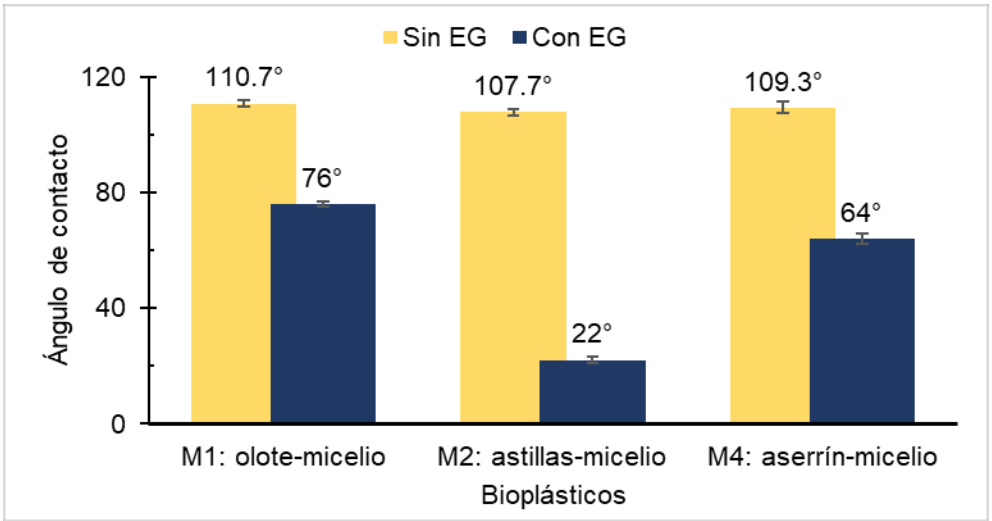


Figura 8. Promedios del análisis de Ángulo de contacto, en bioplásticos fúngicos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín, con y sin la adición de plastificante de etilenglicol.

Absorción de agua

Los resultados del porcentaje de absorción de agua muestran que la adición de EG aumenta significativamente la absorción de agua en todos los tratamientos (Fig. 10), lo cual coincide con lo reportado en la literatura sobre el efecto plastificante del EG en materiales biopoliméricos. Este comportamiento se atribuye a la capacidad del EG para introducir grupos hidroxilo adicionales y aumentar el volumen libre en la matriz polimérica, facilitando la entrada de moléculas de agua (8). Sin la presencia de EG, el bioplástico con astillas presentó la menor absorción de agua (24 %), seguido por el elaborado con olote (39 %) y el de aserrín (49 %). Esta tendencia sugiere que el tipo de sustrato influye notablemente en la porosidad y densidad del bioplástico. Las astillas, al ser de mayor tamaño y menor área superficial, permiten una estructura más compacta, reduciendo los espacios porosos y, por lo tanto, la retención de agua. Por el contrario, el aserrín, por su textura fina, genera una mayor porosidad superficial, lo que incrementa su capacidad de absorción. Estudios previos han demostrado que los sustratos lignocelulósicos afectan la red de micelio en términos de densidad y permeabilidad (1).

En presencia de EG, se observó un aumento considerable de la absorción: M1 alcanzó 91.2 %, M2 subió a 60.2 % y M3 presentó la mayor absorción con 100.5 %. A pesar de este aumento generalizado, el patrón relativo entre tratamientos se mantuvo, siendo M2 el más eficiente en cuanto a resistencia al agua. Este fenómeno se puede explicar por la capacidad del micelio de formar una red más cerrada en presencia de astillas, limitando el ingreso de agua incluso con EG. La elevada absorción en el caso del aserrín sugiere una mayor susceptibilidad a la hidratación, posiblemente por una matriz menos estructurada y con mayor número de microcavidades capilares.

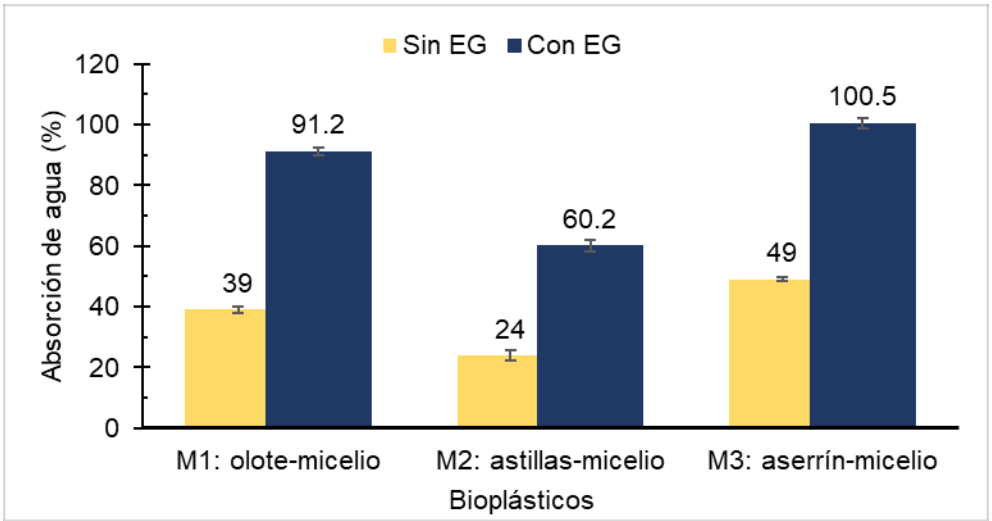


Figura 9. Promedios del análisis de Absorción de agua, en bioplásticos fúngicos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín, con y sin la adición de plastificante de etilenglicol.

Caracterización Química por FTIR

Los espectros de FTIR-ATR (Fig.11a, b) confirman la presencia de los principales grupos funcionales del micelio de *P. ostreatus* y evidencian la incorporación del etilenglicol (EG) como plastificante. Las bandas a 2934–2935 cm^{-1} (vibración de tensión C–H en lípidos), 1634 cm^{-1} (C=O de amida I) y 1372 cm^{-1} (grupos metilo) corresponden a componentes intrínsecos del micelio, mientras que el conjunto de señales entre 1200 y 900 cm^{-1} refleja las vibraciones C–O, C–C y C–O–C de los polisacáridos (9). La notable intensidad en la región 3200–3500 cm^{-1}, asociada a los grupos OH, aumenta proporcionalmente con la concentración de EG, evidenciando la mayor presencia de este humectante en la matriz. La aparición de nuevas bandas del EG tales como las vibraciones OH (3200–3500 cm^{-1}), C–O (1200–650 cm^{-1}) y CH_2 (2800–3000 cm^{-1}) se superpone con las señalizaciones del micelio y modifica el perfil espectral global. Esta superposición, junto con los desplazamientos y variaciones en la intensidad de las bandas correspondientes a aminas y carbonilos del micelio, sugiere que el EG establece enlaces de hidrógeno con las macromoléculas fúngicas, lo que conduce a una alteración de su red estructural.

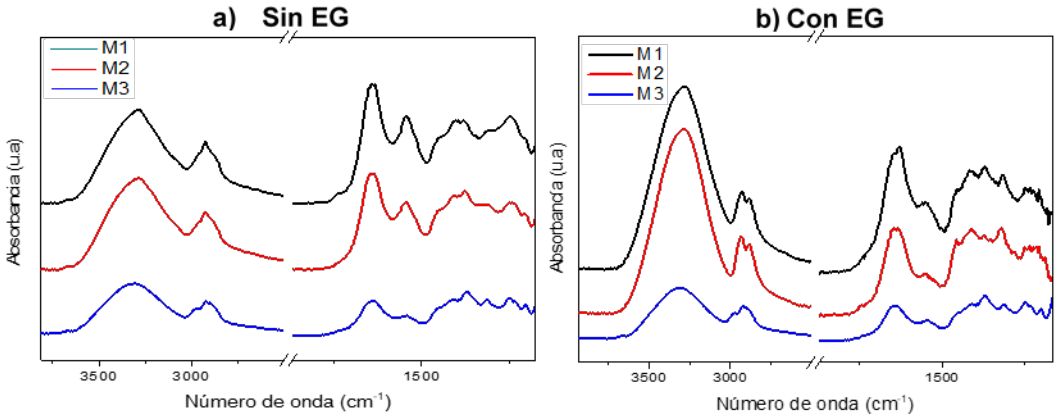


Figura 10. FTIR de bioplásticos fúngicos de *P. ostreatus* en sustratos de M1: olote, M2: astillas y M3: aserrín, con y sin la adición de plastificante de etilenglicol.

CONCLUSIONES

El análisis de los bioplásticos fúngicos elaborados con *Pleurotus ostreatus* y distintos sustratos (olote, astillas y aserrín), con y sin etilenglicol (EG), permitió identificar relaciones claras entre estructura, propiedades mecánicas y comportamiento frente al agua. La densidad aumentó significativamente con la adición de EG, superando el 50 % en todos los casos, debido a una mayor retención de agua y compactación de la matriz. Este cambio fue respaldado por el análisis morfológico mediante MEB, donde los bioplásticos con EG mostraron estructuras más compactas, mientras que los sin EG presentaron hifas entrelazadas y porosas. La dureza Shore A disminuyó con la incorporación del plastificante, reflejando un aumento en la flexibilidad. Este comportamiento está vinculado al efecto plastificante del EG, que reduce la rigidez del material. En cuanto a la absorción de agua, el EG incrementó notablemente este valor, especialmente en el tratamiento con aserrín. El tipo de sustrato influyó directamente, siendo las astillas el que generó menor absorción, debido a una estructura más cerrada. El ángulo de contacto también disminuyó al añadir EG, indicando una transición hacia superficies más hidrofílicas. Sin EG, los bioplásticos fueron hidrofóbicos (AC > 100°), ideales para aplicaciones en contacto con humedad. El tratamiento con astillas mostró el cambio más drástico (AC = 22°), debido a la combinación de estructura porosa y exposición de grupos polares.

En conjunto, estos resultados confirman que tanto el tipo de sustrato como la presencia de EG influyen considerablemente en las propiedades funcionales del bioplástico. Esto abre posibilidades para adaptar estos materiales a diversas aplicaciones, desde empaques biodegradables hasta componentes con requerimientos específicos de rigidez o permeabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. C. Bruscato, "High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust-Sustainable technology for waste reduction", Journal of Cleaner Production, 2019, pp. 225-232.
2. E. Fernández, "Differential proteomic profiles of Pleurotus ostreatus in response to lignocellulose and sugarcane bagasse-based medium", Frontiers in Microbiology, 2017, pp 8.
3. J Quintana, "Producción de Pleurotus ostreatus y Pleurotus sapidus con residuos agrícolas de Glycine max, Oryza sativa y Zea mays", UNESUM ciencias, Vol. 1, 8, pp 83-93.
4. K. Alamane, "Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications", Alexandria Engineering Journal, 2023, pp 234-250.
5. K. Jatuwong, "Bioprocessing of agricultural residues as substrates and optimal conditions for phytase production of chestnut mushroom, pholiota adiposa, in solid state fermentation" Journal of fungi, Vol. 4, 6, 2020, pp. 384.
6. M. R. Islam, "Morphology and mechanics of fungal mycelium", Sci Rep, 2017, pp. 13070.
7. E. Elsacker, "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates", Plos One, 2019, Vol. 7, 14, pp. e0213954.
8. F. Apples, "Fabrication factors influencing mechanical, moisture and water related properties of mycelium-based composite". Materials & Desing, 2019, pp. 64-71.
9. M. Hu, "Experimental assessment of multiple properties of mycelium-based composites with sewage sludge and bagasse" Materials, 2025, pp. 1, 18.
10. G. Holt, "Fungal mycelium and cotton Plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: evaluation study of select blends of cotton byproducts", Journal of Biobased materials and bioenergy, 2012, pp. 6, 431-439.
11. M. Haneef, "Advanced materials from fungal mycelium: Fabrication and tuning of physical properties", Scientific Reports, 2017, Vol. 1, 7, pp. 41292.
12. Q. Tong, "Effects of glycerol, sorbitol, xylitol and fructose plasticisers on mechanical and moisture barrier properties of pullulan–alginate–carboxymethylcellulose blend films", International Journal of Food Science & Technology, 2013, Vol. 4, pp. 870-878.
13. Z. Yang, "Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based", Jornal of materials in Civil Engineering, 2017, Vol. 7, 29.

14. A. Javadian, "Aplicacion de materiales compuestos ligados con micelio en la industria de la construcción: una breve revisión", SOJ Materials Science & Engineering, 2020, Vol. 2, 7, pp. 1-9.
15. M. Téllez, "Hongos una alternativa biodegradable en la industria textil", Inventio, 2024, Vol. 51, 20.
16. K. Zuñiga, "Los hongos como elementos clave en la productividad del suelo, la agricultura y el bienestar social", Biocenosis, 2021, Vol. 1, 32, pp. 46-58.
17. D. Andrejc, "Antioxidant, antibacterial, antitumor, antifungal, antiviral, anti-inflammatory, and nevro-protective activity of Ganoderma lucidum: An overview", Frontier in pharmacology, 2022.
18. L. Naranjo, "Bioproductos desarrollados a partir de micelio de hongos: Una nueva cultura material y su impacto en la transición hacia una economía sostenible", Bionatura, 2021, Vol. 1, 6, pp.1637-1652.
19. M. Jones, "Waste-derived low-cost mycelium nanopaper with tunable mechanical and surface properties", Biomacomolecules, 2019, Vol. 9, 20, pp. 3513-3523.
20. M. A. Shakir, "Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of bio-composite", Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences, 2020, pp. 253-263.
21. M. Antiori, "Fine-Tuning of physicochemical properties and growth dynamics of mycelium-based materials", Applied Biomaterials, 2020.

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS TEXTILES EN LA FABRICACIÓN DE TABIQUES CON MEZCLA DE SEDIMENTO ARCILLOSO

German Reséndiz López*, Ángel Monzalvo Hernández, Noel Ivan Toto Arellano*, Jesús Rubén González Rivera, David Tienda Montiel, Ángel González Gómez, Saúl Cárdenas Rosas, José Oscar Hernández Vargas

Universidad Tecnológica de Tulancingo (CTOF-UTEC)
*gresendizl@utectulancingo.edu.mx; noel.toto@utectulancingo.edu.mx

RESUMEN

En México, se generan anualmente 3,700 millones de toneladas de residuos textiles, de los cuales solo el 1% se recicla debido a la falta de infraestructura efectiva y los altos costos asociados. Muchos de estos residuos presentan una composición mixta de fibras naturales y sintéticas, lo que dificulta su reciclaje. Ante esta problemática, se propone la fabricación de tabiques sustentables a partir de una mezcla de 60% residuo textil y 40% sedimento arcilloso, ofreciendo una solución innovadora para la reutilización de desechos textiles, el proceso de elaboración inicia con la recolección y trituración del residuo textil para reducirlo a fibras de tamaño homogéneo. Posteriormente, estas fibras se mezclan con sedimento arcilloso hasta obtener una pasta uniforme, la cual es moldeada en forma de tabique y sometida a un proceso de secado y cocción controlado.

Esta combinación de materiales permite mejorar la resistencia mecánica del tabique, reducir su peso y optimizar su desempeño térmico y acústico. Además, el uso de residuos textiles en la mezcla disminuye la cantidad de materia prima virgen requerida, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales. El tabique fabricado cumple con los estándares establecidos en la Norma Mexicana NMX-C-010-1986 en cuanto a dimensiones y calidad superficial, presentando una forma rectangular de 7 cm por 25 cm, bordes bien definidos y una superficie lisa y uniforme. Las pruebas experimentales muestran que propiedades mecánicas cumplen con la NMX-C-036-ONNCCE, demostrando una resistencia a la compresión de 2.8 MPa, adecuada para su uso en la construcción de viviendas y edificaciones de bajo costo.

Su proceso de fabricación no requiere tecnologías sofisticadas, permitiendo su producción a nivel local con materiales accesibles. Entre sus principales ventajas, destaca su bajo costo de producción en comparación con los tabiques convencionales, debido al aprovechamiento de residuos textiles que de otro modo serían desechados. Además, su menor peso facilita el transporte y manipulación en obra, reduciendo los costos de logística. Su composición también contribuye a un mejor aislamiento térmico y acústico, lo que mejora las condiciones de habitabilidad en viviendas construidas con este material y reduce el consumo de energía en climatización. Dadas sus características, el tabique fabricado a partir de residuos textiles puede aplicarse en la construcción de viviendas de bajo costo, asentamientos urbanos sustentables y proyectos de infraestructura en comunidades marginadas. Además, su utilización en la edificación de bardas perimetrales, muros divisorios y estructuras de baja carga representa una alternativa viable para reducir el impacto ambiental del sector de la construcción y fomentar la economía circular.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción representa uno de los sectores de mayor impacto ambiental a nivel global, se estima que consume aproximadamente el 40 % de los recursos naturales extraídos y es responsable de cerca del 30 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) generadas mundialmente (UNEP, 2020), esta situación se ve agravada por la creciente demanda de vivienda, infraestructura y urbanización en zonas tanto rurales como urbanas, lo que incrementa de forma

exponencial el consumo de materiales convencionales como el concreto, el acero y los bloques cerámicos, al mismo tiempo la industria textil ha emergido como una de las más contaminantes del mundo, generando alrededor de 92 millones de toneladas de residuos anuales, de los cuales menos del 1 % es reciclado o reincorporado a procesos productivos [1].

Esta combinación de altos niveles de extracción de materias primas y acumulación de desechos plantea un reto urgente para la sostenibilidad de los modelos industriales tradicionales, en este sentido, se desarrolló el proyecto denominado ECO-BLOCK, el cual propone una solución innovadora y sustentable orientada a la elaboración de tabiques ecológicos a partir de la valorización de residuos textiles y sedimentos arcillosos, esta iniciativa surge como respuesta a la necesidad de incorporar principios de economía circular [2-4] y aprovechamiento de materiales alternativos en la industria de la construcción, particularmente en contextos con limitaciones económicas o con restricciones en el acceso a materiales convencionales.

Consideramos que se ha establecido un proceso técnico y económicamente viable para la fabricación de “eco-bloques” que cumplan con los estándares básicos de resistencia, durabilidad y funcionalidad requeridos en aplicaciones constructivas no estructurales, por lo que esta propuesta se fundamenta en el desarrollo de una mezcla compuesta por un 60 % de residuos textiles triturados y un 40 % de sedimento arcilloso, lo que permite una reducción significativa en el uso de materiales vírgenes y en los costos energéticos asociados a la producción.

Diversos estudios han respaldado la incorporación de fibras textiles recicladas en matrices cerámicas, señalando mejoras sustanciales en propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la capacidad de absorción de energía ante impactos [5-7]. Asimismo, la estructura fibrosa de estos materiales contribuye a una mejor respuesta térmica y acústica, aumentando el potencial del producto en términos de confort y eficiencia energética en edificaciones [7-11]. Por su parte, el sedimento arcilloso, recurso disponible localmente en múltiples regiones, posee una alta plasticidad que facilita su moldeo y cocción, lo que lo convierte en un componente ideal para la fabricación artesanal o semi-industrial de bloques de construcción.

El desarrollo de este proyecto busca no solo validar las propiedades físico-mecánicas del tabique ecológico, sino también evaluar su impacto ambiental, su viabilidad económica en escenarios de producción a pequeña y mediana escala, y su pertinencia social como una alternativa asequible para comunidades vulnerables. Al articular conocimientos técnicos de procesos industriales con prácticas de reciclaje y conservación ambiental, el proyecto ECO-BLOCK contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y al ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) [12].

Finalmente, este trabajo de investigación plantea una propuesta concreta de transición hacia una construcción más verde y consciente, impulsando el uso de materiales sustentables mediante la revalorización de residuos industriales, y posicionando al tabique ecológico como un producto innovador, funcional y comprometido con la sostenibilidad ambiental y social.

METODOLOGÍA

En este trabajo se desarrolló una investigación cuantitativa-aplicada dirigida a medir, analizar y comparar el desempeño de tabiques ecológicos elaborados con sedimento arcilloso y residuos textiles frente a tabiques convencionales de arcilla. El objetivo de este diseño metodológico fue validar la viabilidad técnica del nuevo material generado, mediante la fabricación de prototipos funcionales y la ejecución de ensayos normalizados [13].

Recolección y procesamiento de materiales

Los materiales utilizados en el presente estudio fueron seleccionados en función de su disponibilidad regional, propiedades fisicoquímicas y compatibilidad en mezclas cerámicas de bajo impacto ambiental. La selección se orientó a optimizar tanto el comportamiento mecánico del tabique como su viabilidad de producción a escala semi-artesanal [14-16]. Sedimento arcilloso. Se empleó como matriz principal un sedimento de naturaleza arcillosa extraído de un banco natural perteneciente a la empresa local Tabiquería Don Toño, ubicada en la región del Valle de Tulancingo, Hidalgo. Este material fue elegido por su alta plasticidad, granulometría fina y adecuada capacidad de retención de humedad, propiedades que favorecen su moldeabilidad y cohesión durante el proceso de conformado.

Asimismo, se verificó su aptitud para la cocción cerámica mediante una prueba preliminar de mufla, confirmando su capacidad de endurecimiento sin agrietamientos a temperaturas en el rango de 250 °C a 300 °C. La arcilla fue sometida a un proceso de cribado para eliminar impurezas gruesas, piedras o materia orgánica que pudiera comprometer la homogeneidad estructural del tabique final.

Residuo textil. Como refuerzo y agente ligante se utilizó residuo textil postindustrial proveniente de talleres de confección de ropa en desuso, con una composición predominante de fibras de poliéster, algodón y mezclas sintético-naturales. El material recolectado fue sometido a una primera fase de selección visual y clasificación por tipo de fibra y color, con el objetivo de garantizar una uniformidad compositiva en cada lote de mezcla. Posteriormente, el residuo textil fue cortado manualmente con tijeras industriales hasta obtener fibras de tamaño medio (aproximadamente 3 cm de longitud), lo que permitió mejorar su distribución en la matriz arcillosa y aumentar la capacidad de refuerzo mecánico mediante anclaje interno.

Esta fase fue realizada en condiciones secas para evitar la degradación del material fibroso y minimizar el contenido de humedad en la mezcla, en la Fig. 1 se muestra el residuo textil en su pesaje (a) y cortado a mano en (b). La combinación adecuada del residuo arcilloso (con propiedades cohesivas) y textil (con propiedades estructurales de refuerzo), permite diseñar un compuesto híbrido apto para procesos de moldeo, secado y cocción, facilitando su aplicación en la elaboración de eco-bloques destinados a la construcción de vivienda de interés social y soluciones habitacionales sustentables.



(a) (b)

Figura 1. Residuo textil. (a)Pesaje del residuo. (b)Residuo textil cortado a mano

Formulación y mezcla

Se elaboraron distintas formulaciones experimentales con variaciones en la proporción de residuo textil respecto al peso seco del material, manteniendo un rango entre 50–60%, el sedimento arcilloso previamente cribado, se mezcló con las fibras textiles y agua limpia hasta alcanzar una consistencia homogénea y plástica, en la Figura 2 se presenta como se mezclan las materias primas donde (a) presenta el amasado de la arcilla y en (b) la mezcla a mano de los materiales.



(a) (b)

Figura 2. Mezcla de materias primas. (a) Amasado de la arcilla. (b) Mezcla a mano de los materiales.

Moldeo y compactación

La mezcla homogénea obtenida tras la integración del sedimento arcilloso, el residuo textil triturado y el agua fue vertida en moldes rectangulares de madera con dimensiones normalizadas de 27 cm de largo × 7 cm de ancho × 16 cm de alto, considerando estas proporciones como representativas para aplicaciones en muros divisorios no estructurales, los moldes fueron previamente humedecidos para evitar la adhesión del material y facilitar el proceso de desmolde posterior.

Durante el llenado, se aplicó presión manual progresiva con ayuda de paletas de compactación de madera, con el fin de asegurar una distribución uniforme de la mezcla dentro del molde y maximizar la densidad del producto (Ver Fig. 3), en esta etapa de compactación es fundamental, ya que permite la eliminación de burbujas de aire atrapadas en la matriz, lo que mejora la cohesión interna del tabique y reduce la presencia de vacíos estructurales que podrían debilitarlo en las pruebas de compresión, de igual manera se procuró que los bordes y caras del bloque adquirieran definición geométrica precisa, garantizando la uniformidad dimensional entre piezas, aspecto crucial para la estabilidad y estética en su aplicación constructiva.

Finalizado el proceso de compactación, los moldes fueron cuidadosamente desmoldados tras un periodo corto de asentamiento inicial, de alrededor de 10 minutos, asegurando que la mezcla mantuviera su forma sin deformaciones. Los tabiques frescos fueron trasladados manualmente a un área techada y ventilada para su secado inicial, evitando exponerlos a corrientes de aire fuerte o insolación directa, factores que podrían inducir un secado desigual y provocar fisuras prematuras.



Figura 3. Mezcla de materias primas coloca en los moldes

Secado y cocción

El proceso de secado de los prototipos se llevó a cabo en condiciones naturales al aire libre durante un periodo de 4 a 5 días, dependiendo de la temperatura ambiente y la humedad relativa del entorno. Durante este proceso, los tabiques se colocaron sobre plataformas elevadas de madera y bajo estructura de sombreado parcial, con el objetivo de evitar la exposición directa a la radiación solar y minimizar gradientes térmicos que pudieran inducir tensiones internas diferenciales. Estas tensiones suelen ser responsables de la aparición de fisuras superficiales o deformaciones dimensionales, fenómenos que comprometen tanto la estética como el desempeño estructural del bloque cerámico [17-18]. Para garantizar un secado uniforme, los tabiques fueron rotados cada 24 horas, permitiendo una ventilación equilibrada de todas sus caras. Esta fase inicial de curado en condiciones ambientales controladas permitió la evaporación progresiva del contenido de humedad libre presente en la mezcla, disminuyendo el riesgo de formación de microgrietas por retracción.

Posteriormente, una fracción de los prototipos fue seleccionada para someterse a un tratamiento térmico en mufla eléctrica, con el fin de evaluar la influencia del proceso de cocción sobre las propiedades mecánicas y físicas del producto final. La cocción se realizó en dos etapas: una fase de precocción lenta de 1 hora a 150 °C para eliminar humedad residual sin generar vapor interno, seguida por una cocción principal a temperaturas entre 250 °C y 300 °C durante 2 horas, asegurando una transformación térmica adecuada sin llegar al punto de vitrificación [17-20].

Este tratamiento térmico tuvo como propósito principal incrementar la resistencia mecánica a la compresión, promover la cohesión entre partículas arcillosas y fibras textiles, y reducir la higroscopicidad del tabique, es decir, su tendencia a absorber humedad del ambiente. La cocción, además, favoreció la estabilidad dimensional del producto, disminuyendo la probabilidad de expansión o contracción posterior a la instalación en obra.

En contraste, los tabiques curados exclusivamente mediante secado natural se utilizaron como grupo de control, permitiendo comparar sus propiedades mecánicas, densidad, absorción de agua y comportamiento estructural frente a los que fueron cocidos. Esta comparación fue clave para evaluar la viabilidad del uso de métodos de curado más sostenibles en términos energéticos, especialmente para contextos rurales o autoconstrucción con recursos limitados.



Figura 4. Secado y cocción de los tabiques. (a) Tabique húmedo fuera del molde. (b) Tabiques colocado en la mufla para su cocción

Ensayos, análisis técnico-económico y validación de desempeño

Con el fin de evaluar el comportamiento físico-mecánico y funcional de los tabiques ecológicos elaborados, se realizaron ensayos normalizados conforme a los lineamientos establecidos en la Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2013[21-22], así como otras referencias técnicas pertinentes, estos ensayos permitieron caracterizar cuantitativamente los principales parámetros estructurales del producto final y establecer comparaciones objetivas respecto a tabiques

convencionales de uso común en la construcción no estructural, las pruebas realizadas fueron las siguientes:

Resistencia a la compresión. Se aplicó carga axial creciente mediante una prensa hidráulica de laboratorio hasta la falla del espécimen, registrando el esfuerzo máximo soportado. Este ensayo permitió establecer la capacidad portante de cada tipo de tabique, expresada en MPa, y evaluar la influencia de la incorporación de fibras textiles recicladas en la matriz arcillosa.

Absorción de agua. Los especímenes fueron sometidos a inmersión parcial controlada durante un periodo específico, con el objetivo de determinar su porosidad efectiva y grado de higroscopicidad. Este parámetro es clave para estimar el comportamiento del bloque en ambientes húmedos o expuestos a condiciones climáticas variables.

Densidad aparente y peso unitario. Se cuantificó la relación entre el volumen y la masa seca de cada prototipo, lo cual proporcionó información relevante sobre la manejabilidad y eficiencia en transporte y montaje del eco-bloque.

Para los ensayos físicos, se desarrolló un análisis técnico-económico del proceso de producción, tomando en cuenta el costo de los materiales (arcilla, residuos textiles, agua), la mano de obra involucrada en cada etapa (mezclado, moldeo, secado/cocción), el consumo energético y el uso de equipos auxiliares. Con base en estos datos, se estimó el costo de producción por unidad, así como un precio de venta competitivo, que resultó considerablemente inferior (aproximadamente $5.90 MXN por unidad) al de los tabiques convencionales disponibles en el mercado regional.

Desde la perspectiva ambiental, se documentaron beneficios significativos asociados al uso de materia prima reciclada, destacando la reducción de residuos textiles destinados a rellenos sanitarios y el aprovechamiento de sedimentos arcillosos locales, además, al emplear temperaturas de cocción moderadas (250–300 °C), se logró una reducción estimada del 30 % en el consumo energético en comparación con procesos tradicionales de ladrillo cocido, contribuyendo así a una menor huella de carbono.

Finalmente, los resultados obtenidos en las pruebas fueron sometidos a un tratamiento estadístico para identificar la mezcla óptima desde un enfoque multicriterio, considerando simultáneamente la resistencia mecánica, durabilidad, absorción, densidad y costo-beneficio. Esta validación integral permitió definir un modelo de tabique ecológico replicable y escalable, con potencial de ser implementado en contextos de construcción sustentable, autoconstrucción o programas de vivienda social, sin comprometer la calidad ni la funcionalidad del material.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Durante el desarrollo del proyecto", se introdujo una innovación significativa en el proceso de fabricación de elementos para la construcción, la cual consistió en la sustitución de la base cementicia tradicional empleada en bloques de concreto con residuos textiles por una mezcla compuesta principalmente de sedimento arcilloso, esta transformación dio lugar al diseño y producción de tabiques ecológicos, fabricados con una proporción de 60% residuo textil y 40% sedimento arcilloso, eliminando por completo el uso de cemento. Esta modificación material no solo implicó una innovación técnica, sino que derivó en múltiples beneficios de índole económica, ambiental y funcional.

El uso de sedimento arcilloso, abundante y disponible en zonas cercanas a cuerpos de agua (como el material obtenido de la Tabiquera Don Toño), permitió una notable reducción de costos en la fabricación de cada unidad. El costo de producción por tabique fue estimado en $3.10 MXN, en contraste con los precios de tabiques comerciales que oscilan entre $4.00 y $5.50 por unidad, según el estudio de mercado realizado.

En segundo lugar, a través de pruebas empíricas realizadas durante la fase experimental del proyecto, se pudo constatar que el tabique elaborado con sedimento arcilloso y residuo textil presenta una mayor resistencia estructural que aquel fabricado con base en cemento y residuo textil. Esta mejora en el desempeño mecánico se traduce en una mayor durabilidad del producto, lo que amplía su potencial de aplicación en diversas obras de construcción, particularmente en contextos rurales o de bajo presupuesto.

Otro aspecto clave de esta innovación fue la optimización del proceso productivo, ya que el uso del sedimento arcilloso permitió prescindir de la operación de prensado, la cual era indispensable en el modelo original basado en cemento. La eliminación de esta etapa redujo significativamente el tiempo de fabricación de cada unidad, lo que se reflejó en un aumento en la eficiencia del proceso y en una mejora sustancial en la capacidad de producción diaria. Esta simplificación también contribuye a la sostenibilidad del proyecto, al disminuir el consumo energético asociado con el uso de maquinaria de prensado.

Esta innovación en el proceso de fabricación no solo mejoró la rentabilidad del producto, sino que también aportó al desarrollo de una alternativa más amigable con el medio ambiente y socialmente viable. La transición hacia el uso de sedimento arcilloso con residuos textiles representa un paso adelante en la búsqueda de soluciones sostenibles para la industria de la construcción, ofreciendo una opción accesible, funcional y alineada con los principios de economía circular y aprovechamiento de residuos (En la tabla 1 se presenta un resumen comparativo de los beneficios de este proyecto).

Tabla 1. Resumen comparativo

Criterio	Modelo original (concreto + textil)	Innovación (sedimento + textil)
Costo por tabique	Alto (requiere cemento)	Bajo ($3.10 MXN por unidad)
Resistencia al impacto	Baja (fracturas evidentes)	Alta (solo fisuras superficiales)
Proceso de producción	Requiere prensado	No requiere prensado
Impacto ambiental	Cemento con alta huella de CO_2	Reciclaje de textiles + sedimento
Capacidad de producción	Limitada por prensado	650 tabiques/día

La transición del uso de cemento a sedimento arcilloso en la fabricación de tabiques con residuos textiles constituyó una innovación integral en términos de materiales, procesos y resultados. El nuevo modelo no solo disminuyó costos en un 65%, sino que también mejoró la resistencia al impacto, aumentó la capacidad productiva, y redujo la carga ambiental. Esta solución representa una alternativa viable, funcional y sostenible para la industria de la construcción, con potencial de implementación en comunidades que requieren materiales accesibles, eficientes y amigables con el medio ambiente.

CONCLUSIONES

El proyecto ECO-BLOCK demuestra que es posible fabricar tabiques ecológicos viables técnica, ambiental y económicamente mediante el uso de residuos textiles y sedimento arcilloso. Las fibras textiles aportan resistencia al impacto y propiedades aislantes, mientras que el sedimento arcilloso

permite reducir costos y energía. El eco-bloque es rentable, resistente y más sostenible que los tabiques convencionales, lo que lo convierte en una alternativa adecuada para la construcción social y sustentable. Se recomienda investigar su comportamiento estructural en condiciones extremas y avanzar en la normalización de su producción.

La transición del uso de cemento a sedimento arcilloso en la fabricación de tabiques con residuos textiles constituyó una innovación integral en términos de materiales, procesos y resultados. El nuevo modelo no solo disminuyó costos en un 65%, sino que también mejoró la resistencia al impacto, aumentó la capacidad productiva, y redujo la carga ambiental. Esta solución representa una alternativa viable, funcional y sostenible para la industria de la construcción, con potencial de implementación en comunidades que requieren materiales accesibles, eficientes y amigables con el medio ambiente. La implementación de una mezcla compuesta por 60% residuo textil y 40% sedimento arcilloso como sustituto del cemento en la elaboración de tabiques ecológicos permitió una transición técnica eficiente y viable hacia un producto más sostenible. Esta modificación eliminó la dependencia de materiales de alto costo y alto impacto ambiental como el cemento, sin comprometer las propiedades mecánicas básicas requeridas para su aplicación en obras de bajo impacto estructural.

El análisis de costos demostró que el costo de producción por unidad fue de $3.10 MXN, mientras que el precio de venta propuesto fue de $5.90 MXN, logrando un margen de ganancia del 90.3% por unidad. La inversión inicial estimada en $239,050 MXN se recupera en un punto de equilibrio de 8 meses, con un flujo neto anual de $1,176,950 MXN en el primer año y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 42%, lo que confirma la alta rentabilidad del proyecto. El proyecto logró la reutilización de 1.2 toneladas de residuo textil por mes, mitigando su disposición inadecuada y aportando a la economía circular. Además, el uso de materiales locales (sedimentos de cuencas y residuos industriales) disminuyó la huella ecológica del proceso constructivo. Este enfoque cumple con los principios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 9 y 12, promoviendo innovación responsable y consumo sustentable.

La innovación implementada en ECO-BLOCK no solo logró reducir costos y mejorar la eficiencia del proceso, sino que también validó técnica y económicamente un modelo de fabricación de tabiques ecológicos con alto potencial de aplicación en comunidades vulnerables. Este modelo puede ser escalado e implementado en zonas con disponibilidad de residuos textiles y sedimentos, proponiendo una solución concreta a problemáticas ambientales y sociales del sector de la construcción.

BIBLIOGRAFÍA

Ellen MacArthur Foundation. (2017). A New Textiles Economy: Redesigning Fashion’s Future.

Azapagic, A.; Perdan, S. Indicators of sustainable development for industry: A general framework. *Trans IChemE* 2000, *78*, 243–261.

Barbier, E.B. The concept of sustainable economic development. *Environ. Conserv.* 1987, *14*, 101.

Kiddee, P.; Pradhan, J.K.; Mandal, S.; Biswas, J.K.; Sarkar, B. An overview of treatment technologies of E-waste, Chapter 1. In *Handbook of Electronic Waste Management International Best Practices and Case Studies*; Elsevier: Cambridge, MA, USA, 2019; pp. 1–18.

Sasi, S.; Joseph, P.; Haigh, R.; Sandanayake, M.; Vrcelj, Z.; Yaghoubi, E. A Review on the Effects of Waste Textile Polymer Fiber on Concrete Strength: Exploring the Key Parameters. Buildings 2024, 14, 1486.

Patti A, Cicala G, Acierno D. Eco-Sustainability of the Textile Production: Waste Recovery and Current Recycling in the Composites World. Polymers (Basel). 13(1), 2020,134.

Tran, N.P.; Gunasekara, C.; Law, D.W.; Houshyar, S.; Setunge, S.; Cwirzen, A. Comprehensive Review on Sustainable Fiber Reinforced Concrete Incorporating Recycled Textile Waste. J. Sustain. Cem. Based Mater, 11, 2022, 28–42.

Kosmatka, S.H.; Panarese, W.C.; Kerkhoff, B. Design and Control of Concrete Mixtures; Portland Cement Association: Skokie, IL, USA, 2002.
Quiroga, P.N. The Effect of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete; The University of Texas at Austin: Austin, TX, USA, 2003.]
Qaidi, S.; Al-Kamaki, Y.; Hakeem, I.; Dulaimi, A.F.; Özkılıç, Y.; Sabri, M.; Sergeev, V. Investigation of the Physical-Mechanical Properties and Durability of High-Strength Concrete with Recycled PET as a Partial Replacement for Fine Aggregates. Front. Mater, 10,2023, 1101146
Shakir, Q.M.; Alghazali, A.F. Hybrid Curved Precast Deep Beams Composed Partially from Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. E3S Web Conf. , 427,2023, 02025
Naciones Unidas. (2015). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Link: Página web de Naciones Unidas (Consultado el 27 de mayo de 2025) https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/.
NMX-C-036-ONNCCE-2013. Industria de la construcción – Tabiques y ladrillos – Determinación de la resistencia a la compresión. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación, México.
García-Morales, F. M., Sánchez-Molina, J., & Gelves-Díaz, J. F. (2021). Caracterización de materias primas y formulación de pastas cerámicas para una empresa ubicada en el área metropolitana de Cúcuta, Colombia. Mundo FESC, 11(22), 21-33.
Morales, P. Producción cerámica en Calakmul, Campeche: selección de materias primas y tecnología artesanal. En XV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2000, 627–638. Asociación Tikal. Recuperado de https://www.asociaciontikal.com/simposio-14-ano-2000/50-00-doc/
Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco. (s.f.). Estudio de materiales cerámicos tradicionales y avanzados. Departamento de Ciencias Básicas. Recuperado de https://cienciasbasicas.azc.uam.mx/project/estudio-de-materiales-ceramicos-tradicionales-y-avanzados/
Becerra Rodríguez, M. B., Franco Baltazar, Á. A., Hernández Hernández, A., & López Navarro, I. E., Prácticas ecológicas con tabiques. Multidisciplinas de la Ingeniería, 6(08), 2023, 01–11.
Rodríguez, M. , Diseño de adobes urbanos: una alternativa sustentable en la construcción. Repertorio Científico, 20(1), 2015, 45–60.
NMX-C-024-ONNCCE-2012: Industria de la construcción – Mampostería – Determinación de la contracción por secado de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones.
Proyest Ingeniería. (s.f.). Mamposterías de tabiques regionales. (Consultado el 27 de mayo de 2025) https://proyest.com/mamposterias-de-tabiques-regionales/tectonica.archi+2proyest.com+2Redalyc.org+2
STM International. (2013). ASTM C62-13: Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale). West Conshohocken, PA: ASTM International. https://www.astm.org/c0062-13.html
NMX-C-036-ONNCCE-2013: Industria de la construcción – Tabiques y ladrillos – Determinación de la resistencia a la compresión. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/205415/NMX-C-036-ONNCCE-2013.pdf

EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN EL DESEMPEÑO ESCOLAR DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA INDUSTRIAL AL IMPLEMENTAR CURSOS EN LÍNEA MASIVOS Y ABIERTOS (MOOC) PARA ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA

María Patricia Torrijos Muñoz, Luis Ricardo Morales Juárez, Martha Alvarado Arellano Beatriz Pérez Rojas, María Adelina Cruz Rodríguez

Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Puebla
*patricia.torrijos@puebla.tecnm.mx

RESUMEN

Actualmente los alumnos de educación superior son nativos digitales y cada vez es mayor el número que utilizan las tecnologías de información y comunicación para su capacitación, una de estas son los Cursos en Línea Masivos y Abiertos (MOOC) los cuales permiten a los alumnos autorregular su aprendizaje con la calidad adecuada de forma asíncrona, siendo necesario acercar a los alumnos herramientas que se adaptan a las nuevas formas de aprendizaje para atender las necesidades de conocimiento y la continuidad académica.

Las herramientas digitales deben estar diseñadas y validadas para garantizar su eficacia en el proceso de aprendizaje, este proyecto se desarrolla bajo un paradigma cuantitativo, con un diseño no experimental, longitudinal, descriptivo y correlacional, teniendo como objetivo determinar el impacto de los MOOC en el aprendizaje de los alumnos; se plantea, por su relevancia en el perfil profesional el diseño de un MOOC para la unidad de aprendizaje de Estimación Estadística (EE), tema incluido en la materia de Estadística Inferencial I de Ingeniería Industrial, así como su validación al evaluar su efectividad comparando el desempeño de alumnos con antecedentes académicos similares, pero diferenciados durante el desarrollo de la materia por el uso de la herramienta MOOC en el tema de EE.

La muestra corresponde a alumnos del periodo agosto diciembre 2024. Para el logro de los objetivos se plantean las etapas de: diseño, validación, disponibilidad en plataforma FORMS y aplicación del instrumento de evaluación diagnóstica; selección de la muestra; diseño, elaboración y disponibilidad de MOOC en plataforma TECNM; uso del recurso MOOC; diseño, elaboración, disponibilidad en plataforma y aplicación de evaluación de aprendizaje de EE; análisis estadístico de resultados; conclusiones y recomendaciones.

Como resultados del trabajo se tiene la elaboración y autorización del MOOC de EE por el TECNM y su implementación abierta; la evaluación estadística de los resultados del examen diagnóstico costoso que no hay evidencia significativa para el conocimiento previo promedio entre los dos grupos, es decir se acepta la hipótesis nula. Para el caso del desempeño académico de los alumnos que emplearon MOOC y los que no, se observa que estadísticamente existen diferencias significativas, rechazando la hipótesis nula, y se establece una diferencia de 14.20 con un IC del 95%, con lo que se puede aseverar que se tiene un impacto positivo en el desempeño académico de los alumnos al emplear como auxiliar didáctico el MOOC en el tema de EE.

Los alumnos que utilizaron la herramienta MOOC obtuvieron un mejor promedio ante los que siguieron enseñanza tradicional, reafirmando que las herramientas digitales de aprendizaje con un diseño instructivo y programación adecuada tiene una relevancia significativa en el aprovechamiento escolar, sin embargo es importante que el alumno genere interés por el uso de los MOOC, por lo que se plantea dar seguimiento a este proyecto con un enfoque cualitativo, a fin de identificar y valorar los motivos de calificación reprobatoria en alumnos que emplearon MOOC.

INTRODUCCIÓN

El sujeto de estudio que se ocupó en la presente investigación es el fenómeno llamado MOOC para lo cual se toma como un modelo en desarrollo que se va perfeccionando conforme al uso y las

experiencias de diferentes personas, en este trabajo se recopilan las opiniones y experiencias que se tiene al implementarlo en la enseñanza de la materia de estadística.

La investigación se realiza con los alumnos de la carrera de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México (I.T. Puebla), inscritos en el 3er semestre y que están cursando la materia de Estadística Inferencial I durante el periodo Agosto- diciembre 2024.

Planteamiento del problema

El Instituto Tecnológico de Puebla se encuentra ubicada en la avenida Tecnológico 420 colonia Maravillas, en el estado de Puebla, cuenta actualmente con 6 carreras de Ingenierías, dentro de las se tienen a: mecánica, eléctrica, electrónica, gestión empresarial y logística e industrial y de éstas se considerará para la investigación a la de Ingeniería Industrial.

En el plan de estudios de la carrera de Ingeniería industrial, se encuentra la materia de probabilidad y estadística, la consecutiva a ésta es Estadística inferencial 1 y posteriormente Estadística inferencial 2, por otro lado hablando específicamente de la materia de Estadística Inferencial 1,la academia de Probabilidad y estadística perteneciente al departamento de ciencias básicas realiza al inicio del semestre un examen diagnóstico y casi al término del semestre se aplica un examen departamental precisamente de la unidad de Estimación, ya que la academia lo considera medular en la formación de los estudiantes de esta carrera debido a que aporta conocimientos específicos que van relacionados con materias de semestres avanzados como lo son control estadístico de la calidad, Gestión de la calidad e Ingeniería de calidad y la toma de decisiones. Dichas materias son cursadas hasta con 5 semestres de diferencia por lo que alumnos más avanzados recurren a sus profesores para dudas que en su tiempo se trataron la materia de estadística inferencial 1.

Al identificar la relevancia de esta materia, y considerando la necesidad de una herramienta que permita mejorar el rendimiento académico de los alumnos de Ingeniería Industrial, se plantea el área de oportunidad de elaborar e implementar un MOOC de EE.

Justificación

La universidad Latinoamericana de hoy necesita renovarse para hacer frente a los retos que plantea la llamada sociedad de la información y del conocimiento, lo cual nos ha convertido en una sociedad global; y el uso del conocimiento como el insumo más valioso que agrega valor a la acción ha sido ampliamente estudiado por organismos internacionales como las Naciones Unidas, que ha asumido de manera publica la responsabilidad de orientar su desarrollo.
Estos y otros cambios deben estar orientados a proponer una opción educativa que se adecue a las necesidades de la sociedad presente y futura, lo cual implica tener una educación de calidad con equidad y pertinencia sociocultural en el contexto de un sistema de educación permanente, ofrece una opción formativa mediante una oferta académica encauzada a la actualización y el mejoramiento constante del individuo tanto en el plano profesional como en el personal.

Para los alumnos de la carrera de Ingeniería Industrial, el MOOC servirá como un apoyo adicional o complemento del curso normal, pero como el MOOC tiene la característica de que es un cuso en línea de forma masiva, este además de servir a los alumnos de estudio, también puede atender a un número grande de estudiantes debido a las posibilidades ofrecidas por el software empleado en el diseño de las plataformas que hospedan los cursos.

Objetivo general

Explicar cómo la necesidad, la creación y la aplicación de un Mooc de la unidad de Estimación favorece el programa de Estadística Inferencial I como recurso complementario para la apropiación del tema en los alumnos de tercer semestre de Ingeniería Industrial de Nivel Superior Tecnológico

Objetivos específicos

- Identificar la deficiencia del tema mediante la experiencia y resultado del examen departamental aplicado anteriormente en los semestres pasados
- Describir el sentir de los alumnos de ingeniería industrial de nivel Superior por la estadística.
- Elaborar el MOOC con el tema de Estimación para reforzar el conocimiento del programa de Estadística Inferencial I.
- Demostrar la utilidad del MOOC sobre el aprendizaje en los alumnos de la materia de Estadística para la unidad de estimación.
- Medir la importancia que tiene el uso del MOOC en el aprendizaje de la unidad de estimación en los alumnos de forma alterna con el uso tradicional
- Interpretar con un análisis cualitativo la opinión de los alumnos no aprobados acerca del uso del MOOC complemento a su curso tradicional.

TEORÍA

Una tendencia educativa que ha despertado notablemente el interés de las mejores instituciones de educación superior es la aparición en el escenario mundial de los cursos masivos, abiertos en línea, la mayoría de estos cursos son gratis y atienden a poblaciones repartidas en todo el mundo. El acrónimo MOOC fue usado por primera vez en 2008 para el curso Conectivism and Connective Knowledge diseñado por George Siemens, Stephen Downes y Dave Cormier y ofrecido por la División de Extensión Universitaria de la Universidad de Manitoba en Canadá. Pero fue en 2011 con el curso de Introducción a la Inteligencia Artificial, que esta modalidad educativa logró la cifra de 160 000 alumnos inscritos (Lewin, 2012).

En la actualidad una de las dificultades que se plantea la educación en México, es la atención que puede brindar el maestro a sus alumnos ya que por la alta asignación de número de estudiantes por grupo se dificulta el proceso de interacción que se necesita para el entendimiento de las clases Naji (2020) describe en su investigación la necesidad de adoptar el uso de MOOC pues se tiene el reto de proporcionar una educación de calidad con un aprendizaje asíncrono que permita a los alumnos autorregular su aprendizaje. Uno de los propósitos tangibles que se busca en la implementación de un MOOC es el incremento en las calificaciones por lo que Sukronio (2020) en su investigación nos muestra como a partir de la comparación de dos grupos uno presencial y otro que además del curso tradicional implementaba el MOOC obtuvo buenos resultado ya que disminuyó el índice de reprobación, además de que comprenden mejor los temas y hace que el alumno autorregule su aprendizaje.

Uno de los objetivos que se pretende es que el alumno construya su conocimiento, en lo cual se fundamenta el constructivismo el cual Mayer (1999) lo define como que el alumno puede construir su propio conocimiento a través de sus necesidades e intereses siguiendo un ritmo particular para interactuar con el entorno. Según sus teóricos, el aprendizaje se realiza cuando el alumno ha elaborado activamente su propio conocimiento, el cual no necesariamente debe estar basado en el descubrimiento. Esto se desprende de los aportes del psicólogo suizo Jean Piaget, quien establece una franca relación entre los aspectos biológicos del individuo y el origen del conocimiento (Aragón, 2001). Para este autor, la característica fundamental de la inteligencia es la transformación que hace el individuo de los objetos que los rodean, llegando a conocerlo solo cuando ha realizado dicha trasformación (Poole, 2000). Así mismo el entorno, en el que se adquiere el aprendizaje es de suma importancia, ya que este permitirá el pensamiento efectivo, el razonamiento, la solución de problemas y el desarrollo de habilidades aprendidas Gros (19997).

En el entorno internacional los MOOC continúan teniendo presencia importante y son considerados como oportunidades viables para contribuir a la ampliación de oportunidades de aprendizaje de numerosas poblaciones, especialmente para los habitantes de los países en desarrollo (kiers, 2016; González, 2016).

Como menciona Batanero (2002), Aprender estadística implica el dominio de ciertas habilidades generales para el manejo, la comprensión y comunicación de datos estadísticos, más que el dominio de conceptos y técnicas aisladas: implica comprensiones globales más o menos amplias, aunadas a otro tipo de competencias, así mismo ante la gran cantidad de información que en la actualidad se genera, la estadística es imprescindible en todas las áreas de conocimiento, por loque los MOOC, diseñados de manera adecuada y mantenerlos actualizados, permiten por su accesibilidad y flexibilidad, aprender la estadística desde cualquier lugar y al ritmo de cada persona y le posibilitan para interactuar con materiales actualizados, ejercicios prácticos y evaluaciones automatizadas que refuerzan el aprendizaje.

Nuestro país requiere crear condiciones para que un mayor número de personas aproveche las oportunidades existentes para la superación personal y la adquisición de conocimientos y habilidades que les permitan acceder a mejores empleos y contribuir a la mejora de su calidad de vida y la de sus comunidades. Por otra parte, las empresas y organizaciones requieren contar con personas competentes y actualizadas permanentemente en los distintos campos profesionales, los MOOC ofrecen la posibilidad de atender ambas necesidades sociales.

PARTE EXPERIMENTAL

Diseño de la investigación

Como resultado de los exámenes departamentales anteriores se pudieron notar algunas deficiencias en la unidad y buscando precisamente una alternativa para la mejora del aprendizaje, se propone implementar un MOOC como complemento al método tradicional de estar con ellos frente a grupo, para poder analizar posteriormente si éste impacta significativamente sobre el aprovechamiento académico de la materia.

Con lo anterior, el MOOC está programado para 5 semanas que es el tiempo en que se tiene que cubrir dicha unidad.

Una vez que ya se tiene toda la información y está listo, se les dará la información pertinente a los alumnos para que lo inicien, esto se realizará justo en el mismo momento en que están cursando la unidad de forma presencial. La duración del MOOC está programada para un mes tiempo que está considerado en la planeación normal del curso. Cabe aclarar que a los grupos se les dividirá en dos partes, con la finalidad de que una parte del grupo curse el MOOC y la otra solamente las clases presenciales, aplicarles el mismo examen de la unidad y revisar si el MOOC impactó considerablemente sobre el aprendizaje significativo en los alumnos, además que los grupos son homogéneos pues ambos traen los mismos conocimientos previos, justificado esto con un examen diagnostico anterior y donde se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existía diferencia en conocimientos previos o no a lo que se obtuvo un Pvalor de 0.64.

Tipo de estudio

Este trabajo se desarrolla bajo un enfoque descriptivo y correlacional ya que se contará con una serie de datos que podrán ser analizados de forma descriptiva, sin embargo, la investigación principal se basa en analizar si existe un impacto positivo en el aprendizaje de los alumnos de la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Puebla con el uso del MOOC de Estimación, correspondiente a la segunda unidad de la materia de estadística Inferencial 1, ya que además de dar el curso tradicional de la materia, ellos se verán obligados a cursar y aprobar dicho MOOC, posteriormente se realizará una evaluación de la unidad de forma tradicional y entonces, mediante una prueba de hipótesis se podrá ver el impacto de éste sobre los alumnos.

Estaremos refiriéndonos a un diseño no experimental de tipo longitudinal, en donde se recolectarán datos durante el semestre agosto diciembre 2020 a verano 2021 para poder hacer inferencias respecto de los cambios ocurridos a lo largo de la duración del estudio con el uso del MOOC.

Se trabajará con el método cuantitativo ya que derivado de la aplicación del MOOC se podrán generar datos que posteriormente serán analizados de forma estadística, aplicando una prueba de hipótesis para verificar con un nivel de confianza del 95% si el MOOC de Estimación para la materia de Estadística Inferencial 1 impacta significativamente sobre el aprendizaje significativo en los alumnos.

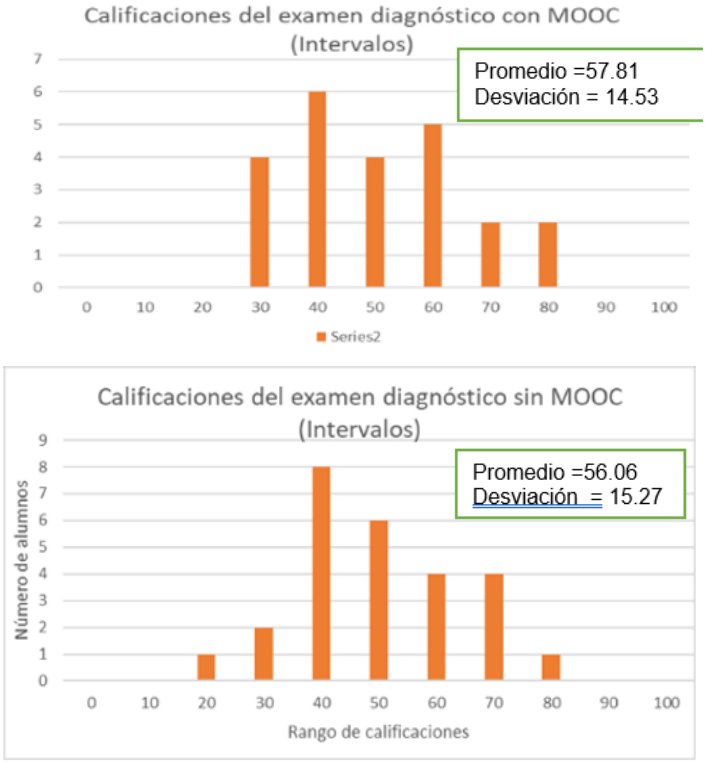
Se aplicará el examen de la unidad de Estimación correspondiente a la materia de Estadística inferencial 1 a los alumnos de Ingeniería Industrial que se encuentran cursando actualmente el tercer semestre, el examen será de la forma tradicional como se ha explicado anteriormente, pero con la diferencia de que adicional a las clases presenciales ellos cursarán el MOOC de Estimación. La población total de alumnos que se encuentran cursando la materia en el semestre es de 318 alumnos, de la cual se tomará una muestra representativa, considerando un 95%. Por lo que se obtiene mediante cálculos una muestra total de 60 alumnos, de los que se dividirán en 2 grupos y cuya nomenclatura para cada grupo se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 nomenclatura de los grupos de estudio

Grupo	Nomenclatura
Educación tradicional sin MOOC	SM
Educación virtual con MOOC	CM

Para que los dos grupos sean representativos, se corre una prueba de hipótesis para validar que el conocimiento previo sea el mismo, en la figura 1 se muestran los datos correspondientes, así mismo se comprueba (Pvalue =0.64) que no existe diferencia en el conocimiento previo para ambos grupos.

Figura 1 Prueba de hipótesis para conocimientos previos



	Prueba
Hipótesis nula	$\mathbf{Ho}: \mu 1 - \mu 2 = \mathbf{0}$
Hipótesis alternativa	$\mathbf{H}1: \mu 1 - \mu 2 \neq \mathbf{0}$

Valor T	GL	Valor p
0.47	61	0.640

Instrumentos de investigación

Se elabora el examen diagnóstico por la academia de Probabilidad y Estadística del Instituto Tecnológico de Puebla, cuidando en todo momento que éste considere las competencias específicas a desarrollar de la unidad, mismo que será aplicado a los alumnos de Ingeniería Industrial al término de la unidad de Estimación, ver Figura 2.

Figura 2 examen diagnóstico Estadística Inferencial



Para el diseño del MOOC se ocupa el formato de diseño instruccional que se muestra en la figura 3.

Figura 3 Formato de diseño instruccional

Formato diseño instruccional

Unidad y tema:	
Competencia:	
Tiempo de Duración:	
Elaborado por:	

Tema ***(Se especifica que tema se tratará el recurso)***	
Tipo de recurso	(video, documento, link externo, aplicaciones, uso de software, etc.)
Objetivo del recurso	*Se describe que pretende el actual recurso para la adquisición de conocimiento de la unidad*
Tiempo estimado	*Que requerirá el estudiante para asimilar la información y recomendado.*
Contenido del recurso	*El siguiente material le será ofrecido a los estudiantes:* *Se muestra que temas abarca y de manera textual lo que se desea enseñar.*

Técnicas y Métodos

Como resultado de la evaluación diagnóstica se distribuyen los tiempos de acuerdo con el entendimiento de los alumnos, para lo cual se utilizarán los formatos de diseño instruccional que nos darán las herramientas para la elaboración del MOOC.

Se recolectarán toda la información y recursos necesarios para llevar el curso de forma autónoma, para requerir lo menos posible la ayuda del profesor; para esto se dividirá en la siguiente forma:

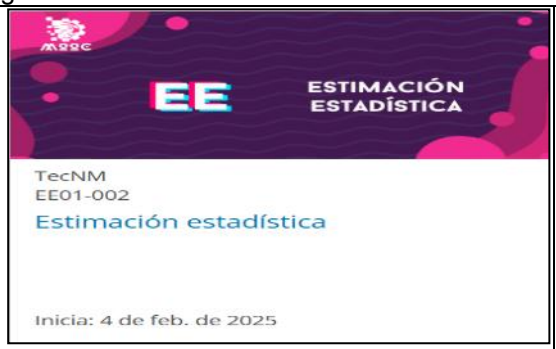
- Documentación técnica: se refiere a todos los conocimientos necesarios que necesitan los alumnos para la adquisición de los mismos, pudiendo ser: textos académicos, artículos científicos, enlaces a páginas, partes de libros, etc.

- Videos: los cuales compensan la ausencia del profesor y ayuda visualmente a los alumnos a la comprensión del tema, estos se deben cuidar que sean los más concisos posibles; con una duración máxima de 8 min y no se debe repetir la información que se dio en la documentación técnica.

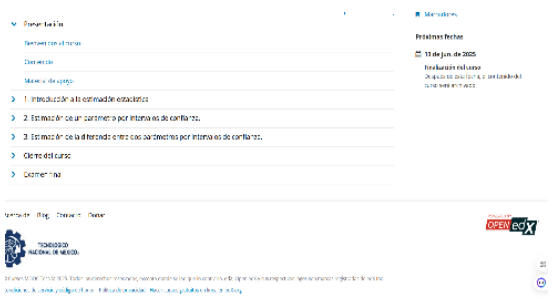
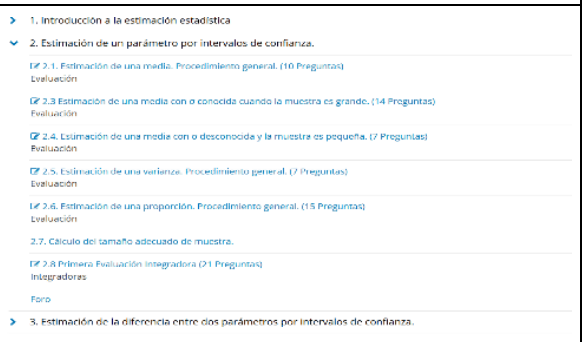
- Exámenes de autoevaluación: estos ayudan a medir el avance que tiene el alumno y dan evidencia del aprendizaje del mismo, estos deben asegurar que se puedan responder a partir de la información mostrada en los puntos anteriores y el alumno no requiera buscar en otras fuentes.

Una vez estructurado el material anterior se sube a la plataforma del TecNM, la cual alojará el MOOC de Estimación, cuidando que la estructura de la misma contemple la afluencia de un gran número de personas ver figura 4.

Figura 4 Estructura del MOOC

<table>
<tr>
<td> 

Portada</td>
<td> 

Presentación</td>
</tr>
<tr>
<td> 
Temario</td>
<td> 

Desarrollo de tema y evaluaciones</td>
</tr>
</table>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los primeros resultados que se obtuvo preliminarmente es el examen diagnóstico, el cual nos muestra el nivel de dominio de los temas requeridos para el aprendizaje de la unidad, los resultados del grupo con enseñanza tradicional se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Resultados del examen diagnóstico, grupo sin MOOC

Alumno	Calificación	Alumno	Calificación
SM1	58	SM17	79
SM2	30	SM18	45
SM3	66	SM19	90
SM4	57	SM20	60
SM5	45	SM21	48
SM6	45	SM22	36
SM7	45	SM23	63
SM8	60	SM24	45
SM9	54	SM25	48
SM10	79	SM26	57
SM11	75	SM27	42
SM12	72	SM28	51
SM13	60	SM29	81
SM14	27	SM30	54
SM15	33	SM31	63
SM16	66	SM32	60

Los resultados del grupo con enseñanza virtual (MOOC) se observan en la tabla 3.

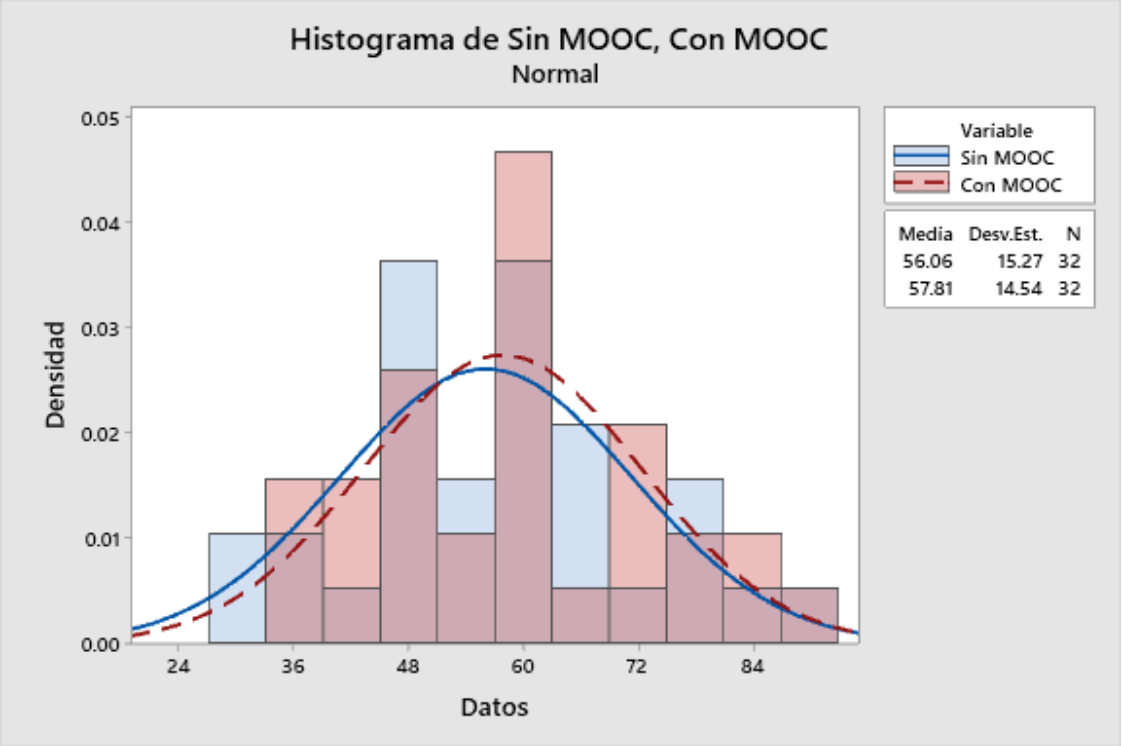
Tabla 3 Resultados del examen diagnóstico grupo con MOOC

Alumno	Calificación	Alumno	Calificación
CM1	42	CM17	45
CM2	39	CM18	60
CM3	36	CM19	60
CM4	36	CM20	60
CM5	69	CM21	60
CM6	33	CM22	69
CM7	69	CM23	48
CM8	54	CM24	81
CM9	63	CM25	78
CM10	81	CM26	42
CM11	54	CM27	69
CM12	57	CM28	48
CM13	90	CM29	48
CM14	60	CM30	60
CM15	78	CM31	59
CM16	57	CM32	45

Para trabajar con el MOOC, los grupos de estudio cuentan con el mismo nivel de conocimiento previo pues se llevó a cabo la prueba de contraste para ver si existe diferencia significativa en

conocimientos previos o no. Realizando una comparación de los niveles de conocimiento como se puede observar en la figura 5.

Figura 5 Comparación de resultados de examen diagnóstico entre grupos.



Formalizando el análisis gráfico con una prueba de hipótesis donde:

H_0: No hay diferencia significativa en el conocimiento previo promedio entre los grupos con el MOOC y sin él.

H_1: Hay diferencia significativa en el conocimiento previo promedio entre los grupos con el MOOC y sin él.

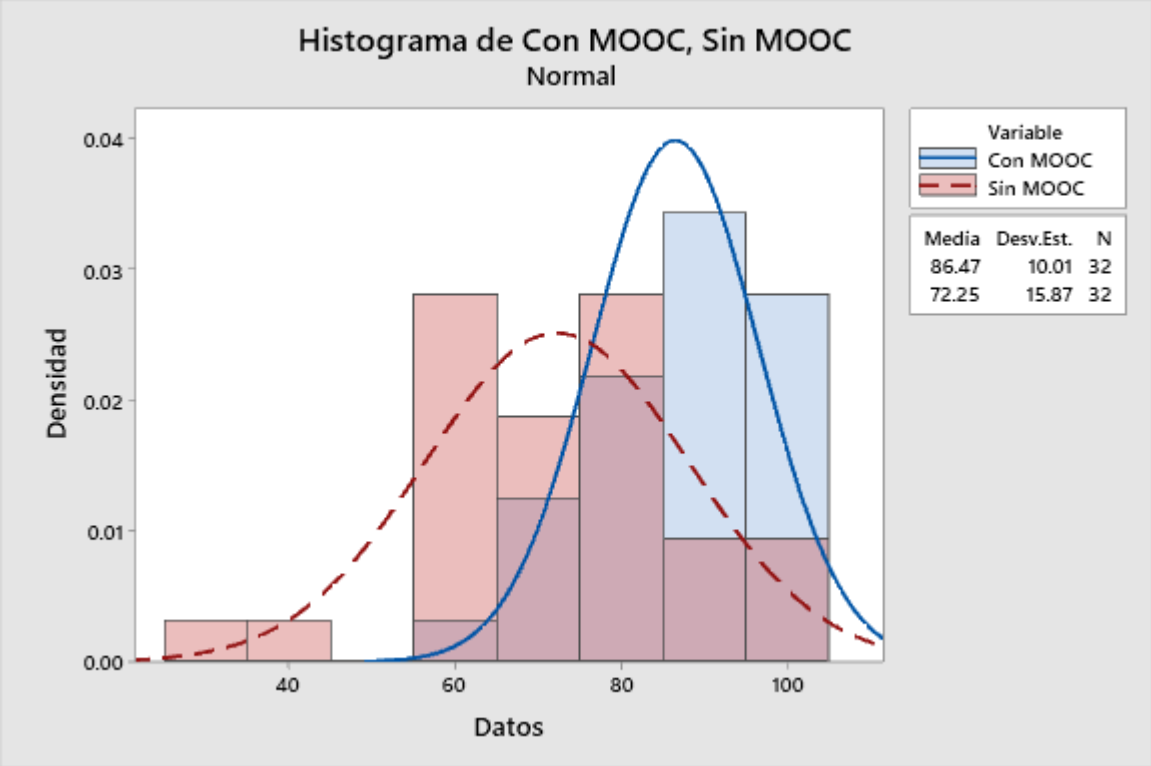
Realizando los cálculos se puede observar que no hay diferencia significativa para ambos grupos.

	Prueba
Hipótesis nula	$\mathbf{Ho}: \mu 1 - \mu 2 = \mathbf{0}$
Hipótesis alternativa	$\mathbf{H}1: \mu 1 - \mu 2 \neq \mathbf{0}$

Valor T	**GL**	**Valor p**
0.47	**61**	**0.640**

Después de la aplicación del MOOC, se evaluaron a los grupos de enseñanza tradicional (sin MOOC) y enseñanza virtual (con MOOC), obteniéndose los siguientes resultados para cada grupo:

Figura 6 Comparación de resultados finales con y sin MOOC.



Finalmente implementando una prueba de hipótesis sobre los resultados arrojados por la investigación, se obtuvieron los valores mostrados en la tabla 4.

Tabla 4 Resultados de la prueba de hipótesis

Muestra	N Media	Desv. Est.	Error estándar de la media
Con MOOC 32	86.5	10.0	1.8
Sin MOOC 32	72.3	15.9	2.8

Prueba

Hipótesis nula	$\mathbf{Ho}: \mu 1 - \mu 2 = \mathbf{0}$
Hipótesis alternativa	$\mathbf{H1}: \mu 1 - \mu 2 \neq \mathbf{0}$

Valor T	GL	Valor p
4.29	**52**	**0.0000788**

Con lo que se rechaza la hipótesis nula y se establece que, si hay diferencia significativa en el aprovechamiento académico promedio con el uso del MOOC

CONCLUSIONES

Realizando un resumen de los datos, se obtuvo como se esperaba una diferencia significativa en cuanto al uso del MOOC en la enseñanza de la unidad “estimación” ya que los alumnos en forma global obtuvieron un mejor promedio que el que se tiene en una enseñanza tradicional.

Como se habló en la justificación se obtuvieron resultados similares a los de Naji (2020) ya que, de manera similar, su implementación del MOOC fue enfocado a contemplar grupos extensos, y

mediante los videos atender las dudas recurrentes que tienen los alumnos, debido a la obligatoriedad del curso se tuvo resultados diferentes en el nivel de deserción a los de Watson (2020), esto puede ser debido a una planeación mediante el diseño instruccional y la evaluación de distribución del tiempo de los alumnos.

En los que respecta a ampliar la investigación del trabajo, se recomendaría ampliar a un curso completo y a una mayor población objetivo, ya que, aunque los métodos empleados fueron correctos, hay otros factores que se deben considerar como: la utilización por estudiantes externos, implementación de estrategias diferentes educativas como instrucción por pares, uso de aplicaciones y software interactivo para complementar la experiencia de enseñanza virtual.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aragón Diez, J. (2001). La psicología del aprendizaje. Caracas: San Pablo.

2. Batanero, C. (2002). Los retos de la cultura estadística. *Jornadas interamericanas de enseñanza de la estadística*, 5-7.

3. González, C. S., Collazos, C. A., & García, R. (Enero de 2016). Desafío en el diseño de MOOCs: incorporación de aspectos para la colaboración y la gamificación. Revista de Educación a Distancia, 48, 1-23.

4. Gros, B. (1997). Diseño y programas educativos. Pautas pedagógicas para la elaboración de software. Barcelona: Ariel Education.

5. Kiers, J. (2016). MOOCs and their Effect on the Institution: Experiences in Course Design, Delivery and Evaluation; Research; Faculty Development; Unbundling and Credits for MOOCs. Foro de Educación, 133-149.

6. Lewin, T. (2012). “Instruction for Masses Knocks Down Campus Walls”, en New York Times. [En línea]. Disponible en http://www.nytimes.com/2012/03/05/education/moocs-large-courses-open-to-alltopple-campus-walls.html?_r=0

7. Mayer,R.E.(1999). Diseño educativo para un aprendizaje constructivista: Aula XII Santillana,Madrid.

8. Naji, K. (2020). Adoption of MOOCs by Emerging Countries Seeking Solutions to University Overcrowding. Sidi Mohammed Ben Abdullah University, 78-103.

9. Poole, B. J. (2000). Docentes del siglo XXI. Cómo desarrollar una práctica docente competitiva. Colombia: McGraw-hill / Interamericana, S.A

10. Sukriono, D. (2020). Using Massive Open Online Course (MOOC) on Pancasila Education Increasing Students’ Score. iJIM, 138-148.

11. Watson, W. (2020). The Influence of Successful MOOC Learners’ Self-Regulated Learning Strategies, Self-Efficacy, and Task Value on Their Perceived Effectiveness of a Massive Open Online Course. International Review of Research in Open and Distributed Learning, 82-98.

MATRICES DE RECONSTRUCCIÓN PARA OBTENCIÓN DE IMAGEN TOMOGRÁFICA POR INFRARROJO

Laura Judith Muñoz Arrona[1], Itzel Ruiz Lopez[1], Andrea Gutiérrez Fernández[1], Angel Adad Guzmán Zaragoza[1], Svetlana Kashina Kashina[1], José Marco Balleza Ordaz[1], Ximena Marbán

Guerrero[11]División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuatolaurajudith.munoz.2@gmail.com

RESUMEN

Este proyecto presenta un sistema de tomografía óptica difusa (TOD) basado en luz infrarroja, utilizando LEDs infrarrojos y fototransistores. Esta técnica permite detectar y reconstruir imágenes de objetos sólidos mediante la dispersión y absorción de luz en medios opacos. Se construyó un sistema electrónico con un arreglo lineal de emisores IR y fototransistores, empleando una técnica de adquisición adyacente. Para la reconstrucción se utilizó la Transformada de Coseno Discreta (DCT), generando representaciones espaciales eficientes de los objetos. Los resultados experimentales validaron la funcionalidad del dispositivo, aunque la resolución fue limitada por el número de sensores. El sistema representa una solución accesible y eficaz para aplicaciones biomédicas.

INTRODUCCIÓN

La tomografía óptica difusa (TOD) es una técnica no invasiva que permite generar imágenes internas en medios altamente dispersivos como los tejidos biológicos. A diferencia de técnicas como la tomografía por emisión de positrones o la resonancia magnética, la TOD no emplea radiación ionizante, haciéndola segura y adecuada para aplicaciones médicas. En este proyecto, se utilizó un sistema de emisores y detectores de luz infrarroja para obtener imágenes tomográficas de objetos sólidos mediante el procesamiento matemático de los datos ópticos adquiridos.

TEORÍA

La base física de la Tomografía Óptica Difusa (TOD) radica en los fenómenos de dispersión y absorción de la luz en medios turbios. La luz infrarroja interactúa con los objetos generando patrones complejos de transmisión y reflexión, los cuales pueden ser captados por fotodetectores estratégicamente ubicados. En este sistema, se utilizaron LEDs infrarrojos como fuente emisora debido a su capacidad de emitir radiación en longitudes de onda no visibles al ojo humano (generalmente entre 850–950 nm), lo cual resulta ideal para la penetración superficial en materiales biológicos o sólidos opacos. Además, los LEDs IR son compactos, económicos, eficientes en consumo energético y ofrecen una buena estabilidad espectral, lo que los convierte en una excelente opción para aplicaciones de imagen óptica.

Por otro lado, se emplearon fototransistores como sensores receptores de la señal luminosa reflejada o transmitida. Estos dispositivos convierten la energía de la luz infrarroja recibida en una señal eléctrica proporcional, la cual puede ser cuantificada por un sistema de adquisición de datos. Su alta sensibilidad a las longitudes de onda específicas del infrarrojo los hace adecuados para detectar pequeñas variaciones en la intensidad de luz que resultan de la interacción con un objeto. Esto es fundamental para poder discriminar espacialmente la información óptica y, posteriormente, generar una reconstrucción.

El método de **adquisición adyacente** consiste en activar secuencialmente un emisor de luz (en este caso, un LED infrarrojo) mientras los detectores situados en posiciones cercanas (adyacentes) registran la luz dispersada por el objeto. Este tipo de adquisición permite una mayor sensibilidad a

los cambios locales en la densidad óptica del objeto, ya que las trayectorias de la luz son más cortas y predominantemente superficiales. En sistemas con geometrías limitadas, como el cilindro experimental utilizado, este método resulta efectivo para generar una matriz de datos suficientemente informativa sin requerir una gran cantidad de sensores ni geometrías complejas de adquisición.

Para reconstruir imágenes a partir de estas señales, se aplicó la Transformada de Coseno Discreta (DCT), una técnica matemática que representa la energía espacial en términos de componentes de frecuencia. Esta transformada permite convertir la matriz de intensidades detectadas en una representación más eficiente, donde los coeficientes de baja frecuencia concentran la mayor parte de la información estructural del objeto. Esto facilita tanto la compresión como la interpretación visual de las imágenes reconstruidas.

$$u_{k;n} = a(k)cos\frac{(2n+1)k\pi}{2N}, n = 0,1, \dots, N-1$$

Donde $u_{k;n}$ es el coeficiente transformado, $a(k)$ es un factor de normalización, y N es el número de muestras. Esta representación matemática fue clave para lograr una reconstrucción eficiente a pesar del número limitado de sensores disponibles en el sistema.

METODOLOGÍA

El sistema fue ensamblado en dos protoboards de 5.6 cm × 16.5 cm utilizando LEDs IR383 con una longitud de onda de 940 nm como emisores, y fototransistores QSD124 con sensibilidad centrada en 880 nm como receptores. Estos componentes se organizaron en pares (emisor-receptor) y se insertaron en un cilindro pintado completamente de negro, diseñado específicamente con orificios distribuidos radialmente para permitir la colocación precisa de los sensores. El color negro del cilindro ayudó a minimizar la reflexión externa no deseada, favoreciendo una mayor absorción de luz y, por lo tanto, una señal más limpia al interior.

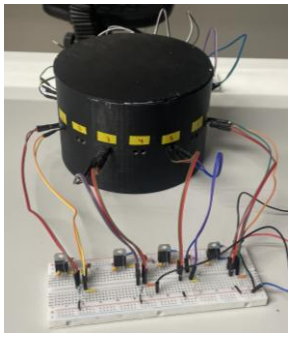


Figure 1: Dispositivo de adquisición adyacente para tomografía óptica difusa basado en luz infrarroja.

Durante el procedimiento experimental, se introdujo un objeto sólido también pintado de negro dentro del cilindro, simulando una estructura opaca a analizar. El sistema operó bajo un esquema de adquisición adyacente, en el que los LEDs se activaban secuencialmente uno por uno, mientras que todos los fototransistores registraban simultáneamente la luz infrarroja dispersada por el objeto.

Los datos obtenidos se organizaron en una matriz de reconstrucción que representa la intensidad detectada por cada fototransistor en función del LED activado. Esta matriz fue posteriormente procesada mediante algoritmos de interpolación espacial y la Transformada de Coseno Discreta

(DCT) en el entorno de MATLAB, generando así una representación tomográfica preliminar de la distribución óptica del objeto.

RESULTADOS

Los resultados experimentales mostraron que el sistema diseñado es capaz de detectar y reconstruir la forma básica del objeto colocado dentro del cilindro, en la región de análisis. La matriz de adquisición obtenida a partir del método de activación adyacente permitió mapear la intensidad de luz detectada en cada posición relativa de emisor-receptor.

A pesar del número limitado de sensores, se logró obtener una visualización distinguible entre regiones con y sin material dentro del campo de dispersión, evidenciando diferencias ópticas causadas por la presencia del objeto negro. Esto valida la sensibilidad del sistema frente a heterogeneidades internas.

Posteriormente, se aplicó la Transformada de Coseno Discreta (DCT) a la matriz de intensidades, lo que permitió reconstruir una imagen espacial comprimida**,** preservando los patrones de baja frecuencia que contienen la mayor parte de la información estructural del objeto. Esta técnica demostró una eficiencia computacional adecuada para sistemas con bajo número de sensores.

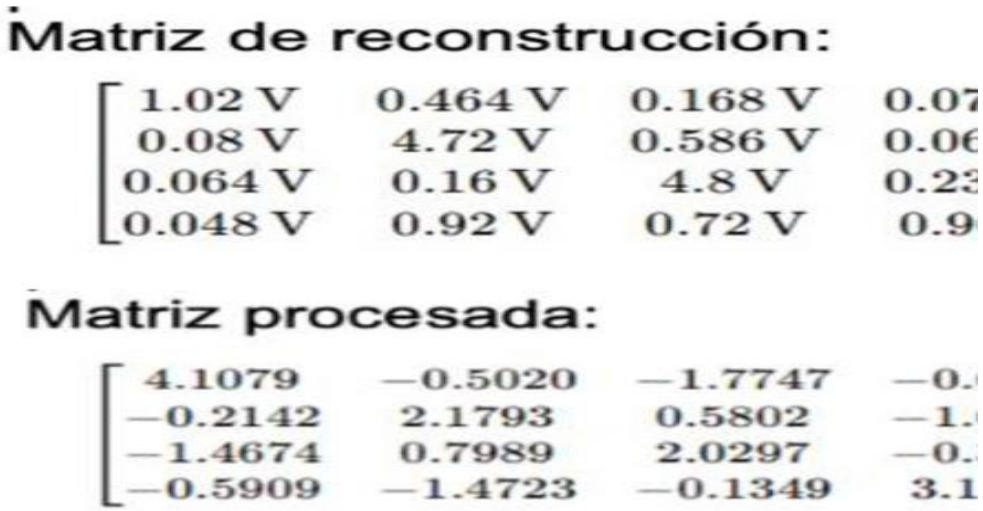


Figure 2: Resultados obtenidos a partir de la matriz de reconstrucción y matriz procesada

CONCLUSIÓN

El sistema desarrollado de tomografía óptica difusa utilizando LEDs infrarrojos y fototransistores demostró ser una alternativa viable y de bajo costo para la obtención de imágenes internas en objetos opacos. A pesar de las limitaciones en resolución espacial debido al número reducido de sensores, la implementación de matrices de reconstrucción junto con la Transformada de Coseno Discreta permitió representar con eficiencia las regiones internas del objeto analizado. Se validó la funcionalidad del método de adquisición adyacente y se destaca su potencial en aplicaciones biomédicas no invasivas. Como trabajo futuro, se contempla la integración de más sensores y el uso de algoritmos avanzados de reconstrucción para mejorar la calidad de imagen y la resolución espacial del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Transformada de coseno discreta. (s.f.). AcademiaLab. https://academia-lab.com/enciclopedia/transformada-de-coseno-discreta/
2. Reconstrucción de imagen en tomografía por emisión de positrones. (2002). https://www.die.upm.es/im/papers/Reconst_RACFN.pdf
3. EVERLIGHT. (s.f.). Datasheet IR383. https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/219282/EVERLIGHT/IR383.html
4. ON Semiconductor. (s.f.). QSD124 Phototransistor Datasheet. https://www.mouser.com/ProductDetail/onsemi-Fairchild/QSD124?qs=MxR4l2%2FOSsAHaGvM89M6PA%3D%3D

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO BIOMÉDICO PORTÁTIL PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL DE PARÁMETROS FISIOLÓGICOS Y AMBIENTALES

Alejandra Ordoñez Mondragón[1], Ana Gabriela Torres Bermúdez[1], Ana Valeria Zumaya García[2], Francisco Morales Morales[2]

[1] Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Ingeniería Biomédica,León, Guanajuato, México. Loma del Bosque 103, Colonia Lomas del Campestre León, Guanajuato, México. CP. 37150. [2] Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Colonia Lomas del Campestre León, Guanajuato, México. CP. 37150.

a.ordonezmondragon@ugto.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un dispositivo biomédico portátil capaz de medir múltiples parámetros vitales y ambientales. Se diseñó un dispositivo que integra sensores de saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca, temperatura, humedad, y detección de alcohol y metano en el aliento. La adquisición de datos se realizó mediante un microcontrolador Arduino, que procesa las señales de los sensores y las transmite a una interfaz gráfica en LabVIEW para visualización en tiempo real y emisión de alertas. El dispositivo incluyó una carcasa personalizada fabricada mediante impresión 3D, lo que facilitó la integración de componentes y mejoró su portabilidad. Además, se incorporaron actuadores como LEDs y buzzers para retroalimentación visual y auditiva en caso de anomalías. Las pruebas demostraron que el sistema proporciona mediciones estables y confiables en tiempo real. Los valores de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno mostraron una alta correlación con dispositivos comerciales, dentro del rango aceptable de 60 a 120 LPM para frecuencia cardíaca y superiores al 94% para oxigenación. En situaciones controladas, el sistema alertó cuando estos valores estaban fuera del rango. Los sensores de alcohol y metano detectaron concentraciones relevantes, con una alerta activada para niveles de alcohol superiores a 0.40 mg/L. Los sensores de alcohol y metano detectaron concentraciones relevantes en muestras de aliento con tiempos de respuesta adecuados para aplicaciones preventivas. Para ello, el dispositivo fue diseñado con un enfoque en accesibilidad y eficiencia, con la integración de diversos sensores. Finalmente, el desarrollo de este dispositivo representa una solución innovadora para el monitoreo continuo de la salud, con aplicaciones en eventos masivos, espacios recreativos y comunidades remotas.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo en tiempo real de parámetros de salud es una herramienta clave para mejorar la atención médica y prevenir enfermedades, ya que permite la detección temprana de anomalías, la gestión personalizada del bienestar y la optimización en la toma de decisiones clínicas.

En este proyecto se busca desarrollar un sistema integral capaz de medir parámetros vitales clave, como frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno, temperatura y humedad ambiental, así como niveles de alcohol y metano en el aire exhalado, utilizando cuatro sensores biomédicos. Además, incorpora actuadores como LEDs y buzzers para alertar al usuario y facilitar la toma de decisiones inmediatas.

La relevancia de este dispositivo no solo radica en su capacidad para monitorear la salud, sino también en su aplicación en eventos, donde se requiere asegurar el bienestar de los asistentes y prevenir situaciones de riesgo. Por otro lado, mediante el uso de la versión más reciente de LabVIEW (LabVIEW 2024) como plataforma de control y visualización, el sistema proporciona una interfaz intuitiva que permite analizar los datos en tiempo real, promoviendo así un enfoque proactivo en la gestión de la salud y la seguridad.

Este trabajo no solo contribuye al desarrollo de dispositivos biomédicos innovadores, sino que también subraya la importancia de integrar tecnología accesible y eficiente en contextos que requieren monitoreo continuo, demostrando su potencial para ser aplicado en situaciones críticas como eventos masivos o áreas remotas.

TEORÍA

En sistemas de monitoreo biomédico, se utilizan diversos sensores electrónicos capaces de medir variables fisiológicas y ambientales en tiempo real. Los sensores seleccionados son compatibles con microcontroladores de uso común, como el Arduino Uno, y ofrecen eficiencia y facilidad de integración en sistemas portátiles.

El sensor MAX30100 es un dispositivo digital que permite medir la saturación de oxígeno en sangre (SpO_2) y la frecuencia cardíaca mediante el principio de fotopletismografía. Este sensor incorpora emisores de luz (rojo e infrarrojo) y un fotodiodo receptor. La luz emitida atraviesa el tejido, y su absorción variable según el volumen sanguíneo permite calcular ambos parámetros. El MAX30100 se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo I2C, utilizando pines dedicados para la transmisión de datos y la comunicación con el sistema.[1]

Para el monitoreo de condiciones ambientales, se emplea el sensor DHT11, un dispositivo digital que integra un termistor para la medición de temperatura y un sensor capacitivo para la humedad relativa. La salida digital del sensor proporciona los datos en una secuencia que incluye tanto la temperatura como la humedad. Para su correcto funcionamiento, se requiere la utilización de una resistencia pull-up en la conexión.

En cuanto a la detección de alcohol en el aliento, se utiliza el sensor MQ-3, un dispositivo analógico que mide la concentración de vapores de etanol en el aire. Este sensor funciona mediante un semiconductor basado en óxido de estaño (SnO_2), cuya resistencia disminuye en presencia de alcohol. La salida analógica de este sensor es proporcional a la concentración de alcohol en el ambiente y puede ser procesada por un microcontrolador para obtener un valor cuantificable.[2]

De forma similar, el sensor MQ-4, también analógico, está optimizado para detectar metano (CH_4) y otros gases combustibles. Al igual que el MQ-3, el MQ-4 utiliza un elemento semiconductor para detectar variaciones en la concentración del gas, proporcionando una salida analógica que puede ser procesada para obtener la concentración de metano en el aire.[2]

El microcontrolador comúnmente empleado para gestionar señales y controlar estos sistemas es el Arduino Uno, que utiliza el chip ATmega328P. Esta placa cuenta con múltiples pines digitales y analógicos para la adquisición de señales de los sensores. El microcontrolador está equipado con un convertidor analógico-digital de 10 bits, lo que permite representar las señales analógicas en un rango discreto adecuado para su procesamiento.[3]

LabVIEW, por su parte, es una plataforma de programación gráfica que facilita el diseño de interfaces de usuario y el procesamiento de datos en tiempo real. En sistemas de monitoreo biomédico, LabVIEW se utiliza para visualizar y analizar los datos adquiridos por los sensores. Mediante su entorno de programación basado en diagramas de bloques, LabVIEW interpreta los valores enviados por el microcontrolador y los presenta en una interfaz gráfica de usuario (GUI). Esta interfaz muestra los datos numéricos adquiridos, activando alertas visuales mediante indicadores LED y emite señales acústicas mediante un buzzer. Además, permite ajustar los umbrales de alerta en función de las condiciones detectadas.[4]

Los umbrales de alerta para los parámetros fisiológicos y ambientales son fundamentales para detectar situaciones que puedan comprometer la salud o seguridad del usuario. En el caso de la frecuencia cardíaca, se considera que valores inferiores a 60 latidos por minuto (BPM) pueden indicar bradicardia, una condición que requiere atención médica, mientras que valores superiores a 120 BPM pueden ser indicativos de taquicardia, lo que también representa un riesgo para la salud. Para

la saturación de oxígeno en sangre (SpO_2), niveles por debajo del 94% son considerados anómalos y pueden reflejar hipoxemia, una condición que puede afectar gravemente al organismo.[5]

La humedad ambiental también juega un papel crítico en la comodidad y seguridad de los individuos. Valores fuera del rango de 40% a 60% de humedad relativa pueden ser incómodos o perjudiciales para la salud, ya que tanto la humedad baja como alta, pueden afectar la respiración y la piel. La temperatura ambiental también debe mantenerse dentro de un rango adecuado, típicamente entre 18°C y 24°C, para evitar condiciones extremas que puedan afectar el bienestar físico.

En cuanto a los gases presentes en el aliento, se considera que concentraciones de alcohol superiores a 0.40 mg/L pueden indicar un nivel de intoxicación que presenta riesgos para la salud y la seguridad, mientras que la presencia de metano en concentraciones superiores a 10 partes por millón (ppm) podría señalar una posible fuga de gas, representando un riesgo de intoxicación o explosión.[6]

Estos umbrales permiten activar alertas automáticas para notificar condiciones de riesgo, brindando una respuesta inmediata mediante los actuadores conectados al sistema.

PARTE EXPERIMENTAL

Se emplearon diversos sensores para el monitoreo de parámetros biomédicos y ambientales, cada uno seleccionado por su capacidad de detectar condiciones críticas en tiempo real. En la Tabla 1 se muestran los sensores seleccionados y en la Tabla 2, se presentan los valores de alerta definidos para cada parámetro monitoreado.

Sensor	Descripción
MAX30100	Sensor para medir la frecuencia cardíaca (*BPM*) y oxigenación en sangre (SpO_2).
DHT11	Sensor para medir la humedad y temperatura ambiental.
MQ3	Sensor para detectar concentraciones de alcohol en el aliento.
MQ4	Sensor para medir la presencia de metano en el aliento.

Tabla 1. Sensores utilizados en el dispositivo.

Frecuencia cardíaca (*BPM*)	<60: Bradicardia, >120: Taquicardia
Oxigenación en sangre (SpO_2)	<94%: Niveles bajos de oxigenación
Humedad ambiental	Fuera del rango 40% a 60%
Temperatura ambiental	Fuera del rango 18°C a 24°C
Concentración de alcohol en el aliento	>0.40 mg/L
Presencia de metano en el aliento	>10 ppm

Tabla 2. Valores de alerta definidos para los parámetros.

Los sensores y sus respectivos rangos de alerta fueron seleccionados por su capacidad para proporcionar datos relevantes en tiempo real y su facilidad de integración en el sistema, asegurando respuestas rápidas ante desviaciones de los valores normales. Es así como se llevaron a cabo una serie de pasos con cada uno de los sensores para verificar el correcto funcionamiento de acuerdo con las especificaciones establecidas, como se puede detallar en la Figura 1, este enfoque permitió confirmar la precisión de las lecturas de los datos y garantizar la adecuada integración de los sensores en el sistema final.

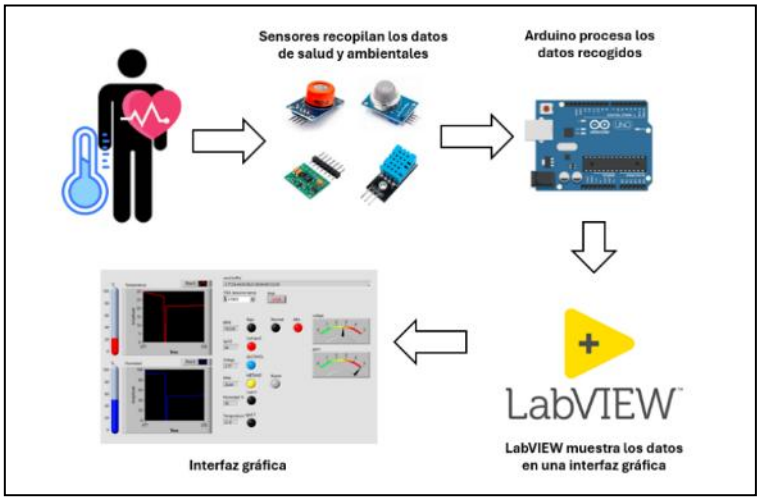


Figura 1. Diagrama de obtención de señales y procesamiento de datos.

Una vez seleccionado el sensor y especificados los parámetros en los que actuaría, por medio de la IDE de Arduino y usando C++ como lenguaje de programación base, se codificó al microcontrolador para que el sensor, a través de la adquisición de datos recoja toda la información y pueda ser leída por el Arduino mediante los pines digitales y analógicos, así el código previamente cargado al microcontrolador, se ejecuta para procesar la información recibida para un posterior control de los actuadores, enviando datos tanto al Serial Monitor como a la LCD. Concluidas las pruebas donde se usaron simulaciones de situaciones controladas, para comprobar su veracidad, por medio de LabVIEW utilizando un lenguaje de programación gráfico G, se realizó una interfaz gráfica, para controlar y monitorear el Arduino, mediante protocolos de comunicación como es el Serial. Entonces con la interfaz gráfica y el dispositivo físico actúan dinámicamente con el usuario, alertándolo visual y auditivamente sobre los posibles riesgos en su salud.

A diferencia del dispositivo biomédico, el interactuar con una interfaz gráfica en LabVIEW permite ofrecer al usuario una experiencia más dinámica y visual de la monitorización de distintos parámetros tanto de su salud como del entorno que lo rodea. La interfaz diseñada mediante un lenguaje que es visual, se presenta ante el usuario con distintos elementos e indicadores visuales que se activan cuando los datos capturados se encuentran fuera de los límites de un rango adecuado. El panel frontal es la interfaz de usuario, ver la Figura 2, donde se visualizan los datos procesados y los indicadores correspondientes: para los visuales se integraron termómetros que representan gráficamente los valores de la humedad y temperatura en rangos visuales claros, también se agregó un medidor para el alcohol; para los numéricos que muestran los valores actuales de: BPM (frecuencia cardíaca), SpO2 (saturación de oxígeno), Voltaje (sensor de alcohol), PPM (concentración de metano), el porcentaje de la humedad y los grados centígrados de temperatura; y para los LEDs que se iluminan según las condiciones incluyendo a un buzzer para los valores del metano.



Figura 2. Interfaz gráfica elaborada en LabVIEW que integra los indicadores y actuadores de cada sensor.

El diseño del dispositivo comenzó con la planificación de su estructura y la disposición de los componentes electrónicos. Se priorizó un diseño compacto y funcional, asegurando que los sensores y actuadores estuvieran correctamente ubicados para optimizar el monitoreo de los parámetros vitales. También se consideró la facilidad de uso y el acceso para el mantenimiento del dispositivo, garantizando que pudiera operar de manera eficiente en diversas situaciones. Para la fabricación del prototipo físico, se utilizó la impresión 3D, un proceso que permitió crear una representación precisa del diseño, facilitando la integración de los componentes electrónicos y permitió realizar pruebas de ensamblaje antes de la fabricación final. En la Figura 3, se puede apreciar el modelo del dispositivo biomédico para su impresión 3D.

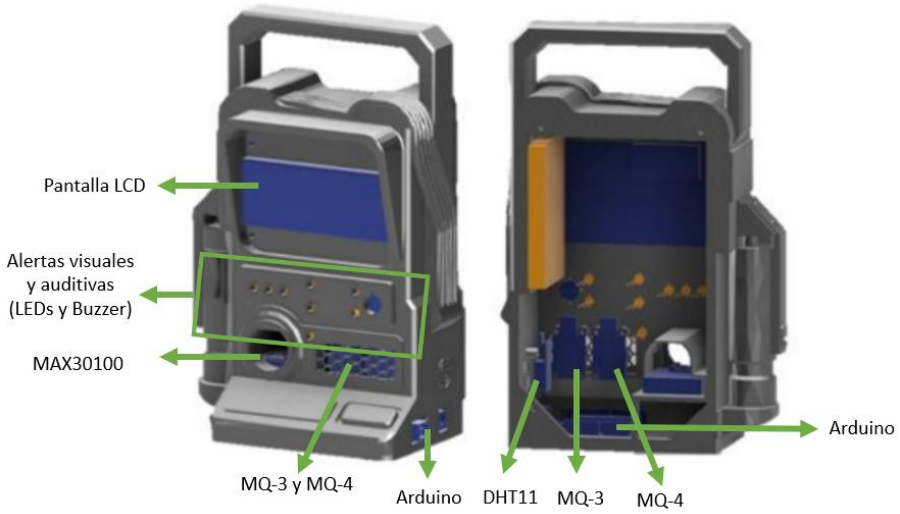


Figura 3. Vista exterior e interior del modelo 3D del dispositivo biomédico.

Posteriormente, se procedió a la integración final de los componentes electrónicos en la estructura física del dispositivo, cada componente fue conectado de acuerdo con el diseño previamente

establecido, asegurando que estuvieran correctamente ubicados y fuesen accesibles para futuras modificaciones o mantenimiento. En la Figura 4, se muestra el dispositivo biomédico 3D final integrando todos los componentes, sensores y actuadores.



Figura 4. Dispositivo biomédico 3D final ensamblado con todos los componentes integrados.

Tras completar la integración, se realizaron pruebas controladas para evaluar el funcionamiento del dispositivo en condiciones específicas, se monitorearon tanto el rendimiento del hardware como la interfaz de usuario, asegurándose de que las alertas y visualizaciones de datos fueran claras y efectivas, verificando la estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones operativas, garantizando que el dispositivo funcionara de manera fiable, tanto en escenarios normales como en situaciones que pudieran generar variaciones en las mediciones. Los resultados de las pruebas permitieron ajustar algunos parámetros del sistema, como los umbrales de alerta y la calibración de los sensores, para optimizar su desempeño. Este proceso aseguró que el dispositivo cumpliera con los estándares de calidad y funcionamiento requeridos, sentando las bases para su aplicación práctica en entornos reales.

RESULTADOS

Durante las pruebas realizadas, se obtuvieron diversos valores al utilizar el dispositivo tanto en personas como en condiciones controladas. Las mediciones incluyeron frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno, temperatura y humedad ambiental, así como concentraciones de alcohol y metano en el aire. Para evaluar su desempeño, se llevaron a cabo pruebas específicas en ambientes con mayor humedad, exposición controlada a gas metano y alcohol, obteniendo resultados que evidencian la sensibilidad y precisión del sistema. Los valores obtenidos están resumidos en la Tabla 3, donde se presenta un análisis comparativo de las alertas detectadas y los parámetros monitoreados.

Parámetros medidos	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
BPM	66.94	61.48	80.99	48.63	117.71
SpO_2	95%	94%	95%	93%	94%
Temperatura	25.80	25.80	25.40	25.50	24.80
Humedad	41%	42%	41%	41%	76%
Voltaje MQ3	0.90	1.43	2.68	3.48	1.96
ppm MQ4	0.34	2.83	26.93	32.64	18.48

Tabla 3. Resultados de pruebas realizadas.

Alertas detectadas	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
BPM Bajo	Apagada	Apagada	Apagada	Encendida	Apagada
BPM Alto	Apagada	Apagada	Apagada	Apagada	Apagada
SpO2 Bajo	Apagada	Apagada	Apagada	Encendida	Apagada
Temperatura Inadecuada	Encendida	Encendida	Encendida	Encendida	Encendida
Humedad Inadecuada	Apagada	Apagada	Apagada	Apagada	Encendida
Nivel de Alcohol Alto	Apagada	Apagada	Encendida	Encendida	Apagada
Nivel de Metano Alto	Apagada	Apagada	Encendida	Encendida	Encendida

Tabla 4. Alertas detectadas en las pruebas.

Con base en los datos obtenidos durante las pruebas, se analizó el comportamiento de las alarmas integradas en el dispositivo. Este análisis permitió identificar las condiciones específicas que activaron los actuadores en respuesta a parámetros fuera de los rangos establecidos. Los resultados de este análisis, que incluyen tanto la activación como la ausencia de alarmas en diferentes escenarios, se presentan en la Tabla 4.

Al observar los datos obtenidos, se aprecia que las alarmas se activaron de manera consistente con los rangos de alerta definidos en la metodología. Esto confirma que el dispositivo responde adecuadamente ante condiciones de riesgo, lo que valida su funcionalidad y precisión en escenarios controlados. Además, estos resultados respaldan la capacidad del sistema para operar de manera confiable, cumpliendo con los objetivos planteados, permitiendo dar el siguiente paso para mejorar la efectividad de las pruebas, ya que, al dejar el dispositivo calibrado con pruebas controladas de nivel de alcohol y metano alto, podríamos pasar a probar directamente con una persona que se presente con alto nivel de alcohol en su sistema.

CONCLUSIONES

Este proyecto no solo cumplió con los objetivos establecidos, sino que también brindó valiosas oportunidades de aprendizaje y desarrollo tanto a nivel técnico como práctico. El dispositivo diseñado demostró ser funcional y eficaz al medir parámetros biomédicos y ambientales, como la saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca, concentración de alcohol y metano en el aliento, así como temperatura y humedad ambiental. La implementación de sensores y actuadores, junto con la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW, permitió una visualización efectiva y en tiempo real de los datos, lo que mejora la experiencia del usuario y valida el desempeño del sistema en condiciones específicas. La interacción entre los diferentes componentes del sistema proporcionó una comprensión más profunda sobre la importancia de la calibración y la integración de los sensores para lograr mediciones precisas. Además, se adquirieron conocimientos valiosos sobre la resolución de problemas y el manejo de diversos desafíos técnicos, lo que permitió que el producto final fuera funcional y aplicable a diversas situaciones. A largo plazo, el proyecto abrió la posibilidad de futuras mejoras y expansiones. Una de las posibles direcciones sería hacer el dispositivo más compacto, lo que permitiría su uso personal y ampliaría sus aplicaciones en diferentes entornos. Esto podría representar un avance significativo hacia la creación de dispositivos biomédicos más accesibles y adaptables, contribuyendo así al desarrollo de herramientas de monitoreo de la salud más eficientes y accesibles para una mayor variedad de usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Khandpur, R. S. (2014). Biomedical instrumentation: Technology and applications. McGraw-Hill Education.
2. Fraden, J. (2015). Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications (5th ed.). Springer.
3. Monk, S. (2016). Programming Arduino: Getting started with sketches (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
4. Bishop, R. H. (2007). Learning with LabVIEW (7th ed.). Pearson.
5. Ganong, W. F. (2010). Review of Medical Physiology (23rd ed.). McGraw-Hill Medical.
6. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2010). Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to methane. U.S. Department of Health and Human Services.

CHATBOTS TERAPÉUTICOS: APOYO EMOCIONAL PARA LA DEPRESIÓN MEDIANTE MODELOS DE LENGUAJE MULTIMODAL BASADOS EN IA

Leonardo Miguel Moreno Villalba[1,2], Francisco Jacob Ávila Camacho[1,2], Hilda Maria Torres Rodríguez[3], Mariana Zuleima Perez Gonzalez[1]

[1]Tecnologógico Nacional de México / TES Ecatepec, [2]Universidad Nacional Rosario Castellanos, [3]Colegio de Postgraduados Campus Montesillos
lmoreno@tese.edu.mx

RESUMEN

La depresión es un problema de salud pública de primer orden a escala global, afectando a un porcentaje significativo de la población y generando una carga considerable para los individuos y los sistemas de salud. El limitado acceso a la atención especializada, exacerbado por factores como el estigma, el costo y la escasez de profesionales, subraya la necesidad urgente de soluciones innovadoras. En respuesta a este desafío, se ha conceptualizado y desarrollado un Chatbot Multimodal con Inteligencia Artificial (IA); este chatbot terapéutico avanzado está diseñado para ofrecer apoyo emocional a personas con síntomas de depresión. Se distingue por su enfoque multimodal basado en IA, capaz de analizar no solo las entradas de texto del usuario, sino también biomarcadores vocales y expresiones faciales capturados a través de la cámara y el micrófono del dispositivo móvil. Este documento detalla el diseño, desarrollo y la evaluación inicial de la aplicación de estos Chatbots Terapéuticos Multimodales basados en IA. La metodología incluyó el desarrollo de una arquitectura robusta que integra modelos de procesamiento de lenguaje natural, análisis de audio y visión por computadora, junto con técnicas de fusión de datos para una comprensión holística del estado emocional del usuario. Se realizó un estudio piloto con usuarios que presentaban síntomas depresivos leves a moderados para evaluar la viabilidad, la aceptación y la efectividad preliminar de los chatbots. Los resultados indican una alta aceptación y usabilidad de la aplicación, junto con una reducción significativa en los síntomas depresivos reportados por los participantes tras un período de uso. Los modelos multimodales demostraron ser prometedores en la identificación de indicadores asociados a la depresión, superando el rendimiento de los modelos unimodales. Se concluye que los Chatbots Terapéuticos Multimodales basados en IA representan un avance significativo en el campo de los chatbots terapéuticos, ofreciendo un enfoque más sensible y personalizado para el apoyo emocional, aunque se requiere investigación adicional para su validación clínica a gran escala.

INTRODUCCIÓN

La depresión constituye uno de los trastornos mentales más prevalentes y discapacitantes a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que el 5% de los adultos a nivel global padecen depresión, afectando de manera desproporcionada a las mujeres (6% frente al 4% en hombres) y a los adultos mayores de 60 años (5,7%).1 Esta condición no solo implica un estado de ánimo deprimido o la pérdida de placer e interés en actividades, sino que también puede generar dificultades significativas en todas las áreas de la vida, incluyendo las relaciones familiares, sociales y el desempeño laboral o académico. En sus formas más graves, la depresión puede conducir al suicidio, siendo una de las principales causas de muerte en jóvenes.1 La carga global de la depresión es inmensa, representando un 4,3% de la morbilidad mundial y siendo una de las principales causas de discapacidad. Los costos económicos y sociales asociados son considerables, no solo en términos de atención sanitaria directa, sino también por la pérdida de productividad. A pesar de la existencia de tratamientos psicológicos y farmacológicos eficaces, una gran proporción de las personas afectadas no recibe la atención necesaria.

Diversas barreras impiden el acceso oportuno y adecuado a los servicios de salud mental. El estigma asociado a los trastornos mentales sigue siendo un obstáculo significativo, disuadiendo a muchas

personas de buscar ayuda (Thornicroft et al., 2016). Además, el costo de los tratamientos y la limitada disponibilidad de profesionales especializados, particularmente en áreas remotas o desfavorecidas, contribuyen a una brecha terapéutica alarmante (Kohn et al., 2004). En algunas regiones, la escasez de profesionales de la salud mental es crítica; por ejemplo, en Colombia, se estima que solo un pequeño porcentaje de adultos y adolescentes con trastornos mentales reciben atención específica, y existe un déficit considerable de psicólogos y psiquiatras. Esta situación subraya la necesidad imperante de soluciones innovadoras y escalables que puedan complementar los servicios de salud mental tradicionales y mejorar el acceso al apoyo.

En este contexto, las tecnologías digitales han emergido como un campo prometedor. Las intervenciones de salud mental digital (DMHIs, por sus siglas en inglés), que incluyen la telepsicología, aplicaciones móviles de autoayuda y, más recientemente, los agentes conversacionales o chatbots, han demostrado potencial para ofrecer intervenciones accesibles, discretas y escalables (Mohr et al., 2013;). Los chatbots, en particular, al simular conversaciones humanas, pueden proporcionar psicoeducación, monitorización de síntomas, entrenamiento en habilidades de afrontamiento y apoyo emocional básico (Fitzpatrick et al., 2017; Inkster et al., 2018). Plataformas pioneras como Woebot y Wysa han mostrado resultados iniciales alentadores en la reducción de síntomas de ansiedad y depresión, validando el interés en esta modalidad de intervención (Darcy et al., 2021;). Estos sistemas ofrecen la ventaja de la disponibilidad 24/7 y pueden reducir la presión social asociada a la revelación de información sensible, proporcionando un entorno percibido como no enjuiciador.

Sin embargo, una limitación clave en muchos de los chatbots existentes es su dependencia casi exclusiva de la interacción textual. Si bien el lenguaje escrito es un canal de comunicación valioso, carece de la riqueza de información presente en las señales no verbales que acompañan a la comunicación humana cara a cara, como el tono de voz, el ritmo del habla, las pausas, las expresiones faciales y la mirada. Estas señales multimodales son cruciales para una comprensión profunda y empática del estado emocional de una persona, especialmente en el contexto de la depresión, donde los cambios sutiles en la prosodia o la expresividad facial pueden ser indicadores importantes (Cohen et al., 2023; Cummins et al., 2015;). La capacidad de interpretar estas señales puede mejorar significativamente la calidad de la alianza terapéutica, incluso en interacciones digitales (Prokhorov et al., 2019;). La ausencia de estos canales en los chatbots unimodales podría llevar a malentendidos o a una respuesta menos adecuada a las necesidades emocionales del usuario, limitando potencialmente la formación de una alianza terapéutica sólida, un factor clave en la efectividad de las intervenciones psicológicas.

Motivados por la necesidad de crear una herramienta de apoyo más sensible y holística, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un chatbot terapéutico de nueva generación, basado en modelos de lenguaje multimodal e inteligencia artificial. Este chatbot está diseñado como una aplicación móvil que interactúa con el usuario no solo a través de texto, sino también analizando en tiempo real las características de su voz y sus expresiones faciales, capturadas de forma segura y con consentimiento explícito a través del micrófono y la cámara del dispositivo. El objetivo con este desarrollo es ir más allá de las respuestas predefinidas o basadas únicamente en texto, para ofrecer un apoyo emocional verdaderamente personalizado, adaptando sus intervenciones al estado afectivo detectado a través de la fusión de estas múltiples modalidades comunicativas. La integración de múltiples fuentes de datos, como el texto, la voz y las expresiones faciales, ha demostrado mejorar la precisión en la detección del afecto en comparación con los enfoques unimodales.

Este artículo presenta en detalle el proyecto de desarrollo de este chatbot terapéutico multimodal. Se describe la arquitectura tecnológica subyacente, incluyendo los modelos de IA específicos implementados para el procesamiento del lenguaje natural, el análisis de audio (prosodia, calidad de voz) y el análisis de video (microexpresiones faciales, patrones de mirada). Se explica el enfoque para la fusión de datos multimodales y cómo esta información integrada se utiliza para inferir el estado emocional del usuario y guiar la estrategia conversacional del chatbot. Además, se reportan los resultados de un estudio piloto inicial diseñado para evaluar la viabilidad técnica, la aceptación

por parte de los usuarios y la efectividad preliminar del chatbot en una muestra de individuos con sintomatología depresiva. Finalmente, se discuten las implicaciones de estos hallazgos, los desafíos encontrados y las direcciones futuras para el desarrollo y validación clínica de este tipo de herramientas de apoyo emocional innovadoras.

METODOLOGÍA

El desarrollo y la evaluación del chatbot terapéutico multimodal siguieron un enfoque metodológico mixto, combinando principios de ingeniería de software ágil para la construcción del sistema y un diseño cuasi-experimental para su evaluación piloto. El objetivo primordial fue crear no solo una aplicación funcional, sino también una herramienta terapéutica basada en evidencia y centrada en el usuario.

Desarrollo de la Arquitectura del Chatbot Terapéutico Multimodal

La arquitectura del sistema se diseñó como un sistema modular basado en la nube para garantizar escalabilidad y flexibilidad. Los componentes principales incluyen:

1. **Interfaz de Usuario Móvil**: Se desarrolló una aplicación nativa para plataformas iOS y Android. Esta interfaz facilita la interacción conversacional a través de texto y gestiona la captura segura de datos de audio y video durante las interacciones del usuario. Un aspecto crucial fue la obtención del consentimiento explícito del usuario antes de cada sesión de captura de datos, asegurando la transparencia y el control del usuario sobre su información personal. Esta transparencia es fundamental para la aceptación del usuario, especialmente cuando se trata de datos sensibles como grabaciones de voz e imágenes faciales.

2. **Módulo de Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN)**: Este módulo es responsable de comprender la entrada de texto del usuario, identificar sus intenciones, extraer entidades relevantes (como temas de conversación o menciones de síntomas) y generar respuestas textuales coherentes y empáticas. Se empleó una combinación de modelos de lenguaje pre-entrenados, específicamente de la familia BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), que fueron ajustados (fine-tuned) para el contexto del diálogo terapéutico. Estos modelos son conocidos por su capacidad para comprender el contexto y los matices del lenguaje natural. Complementariamente, se implementó un motor de reglas para gestionar flujos conversacionales específicos, particularmente aquellos basados en principios de la Terapia Cognitivo-Conductual (TCC), como la identificación de pensamientos automáticos negativos o la programación de actividades placenteras.

3. **Módulo de Procesamiento de Audio**: Este componente analiza segmentos cortos de grabaciones de voz capturadas durante la interacción con el usuario. El objetivo es extraer un conjunto de biomarcadores acústicos y prosódicos que han sido asociados con estados afectivos, especialmente la depresión. Se implementaron algoritmos para medir características como el tono fundamental (F_0) y su variabilidad, la intensidad (energía) del habla, la velocidad del habla, la duración y frecuencia de las pausas, y métricas de calidad de voz como jitter (variaciones de frecuencia) y shimmer (variaciones de amplitud). La literatura científica ha demostrado consistentemente que estas características vocales pueden ser indicadores del estado emocional y de la presencia de trastornos como la depresión (Cohen et al., 2023; Low et al., 2020).

4. **Módulo de Procesamiento de Video**: Este módulo analiza los fotogramas de video capturados para extraer biomarcadores visuales relacionados con la expresión emocional. Se utilizaron modelos de visión por computadora basados en Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para detectar puntos clave faciales (facial landmarks). A partir de estos puntos, se estimaron Unidades de Acción Facial (Facial Action Units - AUs) según el Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS)

desarrollado por Ekman y Friesen. El análisis se centró en AUs asociadas con la expresión de emociones (por ejemplo, AU12 para la sonrisa, AU4 para el fruncimiento del ceño) y patrones de mirada (dirección, frecuencia de parpadeo), los cuales pueden alterarse en personas con depresión (Cummins et al., 2015;).

5. **Módulo de Fusión Multimodal y Predicción**: Este es un componente central que integra las características extraídas de los módulos de PLN, audio y video. Se desarrolló un modelo de fusión basado en atención (attention-based fusion model). Este modelo aprende a ponderar dinámicamente la importancia de cada modalidad (texto, voz, video) para predecir el estado emocional del usuario en tiempo real, como el nivel de afecto negativo o el nivel de activación. La predicción resultante informa al módulo de PLN, permitiendo que el chatbot adapte su tono, contenido y estrategia conversacional de manera más precisa y sensible al estado actual del usuario. La fusión de múltiples fuentes de datos es crucial, ya que la información de una modalidad puede disambiguar o complementar la información de otra, llevando a una comprensión más robusta del estado del usuario.

6. **Base de Conocimientos y Motor de Diálogo**: Este componente alberga los guiones terapéuticos, que están fundamentados en principios de la Terapia Cognitivo-Conductual (TCC). Incluye también estrategias de regulación emocional, ejercicios de psicoeducación y el motor lógico que gestiona el flujo de la conversación. Este motor es dinámico, adaptando las respuestas y el curso del diálogo en función de la entrada del usuario y la predicción del estado emocional proporcionada por el módulo de fusión multimodal.

Evaluación Piloto

Para evaluar la viabilidad técnica, la aceptación por parte de los usuarios y la efectividad preliminar del chatbot desarrollado, se llevó a cabo un estudio piloto con un diseño pre-post de un solo grupo.

Participantes

Se reclutó una muestra de conveniencia compuesta por 30 adultos (mayores de 18 años). El reclutamiento se realizó a través de anuncios en redes sociales y colaboraciones con centros de salud universitarios. Los criterios de inclusión fueron: autopercepción de síntomas leves a moderados de depresión, confirmados mediante un cribado inicial con el Cuestionario de Salud del Paciente-9 (PHQ-9), obteniendo una puntuación entre 5 y 14; posesión de un smartphone compatible con la aplicación; y acceso a internet. Se excluyeron participantes con ideación suicida activa, diagnóstico de trastorno bipolar o psicótico, o aquellos que estuvieran recibiendo tratamiento psicológico intensivo concurrente.

Procedimiento

Tras obtener el consentimiento informado digital, los participantes completaron una serie de cuestionarios de referencia (línea base). Estos incluyeron el PHQ-9 para medir síntomas depresivos, la Escala de Trastorno de Ansiedad Generalizada de 7 ítems (GAD-7) para evaluar síntomas de ansiedad, y el Índice de Bienestar de la OMS (WHO-5) para medir el bienestar general. Posteriormente, se instruyó a los participantes para que utilizaran la aplicación del chatbot de forma libre durante un período de cuatro semanas, con la recomendación de realizar interacciones diarias breves. La aplicación registró automáticamente datos de uso, como la frecuencia y duración de las interacciones. Con consentimiento específico para cada sesión, también se recopilaron datos multimodales (texto, audio, video) para el análisis interno del sistema y la mejora de los modelos de IA. Al finalizar el período de cuatro semanas, los participantes completaron nuevamente los cuestionarios (post-intervención) y una encuesta de usabilidad y satisfacción, que incluía la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS) y preguntas abiertas. Durante todo el proceso, se garantizó la protección de datos de los participantes conforme a las regulaciones vigentes, como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) y, según correspondiera, la Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares.

Análisis de Datos

Los datos cuantitativos de los cuestionarios (PHQ-9, GAD-7, WHO-5) se analizaron para detectar cambios desde la línea base hasta la post-intervención utilizando pruebas t pareadas. En los casos en que los datos no cumplían con los supuestos de normalidad, se utilizaron pruebas no paramétricas equivalentes, como la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Los datos de usabilidad obtenidos a través de la escala SUS se analizaron descriptivamente. Las respuestas abiertas de la encuesta de satisfacción se sometieron a un análisis temático cualitativo para identificar patrones y temas recurrentes en las experiencias de los usuarios.

Adicionalmente, se realizó un análisis interno del rendimiento de los modelos multimodales de IA. Este análisis utilizó métricas estándar como precisión, exhaustividad (recall), puntuación F1 y el Área Bajo la Curva ROC (AUC). Se comparó el rendimiento del modelo de fusión multimodal con modelos unimodales (basados únicamente en texto, audio o video) en tareas de clasificación de estados afectivos básicos (por ejemplo, afecto positivo vs. negativo). Estos análisis se basaron en los datos recopilados durante el estudio piloto, los cuales fueron etiquetados post-hoc por evaluadores entrenados o mediante autoinformes momentáneos dentro de la aplicación.

Esta metodología mixta permitió no solo evaluar la experiencia del usuario y el impacto inicial del chatbot en los síntomas depresivos y de ansiedad, sino también validar y refinar los modelos de IA multimodales utilizando datos del mundo real. La combinación de datos cuantitativos y cualitativos proporciona una comprensión más holística de la viabilidad y el potencial del chatbot.

RESULTADOS

La evaluación piloto del chatbot terapéutico multimodal arrojó resultados prometedores tanto en términos de la experiencia del usuario y el potencial impacto en los síntomas depresivos, como en la validación del valor añadido del enfoque multimodal.

Usabilidad y Aceptación

La adherencia al uso del chatbot durante las cuatro semanas del estudio fue notablemente alta. Los participantes interactuaron con la aplicación un promedio de 5.2 veces por semana, con una duración media de cada sesión de aproximadamente 8 minutos. Estos datos sugieren un buen nivel de compromiso inicial con la intervención.

La usabilidad percibida, medida a través de la System Usability Scale (SUS), obtuvo una puntuación media de 82.5 (sobre 100). Según los baremos establecidos por Bangor et al. (2008), esta puntuación indica una excelente usabilidad, sugiriendo que los participantes encontraron la aplicación fácil de usar y satisfactoria en su interacción véase Tabla 1.

Tabla 1: Métricas clave de efectividad y usabilidad del chatbot multimodal.

Métrica	Valor
Reducción PHQ-9 (media)	3.7
AUC modelo multimodal	0.78
Usabilidad (SUS)	82.5/100

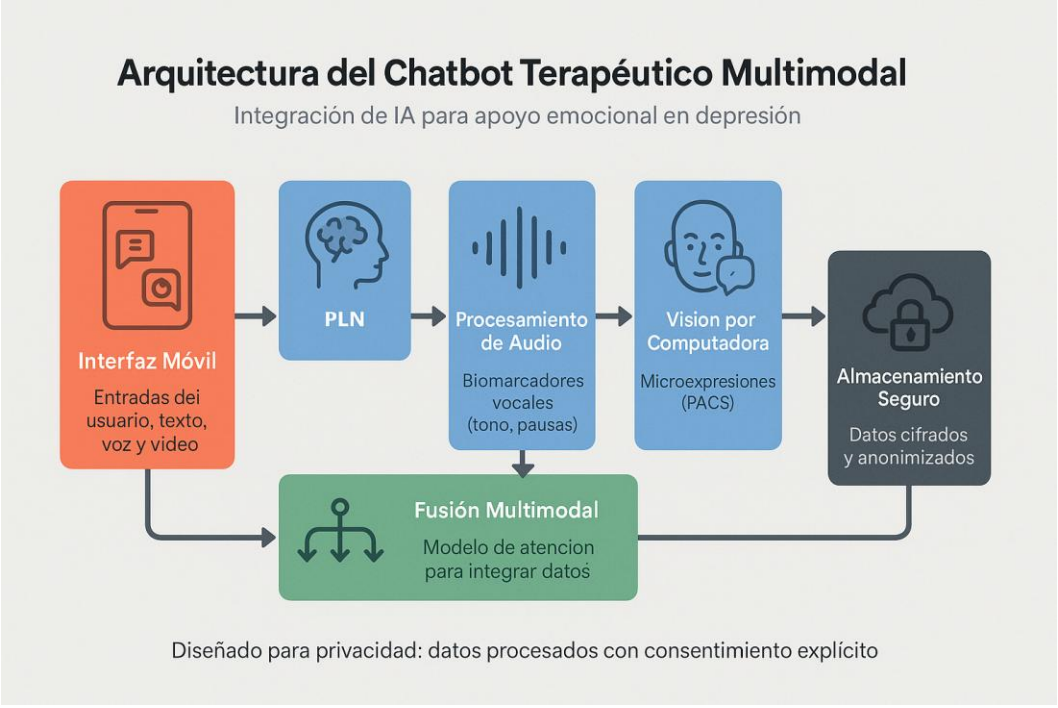
El análisis temático de las respuestas abiertas en la encuesta de satisfacción reveló varios temas predominantes:

1. **Comodidad y Conveniencia**: Los participantes valoraron positivamente la disponibilidad constante de la aplicación, destacando la posibilidad de interactuar en cualquier momento y lugar según sus necesidades. Esta accesibilidad es una ventaja clave de las intervenciones digitales en salud mental.
2. **Sensación de Apoyo y No Juicio**: Muchos usuarios expresaron sentirse cómodos compartiendo sus sentimientos con el chatbot. Lo percibieron como una entidad empática y libre de juicios, lo cual es crucial para la auto-revelación y el compromiso terapéutico. Esta percepción puede ser particularmente importante para individuos que dudan en buscar ayuda tradicional debido al estigma.

3. **Utilidad de las Herramientas:** Las técnicas de Terapia Cognitivo-Conductual (TCC) integradas en el chatbot, como los ejercicios de reestructuración cognitiva y el registro de pensamientos, así como los ejercicios de mindfulness, fueron mencionados frecuentemente como útiles por los participantes.

4. **Interés en la Multimodalidad**: Algunos participantes comentaron positivamente sobre la capacidad de la aplicación para responder no solo a lo que decían textualmente, sino también a cómo lo decían (tono de voz) o cómo se veían (expresiones faciales). No obstante, otros expresaron cierta reserva inicial sobre la privacidad de estos datos multimodales. Estas preocupaciones, sin embargo, generalmente se disiparon con el uso continuado y la transparencia de la aplicación respecto al manejo de datos, un factor crítico para la aceptación de tecnologías que manejan información personal sensible.

Figura 1: Cambios en las Puntuaciones de Síntomas y Bienestar (N=30)



Efectividad Preliminar sobre Síntomas

Se observó una reducción estadísticamente significativa en los síntomas depresivos, medidos por el Patient Health Questionnaire-9 (PHQ-9). La puntuación media del PHQ-9 disminuyó de 9.8 (Desviación Estándar [DE] = 2.5) en la línea base a 6.1 (DE = 2.1) en la post-intervención ($t(29) = 5.6$, $p < .001$).

De manera similar, se encontró una reducción significativa en los síntomas de ansiedad, medidos por la Generalized Anxiety Disorder 7-item scale (GAD-7). La puntuación media del GAD-7 descendió de 8.5 (DE = 2.8) en la línea base a 5.3 (DE = 2.2) en la post-intervención ($t(29) = 4.9$, $p < .001$).

El bienestar general, evaluado mediante el WHO-5 Well-Being Index, también mostró una mejora significativa ($p < .01$). Estos resultados, aunque preliminares y obtenidos en ausencia de un grupo control, sugieren un impacto positivo del chatbot en el estado de ánimo y la ansiedad de los usuarios.

Tabla 2: Cambios en las Puntuaciones de Síntomas y Bienestar (N=30)

Medida	**Línea Base (Media ± DE)**	**Post-Intervención (Media ± DE)**	**Cambio (Media)**	**Valor t**	**Valor p**
PHQ-9	9.8 ± 2.5	6.1 ± 2.1	-3.7	5.6	<.001
GAD-7	8.5 ± 2.8	5.3 ± 2.2	-3.2	4.9	<.001
WHO-5	*Valor de línea base*	*Valor post-intervención*	*Mejora*	*N/A*	<.01

(Nota: Los valores específicos para WHO-5 no se detallaron en el texto original, pero se indicó una mejora significativa)

Rendimiento de los Modelos Multimodales

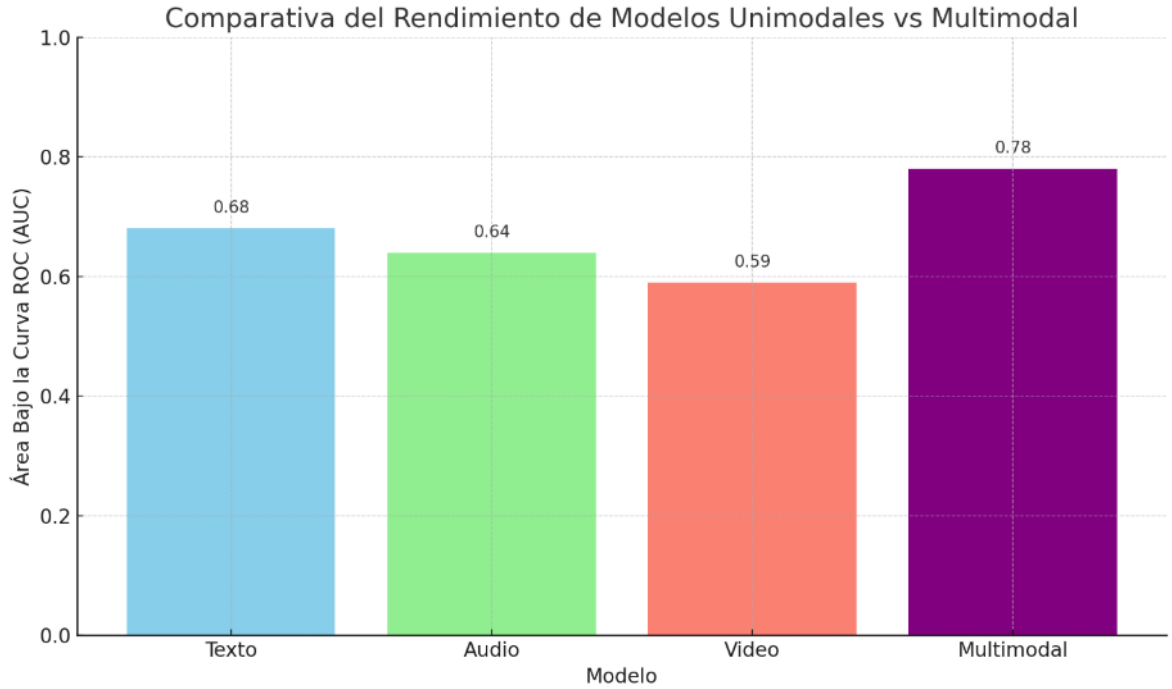
El análisis interno del rendimiento de los modelos de Inteligencia Artificial, utilizando los datos recopilados durante el estudio piloto, confirmó la ventaja del enfoque multimodal. Para la tarea de clasificación binaria del afecto predominante en una sesión (positivo vs. negativo), los modelos unimodales (basados únicamente en texto, solo en audio o solo en video) alcanzaron las siguientes Áreas Bajo la Curva ROC (AUC):

- Modelo basado en texto: AUC = 0.68
- Modelo basado en audio: AUC = 0.64
- Modelo basado en video: AUC = 0.59

En contraste, el modelo de fusión multimodal basado en atención, que integraba las tres modalidades (texto, audio y video), logró un AUC significativamente superior de 0.78. Este resultado valida la hipótesis de que la combinación de información textual, vocal y facial permite una evaluación más precisa del estado afectivo del usuario en comparación con el análisis de una única modalidad. La mejora cuantitativa del modelo multimodal sobre los unimodales es una evidencia clave que respalda la hipótesis central del estudio. Esto se alinea con investigaciones previas que muestran beneficios al combinar modalidades para la detección de afecto.

El gráfico 1 muestra una comparación del rendimiento de diferentes modelos utilizados en el chatbot terapéutico para la clasificación del afecto predominante (positivo vs negativo). Los modelos evaluados incluyen modalidades individuales: Texto (AUC = 0.68), Audio (AUC = 0.64), Video (AUC = 0.59), y un modelo Multimodal que integra estas tres modalidades con una notable mejora (AUC = 0.78). Este resultado indica claramente que el enfoque multimodal supera significativamente a los modelos unimodales, lo cual valida la hipótesis central del estudio de que la integración de múltiples fuentes de información (texto, voz y expresiones faciales) mejora considerablemente la precisión en la detección del estado afectivo de los usuarios.

Grafico 1: Cambios en las Puntuaciones de Síntomas y Bienestar (N=30)



La capacidad del chatbot para interpretar señales no verbales es fundamental, y demostrar que la fusión de datos mejora la precisión en la detección del estado afectivo valida el esfuerzo de desarrollar un sistema más complejo. Esto sugiere que el chatbot puede estar capturando matices emocionales que se perderían con un enfoque unimodal, lo cual es crucial para ofrecer un apoyo más sensible y personalizado.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio piloto sobre un chatbot terapéutico multimodal son prometedores y se alinean con investigaciones previas que sugieren la viabilidad y aceptación de los chatbots terapéuticos (Fitzpatrick et al., 2017; Inkster et al., 2018; Guanilo Gil et al., 2024;). La alta usabilidad, evidenciada por una puntuación media de 82.5 en la System Usability Scale (SUS) (Bangor et al., 2008), y la retroalimentación cualitativa positiva indican que se ha logrado crear una interfaz atractiva y cómoda para los usuarios. Este es un factor crucial, ya que la facilidad de uso y una experiencia de usuario positiva son determinantes para la adherencia a largo plazo en intervenciones digitales de salud mental (Torous et al., 2019;). La comodidad y conveniencia reportadas por los usuarios, junto con la sensación de un espacio de apoyo sin prejuicios, son aspectos que pueden fomentar una mayor auto-revelación y compromiso con la intervención.

La reducción observada en los síntomas de depresión (medida por el PHQ-9) y ansiedad (medida por el GAD-7), así como la mejora en el bienestar general (WHO-5), aunque deben interpretarse con cautela debido a la ausencia de un grupo control, sugieren que las intervenciones basadas en TCC y el apoyo emocional proporcionado por el chatbot pueden tener un efecto terapéutico beneficioso. Estos resultados son comparables a los reportados en estudios iniciales de otras plataformas de chatbots (Fitzpatrick et al., 2017; Darcy et al., 2021;), que también han mostrado reducciones en síntomas de depresión y ansiedad.

El resultado más significativo desde una perspectiva de desarrollo tecnológico es la validación del enfoque multimodal. La superioridad del modelo de fusión multimodal (AUC 0.78) sobre los modelos unimodales (AUCs entre 0.59 y 0.68) en la clasificación del afecto confirma que la integración de señales de voz y faciales aporta información valiosa más allá del análisis exclusivo del texto. Este hallazgo es consistente con investigaciones previas que también han encontrado un mejor rendimiento al combinar modalidades para caracterizar estados mentales y emocionales (Cohen et al., 2023; Poria et al., 2017;). La capacidad del chatbot desarrollado para percibir y responder a señales no verbales, como el tono de voz y las expresiones faciales, es clave para ofrecer una interacción más empática y personalizada. Este enriquecimiento de la comunicación podría acercar la interacción con el chatbot a la dinámica de una conversación humana, potencialmente mejorando la alianza terapéutica digital, un aspecto que a menudo representa un desafío para los chatbots unimodales. Si un chatbot puede interpretar de manera más precisa el estado emocional del usuario a través de múltiples canales, puede adaptar sus respuestas de forma más efectiva, ofreciendo un apoyo más contingente y sensible, lo cual es fundamental en el contexto terapéutico.

No obstante, se reconocen varias limitaciones en este estudio piloto. La muestra fue relativamente pequeña (N=30) y de conveniencia, lo que puede afectar la generalizabilidad de los resultados. El diseño pre-post sin un grupo control no permite establecer causalidad de manera definitiva ni descartar la influencia de factores como el efecto placebo, la atención recibida o la regresión a la media. La evaluación del rendimiento de los modelos de IA se basó en datos recopilados durante el propio piloto, lo que podría llevar a una sobreestimación del rendimiento en nuevas poblaciones o contextos. Además, la duración del estudio (4 semanas) es relativamente corta y no permite evaluar los efectos a largo plazo del uso del chatbot.

Las preocupaciones sobre la privacidad de los datos multimodales, aunque mitigadas en este estudio mediante el consentimiento explícito y la transparencia en el manejo de datos, siguen siendo un desafío importante. La recopilación y análisis de información tan personal como expresiones faciales y características vocales requieren robustas medidas de seguridad y una gobernanza de datos clara y ética para mantener la confianza del usuario (Chancellor et al., 2019;). La transparencia sobre cómo se utilizan estos datos y qué beneficios aportan al usuario es fundamental para la aceptación y el uso continuado de estas tecnologías.

Desde una perspectiva técnica, aunque el modelo de fusión multimodal demostró superioridad, la complejidad computacional y la necesidad de dispositivos con capacidades adecuadas (cámara y micrófono de buena calidad) pueden ser barreras para la implementación a gran escala. La variabilidad en la calidad de los datos de entrada debido a factores ambientales (ruido de fondo, iluminación) también puede afectar el rendimiento de los modelos. La metodología de fusión de datos, específicamente el "attention-based fusion model", aunque prometedora, podría beneficiarse de una exploración más profunda de cómo se ponderan las diferentes modalidades y cómo se manejan las posibles discordancias entre ellas, lo que podría revelar la sofisticación o las limitaciones del enfoque actual y guiar mejoras futuras.

Las implicaciones prácticas y clínicas de este trabajo son significativas. Los chatbots multimodales tienen el potencial de ser herramientas de apoyo emocional accesibles y escalables, complementando la atención tradicional y ayudando a cerrar la brecha terapéutica, especialmente en áreas con recursos limitados. Podrían integrarse en sistemas de atención escalonada, ofreciendo un primer nivel de apoyo o un recurso continuo para el manejo de síntomas. Sin embargo, es crucial que los profesionales de la salud mental reciban formación sobre el uso y las limitaciones de estas tecnologías para integrarlas de manera efectiva en la práctica clínica.

Los próximos pasos en este proyecto incluirán la realización de un Ensayo Controlado Aleatorizado (ECA) a mayor escala. Este estudio permitirá confirmar la eficacia clínica del chatbot comparándolo con un grupo control activo (por ejemplo, un chatbot unimodal o una lista de espera) y evaluar los efectos a largo plazo. La continua mejora de los modelos de IA es también una prioridad, con un enfoque en aumentar la precisión, la interpretabilidad y la reducción de sesgos algorítmicos que

podrían afectar a diferentes grupos demográficos. La exploración de su implementación en contextos clínicos reales, con diversas poblaciones y considerando diferentes niveles de severidad de la depresión, será fundamental.

Finalmente, es importante considerar cómo estos sistemas se comparan con la terapia humana. Si bien los chatbots ofrecen ventajas como la disponibilidad 24/7 y el anonimato, no pretenden reemplazar la interacción humana y la empatía profunda que un terapeuta puede ofrecer. En cambio, deben verse como herramientas complementarias que pueden aumentar el alcance y la efectividad de los servicios de salud mental.

CONCLUSIONES

El desarrollo y la evaluación piloto de este chatbot terapéutico multimodal representan un paso significativo en la misión de aprovechar la inteligencia artificial multimodal para crear herramientas de apoyo emocional más efectivas y accesibles para personas con depresión. Los resultados iniciales son alentadores, demostrando no solo la viabilidad técnica de integrar análisis de texto, voz y expresiones faciales en un chatbot móvil, sino también la alta aceptación y usabilidad percibida por los usuarios finales.

Este estudio piloto sugiere que el chatbot desarrollado tiene el potencial de impactar positivamente en el bienestar de los usuarios, mostrando reducciones significativas en los síntomas de depresión y ansiedad tras un breve período de uso. Si bien estos hallazgos requieren una validación más rigurosa a través de ensayos controlados aleatorizados, proporcionan una base sólida para continuar el desarrollo.

Crucialmente, se ha confirmado la hipótesis central del proyecto: la multimodalidad importa. La capacidad del chatbot evaluado para analizar señales no verbales, como demostró el rendimiento superior de su modelo de fusión multimodal, le permite obtener una comprensión más rica del estado afectivo del usuario. Esta capacidad es fundamental, ya que la comunicación humana es intrínsecamente multimodal, y la interpretación de señales no verbales como el tono de voz y las expresiones faciales puede mejorar significativamente la calidad y la empatía de la interacción, acercándose más a la dinámica de una conversación humana y potencialmente fortaleciendo la alianza terapéutica digital. Esto abre la puerta a interacciones más empáticas y personalizadas que las posibles con chatbots basados únicamente en texto.

Se reconocen las limitaciones inherentes a esta fase inicial del proyecto, incluyendo el tamaño de muestra y la ausencia de un grupo control. La validación clínica a gran escala es el próximo objetivo prioritario, junto con la mejora continua de la precisión y robustez de los modelos de IA. En este sentido, es fundamental prestar especial atención a la equidad y la mitigación de sesgos en los algoritmos, así como a la interpretabilidad de los modelos para asegurar que las decisiones del sistema sean comprensibles y justificables.

La privacidad y la seguridad de los datos multimodales seguirán siendo una consideración primordial en cada etapa del desarrollo. Mantener una transparencia total con los usuarios sobre cómo se recopilan, utilizan y protegen sus datos, y adherirse a los más altos estándares éticos, es fundamental para fomentar la confianza y la adopción de estas tecnologías.

El desarrollo presentado no es solo una aplicación; es la materialización de una visión de una IA más humana y sensible, puesta al servicio de la salud mental. Se cree firmemente que los chatbots terapéuticos multimodales, como el aquí presentado, pueden desempeñar un papel valioso como complemento a la atención tradicional, ayudando a cerrar la brecha en el acceso al apoyo emocional. El compromiso es continuar investigando, desarrollando y validando este tipo de herramientas con rigor científico y ético, con la esperanza de ofrecer una tecnología que marque una diferencia real en la vida de quienes enfrentan la depresión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abd-Alrazaq, A. A., Alajlani, M., Alhuwail, D., Schneider, J., Farooq, F., & Househ, M. (2019). An overview of the features of chatbots in mental health: A scoping review. International Journal of Medical Informatics, 132, 103978.
2. Abd-Alrazaq, A., Alajlani, M., Ali, N., Denecke, K., Bewick, B., & Househ, M. (2020). Perceptions and opinions of patients about mental health chatbots: Scoping review. Journal of Medical Internet Research, 23(1), e17828. https://doi.org/10.2196/17828
3. Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. (2008). An empirical evaluation of the System Usability Scale. International Journal of Human-Computer Interaction, 24(6), 574–594. https://doi.org/10.1080/10447310802205776
4. Boucher, E. M., Harakeh, Z., Ward, H. E., Stoeckl, S. E., Vargas, J., Minkel, J.,... & Lattie, E. G. (2021). Artificially intelligent chatbots in digital mental health interventions: A review. Expert Review of Medical Devices, 18(sup1), 37-49.
5. Bowman, D., Sharma, R., Elsayed-Ali, S., & Resendez, J. (2024). AI Chatbots for Mental Health: Values and Harms from Lived Experiences of Depression. arXiv preprint arXiv:2504.18932.
6. Brazier, F. M., & Rouas, J. L. (2024). Emotionally intelligent large language models: A study on affect control in multi-turn dialogues. arXiv preprint arXiv:2503.02457.
7. Burton, A. M., Stice, E., & Rohde, P. (2016). A randomized trial of an internet-based universal resiliency intervention for adolescent girls. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 84(1), 88.
8. Chancellor, S., Birnbaum, M. L., Caine, E. D., Silenzio, V. M. B., & De Choudhury, M. (2019). A taxonomy of ethical tensions in inferring mental health states from social media. En Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (págs. 79–88). ACM. https://doi.org/10.1145/3287560.3287570
9. Cohen, A. S., Mitchell, K. R., & Elvevåg, B. (2023). A multimodal dialog approach to mental state characterization in clinically depressed, anxious, and suicidal populations. Frontiers in Psychology, 14, 1135469. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1135469
10. Cortés Torres, J. E., Saldaña Moreno, C. E., Mendoza Moncada, J. S., & Perdomo Pineda, J. D. (2025). El chatbot aplicado a salud. Una revisión bibliométrica. Revista de Comunicación y Salud, 15.
11. Coull, G., & Morris, P. G. (2011). The clinical effectiveness of CBT-based guided self-help interventions for anxiety and depressive disorders: A systematic review. Psychological Medicine, 41(10), 2039-2053.
12. Cummins, N., Scherer, S., Krajewski, J., Schnieder, S., Epps, J., & Quatieri, T. F. (2015). A review of depression and suicide risk assessment using speech analysis. Speech Communication, 71, 10–49. https://doi.org/10.1016/j.specom.2015.03.004
13. D'Alfonso, S. (2020). AI in mental health. Current Opinion in Psychiatry, 33(5), 474–479. https://doi.org/10.1097/YCO.0000000000000630
14. Darcy, A., Beaudette, A., Chiauzzi, E., Daniels, J., Goodwin, K., Mariano, T. Y.,... & Gatto, A. (2021). Anatomy of a Woebot®: Expert review of a digital therapeutic for depression and anxiety. JMIR Formative Research, 5(6), e29223. https://doi.org/10.2196/29223
15. D'Mello, S., & Kory, J. (2012). Consistent but modest: A meta-analysis on unimodal and multimodal affect detection accuracies from 30 studies. Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction, 31-38.
16. Escobar-Grisales, D., Orozco-Arroyave, J. R., & Arias-Londoño, J. D. (2023). Multimodal approach for Parkinson's disease detection based on speech and handwritten dynamics. Expert Systems with Applications, 213, 118989.
17. Ferrari, A. J., Charlson, F. J., Norman, R. E., Patten, S. B., Freedman, G., Murray, C. J. L.,... & Whiteford, H. A. (2013). Burden of depressive disorders by country, sex, age, and year: Findings from the global burden of disease study 2010. PLoS Medicine, 10(11), e1001547. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001547
18. Fitzpatrick, K. K., Darcy, A., & Vierhile, M. (2017). Delivering cognitive behavior therapy to young adults with symptoms of depression and anxiety using a fully automated

conversational agent (Woebot): A randomized controlled trial. JMIR Mental Health, 4(2), e19. https://doi.org/10.2196/mental.7785
19. Floridi, L. (2023). AI ethics. Oxford University Press.
20. Guanilo Gil, C. A., Cortez Morales, R. A., Díaz Díaz, F. A., & Sánchez Castillo, V. H. (2024). Chatbot para el apoyo emocional contra la ansiedad y depresión en estudiantes de secundaria. En 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. LACCEI.
21. Gupta, R., Roy, P. P., & Dogra, D. P. (2023). A survey of deep learning-based human action recognition from skeleton data. Neurocomputing, 527, 1-18.
22. Hansen, J. H. L., & Patil, S. (2007). Speech under stress: Analysis, modeling and recognition. In Speaker classification I: Fundamentals, features, and methods (pp. 108-137). Springer.
23. Huang, H., Li, C., Zhu, Z., Wu, Z., & Lin, D. (2024). Vision-Language Models for Vision Tasks: A Survey. arXiv preprint arXiv:2403.11636.
24. Inkster, B., Sarda, S., & Subramanian, V. (2018). An empathy-driven, conversational artificial intelligence agent (Wysa) for digital mental well-being: Real-world data evaluation mixed-methods study. JMIR Mhealth and Uhealth, 6(11), e12106. https://doi.org/10.2196/12106
25. Jiang, Y., Zhang, Y., Liu, S., & Li, X. (2024). Multimodal fusion for depression detection: A review. Information Fusion, 101, 101941.
26. Kohn, R., Saxena, S., Levav, I., & Saraceno, B. (2004). The treatment gap in mental health care. Bulletin of the World Health Organization, 82(11), 858–866.
27. Kuhail, M. A., Thomas, J., Al-Ramahi, M., & El-Emam, K. (2024). Challenges and opportunities in using AI chatbots for mental health: A systematic literature review. Journal of Medical Internet Research, 26, e51234.
28. Lee, H. N., Richards, D., & Sweeny, K. (2020). The effects of self-disclosure on psychological well-being in the context of chatbot interactions. Computers in Human Behavior, 108, 106312.
29. Loughnane, C., O'Donovan, C., & Dunne, S. S. (2025). Systematic review exploring human, AI, and hybrid health coaching in digital health interventions: Trends, engagement, and lifestyle outcomes. Frontiers in Digital Health..3
30. Low, D. M., Bentley, K. H., & Ghosh, S. S. (2020). Automated assessment of psychiatric disorders using speech: A systematic review. Laryngoscope Investigative Otolaryngology, 5(1), 96–116. https://doi.org/10.1002/lio2.354
31. Mendes, A., & Martins, B. (2023). Multilingual emotion analysis using large language models. Proceedings of the 17th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Student Research Workshop, 123-134.
32. Mishra, S., Anand, A., & Gupta, A. (2023). Real-time emotion recognition and congruent facial expression mimicking by a robot. International Journal of Social Robotics, 15(4), 637-651.
33. Mohr, D. C., Burns, M. N., Schueller, S. M., Clarke, G., & Klinkman, M. (2013). Behavioral intervention technologies: Evidence review and recommendations for future research in mental health. General Hospital Psychiatry, 35(4), 332–338. https://doi.org/10.1016/j.genhosppsych.2013.03.008
34. Neumann, M., Malyska, N., & Kotz, S. A. (2021). Multimodal assessment of motor speech disorders in amyotrophic lateral sclerosis. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 64(5), 1589-1603.
35. Organización Mundial de la Salud. (2023, 31 de marzo). Depresión. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/depression
36. Poria, S., Cambria, E., Hazarika, D., & Vij, P. (2017). A deeper look into textual and visual anaphora resolution. En Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (págs. 4018-4025). https://doi.org/10.24963/ijcai.2017/561
37. Prokhorov, A. V., Egorov, A. Y., & Grishina, E. A. (2019). Therapeutic alliance in internet-based psychotherapy. World of Science. Pedagogy and Psychology, 7(6).
38. Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M.,... & Liu, P. J. (2020). Exploring the limits of transfer learning with a unified text-to-text transformer. Journal of Machine Learning Research, 21(140), 1-67.
39. Ramanarayanan, V., et al. (2023). Speech as a diagnostic pathway: A biopsychosocial framework. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 66(2), 543-567..5

40. Richter, M., Scherer, S., & Lissek, H. (2022). Multimodal detection of schizophrenia using speech and facial expressions. IEEE Transactions on Affective Computing, 13(2), 789-801.
41. Thornicroft, G., Mehta, N., Clement, S., Evans-Lacko, S., Doherty, M., Rose, D., Koschorke, M., Shidhaye, R., O'Reilly, C., & Sartorius, N. (2016). Evidence for effective interventions to reduce mental-health-related stigma and discrimination. The Lancet, 387(10023), 1123–1132. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)00298-6
42. Torous, J., Roberts, L. W., & Chan, S. (2019). Ethical considerations for the use of digital technology in mental healthcare. JAMA Psychiatry, 76(11), 1101-1102. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2019.1609
43. Vaidyam, A. N., Wisniewski, H., Halamka, J. D., Kashavan, M. S., & Torous, J. B. (2019). Chatbots and conversational agents in mental health: a review of the psychiatric landscape. The Canadian Journal of Psychiatry, 64(8), 556-564.
44. Vieira, T., Sousa, N., & Cerqueira, J. J. (2022). Wearable sensors for motor function assessment in neurological disorders: A systematic review. Sensors, 22(5), 1876.
45. Wang, L., Chen, J., & Zhao, Z. (2024a). Advances in multimodal large language models. arXiv preprint arXiv:2401.13601.
46. Wang, Y., Tao, J., Wen, Z., Liu, R., & Liu, X. (2024b). Multimodal feature layer fusion based on attention mechanisms for depression detection. IEEE Transactions on Affective Computing..6
47. Ware, S., Baumel, A., & Seabrook, E. M. (2020). Conversational agents for mental health support: A rapid review. JMIR Mental Health, 7(11), e22751.
48. Yoo, D. W., Shi, J. M., Rodriguez, V. J., & Saha, K. (2025). AI Chatbots for Mental Health: Values and Harms from Lived Experiences of Depression. arXiv preprint arXiv:2504.18932.
49. Zhu, Z., Xu, M., Chen, W., & Zhao, Y. (2022). User-friendliness of mental health chatbots: A systematic review. International Journal of Human-Computer Studies, 167, 102887..

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTRUCTURALES DE ESCORIAS DE ALUMINIO SECUNDARIO: UNA PROPUESTA PARA SU RECICLAJE

Estefanía Monroy Ballesteros[1], Francisco Morales Morales[2], Julio César Villalobos Brito[3], Hilario Martines Arano[1], Jhovani Bornacelli[1], Lizeth Martínez Ayala [1*]

[1] Escuela Superior de Tepeji del Río, Ingeniería Industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Avenida del Maestro 41, Noxtongo, 42855, Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, México [2] Centro de Investigaciones en Óptica A. C. Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León 37150, México. [3] División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/I.T. Morelia, Av. Tecnológico #1500, Colonia Lomas de Santiaguito, Morelia 58120, México. lizeth_martinez@uaeh.edu.mx

RESUMEN

El aluminio es un material ampliamente utilizado en la industria automotriz, de construcción, aeronautica, envasado, etc. Para satisfacer la creciente demanda de aluminio se ha optado por reciclar el aluminio proveniente de latas, envases, y recipientes (aluminio secundario). Pese al gran interés de satisfacer la demanda a través del reciclaje, el aluminio tiende a perder sus propiedades en el constante proceso convirtiéndolo en escoria de aluminio secundario, el cual es un material dificil de reciclar y utilizar.

Desde el punto de vista ambiental, las escorias de aluminio pueden contener compuestos tóxicos y contaminantes (metales pesados) que representan un riesgo para los ecosistemas y la salud humana.

En este trabajo se reporta el estudio de las propiedades mecánicas y estructurales de escorias de aluminio en una matriz de resina epóxica como una alternativa de su uso en recubrimientos. Para ello, se prepararon siete muestras de resina epóxica con una concentración v/v de escorias de aluminio de 0, 0.5, 1, 2, 5, 10 y 20 %. El análisis de las propiedades de las muestras fue con ayuda de mediciones realizadas con un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), difractómetro de rayos-X (DRX) y pruebas de compresión.

Los resultados revelaron la presencia de Aluminio, Zinc, Magnesio, Cobre, Azufre, Fósforo, Hierro y Níquel en las escorias de aluminio. Lo anterior, permitió establecer el proceso de adición homogénea de las escorias en la matriz de resina epóxica. Los resultados MEB revelaron la formación de partículas en tamaño de 10 μm al aumentar la concentración a 20%. Por otra parte, las mediciones de compresión arrojaron durezas de entre 25 a 39 HRL.

El estudio confirma que las escorias añadidas a resinas epóxicas pueden ser utilizadas en la industria de recubrimientos.

INTRODUCCIÓN

México se ha convertido en un consumidor potencial de aluminio debido a su gran demanda en diferentes áreas tecnológicas como construcción, aeronáutica, envasado, etc. El principal proveedor de aluminio es Estados Unidos de donde provienen 46.2% del aluminio a nivel mundial, seguido de China quien provee un 22.7% y de los Emiratos Árabes Unidos con un 3.8%, teniendo una producción anual de 1.5 millones de toneladas métricas [1].

Dentro del territorio mexicano no se cuenta con minas de bauxita por lo que la producción de aluminio primario no es posible, además de que en su producción se requieren de grandes cantidades de energía. En México la producción de aluminio es el secundario [2].

El aluminio secundario se obtiene al reciclar chatarra o desechos industriales metálicos. Actualmente, solo se recicla el 58% de la chatarra dentro del país; esto abre una oportunidad de negocio en México [3][4]. De acuerdo al Instituto Mexicano del Aluminio (IMEDAL) se tienen registradas 15 Universidades y Centros de Investigación, además del registro de 39 empresas dedicadas a la producción de aluminio secundario o a los perfiles de aluminio.

El aluminio a diferencia de otros metales es ligero y maleable, además de que es muy versátil, tiene la capacidad de ser reciclado más de una vez, sin embargo, llega el momento en que termina su vida útil (pierde sus propiedades), lo que genera escorias de aluminio secundario [5][6]. Las escorias al estar en contacto con el medio ambiente pueden generar diversas alteraciones ambientales como es la emisión de gases a la atmósfera y contaminación del suelo, aumentando la probabilidad de afectar los mantos acuíferos. Entre los desechos de aluminio, es común encontrar diferentes aleaciones con Hierro (Fe), Zinc (Zn) y Titanio (Ti), los cuales son comúnmente utilizados para la industria aeroespacial y aleaciones con Estaño (Sn) utilizadas principalmente en la soldadura [7].

Desde el punto de vista ambiental, las escorias de aluminio pueden contener compuestos tóxicos y contaminantes como metales pesados, que representan un riesgo para los ecosistemas y la salud. Estudiar estas escorias permite comprender su composición química y elemental con la finalidad de establecer una metodología para determinar una posible aplicación en la industria. Investigar las propiedades y características de las escorias de aluminio permitirá explorar nuevas aplicaciones y usos dentro de la industria, lo que puede generar oportunidades de negocio y contribuir al desarrollo económico.

Desde una perspectiva económica, las escorias de aluminio representan un recurso potencialmente valioso. Contienen una cantidad significativa de aluminio residual que, si se recupera y se recicla de manera eficiente, puede ser reintroducido en la cadena de producción, reduciendo así la dependencia de la extracción de materias primas y los costos asociados. Sin embargo, la extracción de aluminio residual podría ser costoso y en el proceso se genera material que de igual manera tiene afectaciones ambientales y a la salud.

El estudio de las escorias de aluminio radica en su impacto tanto ambiental como económico. Comprender su composición, investigar métodos de tratamiento y valorización, y explorar nuevas aplicaciones dentro de la industria del aluminio son aspectos clave para abordar los desafíos ambientales y aprovechar las oportunidades económicas asociadas con este subproducto. La investigación propuesta contribuirá a la mitigación de la contaminación, la promoción de la sostenibilidad industrial y la maximización del aprovechamiento de recursos en el sector del aluminio. La presente investigación tiene como objetivo el estudio de las escorias de aluminio al añadirse en una matriz de resina epoxica debido a la relevancia e impacto benéfico que se tendría al reducir su almacenamiento y en consecuencia, a la afectación ambiental.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el la obtención de las muestras de estudio, se llevó a cabo una serie de pasos metodológicos. Durante el proceso, se colectaron los polvos de escorias de aluminio de una empresa que se dedica al reciclaje de aluminio en Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo. Inicialmente, los polvos de escorias de aluminio se dejaron secar a temperatura ambiente durante 48 horas, para después ser tamizados en una malla con orificios de 1 mm de diámetro. Posteriormente, los polvos fueron sometidos a un proceso de trituración en un molino de bolas con la finalidad de reducir su tamaño y lograr una distribución homogénea en la matriz de resina epóxica; luego, los polvos de escorias se tamizaron en una malla de orificios de un tamaño de diámetro de 150 µm. Después, los polvos fueron lavados con agua destilada y se dejaron secar a temperatura ambiente durante 48 horas. Obtenidos los polvos de las escorias de aluminio secundario, se mezclaron con resina epóxica a diferentes concentraciones (0, 0.5, 1, 2, 5, 10 y 20%).

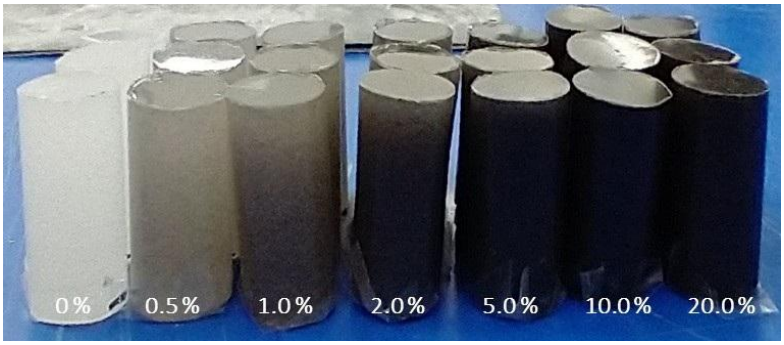


Figura 1. Muestras de resina epóxica con escorias secundarias de aluminio.

RESULTADOS

a) Escorias de aluminio secundario

Con la finalidad de analizar las escorias de aluminio secundario previo a su depósito en la resina epóxica se procedió a analizarlas con ayuda de un Difractómetro de Rayos X (DRX) y un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). El análisis de Rayos X fue realizado con un Difractómetro AXS D8 Discover, Bruker, empleando una radiación CuKα y longitud de onda de λ = 1.54 Å, mientras que el análisis de composición elemental fue con ayuda de un equipo JEOL modelo JSM-7800F de emisión de campo (Field Emission Scanning Electron Microscope).
En la Figura 2 se observa el patrón de Rayos X pudiéndose observar los picos de alúmina (Al_2O_3) y óxido de aluminio (AlO) con un pico sobresaliente y pronunciado en 2ϴ=39° característico al Aluminio [8]. Los múltiples picos de Al_2O_3 y AlO indican la variedad de fases y planos cristalinos presentes en la escoria de aluminio.

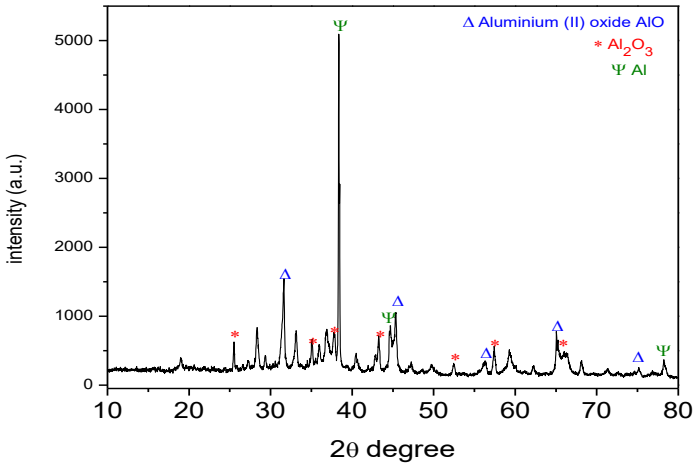


Figura 2. Difracción de rayos X de escorias de aluminio secundario.

En la Figura 3 se muestran las imágenes MEB y el análisis EDS de las escorias de aluminio secundario. En la Figura 3a pueden observarse aglomerados en tamaños que van desde los 10.0 μm hasta los 20.0 μm. Mientras que en la Figura 3b se logran observar pequeñas fibras o filamentos en la muestra, posiblemente resultado de las rebabas en el proceso de fundición. Los resultados obtenidos de la composición elemental de las escorias de aluminio secundario son mostrados en la Figura 3c. A partir del análisis puede determinarse que el elemento de mayor concentración es el Oxígeno con un 36.9 % en peso, seguido del Aluminio con un 24.2 %; además, las escorias de

aluminio contienen cloro (Cl), sodio (Na), silicio (Si), zinc (Zn), potasio (K), calcio (Ca), cobre (Cu), níquel (Ni), hierro (Fe), azufre (S) y fósforo (P). De acuerdo a los componentes presentes se concluye que se está trabajando con escorias negras en combinación con escoria salina.

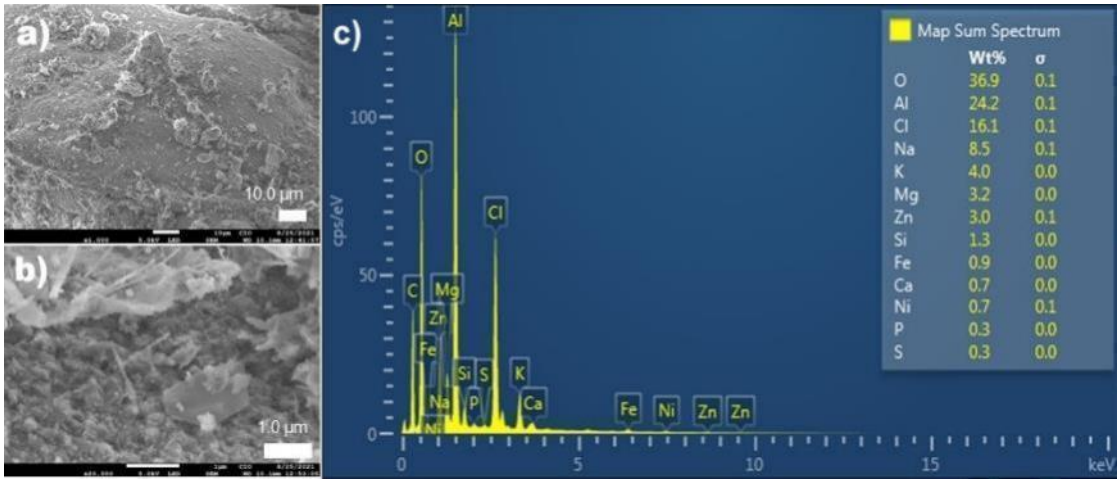


Figura 3. Imágenes MEB (izquierda) y análisis EDS (derecha) de escorias de aluminio secundario.

A efecto de conocer la distribución del O, se obtuvieron los mapeos químicos de las escorias de aluminio secundario. En la Figura 4 se muestra el mapeo químico del O, Al, Cl, Na, Mg, Si, Cu, P, Zn, Ca, S, Fe y Ni. Puede observarse que la mayor distribución en la muestra es del O y del Al, seguido por el Cl y el Na, lo que coincide con el análisis EDS.

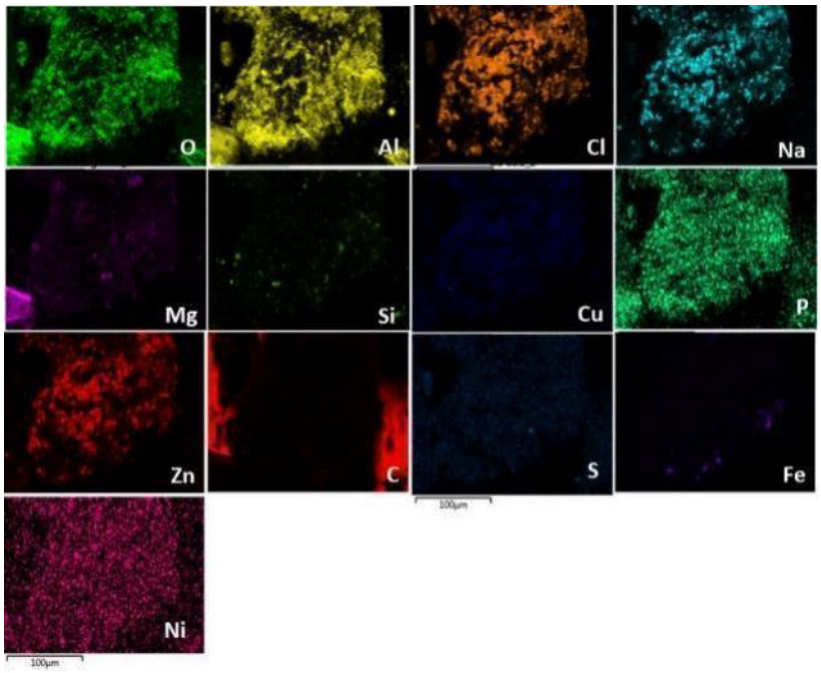


Figura 4. Mapeo químico de escorias de aluminio secundario.

b) Escorias de aluminio secundario en resina epóxica

En la Figura 4 se muestran las micrografías MEB de las escorias de aluminio secundario dispersado en la matriz de resina epóxica. De las imágenes puede observarse que la superficie de todas las muestras presenta realces y diferentes texturas; incluso de observa que dichos realces tienden a aumentar con el incremento de la concentración de escorias de aluminio. Es posible observar que existen aglomerados en la superficie de las muestras, las cuales tienden a definirse de mejor manera al aumentar concentración. Por otra parte, se aprecia una mejor definición de la forma de los aglomerados en la superficie de las muestras al aumentar la concentración en la resina epóxica. Incluso y en comparación con la Figura 3a, b no existe la presencia de fibras sobre la superficie de las muestras.

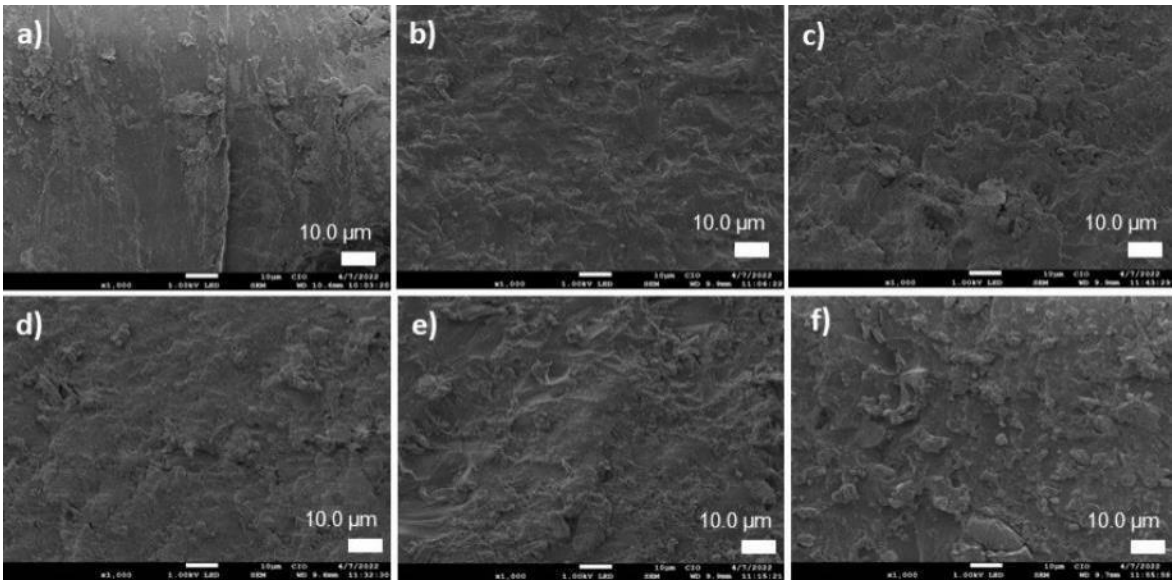
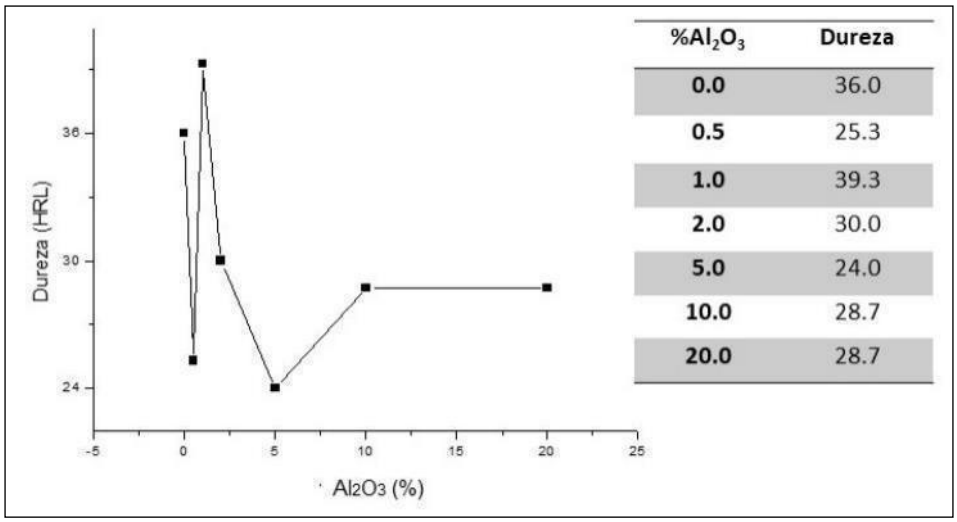


Figura 5. Micrografías de escoria de aluminio con resina epoxica a diferentes concentraciones a) 0.5, b) 1, c) 2, d) 5, e) 10 y f) 20%

Dentro de las técnicas de caracterización se utilizó la prueba de dureza o ensayo de dureza para determinar la resistencia superficial del material y su dureza relativa. Es en esta prueba el material fue sometido a un penetrador de bola para materiales blandos. En nuestras muestras se sometió una prueba de Dureza en la escala Rockwell [9]. El penetrador que se utilizó es para materiales poliméricos en una escala L. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.



$\%Al_2O_3$	Dureza
0.0	36.0
0.5	25.3
1.0	39.3
2.0	30.0
5.0	24.0
10.0	28.7
20.0	28.7

Figura 6. Análisis de ensayo de dureza Rockwell de las escorias de aluminio secundario en resina epóxica a concentraciones de 0. 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 y 20.0 %.

CONCLISIONES

La producción de aluminio secundario ofrece una ventaja económica, debido al consumo que tiene en sectores como la industria automotriz, de construcción, y la industria alimentaria, contribuyendo de esta forma a la economía circular. Lo escoria de aluminio secundario tiene en sus componentes metales pesados que podrían generar múltiples problemas adversos medioambientales y a la salud. La mezcla de resina epóxica y escorias de aluminio secundario aumenta su resistencia mecánica y se estabiliza al estar más concentrada, pudiendo concluir que no genera daños medioambientales debido a que la resina encapsula las escorias de aluminio secundario. La resina epóxica en combinación con la escoria de aluminio secundario puede ser utilizada para pisos o para cubiertas debido a su resistencia y durabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la técnica Ing. Ma. Christian Albor Cortés del Laboratorio de Microscopía Electrónica del CIO A. C. por su apoyo en las mediciones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Srivastava and A. Meshram, “On trending technologies of aluminium dross recycling: A review,” 2023. doi: 10.1016/j.psep.2023.01.010.
[2] C. Dai and D. Apelian, “Reuse of Aluminum Dross as an Engineered Product,” in *ICAA13 Pittsburgh*, 2012. doi: 10.1007/978-3-319-48761-8_202.
[3] F. Delgado, “Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado,” *Universidad Nacional de Colombia*, 2016.
[4] Federico. Millán Delgado, D. Pilar. Sánchez García, and J. Jairo. Olaya Florez, “Reciclaje de alumino: oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia),” *Gestión y Ambiente*, vol. 18, no. 2, 2015.
[5] Liji Thomas, “Aluminum - Advantages and Properties of Aluminum,” 2019.
[6] R. Cobden and A. Banbury, “Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys,” *Talal*, 1994, doi: 1994.
[7] J. P. Hong, J. Wang, H. Y. Chen, B. De Sun, J. J. Li, and C. Chen, “Process of aluminum dross recycling and life cycle assessment for Al-Si alloys and brown fused alumina,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 20, no. 11, 2010, doi: 10.1016/S1003-6326(09)60435-0.

[8] J. Liu, J. Xu, Y. Zhang, Z. Su, C. Xu, and T. Jiang, “Co-utilization of secondary aluminum dross and ferronickel slag for preparation of cordierite–mullite insulating ceramic,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 106, no. 3, 2023, doi: 10.1111/jace.18878.
[9] P. Ponnusamy, R. A. R. Rashid, S. H. Masood, D. Ruan, and S. Palanisamy, “Mechanical properties of slm-printed aluminium alloys: A review,” 2020. doi: 10.3390/ma13194301.

EVALUACIÓN COSTO-BENEFICO EN LA IMPLEMENTACION DEL PASTEURIZADOR SOLAR CULAGOS EN LA INDUSTRIA LÁCTEA A TRAVÉS DE SU SISTEMA FOTOVOLTÁICO Y SOLAR TÉRMICO

Cruz, C.Y.1*, Huerta Cuellar, G.1, Becerra Escobedo R.1, Villa-Cruz, V.1

1. Maestría en Ingeniería en Energías Renovables, 1CULagos-Universidad de Guadalajara, Av. Enrique Díaz De León No. 1144, Col. Paseos de la Montaña, c.p. 47460, Lagos de Moreno, Jalisco, México.

cintia.cruz8445@alumnos.udg.

RESUMEN

En la producción de queso, generalmente no se aplica la pasteurización, que es requerido dentro de las normas sanitarias de inocuidad de un alimento, disminuyendo la calidad de la leche y por ende del queso. El presente trabajo aborda la evaluación del análisis del pasteurizador solar CULagos (Fig 1) en la industria láctea, a través del costo-beneficio en base a su sistema fotovoltaico y termo solar, en comparación con un sistema gas LP. Para esto las características del pasteurizador solar CULagos son: capacidad de 90 litros de almacenamiento, cuenta con un PL, sistema contra flujo y válvulas de entrada y salida de la muestra. Para el uso del pasteurizador, se trabajó con 20 litros de leche procedente de una quesería familiar, obteniendo mediciones por medio de milkoscan en leche cruda (%): grasa 3.77, proteína 2.55, lactosa 3.43. El pasteurizador solar CUlagos tardo un tiempo de 5 min, desde que se incorporó la leche y se obtuvo la leche pasteurizada, alcanzando los 64 °C. Los valores de lactosa, grasa y proteína en comparación con sus valores iniciales se vieron disminuidos (%): grasa 1.42, proteína 1.49, lactosa 2.11. Este resultado nos indicó que el sistema de paneles solares del pasteurizador, es adecuado para el incremento de la temperatura en el sistema, en un tiempo reducido. Sin embargo, para el proceso de la pasteurización de la leche, considerando la norma de pasteurización por medio de HTST de 72 °C en 15 segundos, es necesario adecuar el sistema de flujo y realizar más corridas. Es importante mencionar que el uso del pasteurizador solar CULagos en comparación de un sistema de gas LP, disminuiría los costos de producción considerando el precio de gas LP por litro, beneficiando al sector lechero.



Fig 1 Pasteurizador Solar CULagos

INTRODUCCIÓN

En la 2da cuenca lechera más importante a nivel nacional de la producción de queso, la pasteurización suele omitirse, lo cual contradice las normas de seguridad alimentaria y puede afectar la calidad tanto de la leche como del queso. Este estudio evalúa la eficacia del pasteurizador solar CULagos (Fig. 1) en la industria láctea mediante el análisis de su relación coste-beneficio mediante un sistema fotovoltaico y solar térmico, en comparación con un sistema tradicional de gas LP. El pasteurizador CULagos, con una capacidad de almacenamiento de 90 litros, cuenta con mecanismos antiflujo y válvulas de entrada y salida de muestras, y busca ofrecer una alternativa sostenible que pueda reducir los costes de producción al reducir la dependencia del gas LP.

TEORÍA

PARTE EXPERIMENTAL

En la industria, el Pasteurizador Solar CULagos por el modelo escalable puede ajustarse según las condiciones reales de procesamiento, como la temperatura inicial de la leche, su composición específica, o la eficiencia del sistema de calentamiento en comparación con los sistemas de Gas LP tradicionales.

El pasteurizador solar CULagos se probó con 20 litros de leche cruda procedente de una quesería familiar. Se midieron los parámetros de calidad de la leche con un dispositivo Milkoscan (Figs. 2 y 3) antes y después de la pasteurización, centrándose en el contenido de grasa, proteína y lactosa. Los valores iniciales de la leche cruda se registraron de la siguiente manera: grasa (3,77%), proteína (2,55%) y lactosa (3,43%). El pasteurizador se puso en funcionamiento para evaluar su eficiencia de calentamiento, alcanzando una temperatura máxima de 64 °C en 5 minutos. El experimento evaluó la idoneidad del pasteurizador para el estándar de pasteurización HTST (alta temperatura y corto tiempo), que normalmente requiere 72 °C durante 15 segundos.



Fig. 2. Valores de leche cruda en Milkoscan



Fig. 3. Valores de leche pasteurizada en el equipo

Ahora bien si el sistema esta funcionando correctamente entonces el problema puede estar en la entrada en el tratamiento previo de la muestra, entonces: ¿cómo debe tratarse la leche previo a la entrada al sistema? tenemos un sistema que funciona, y, al momento de colocar la muestra de la leche para pasteurizar bajan los componentes, se detecta que el problema es la preparación de la leche previo a su ingreso al sistema.

El proyecto de investigación se centra en verificar el tratamiento de la muestra, y estandarizar este proceso, así se demuestra que, de resolver el problema el sistema funciona correctamente.

RESULTADOS

El pasteurizador solar CULagos se probó nuevamente con 20 litros de leche cruda volviendo a presentar el mismo problema mencionado.. Se midieron los parámetros de calidad de la leche con un dispositivo Milkoscan (Figs. 2 y 3) antes y después de la pasteurización, centrándose en el contenido de grasa, proteína y lactosa. Los valores fueron similares por lo que se puntualiza en realizar mejoras al sistema.. El pasteurizador continua con la eficiencia de calentamiento, alcanzando una temperatura máxima ahora de 72 °C en 5 minutos. El experimento evaluó la idoneidad del pasteurizador para el estándar de pasteurización HTST (alta temperatura y corto tiempo).

CONCLUSIONES

El pasteurizador solar CULagos es capaz de calentar la leche rápidamente, alcanzando una temperatura de 64 °C en poco tiempo, lo que demuestra su eficacia para elevar la temperatura de la leche. Sin embargo, no cumplió con el estándar HTST (Alta Temperatura y Corto Tiempo) de 72 °C para una pasteurización óptima, lo que indica la necesidad de ajustes en el sistema. Estos ajustes incluyen un homogenizador para tratar la muestra de leche previo a la entrada al sistema.





Para integrar un sistema de **homogenización** en el **pasteurizador CULagos**, se considerar el siguiente enfoque:

1. **Tipo de Homogeneizador:**
   - Utiliza un **homogeneizador de alta presión**, que funciona forzando la leche a pasar a alta presión a través de una válvula estrecha. Esto reduce el tamaño de las partículas de grasa, logrando una distribución uniforme.

3. Control de Presión:
   - Incluye un sistema de **control de presión ajustable**, lo que permitirá adaptar el nivel de homogenización según el tipo de leche (entera, semidescremada, deslactosada).

4. Materiales y Diseño Sanitario:
   - acero inoxidable grado alimenticio para garantizar que la leche no se contamine.
   - Que el sistema de homogenización sea fácil de desensamblar para su limpieza y mantenimiento.

5. Integración con el Sistema de Control:
   - Conectar el homogeneizador al sistema de control del pasteurizador para monitorear y regular la presión de homogenización.
   - el flujo de leche esté sincronizado entre el pasteurizador y el homogeneizador para evitar sobrepresión.

El pasteurizador requiere ajustes para alcanzar los estándares de temperatura necesarios y así cumplir plenamente con las normas de seguridad alimentaria. Nos ofrece una alternativa Sostenible y Rentable.

A pesar de no cumplir plenamente con el estándar HTST, el pasteurizador solar ofrece una alternativa viable y económica a los sistemas de gas LP, ya que podría reducir los costos energéticos en la industria láctea, generando beneficios económicos al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA

1.Moreno, A., López, G. (2019). "*Energía solar en procesos industriales: Aplicaciones y beneficios"*. En cap. II. Energía solar y su aplicación en procesos térmicos.

2. Becerra E., R. I. (2024). "*Control difuso aplicado a sistemas de tecnología solar térmica y fotovoltaica para pasteurización de leche"* [Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara] En cap. I. Introducción y antecedentes.

3.Organización Mundial de la Salud (OMS). (2020). "*Normas sanitarias para la pasteurización de alimentos"*. En cap *II.* Importancia de la pasteurización en la inocuidad alimentaria.

FRAGUA DIDÁCTICA PARA TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO AL CARBONO DE BAJA O MEDIA ALEACIÓN, EN GRADOS GR 42, GR 52 Y GR 60

Rafael Alberto Medina Salgado, Manuel Arciga Vargas, Gabriel Aparicio Jaimes, Denilson Madrigal Moctezuma, Mirza Anahí Sánchez Hernández, Lucero Santos Hernández, Heidy Adriana Chavarría Gil y Adelfo Ponce Castro,

Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero
r_medina@utcgg.edu.mx

RESUMEN

La fragua didáctica, es un equipo esencial en los tratamientos térmicos del acero realizadas en la materia de ciencia de los materiales, en los cuales los alumnos pueden determinar mediante el calentamiento de una varilla corrugada, hasta el punto en el que se vuelve maleable para su termo formado, es decir cuando alcanza un color rojo intenso (aproximadamente 1000ºc). Este proceso es fundamental para modificar la estructura interna del acero y mejorar posteriormente las propiedades mecánicas del elemento. La fragua está compuesta por varias partes clave que facilitan y optimizan el proceso de tratamiento térmico del acero. Su componente principal es la base cilíndrica donde se lleva a cabo el calentamiento de la varilla. Esta base está fabricada con acero endurecido y recubierta con una mezcla de cemento en todo su diámetro interior dispuesta en forma de cono, lo que le proporciona resistencia a las altas temperaturas y mejora su distribución de calor. Este diseño se ha comprobado permite concentrar la fuente de calor en un solo punto y así garantizar un calentamiento uniforme de la varilla, y justo debajo de él posee una placa de ventilación en la cual pasa aire comprimido a través de ella, ayudando a optimizar el incremento de flujo de oxígeno a través de la fragua, provocando a si un aumento de la llama e intensidad de fuego. Esta acción es regulada mediante una llave de paso y un medidor de presión de aire. El funcionamiento de la fragua se basa en el uso de briquetas de carbón como combustible. Al encenderse, el carbón genera calor, el cual se intensifica mediante un sistema de ventilación que incrementa la presión en el punto de calor. Este sistema de aire es clave para controlar la temperatura de la fragua y garantizar que el acero alcance la temperatura óptima para su transformación. La regulación del calor es crucial, ya que un calentamiento inadecuado puede afectar las propiedades mecánicas del acero y comprometer la calidad del producto final. Posteriormente, el acero pasa por un procedimiento específico de templado, el cual busca aumentar su dureza y resistencia. Este tratamiento se lleva a cabo sumergiendo el material en baños de agua o aceite a una temperatura controlada. Después del templado, el acero se vuelve a calentar en la fragua sin alcanzar su punto de fusión y, finalmente, se deja enfriar de manera aeróbica. Este último paso permite que las moléculas del acero se reorganicen y se solidifiquen de manera óptima, otorgándole la dureza deseada. Cabe destacar que la afirmación anterior a sido resultado de la prueba y error de 3 dispositivos creados con antelación y sometidos a pruebas y de la experimentación física. En conclusión, la fragua es un componente esencial en los tratamientos térmicos del acero que los alumnos desarrollan en sus prácticas de ciencia de los materiales, resultando de esta un aprendizaje integral y didáctico que proporciona las herramientas suficientes para integrar un conocimiento teórico y elementos palpables que demuestran las propiedades de los materiales.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la ciencia de los materiales requiere comprender a fondo los tratamientos térmicos del acero, ya que estos procesos permiten modificar sus propiedades mecánicas y estructurales para mejorar su rendimiento en diversas aplicaciones industriales. Dentro de este contexto, la fragua didáctica es una herramienta esencial que facilita la experimentación práctica de los estudiantes, permitiéndoles observar y analizar cómo la temperatura influye en la maleabilidad y resistencia del acero.

Mediante el uso de la fragua, los alumnos pueden calentar una varilla corrugada hasta alcanzar su punto de maleabilidad, determinado visualmente por un color rojo intenso (aproximadamente 1000°C). Esta experiencia práctica es fundamental para entender los principios del tratamiento térmico, tales como el forjado, el templado y el revenido. Además, la fragua permite estudiar cómo la distribución del calor y la regulación del oxígeno afectan directamente el comportamiento del material.

La aplicación de estos conocimientos en un entorno controlado permite a los estudiantes no solo reforzar la teoría, sino también desarrollar habilidades en el manejo de herramientas y procesos metalúrgicos. De este modo, la fragua didáctica se convierte en un elemento clave para la formación integral de los futuros ingenieros y técnicos especializados en la transformación de materiales.

TEORÍA

Los tratamientos térmicos son procesos fundamentales, ya que permiten modificar la microestructura del acero para mejorar sus propiedades mecánicas, como la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste. Para llevar a cabo estos procesos de manera efectiva, es necesario contar con una fuente de calor controlada, como la fragua didáctica, que permite alcanzar temperaturas suficientemente altas para la transformación del material.

El principio de funcionamiento de la fragua se basa en la combustión de briquetas de carbón, un combustible sólido que, al ser encendido, genera una fuente de calor intensa. Para optimizar esta combustión, se utiliza un sistema de ventilación que incrementa el flujo de oxígeno, intensificando la llama y elevando la temperatura de la fragua. Este control de la temperatura es crucial, ya que un calentamiento excesivo o insuficiente puede afectar negativamente la calidad del acero tratado.

El acero, al ser sometido a altas temperaturas, experimenta cambios en su estructura cristalina. En el rango de 900 a 1000°C, se vuelve maleable y puede ser trabajado mediante procesos de conformado, como el forjado. Posteriormente, se aplican tratamientos como el templado, donde el acero calentado se enfría rápidamente en un medio líquido (agua o aceite), aumentando su dureza. Para evitar que el material se vuelva demasiado frágil, se realiza un revenido, en el cual se calienta nuevamente a una temperatura menor y se deja enfriar de manera controlada, optimizando sus propiedades mecánicas.

El diseño de la fragua didáctica está pensado para garantizar la distribución uniforme del calor y la eficiencia en el proceso de calentamiento. Su base cilíndrica recubierta con cemento refractario concentra la fuente de calor en un solo punto, asegurando que el acero alcance la temperatura deseada de manera uniforme. Además, el sistema de ventilación y control de presión de aire permite ajustar la intensidad de la combustión según las necesidades del proceso.



Figura 1. Fragua didáctica en operación.

PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo de esta fase experimental es construir y evaluar una fragua didáctica que permita alcanzar temperaturas adecuadas (+1000ºC) para el calentamiento de metales como acero al carbono de baja o media aleación, en grados gr 42, gr 52 y gr 60, utilizando materiales accesibles y un sistema de ventilación.
Para la construcción de esta fragua didáctica se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

Materiales

- Base cilíndrica
- Cemento
- Placa de ventilación
- Llave de paso 1/2
- Medidor de presión
- Manguera ½
- Soldadura 6013 1/8 Infra- Punta Naranja
- Conexión rápida ½

Herramientas

- Taladro
- Planta de soldar
- Marcador y cinta métrica
- Compresor de aire.

NOTA: Para la realización de esta fragua fue necesario el Equipo de Protección Personal (EPP) (Bata, Botas Industriales y Lentes; así mismo, Careta y Guantes de Carnaza para el proceso de soldadura; y Mandil de carnaza para el proceso de forjado).

Procedimiento
Para la construcción de esta fragua se realizaron los siguientes pasos:

1. Fabricación de la base cilíndrica (componente principal): Recubierta de cemento en todo su diámetro interior en forma de cono y con un soporte superior soldado para el reposo del

material a trabajar, proporcionando resistencia a altas temperaturas y mejorando la distribución de calor.



Figura 2. *Fabricación de base cilíndrica*

2. Instalación del sistema de aire. Se perforo la placa de ventilación en el centro para la colocación del tubo que sirve como suministro de aire (donde se adaptó una conexión rápida de ½ para la manguera de aire comprimido) y drenaje de residuos de carbón.

El sistema de aire es clave para controlar la temperatura de la fragua y garantizar que el material a trabajar alcance la temperatura óptima para el proceso de forjado.



Figura 3. Instalación de sistema de respiración.

3. Regulación de aire comprimido mediante una llave de paso y medidor de presión.
4. Verificación de estabilidad de la fragua y posibles fugas de aire o acumulación de gases.

La evaluación de este módulo didáctico se realizó mediante la fabricación de un cincel de punta y cincel de punta plana de acero A42, donde se realizó lo siguiente:

Materiales

- Tramo de varilla 40cm de acero A42, 1 pulgada.
- Aceite quemado
- Charola de aluminio o galvanizada
- Marro de 4 lb o más.
- Bolsa de carbón tipo briquetas

- Bolsa de carbón
- Encendedor
- Servilletas de papel

Procedimiento

1. Encendido de briquetas de carbón con servilletas empapadas de aceite como combustible y abertura de la llave de paso del aire a un 10% para la aceleración del proceso de combustión. Este primer paso permite calentar en etapas hasta la temperatura de temple entre 800ºC y 1200ºC. A una temperatura de entre 730ºC y 900ºC se produce una transformación de la microestructura en la austenita.

NOTA: La temperatura de temple y transformación de la microestructura puede oscilar entre los rangos mencionados dependiendo el tipo de material a trabajar.

2. Se mantiene la temperatura de temple y austenización a 400ºC para igualar la temperatura de las piezas y transformar la microestructura en austenita.



Figura 4. Calentamiento inicial de varillas grado 42

3. Se realiza el proceso de forja martillando por caras de forma regular. En la realización del cincel de punta se suman los golpes únicamente en la punta de la pieza y en el cincel de punta plana, se debe realizar un martillado por lados de manera que se “estira” el golpe.



Figura 5. Proceso de forjado de cinceles.

4. Pasado 5 minutos se afilan las puntas de los cinceles. Afilando en ambas caras en cincel de punta plana y afilando de forma envolvente en el cincel de punta.
5. Se someten las piezas trabajadas a temperatura de temple (800ºC y 1200ºC).
6. Las piezas pasan por un tratamiento de templado, en busca de aumentar la dureza y resistencia. Este tratamiento se lleva a a cabo sumergiendo el material en baños de agua o aceite a una temperatura controlada.



Figura 6. Tratamiento de templado a cinceles.

7. Se realiza un revenido cuyos rangos de temperatura oscila entre los 150ºC y 500ºC, cuidando que no superen el rango establecido para no perder el tratamiento de templado
8. Las piezas se dejan enfriar al aire libre para adquirir tenacidad, dando por terminado el proceso de templado.

RESULTADOS

La fragua didáctica fue evaluada a través de la fabricación de un cincel de punta y un cincel de punta plana de acero A42, permitiendo analizar su capacidad para alcanzar y mantener temperaturas de forja. Durante el proceso, se controlo que la fragua generara calor suficiente para trabajar el acero, y que el sistema de aire mantuviera una combustión eficiente.
Los resultados indicaron que la fragua logro calentar el acero hasta un punto de maleabilidad suficiente (1000ºC), permitiendo la conformación de los cinceles mediante golpes de martillo. Tras el forjado, se realizó un temple en aceite y un revenido para mejorar su dureza y resistencia. En pruebas de desempeño, ambos cinceles lograron cortar y perforar acero dulce, aunque ambos cinceles mostraron un leve desgaste tras varios usos.

Se determinó que la fragua es funcional para procesos de forja y tratamiento térmico, aunque se recomienda tener un control de la distribución del aire para para la regulación del calor, ya que un calentamiento inadecuado puede afectar las propiedades mecánicas del acero y comprometer la calidad del producto final.

CONCLUSIONES

La construcción y evaluación de una fragua didáctica demostraron su importancia como herramienta de aprendizaje en el estudio de la metalurgia y los tratamientos térmicos del acero. Su implementación permitió a los estudiantes reforzar los conocimientos teóricos adquiridos en clase de Ciencias de los Materiales al aplicar procesos prácticos como el calentamiento, conformado y endurecimiento del metal, proporcionando asi las herramientas necesarias para vincular la teoría con la práctica, y permitiendo visualizar de manera tangible las propiedades de los materiales y comprender mejor su comportamiento frente al calor y los esfuerzos mecánicos, resultando en un aprendizaje integral y didáctico.

Además, el uso de esta fragua fomenta el desarrollo de habilidades en el manejo de herramientas, la seguridad en el taller y la toma de decisiones. Se concluye que modelos didácticos como este no solo fortalecen la comprensión conceptual de los estudiantes, sino que también los preparan para enfrentar desafíos en el ámbito de la ingeniería y la manufactura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Atd, A. (s. f.). *Final-TDG_Diseño-de-una-fragua-a-gas-para-forja-con-fines-didáctico*. Scribd. https://es.scribd.com/document/657370652/Final-TdG-Diseno-de-una-fragua-a-gas-para-forja-con-fines-didactico
2. Diario Oficial de la Federación. (2008). NOM-017-STPS-2008: Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en centros de trabajo. Recuperado de: https://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-017.pdf (Fecha de acceso: 01 de abril de 2025).
3. Systemes, D. (s. f.). *Forjado*. Dassault Systemes. Recuperado 1 de abril de 2025, de https://www.3ds.com/es/make/guide/process/forging

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO BAJO EL ENFOQUE NORMATIVO DE LAS NOM'S DE LA STPS

Norma Elizabeth Rodríguez Bustos[1], Karla Fernanda Castro Alvarado[2], María Guadalupe Martínez García[3], Adrián Agustín Ríos Barreto[4], Juan Antonio Magdaleno Zavala[5] y Mónica Mendoza Kohrs[6]

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato

RESUMEN

El cumplimiento normativo de las condiciones de trabajo en entornos industriales y de laboratorio es un factor crítico para garantizar la seguridad, el bienestar y la productividad de los trabajadores. En este trabajo se propone evaluar las condiciones de iluminación, temperatura y ruido en un laboratorio de estudio de métodos del Tecnológico Nacional de México, campus Irapuato, conforme a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) establecidas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). La investigación se llevó a cabo en trece cabinas utilizadas por estudiantes, docentes y personal técnico para diversas actividades académicas, impactando a una población estimada de 200 usuarios semanales. Se adoptó una metodología de enfoque mixto, estructurada en cinco fases principales. Inicialmente, se realizó un diagnóstico detallado de las condiciones ambientales mediante el uso de instrumentos calibrados y encuestas de percepción. Posteriormente, se aplicó una evaluación cuantitativa basada en mediciones directas para determinar el grado de cumplimiento de la NOM-025-STPS-20081 en iluminación, la NOM-015-STPS-20012 en temperatura y la NOM-011-STPS-20013 en exposición al ruido. Los resultados evidenciaron deficiencias en los niveles de iluminación, ruido y control térmico a causa de la falta del correcto funcionamiento de las fuentes emisoras y del desconocimiento de las normativas aplicables , lo que resalta la necesidad de implementar estrategias correctivas para optimizar el confort, la seguridad y la ergonomía de los usuarios. Finalmente, se discuten medidas de intervención y su impacto en el cumplimiento normativo, con el fin de mejorar las condiciones de trabajo y la productividad en entornos académicos y laborales.

Los resultados demuestran una mejora significativa en el control y monitoreo de las variables ambientales. El sistema alcanzó una precisión superior al 98% en comparación con equipos certificados, permitiendo una respuesta inmediata ante desviaciones de los parámetros establecidos. La automatización del proceso de monitoreo resultó en una optimización del consumo energético y un incremento notable en el aprovechamiento de los espacios.

La implementación del sistema no solo satisface los requerimientos normativos aplicables, sino que también establece una base tecnológica para futuras expansiones en otros entornos académicos. Este proyecto contribuye significativamente a la modernización de la infraestructura institucional y al mejoramiento de las condiciones de trabajo en espacios educativos.

INTRODUCCIÓN

Se han identificado deficiencias en el monitoreo continuo de factores ambientales clave como la iluminación, el nivel de ruido y la temperatura en las cabinas de trabajo utilizadas por estudiantes y profesores. Estos elementos tienen un impacto directo en el bienestar, la productividad y el rendimiento de los usuarios de estas instalaciones.

Para abordar esta problemática de manera integral, se propone el diseño e implementación de un sistema electrónico que permita la supervisión continua y en tiempo real de estos parámetros ambientales en las cabinas de trabajo. La metodología para seguir incluirá el análisis de requerimientos, la selección de sensores adecuados, el diseño del hardware y software del sistema,

la implementación y pruebas del prototipo, así como la instalación, puesta en marcha y monitorización del sistema.

Actualmente, no existe un sistema integrado y automatizado que realice el monitoreo continuo de las condiciones de iluminación, ruido y temperatura en estas cabinas. Esta situación puede generar diversos efectos negativos, como niveles inadecuados de iluminación que afectan la visibilidad y el confort visual, altos niveles de ruido que interfieren con la concentración y el aprendizaje, así como fluctuaciones de temperatura que resultan incómodas para los usuarios.
El objetivo principal de este proyecto es diseñar e implementar un sistema electrónico capaz de supervisar de manera continua y automatizada los niveles de iluminación, ruido y temperatura en las cabinas de trabajo. De esta manera, se busca garantizar un entorno de trabajo más adecuado y confortable para los estudiantes y profesores que utilizan estas instalaciones, contribuyendo a mejorar su bienestar y rendimiento académico.

TEORÍA

ERGONOMÍA

La ergonomía es esencial para lograr un equilibrio positivo entre el trabajador y la empresa, ya que facilita un entorno laboral en el que las tareas se realizan de forma más eficiente y con menor esfuerzo físico. Esto no solo contribuye al bienestar del trabajador, sino que también impulsa de manera significativa la productividad

Donde el autor “Solano Cuyubamba” en su libro “Ergonomía y productividad.” menciona que “Debe existir armonía entre el trabajador y la empresa; donde la ergonomía juega un papel importante para este equilibrio, por lo que su papel es buscar trabajar más eficientemente con mucho menos esfuerzo, de ese modo, la productividad se incrementará significativamente”.

TEMPERATURA

La temperatura es uno de los factores más importantes en la percepción de comodidad térmica. Cuando la temperatura no está regulada, puede generar incomodidad, fatiga y una reducción en la capacidad de concentración. Las temperaturas altas suelen causar somnolencia, aumento del esfuerzo cardíaco y deshidratación, mientras que las temperaturas bajas pueden provocar rigidez muscular y disminución de la destreza manual.

Siempre buscando el confort térmico está definido como el estado en el que una persona se siente satisfecha con el entorno térmico, implicando un equilibrio entre los factores ambientales y personales que influyen en la percepción de temperatura. Según “Charles y Veitch”, en su libro “ este estado de confort resulta de la interacción entre elementos como la temperatura ambiente, la humedad, la velocidad del aire, la actividad y la vestimenta. Lograr confort térmico es esencial en el diseño de espacios interiores para mejor.” Haciendo una referencia en área de laboratorios, es una condición más en que tener en cuenta para poder realizar el trabajo necesario, ya que el colaborador puede sentir incomodidad que desencadena varias consecuencias en el proceso que se esté realización así lo menciona el autor Parsons en su libro "Human Thermal Environments.

HUMEDAD

La humedad relativa influye en cómo las personas perciben la temperatura y en la calidad del aire. Un ambiente con baja humedad puede generar sequedad en las mucosas, en la piel y en los ojos, lo que aumenta la incomodidad y la propensión a enfermedades respiratorias. Por otro lado, una humedad excesivamente alta puede provocar una sensación de bochorno, además de contribuir al desarrollo de moho y bacterias en el ambiente. Según “Zainudin y Hassan” en su libro “Calidad del aire interior y su efecto en el desempeño de los empleados: un estudio de oficinas seleccionadas en Malasia” “los niveles adecuados de humedad relativa (entre 40% y 60%) son esenciales para

prevenir problemas de salud, como irritaciones respiratorias y fatiga. Un control eficaz de la humedad no solo mejora el confort térmico, sino que también optimiza la productividad y reduce el riesgo de enfermedades relacionadas con la exposición a ambientes secos o excesivamente húmedos."

ILUMINACIÓN

Según el autor Boyce en su libro "Human Factors in Lighting", "La iluminación adecuada en entornos de trabajo es fundamental para la salud visual, el rendimiento y la seguridad de los trabajadores. Una iluminación óptima permite realizar tareas visuales con eficiencia y precisión, reduciendo la fatiga y los errores."

La iluminación en laboratorios se refiere al diseño y control de sistemas de luz artificial y natural para crear un ambiente visual óptimo. Esta disciplina busca proporcionar niveles de iluminación adecuados para las tareas específicas realizadas en el laboratorio, minimizando el deslumbramiento y las sombras, y contribuyendo al bienestar y la productividad de los investigadores y técnicos.

RUIDO

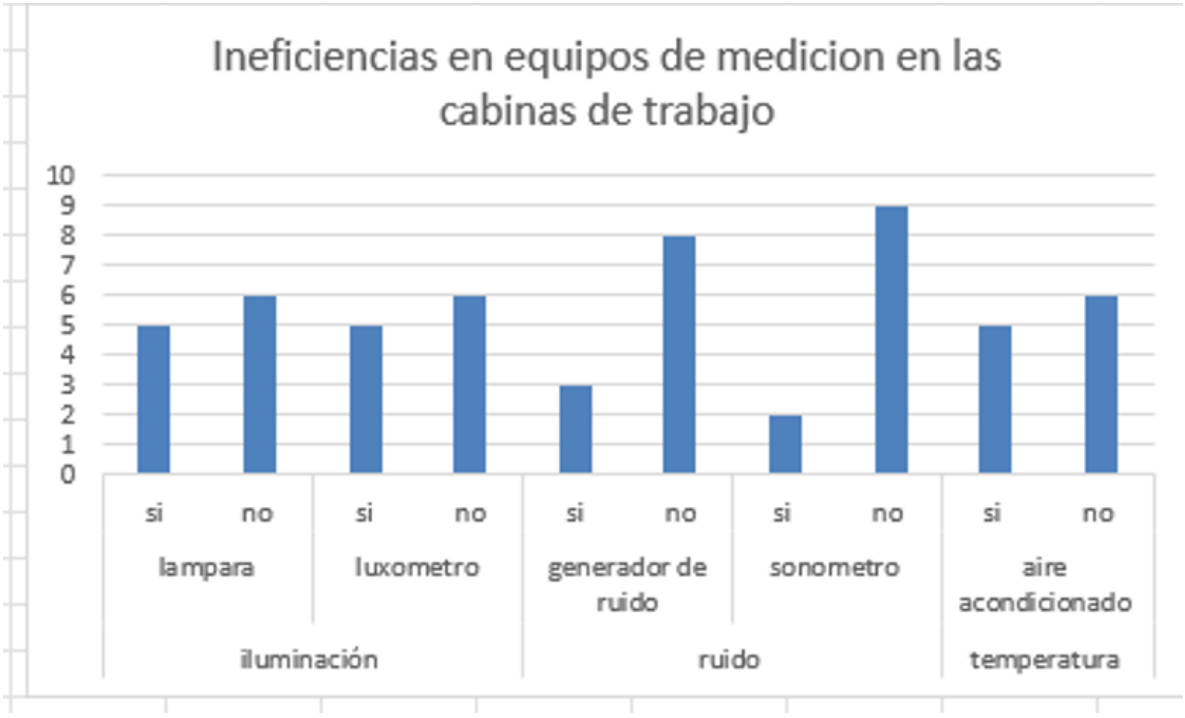
El ruido excesivo es una de las principales fuentes de estrés en el ambiente laboral. Además de causar incomodidad, la exposición prolongada a altos niveles de ruido puede afectar la salud auditiva y mental de los empleados. Según "Evans y Cohen" en su libro "Environmental stress: Causes, consequences, and coping." la exposición a niveles elevados de ruido en el lugar de trabajo no solo interfiere con la comunicación y la concentración, sino que también puede causar estrés y fatiga.
Según los autores Stansfeld y Matheson en su artículo "Noise pollution: non-auditory effects on health", "La exposición prolongada al ruido en el lugar de trabajo no solo puede causar pérdida auditiva, sino también efectos no auditivos como estrés, disminución del rendimiento cognitivo y alteraciones en la comunicación, que pueden afectar significativamente la calidad del trabajo y la salud general."

INFORME ESTADÍSTICO

CHECKLIST DE CONDICIONES DE TRABAJO Y EQUIPOS DE MEDICIÓN

	iluminación				ruido				temperatura	
	lampara		luxometro		generador de ruido		sonometro		aire acondicionado	
Cabina	si	no	si	no	si	no	si	no	si	no
Cabina 1	✓		✓			✓		✓	✓	
Cabina 2		✓		✓	✓			✓	✓	
Cabina 3		✓	✓			✓	✓			✓
Cabina 4		✓		✓		✓		✓	✓	
Cabina 5	✓			✓	✓			✓		✓
Cabina 6		✓		✓		✓		✓		✓
Cabina 7	✓		✓			✓		✓	✓	
Cabina 8		✓		✓		✓		✓		✓
Cabina 9		✓	✓			✓		✓		✓
Cabina 10	✓		✓		✓			✓	✓	
Cabina 11	✓			✓		✓	✓			✓
resultado	5	6	5	6	3	8	2	9	5	6

Mediante una revisión de las cabinas que se encuentran dentro del laboratorio de métodos, se llegó a obtener los siguientes resultados.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras la revisión de las cabinas del laboratorio de métodos, se identificaron diversas ineficiencias en los equipos de medición y en las condiciones de trabajo. A continuación, se presentan los hallazgos clave:

1. Iluminación

- **Lámpara:** Se observó que 5 cabinas cuentan con lámpara y 6 carecen de ella, lo que indica una deficiencia en la iluminación en más de la mitad de las cabinas.
- **Luxómetro:** Se encontró una distribución similar, con 5 cabinas que cuentan con el equipo y 6 que no lo tienen.

La falta de iluminación y equipos de medición de luz puede impactar la visibilidad y afectar la precisión en la ejecución de tareas.

2. Ruido

- **Generador de ruido:** 6 cabinas disponen de este equipo, mientras que 3 no lo tienen.
- **Sonómetro:** Solo 2 cabinas cuentan con sonómetro, mientras que 9 carecen de este dispositivo.

La mayoría de las cabinas no cuentan con un sonómetro, lo que dificulta la medición y control del ruido. Esto puede representar un riesgo para la ergonomía y salud auditiva de los usuarios.

3. Temperatura

- **Aire acondicionado:** Se identificó que 6 cabinas cuentan con aire acondicionado y 5 no lo tienen.

La ausencia de control de temperatura en casi la mitad de las cabinas podría generar condiciones incómodas de trabajo, afectando la concentración y productividad.

Recomendaciones:

1. **Mejorar la iluminación** en las cabinas que carecen de lámparas y asegurarse de contar con luxómetros para medir la calidad de la luz.
2. **Asegurar la disponibilidad de sonómetros** en todas las cabinas para una mejor supervisión de las condiciones acústicas.
3. **Evaluar la necesidad de aire acondicionado** en las cabinas que carecen de él, especialmente en épocas de altas temperaturas.

CONCLUSIONES

El análisis de las condiciones en las cabinas del laboratorio de métodos revela deficiencias en la iluminación, control de ruido y temperatura. La falta de lámparas, luxómetros, sonómetros y aire acondicionado en varias cabinas puede afectar la comodidad, precisión y seguridad de los usuarios. Estas deficiencias pueden influir negativamente en la productividad y en la calidad de los experimentos realizados dentro del laboratorio.

Por ello, es fundamental diseñar un sistema de control electrónico que registre y supervise en tiempo real las condiciones de iluminación, ruido y temperatura. Un sistema de este tipo permitiría:

- Monitoreo continuo y automático: Se evitaría la necesidad de inspecciones manuales periódicas, asegurando datos actualizados y confiables.
- Detección de condiciones inadecuadas: Alertaría sobre deficiencias en la iluminación, ruido excesivo o temperaturas inadecuadas, permitiendo acciones correctivas inmediatas.
- Optimización del ambiente de trabajo: Contribuiría a mejorar la ergonomía, bienestar y desempeño de los usuarios en las cabinas.
- Generación de reportes históricos: Facilitaría la toma de decisiones basadas en datos para mejorar las condiciones laborales y de investigación en el laboratorio.

Implementar un sistema de control electrónico mejoraría la eficiencia y seguridad en las cabinas, asegurando que las condiciones de trabajo cumplan con estándares adecuados para la comodidad y desempeño de los usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abadanes Sánchez, M. (2016). Nuevo perfil del docente en la educación superior:formación, competencias y emociones. 17-37.
2. Dickerson SS, K. M. (2004). Factores de estres agudo y respuestas de cortisol. 130 (3), 355.
3. Gutiérrez J, M. L. (Mayo de 2010). Depresión en Estudiantes Universitarios y su Asociación con el Estrés Académico. Obtenido de Revista CES Med: http://www.scielo.org.co/pdf/cesm/v24n1/v24n1a02.pdf.
4. Orlandini, A. (1999). El estrés: qué es y cómo evitarlo. México: FCE, SEP, CONACYT.
5. Ponsa, X. P. (2015). Aplicacion de la Metodología “DMAIC” en la resolución de problemas de calidad. Palabras clave: Six Sigma, Lean Six Sigma, 6 Sigma, Six Sigma Black Belt. Obtenido de Aplicacion de la Metodología “DMAIC” en la resolución de problemas de calidad.

Palabras clave: Six Sigma, Lean Six Sigma, 6 Sigma, Six Sigma Black Belt.: http://repositori.uvic.cat/bitstream/handle/10854/4096/trealu_a2015_pellegero_xavier_aplicacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

6. Standar, B. (Junio de 2014). Business Standar. Obtenido de https://articulos.mercola.com/sitios/articulos/archivo/2014/07/10/estres-afecta-la-memoria.asp

POLIETILENO TEREFTALATO Y CAUCHO SINTÉTICO: ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS ECOLÓGICAS

Tomas Arroyo Ureña[1], Santiago Arceo Díaz[1], Neín Farrera Vázquez[2], José Fidel Navarro Arellano[1], J. Jesús Solís Enríquez[1] y Jorge Armando Ojeda Sanchez[3]

1 Tecnológico Nacional de México Campus Colima, 2 Otra, 3 Universidad de Colima.Correo[1]: G2446002@colima.tecnm.mx

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión sistemática sobre el uso de materiales reciclados, específicamente PET y caucho, en la construcción, con el objetivo de comparar sus propiedades térmicas, acusticas y mecánicas frente a materiales tradicionales como el concreto y el ladrillo. Se aborda el fenómeno de las islas de calor urbanas, resaltando la necesidad de mitigar el impacto ambiental y promover un entorno urbano más saludable y eficiente energéticamente.

La revisión se basa en una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas, aplicando criterios de inclusión y exclusión para seleccionar estudios relevantes publicados entre 2004 y 2024. Se analizan los beneficios del uso de PET y caucho reciclado, incluyendo mejoras en aislamiento térmico, acustico, flexibilidad y durabilidad. A través de un enfoque metodológico riguroso, se identifican tendencias emergentes y áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

Se aplicaron criterios de inclusión que seleccionaron investigaciones con datos cuantitativos sobre propiedades térmicas, mecánicas y de aislamiento acústico en muros para vivienda, considerando únicamente trabajos con metodología detallada y resultados concluyentes. Se excluyeron estudios que analizaran solo una propiedad, carecieran de datos cuantitativos o no presentaran información metodológica suficiente.

Los resultados revelan que diez de los quince artículos cumplieron los criterios de inclusión, destacando tendencias en torno al calentamiento global, el crecimiento urbano y poblacional. Se identificó la distribución geográfica de los estudios, incluyendo cuántos provienen de América Latina y México, y en qué medida se abordan zonas de clima cálido subhúmedo. Se clasificaron las investigaciones según su tipo (artículos, libros o tesis) y se analizó la frecuencia con la que se estudian combinaciones de propiedades térmicas, mecánicas y acústicas.

Se revisó la presencia de normativas aplicadas en las pruebas y se identificó cuál de estas propiedades es menos estudiada generando un nicho para futuras investigaciones. Se concluye que tanto el PET como el caucho reciclado aportan propiedades valiosas a los materiales constructivos, tales como flexibilidad y mejoras en el aislamiento térmico, aunque también presentan limitaciones como la reducción de ciertas propiedades mecánicas. Se identificó que no todas las investigaciones coinciden en reportar ventajas, pues algunos estudios evidencian que el uso de estos materiales puede comprometer la resistencia estructural si no se optimizan las proporciones de incorporación. Estos hallazgos resaltan la necesidad de continuar investigando y desarrollando soluciones innovadoras para mejorar la viabilidad estructural y ambiental de estos materiales en la industria de la construcción.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es comparar las propiedades térmicas de los muros construidos con materiales como el ladrillo rojo y el bloque de concreto frente a los que incorporan PET y caucho. Esta revisión busca no solo identificar las ventajas térmicas que ofrecen los materiales reciclados, sino también evaluar su impacto en la resistencia mecánica, propiedades acústicas, durabilidad y sostenibilidad económica de las estructuras. La industria de la construcción ha sido históricamente una de las principales responsables del impacto ambiental en nuestras ciudades, contribuyendo

significativamente a la generación de residuos y al consumo excesivo de recursos naturales (Infante-Alcalde & Valderrama-Ulloa, 2019).

El uso extensivo de materiales como el concreto y el ladrillo en entornos urbanos favorece la formación de islas de calor, un fenómeno en el que las temperaturas en la ciudad superan considerablemente a las del entorno rural. Esto ocurre porque estos materiales absorben y almacenan la radiación solar durante el día por poco tiempo, liberando el calor y elevando la temperatura ambiental al carecer de propiedades aislantes.

La falta de propiedades repelentes al agua genera que en temporadas de lluvias el material mantenga una permeabilidad considerable, lo que no solo incrementa los costos de recubrimiento y de mantenimiento, sino que también agrava la producción de desechos. Frente a este escenario, el aprovechamiento de residuos plásticos y caucho surge como una alternativa viable para reducir los efectos ambientales asociados a la industria de la construcción.

A nivel global, se producen cerca de 348 millones de toneladas de plástico cada año, de las cuales una gran parte termina en vertederos o ecosistemas acuáticos, agravando la contaminación ambiental (Ide, 2020). En México, el consumo anual de envases de PET alcanza las 860,000 toneladas, con una tasa de recuperación del 63% (ECOCE, 2023); sin embargo, solo el 9% de los plásticos se recicla de manera efectiva a nivel mundial (Becerra, 2022).

La quema de residuos plásticos y caucho genera emisiones nocivas que aumentan los niveles de contaminación del aire y contribuyen al cambio climático. Cuando se incinera el caucho, se liberan compuestos químicos como monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SOx), óxido de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Millones Mamani, 2002), con efectos adversos a la salud y el medio ambiente, mientras que el PET, al no gestionarse adecuadamente, se descompone lentamente, generando impactos ecológicos significativos (Masazul, 2020).

La contaminación acústica es uno de los problemas ambientales más comunes en las zonas urbanas, con impactos comprobados sobre la salud física y mental de la población. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) menciona que los niveles de ruido superiores a los 55 decibeles A (dB(A)) afectan significativamente el confort, el sueño y la salud cardiovascular, especialmente en áreas residenciales expuestas a fuentes constantes de ruido.

En México, la principal fuente de contaminación acústica es el tránsito vehicular, responsable de aproximadamente el 80% del ruido urbano. En ciudades como la Ciudad de México, se han registrado niveles de entre 69.3 y 79.6 dB(A) en diversas intersecciones, superando ampliamente los límites recomendados por la OMS. Además, el 98% del ruido registrado en ciertas zonas proviene del transporte público y vehículos particulares, y el 86% de los puntos medidos presentan niveles por encima de los 55 dB(A) (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal [PAOT], s.f.).

A pesar de estos desafíos, el PET y el caucho presentan características que los convierten en materias primas ideales para la industria de la construcción. El PET es reconocido por su resistencia y durabilidad; sus propiedades mecánicas, como la rigidez y la capacidad de aumentar la ductilidad del concreto, permiten su uso en aplicaciones de muros y como refuerzo para mejorar el rendimiento de mezclas de concreto (Mahecha Rico, 2016). Por su parte, el caucho sintético destaca por sus propiedades térmicas y acústicas, lo que lo convierte en un material eficaz para mejorar el aislamiento en edificaciones, ya que su incorporación en mezclas de concreto reduce la conductividad térmica y mejora la absorción acústica (Flores Medina, 2013). Además, su flexibilidad y resistencia al desgaste lo hacen adecuado para diversas aplicaciones constructivas.

Diversas investigaciones han analizado la incorporación de materiales reciclados como alternativa para mitigar problemas ambientales. Un estudio realizado por Archana et al. (2023) evaluó la viabilidad de emplear residuos de neumáticos triturados en sustitución del agregado grueso dentro

del concreto ligero. Se busca reducir la acumulación de neumáticos desechados y su impacto ecológico, además de disminuir el peso del concreto. Los hallazgos indicaron que reemplazar hasta un 5% del agregado grueso con estos residuos mejoraba la resistencia del concreto. Sin embargo, al sobrepasar este porcentaje, la resistencia se reducía, lo que limita su uso en estructuras que requieren una alta capacidad de carga (Archana et al., 2023).

En la búsqueda de mejorar las propiedades del concreto, estudios recientes han explorado la adición de caucho molido y piedra caliza. Suárez y Choque (2024) encontraron que la adición de 2.7% de caucho molido a especímenes de concreto mejoró su resistencia a la flexión, alcanzando un valor flector de 5.01 MPa. Esta combinación busca solucionar dificultades comunes del concreto, como la grieta por esfuerzo y la corrosión, las cuales disminuyen la vida útil del concreto. Además, la utilización de caucho reusable no solo incrementa la elasticidad del cemento, sino que representa una solución al problema ambiental al utilizar los residuos de neumáticos para mejorar la resistencia del concreto y reducir la cantidad de ellos en los vertederos (Suárez y Choque, 2024).

En México, el proyecto de viviendas emergentes (VIEM) utilizó botellas de PET para construir viviendas ecológicas y seguras para las personas afectadas por el sismo de 2017. Este proyecto no solo abordó la necesidad urgente de vivienda, sino que también promovió un enfoque sostenible al aprovechar un material reciclado abundante. La técnica empleada incluía el rellenado de botellas y el uso de paneles tipo W con PET como núcleo. Los resultados preliminares indicaron que las casas construidas con estas técnicas tenían una durabilidad estimada de 35 años.

Esta revisión busca no solo identificar las ventajas térmicas y acústicas que ofrecen los materiales reciclados, sino también evaluar su impacto en la resistencia mecánica, durabilidad y sostenibilidad económica de las estructuras.

Investigaciones previas han demostrado que los sistemas constructivos que incorporan estos materiales pueden disminuir las ganancias de calor en muros y en el consumo de energía eléctrica por enfriamiento en más de un 8% (Borbón-Almada et al., 2019). Gandel et al. (2024) examinaron las propiedades mecánicas y la durabilidad de mezclas de concreto con diferentes proporciones de granulado de caucho reciclado. Las altas proporciones de caucho disminuyen significativamente la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción del concreto. En el estudio de Gandel et al. (2024), duplicar el contenido de granulado de caucho de 70 kg/m³ a 140 kg/m³ redujo la resistencia a la compresión en aproximadamente un 42% y la resistencia a la tracción en un 35% después de 28 días. Además, la resistencia a la congelación de la mezcla con mayor contenido de caucho fue significativamente menor. Estos hallazgos sugieren que, aunque el caucho reciclado ofrece beneficios ambientales, su uso en concreto requiere una cuidadosa consideración de las propiedades mecánicas y la durabilidad para garantizar un rendimiento estructural adecuado (Gandel et al., 2024). En términos económicos, los bloques y paneles fabricados con PET reducen significativamente los costos de producción en comparación con los materiales convencionales, como los bloques de concreto y los de arcilla, por la reutilización de residuos plásticos y su integración en la economía circular. Además, el costo por metro cuadrado de muro construido con bloques de PET es competitivo, especialmente cuando se consideran los beneficios a largo plazo en términos de sostenibilidad y menor necesidad de mantenimiento (Alsina Rangel, 2023).

Un aspecto fundamental es el impacto ambiental positivo asociado con el uso de PET y el caucho. Esto no solo reduce la contaminación en mares y vertederos, sino que también disminuye el potencial de calentamiento global asociado con la producción de materiales tradicionales. Este enfoque promueve prácticas constructivas sostenibles que pueden alinearse con certificaciones ambientales internacionales como LEED o EDGE, fortaleciendo el compromiso con el desarrollo sostenible (Alsina Rangel, 2023).

A través de estos antecedentes, queda claro que tanto el PET como el caucho reciclado aportan propiedades valiosas a los materiales constructivos. Entre ellas destacan su **flexibilidad**, que permite absorber impactos y resistir deformaciones; y sus **propiedades térmicas**, que contribuyen

al aislamiento y a la reducción de la transferencia de calor. Sin embargo, también se han identificado limitaciones, como la disminución en ciertas propiedades mecánicas al incorporar estos materiales, lo que resalta la necesidad de seguir investigando y desarrollando soluciones innovadoras para superar estos desafíos. Asimismo, es importante destacar que el campo del aislamiento acústico ha sido muy poco explorado, sin embargo, podría volverse relevante en poca década debido al incremento a la contaminación acústica debido al crecimiento de las ciudades.

TEORÍA

La revisión se estructurará en torno a una serie de artículos seleccionados, donde se presentarán el objetivo de cada estudio, los materiales utilizados, los experimentos realizados y los principales resultados obtenidos. Esta comparación permitirá identificar tendencias, beneficios y limitaciones en el uso de estos materiales reciclados en la construcción.

Para llevar a cabo esta revisión, se realizaron búsquedas en bases de datos académicas reconocidas (Scopus, Web of Science), así como en motores de búsqueda especializados como **Google Scholar** y **Research Rabbit.**. Estas plataformas proporcionan acceso a una amplia gama de literatura científica revisada por pares, asegurando la calidad y relevancia de los estudios seleccionados. La búsqueda se centró en artículos publicados entre 2004 y 2024 que evaluaran propiedades térmicas, acusticas, mecánicas o económicas de muros construidos con PET, caucho sintético o ambos.
La selección de literatura se contempló sobre el uso de PET y caucho sintético en la elaboración de elementos constructivos, se implementó una estrategia de búsqueda sistemática utilizando palabras clave específicas. Se emplearon términos en español y en inglés, por ejemplo, **"PET reciclado en construcción"**, **“propiedades acusticas”**, **"caucho reciclado y concreto"**, **"propiedades térmicas de materiales reciclados"**, **" Environmental impact of construction materials"**, **"Thermal performance"**, y **"Sustainability in construction "**. Las combinaciones de palabras clave se seleccionaron para abarcar investigaciones relacionadas con las propiedades y aplicaciones de estos materiales en el ámbito constructivo.

Para esta revisión, se realizó un proceso de selección de artículos en dos fases: **fase de exclusión** y **fase de inclusión**, con el fin de garantizar la relevancia y calidad metodológica de los estudios analizados. En la fase de exclusión se descartaron aquellos trabajos que no abordaban el uso de materiales reciclados en elementos constructivos o que no presentaban resultados experimentales claros. Posteriormente, en la fase de inclusión, se seleccionaron los estudios que cumplían con los criterios temáticos y técnicos establecidos.

Los resultados de esta revisión se presentan en el **Cuadro 1**, donde se resume la información más relevante de cada estudio con base en su objetivo, hallazgos principales y palabras clave asociadas.

Estudio	Objetivo	Resultados Principales	Palabras Clave
“Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto.” (Silva Herrera y Ochoa González 2019)	Investigar el uso de PET reciclado en elementos de concreto para mejorar la flexión.	El PET reciclado mejora la flexibilidad y resistencia estructural del concreto en pruebas mecánicas.	PET reciclado. Elemento constructivo. Concreto.
“Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción.” (Cano Barrita et al. 2023)	Evaluar partículas de PET como reemplazo parcial de agregado fino en morteros.	El PET reciclado mejora las propiedades reológicas y mecánicas del mortero, haciéndolo viable para aplicaciones constructivas.	Partículas de PET. Morteros. Propiedades mecánicas.

"Diseño y ensayo de fibras plásticas recicladas para refuerzo en morteros." (Pablo Ojeda, Teresa Mercante y Horacio Fajardo 2020)	Estudiar el uso de fibras PET recicladas como refuerzo en morteros.	Las fibras PET mejoran la ductilidad y reducen fisuración por contracción en morteros, respaldando su uso en mezclas constructivas.	Fibras PET. Refuerzo. Morteros.
"Elementos constructivos con PET reciclado." (Gaggino, 2003)	Proponer un método para fabricar elementos constructivos con PET reciclado.	El PET reciclado reduce residuos y contaminación, y los elementos resultantes ofrecen propiedades físicas mejoradas en hormigón liviano.	Elementos constructivos. PET reciclado. Hormigón liviano.
"Effect of Glass Fiber on Mechanical Properties of Vibrated Concrete and Self Compacting Concrete." (Vara Prasad, Kumar y Rama Prasad Reddy, 2014).	Desarrollar FRVC y FRSCC y relacionar la resistencia a la tracción, flexión y compresión para hormigón M40.	La adición de fibras aumentó marginalmente la resistencia a la compresión, y pronunciadamente la resistencia a la tracción y flexión en FRSCC. La fibra aumentó el valor de E en hormigón autocompactante.	Hormigón Vibrado. Hormigón Autocompactante. Fibra de Vidrio. Propiedades Mecánicas.

Cuadro 1. Tabla de revisión de literatura por palabras claves. Fuente: Elaborado por Autor.

Primera fase: Lectura de títulos y resúmenes
En esta primera fase, se realizó una búsqueda inicial en las bases de datos seleccionadas, donde se identificaron un total de 15 estudios potenciales. Se revisaron los títulos y resúmenes de cada artículo para determinar su pertinencia respecto al objetivo del estudio. Los artículos que mencionan el uso de PET o caucho en la elaboración de procesos constructivos, así como aquellos que evaluaban propiedades térmicas, mecánicas, acústicas o económicas.

Segunda fase: Revisión del texto completo para verificar relevancia
En la segunda fase, se procedió a la lectura detallada del texto completo de los artículos seleccionados. Durante esta revisión, se verificó que cada estudio cumpliera con los criterios de inclusión establecidos, la revisión incluye estudios publicados entre 2004 y 2024, seleccionando solo aquellos con datos cuantitativos y metodologías claras, tales como la claridad en la metodología, la presentación de datos cuantitativos significativos y la relevancia temática. De los 15 estudios identificados inicialmente, se seleccionaron 10 artículos relevantes tras aplicar los criterios de inclusión y 5 artículos con criterio de exclusión. Estos 15 artículos fueron considerados adecuados para el análisis comparativo debido a su enfoque de las propiedades del PET y caucho sintético.
Los criterios de inclusión para la selección de artículos fueron específicos: considerando aquellos estudios que presentaran experimentos claros y detallados sobre el uso de estos materiales. Esto incluye investigaciones que evaluaran las propiedades térmicas, mecánicas o acústicas, de estos materiales en comparación con opciones tradicionales. Por otro lado, se excluyeron trabajos que no ofrecieran metodologías claras o que no abordaran directamente las propiedades de interés, así como aquellos que carecieran de datos cuantitativos significativos.

Este proceso sistemático permitió asegurar que la revisión se basara en una literatura sólida y pertinente, lo que contribuye a una evaluación crítica y fundamentada sobre el uso de estos materiales.

A continuación, se presentan los artículos seleccionados para esta revisión, junto con la descripción de los criterios de inclusión aplicados a cada uno de ellos, para el primer apartado se presentan artículo que se incluyeron en la revisión por tener información relevante sobre los temas de propiedades mecánicas, térmicas, acusticas y económicas, para el segundo apartado las investigaciones presentadas fueron de carácter de exclusión, se tomó en cuenta la información relevante que aporte al tema principal de este artículo, el cual es las cualidades mecánicas, térmicas, acusticas y económica de los bloques de pet o caucho, los títulos presentados en este aparatado, reflejan información que ayuda a complementar los alcances que se desean lograr, presentando las problemáticas comunes, las cuales son la contaminación del pet o caucho, entre otros factores.

Ejes temáticos de inclusión y relevancia:

Elaboración de tejas ecológicas utilizando neumáticos, botellas y bolsas plásticas recicladas (Quintana et al., 2023): Este estudio se publicó en 2023 y evalúa las propiedades fisicoquímicas de tejas ecológicas elaboradas con caucho y plástico reciclado, cumpliendo con el criterio de abordar **propiedades mecánicas** relevantes. Se utilizó una metodología experimental clara para comparar las propiedades técnicas de las tejas recicladas con las tradicionales.

Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción (Cano Barrita et al. 2023): En este artículo se examina el uso de partículas de PET reciclado como reemplazo parcial del agregado fino en morteros, evaluando sus **propiedades mecánicas.** Los resultados muestran que el PET puede mejorar ciertas características del mortero, lo que lo hace una opción viable para aplicaciones constructivas.

Diseño y fabricación experimental de placas cemento-PET para ser utilizadas en la construcción de muros no portantes en eco viviendas (Taccone et al., 2022): Este trabajo investiga la factibilidad de fabricar placas de hormigón utilizando plástico tipo polietileno tereftalato (PET) como sustituto parcial de la arena. La metodología empleada evaluó niveles de sustitución del 20% y 35%, con dos granulometrías de PET obtenidas de cooperativas de reciclado. Se realizaron ensayos en fresco de densidad y trabajabilidad, y ensayos en seco de **resistencia al fuego** y aptitud para perforación. Los resultados experimentales demostraron que la sustitución óptima para utilizar en construcciones futuras corresponde a la del 20%, con una granulometría fina. Este estudio aporta una solución para la gestión de residuos de PET y promueve la construcción sustentable de eco viviendas.

Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero (Cobos-Sáenz de Viteri & Valle-Benítez, 2021): Este estudio se centra en comparar el **comportamiento mecánico** del concreto reforzado con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y con fibra de acero, buscando alternativas que minimicen el impacto ambiental en la industria de la construcción. La metodología empleada es cuantitativa, descriptiva y experimental, mediante ensayos realizados a especímenes de hormigón para obtener información experimental sobre el concreto con fibras de PET reciclado y con fibras de acero. Se manipulan variables como la resistencia a la compresión y tracción indirecta para medir los efectos en los resultados obtenidos en laboratorio. La investigación aporta información valiosa sobre los niveles de mejora frente al hormigón tradicional según la fibra y el porcentaje añadido, lo que puede contribuir a mejorar los procesos constructivos y fomentar el uso de materiales más sostenibles.

Diseño de un bloque alivianado utilizando poliestireno expandido, PET, vermiculita como agregados (Villalta-Góngora et al., 2023): Este trabajo tiene como objetivo diseñar un bloque alivianado incorporando poliestireno expandido a la mezcla de mortero, con el fin de comparar su **costo-beneficio** con el mercado tradicional. La metodología empleada es experimental con un enfoque cuantitativo, desarrollando ensayos para determinar la dosificación adecuada para bloques alivianados. Se realizaron pruebas de compresión simple, absorción y análisis bibliográfico de los ensayos de retracción por secado lineal, aspectos visuales, marcas y resistencia al fuego. Se llevaron

a cabo cuatro ensayos con diferentes dosificaciones, donde el cuarto ensayo, con una dosificación del 20% de poliestireno expandido, PET y vermiculita, resultó óptimo. Los resultados obtenidos para el módulo de ruptura fueron de 9.57 MPa, 9.53 MPa y 9.48 MPa a los 28 días. Además, se realizó un análisis económico y ambiental comparativo con un bloque tradicional, concluyendo que la dosificación del bloque No. 4 es adecuada para la elaboración de bloques alivianados, cumpliendo con los requerimientos de la norma ecuatoriana de la construcción.

Prototipo de bloque con base en materiales reciclados para el desarrollo de la construcción sostenible (Alvarado-Gutiérrez et al., 2021): Este trabajo se enfoca en la fabricación de un prototipo de bloque utilizando materiales reciclados como el tereftalato de polietileno (PET), papel y almidón de yuca, además de los materiales tradicionales empleados en la fabricación de bloques. El objetivo principal es fomentar una construcción innovadora y amigable con el medio ambiente, reduciendo la contaminación generada por la mala disposición de desechos no reciclados. La metodología de investigación es experimental con un enfoque cuantitativo, basada en ensayos de laboratorio para evaluar si el prototipo de bloque cumple o supera las especificaciones establecidas por la normativa ecuatoriana. Los ensayos de **resistencia a la compresión** demostraron que la resistencia varía según la cantidad de PET utilizada, superando la resistencia mínima requerida para mampostería no estructural. Este estudio contribuye a mejorar la actividad de reciclaje y reducir la contaminación ambiental mediante el uso de materiales reciclados en la construcción.

Análisis técnico-económico del uso de PET reciclado como reemplazo parcial de áridos finos en hormigones (Carreño Cornejo, 2020): El artículo aborda el uso del PET reciclado como sustituto parcial de áridos finos en hormigón. El objetivo es determinar una proporción óptima de reemplazo que mantenga las propiedades del hormigón dentro de los criterios establecidos por la ACI318-11. El análisis se basa en investigaciones y pruebas ya realizadas, que evalúan la resistencia a la **compresión,** tracción, flexión, absorción de agua y módulo de elasticidad. Se propone una dosificación para un hormigón G25 con un reemplazo del 10% de PET reciclado, el cual podría ser considerado aceptable según los criterios de la ACI318-11.

Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET) (Infante-Alcalde & Valderrama-Ulloa, 2019): Este estudio propone la reutilización de material plástico en reemplazo del agregado fino en la fabricación de bloques de hormigón, analizando el **comportamiento técnico, económico y medioambiental** de la propuesta. La metodología empleada incluye ensayos mecánicos para evaluar las propiedades del hormigón con reemplazo de PET, comparación de precios de mercado para determinar la competitividad económica y cálculo de la huella de carbono para analizar el impacto medioambiental. Los resultados técnicos muestran que las probetas de hormigón con un 10% de reemplazo de PET tienen propiedades mecánicas acordes con la normativa chilena para bloques no estructurales. El análisis económico revela que este bloque es altamente competitivo en comparación con los productos existentes en el mercado chileno. El cálculo de la huella de carbono presenta una disminución en la etapa de extracción de materias primas.

Elaboración de concreto permeable con adición de material plástico reciclado para pavimentación en el distrito de Pariacoto-Ancash (Castillo Castillo & Trujillo De La Cruz, 2019): La inclusión de este artículo se determinó por el tema tratado sobre la permeabilidad del concreto con plástico reciclado. Aunque presenta limitaciones metodológicas, aporta datos cuantitativos sobre la capacidad de permeabilidad del material, un factor crítico para aplicaciones en pavimentación. Su objetivo de evaluar la viabilidad técnica del plástico reciclado en la fabricación de concreto permeable, junto con resultados experimentales sobre tasas de filtración de agua, lo hace relevante para analizar soluciones constructivas.

Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (NFUs) (Flores Medina, 2013): La caracterización de hormigones con residuos de neumáticos (NFUs), contribuye significativamente al conocimiento sobre el

comportamiento de materiales reciclados en la construcción. A pesar de que se centra en NFUs y no en PET o caucho reciclado de otras fuentes, el estudio aporta datos valiosos sobre propiedades **físicas, mecánicas, térmicas y acústicas,** lo que permite comprender el impacto del uso de materiales reciclados en el desempeño del hormigón. La metodología detallada y la amplia gama de ensayos realizados hacen de este trabajo una referencia útil para evaluar la viabilidad técnica y las aplicaciones constructivas de materiales alternativos en el hormigón.

Ejes temáticos de exclusión y relevancia:

Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción (Hernández-Zamora et al., 2021): La exclusión de este artículo es porque no se centra específicamente en el análisis de materiales que contengan PET o caucho reciclado, se habla en lo general de otros materiales, pero no les da la importancia a los materiales principales. El estudio se basa principalmente en una revisión bibliográfica cualitativa, lo que limita su utilidad para un análisis técnico y comparativo de las propiedades de los materiales constructivos.

Elaboración de ladrillos ecológicos a partir de residuos plásticos para la construcción sostenible (Solorzano Dueñas, 2024): A pesar de que este estudio investiga la fabricación de ladrillos ecológicos con residuos plásticos y presenta resultados de pruebas de **resistencia y absorción,** podría ser excluido debido a la falta de detalle en la metodología experimental. Si bien menciona los métodos utilizados, la descripción de los procedimientos específicos, los parámetros de control y los criterios de aceptación es limitada. Esta falta de transparencia dificulta la evaluación de la validez y reproducibilidad de los resultados, lo que impide una comparación rigurosa con otros estudios en el campo.

Plásticos reciclados de RSU en la construcción. PRECO - Diseño y evaluación de soluciones constructivas (Lafalce et al., 2016): Describe un proyecto colaborativo para el diseño de soluciones constructivas con plásticos reciclados de RSU, se enfoca principalmente en el proceso de diseño y las actividades del taller vertical, y se excluye porque no presenta resultados técnicos concretos ni datos cuantitativos sobre las propiedades de los materiales o el desempeño de las soluciones propuestas. El documento describe la metodología de trabajo y los objetivos del proyecto, pero carece de información detallada sobre los ensayos realizados, las características de los plásticos utilizados o la evaluación comparativa de las soluciones constructivas diseñadas. La evidencia empírica limita su utilidad para una revisión sistemática enfocada en la evaluación del desempeño de materiales y sistemas constructivos específicos.

Análisis de materiales sostenibles, ciclo de vida y su aplicación en construcción (Albir Ribera, 2021): Aunque este trabajo aborda un análisis exhaustivo de materiales sostenibles y su ciclo de vida, se excluyó porque no se centra en el uso de plásticos reciclados como el PET en aplicaciones constructivas. El estudio incluye muchos materiales sostenibles, naturales y reciclados, pero carece de datos cuantitativos específicos sobre las propiedades térmicas, mecánicas o estructurales de los materiales derivados del reciclaje de plásticos. Además, el análisis se basa principalmente en una revisión bibliográfica y comparativa, sin incluir ensayos experimentales que permitan validar los resultados o evaluar la viabilidad técnica de los materiales en contextos constructivos específicos.

Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados (Palacio-León et al., 2017): Se compara con detalle la granulometría entre agregados naturales y reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición, y se limita solo a la caracterización física de estos. El estudio no aborda ni evalúa propiedades mecánicas, térmicas o de desempeño del concreto producido con estos materiales, ni considera la incorporación de plásticos reciclados como PET o caucho, que son centrales para el objetivo de esta revisión.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados más relevantes obtenidos de la evaluación del comportamiento térmico, mecánico y acústico de bloques de concreto con adición de polietileno tereftalato (PET) y caucho reciclado. Se analizan los datos en relación con los objetivos establecidos, destacando la importancia de estos materiales en el contexto de la construcción. Mediante la investigación se demostró que las ventajas más discutidas para el PET son las propiedades térmicas y para el caucho las propiedades mecánicas

Propiedades Térmicas
Los estudios indican que la inclusión de PET y caucho en la fabricación de bloques de concreto, mejora significativamente las propiedades térmicas. Según Núñez et al. (2023), la fabricación de bloques con Polietileno de Tereftalato (PET) reciclado para construcción de muros de mampostería no portante, busca determinar las características físicas y mecánicas del plástico para incluirlo en la mezcla con materiales tradicionales. En el estudio, los bloques de 40 x 20 x 10 cm se elaboraron con añadidos de PET al 20, 40, 60 y 80 por ciento sustituyendo el material pétreo grueso. Este hallazgo muestra las propiedades selectivas de artículos, con información cuantitativa y a la vez sugiere que el uso de estos materiales puede contribuir a una mayor eficiencia energética en edificaciones, ya que se requiere menos energía para mantener temperaturas confortables en el interior.

Material	**Conductividad Térmica (W/m·K)**
Block Hueco 12 X 20 X 40 cm	0.8 – 1.7
Bloque con 40% PET* Intervalos promedios basados en los valores reportados*	0.2 – 0.4

Cuadro 2. Tabla comparativa de conductividad térmica. Fuente: Elaborado por autor.

Este cuadro ilustra cómo la incorporación de PET no solo mejora las propiedades térmicas, sino que también puede ser una solución viable para reducir el consumo energético en climas extremos, como se señala en el análisis realizado por Núñez et al. (2023).

Propiedades Mecánicas
Los hallazgos relacionados con las propiedades mecánicas muestran que el caucho reciclado incrementa la flexibilidad de los muros, lo cual es beneficioso para absorber impactos y mejorar el comportamiento ante sismos (Tamanna et al. 2020). Sin embargo, se observó que, en altas proporciones, la inclusión de caucho puede reducir la resistencia a la compresión, limitando su uso en estructuras de carga.

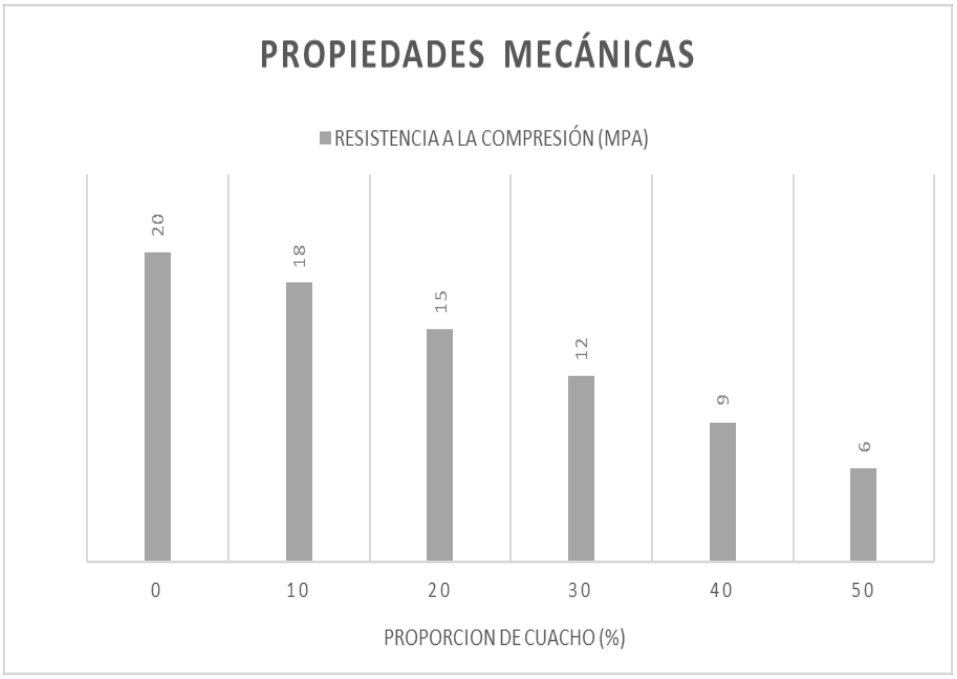


Figura 1. Tabla de resistencia a la compresión y proporción de caucho. Fuente: Elaborado por el autor.

Este gráfico muestra cómo la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de caucho en los bloques, lo que resalta la necesidad de optimizar las proporciones para equilibrar flexibilidad y resistencia estructural.

Impacto Ambiental

El uso de materiales reciclados como PET y caucho ha demostrado ser efectivo para reducir residuos. (Infante-Alcalde & Valderrama-Ulloa, 2019). menciona que el reciclaje de PET permitió disminuir los desechos plásticos enviados a vertederos. Esto no solo contribuye a mitigar el impacto ambiental, sino que también ofrece una alternativa sostenible frente a la extracción intensiva de recursos naturales.

Ventajas Económicas

Los análisis de costo-beneficio indican que la incorporación de PET puede reducir los costos de producción de materiales constructivos entre un 10-25%, dependiendo del tamaño del proyecto (Infante-Alcalde & Valderrama-Ulloa, 2019). Esta reducción es un factor atractivo para los desarrolladores y constructores, especialmente considerando las crecientes demandas por soluciones sostenibles. Aunque el caucho reciclado representa una opción potencialmente viable, no se incluyó en este análisis debido a la falta de información detallada y confiable sobre sus características económicas, en particular los costos de elaboración, Esta limitación impidió realizar una comparación objetiva y fundamentada frente al PET, el cual sí cuenta con datos accesibles y actualizados que permiten evaluar su viabilidad técnica y económica.

Material	Costo por Unidad (MXN)	Ahorro Potencial (%)
Block Hueco 12 X 20 X 40 cm	$12.00	-
Bloque con Caucho (20%)	$8.00	33.33
Bloque con PET (40%)	$5.50	54.17

Cuadro 3. Análisis de costo-beneficio. Fuente: Elaborado por el autor.

Tendencias y Desafíos Identificados
Se identificaron tendencias emergentes en el uso de nuevas técnicas para integrar PET y caucho en mezclas de construcción, lo que abre oportunidades para innovaciones en el sector (Rodas León y Ordoñez Villagómez, 2016). Sin embargo, también se señalaron desafíos, como el cumplimiento de normativas estandarizadas para el uso de materiales reciclados, lo que sigue siendo un obstáculo para su implementación masiva.

Como tendencia significativa es la expansión de PET en sectores no tradicionales: El reciclado de PET está encontrando aplicaciones más allá de los envases, extendiéndose a sectores como bienes para el hogar o de uso cotidiano (tapicería, cojines, alfombras y ropa), en la construcción (aislamiento, material para techos y paneles) debido a su resistencia térmica y durabilidad. Esta tendencia subraya la versatilidad del material y su papel en el impulso de iniciativas de economía circular no solo de una región sino como medida de exportación a otras zonas (Montoya Gómez, 2021).

Discusión
El uso de materiales reciclados, como el polietileno tereftalato (PET) y el caucho, ha sido objeto de investigaciones que destacan sus ventajas y desventajas.

Un aspecto positivo es la mejora en las propiedades mecánicas de los materiales. Por ejemplo, Suárez y Choque Flores (2025), demostraron que la adición de caucho molido y piedra caliza mejora las propiedades mecánicas del concreto, lo que sugiere que estos materiales pueden ser utilizados en aplicaciones constructivas sin comprometer la calidad estructural.

De acuerdo con los trabajos encontrados, como el estudio realizado por Khatib y Bayomy (1999), el caucho sintético aporta flexibilidad al concreto, lo que puede ser beneficioso para aplicaciones específicas como estructuras resistentes a sismos. Es importante considerar que proporciones superiores al 20% afectan negativamente la resistencia a la compresión, limitando su uso en estructuras portantes.

También se han identificado cambios en la incorporación de estos materiales. La investigación de Sánchez Camana (2017) demostró que la mampostería elaborada con botellas PET colocadas verticalmente, más la malla y espuma flex, presentó una resistencia a compresión comparable a la de la mampostería tradicional con ladrillo, con una diferencia del 3,07%. Además, se observó una reducción de peso del 35,01%, lo que resalta su potencial como alternativa liviana y resistente en construcción. Esta evidencia respalda la viabilidad del PET reciclado y el caucho como material estructural y sugiere que, con un diseño adecuado, puede integrarse de manera efectiva en sistemas constructivos.

En cuanto a las propiedades térmicas, González et al. (2018) demostraron que los bloques con PET reciclado presentan una reducción en la conductividad térmica del 15-20%, lo que mejora la eficiencia energética en edificaciones, especialmente en climas cálidos y templados.

Aunque el costo inicial de implementar estas tecnologías puede ser un obstáculo. Algunos estudios sugieren que los costos a largo plazo se reducen debido a la eficiencia energética mejorada (González et al., 2019), el costo inicial más alto puede disuadir a los desarrolladores. Esto es relevante en contextos donde los márgenes económicos son ajustados.

La investigación sobre propiedades acústicas de Pinto y Cuba (2019) tuvo como objetivo determinar las propiedades térmicas y acústicas de ladrillos fabricados con plásticos PET. Se realizaron ensayos experimentales en 83 ladrillos y se encontró que, en cuanto a la intensidad de ruido, a frecuencias de 125 y 250 Hz la intensidad es baja, mientras que de 500 a 2000 Hz la intensidad es considerable, pero aun así el material amortigua el sonido de manera significativa. Se concluye que los ladrillos con PET cumplen con los parámetros requeridos para su uso en la construcción y presentan buenas propiedades de absorción acústica, especialmente en frecuencias medias y altas.

Las investigaciones también apuntan a tendencias emergentes en el uso de nuevos materiales reciclados. Por ejemplo, Sánchez-Amono et al. (2024) analizan tejas hechas de caucho y plástico reciclado, destacando sus propiedades óptimas para aplicaciones constructivas. Esto sugiere un camino hacia adelante donde la innovación puede superar algunas limitaciones actuales.
Desde una perspectiva económica Infante-Alcalde y Valderrama-Ulloa (2019). evidenció que el uso de PET y caucho reciclado puede disminuir los costos de producción entre un 10% y un 25%, lo que representa una ventaja significativa para proyectos constructivos sostenibles.

A pesar de que los resultados son prometedores, se identifican desafíos importantes, como la necesidad de normativas estandarizadas para el uso masivo de estos materiales y la optimización de las proporciones utilizadas para equilibrar propiedades térmicas, mecánicas acústicas y económicas. Estos aspectos deben ser considerados para garantizar su implementación efectiva en futuras aplicaciones constructivas.

CONCLUSIÓN

El estudio destacó que la incorporación de polietileno tereftalato (PET) y caucho en la fabricación de bloques de concreto representa una alternativa viable y sostenible para la construcción. Logrando evaluar el comportamiento térmico y mecánico de estos materiales, demostrando que su uso puede mejorar la eficiencia energética de las edificaciones al reducir la conductividad térmica en un 15-20%, como lo señala Núñez et al. (2023). Se identificó que el caucho reciclado incrementa la flexibilidad del concreto, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones específicas como estructuras sismorresistentes (Tamanna et al. 2020). Las investigaciones refuerzan la importancia de integrar materiales reciclados en el sector constructivo para mitigar el impacto ambiental y promover prácticas más sostenibles.

También se identificaron limitaciones importantes. Por ejemplo, altas proporciones de caucho pueden reducir significativamente la resistencia a la compresión del concreto, limitando su uso en estructuras portantes (Sánchez Camana, 2017) Aunque el PET presenta propiedades térmicas favorables, su implementación masiva enfrenta desafíos relacionados con la falta de normativas estandarizadas y la necesidad de optimizar las proporciones para equilibrar propiedades térmicas y mecánicas (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Estas limitaciones deben ser abordadas en futuros estudios para garantizar una aplicación más amplia y efectiva de estos materiales.

Se sugiere continuar investigando las proporciones óptimas de PET y caucho en mezclas de concreto para maximizar sus beneficios térmicos y acústicos sin comprometer su resistencia estructural. También es importante fomentar el desarrollo de normativas específicas que regulen el uso de materiales reciclados en la construcción, lo que facilitaría su adopción masiva. Se recomienda

evitar el uso de proporciones excesivas de caucho en aplicaciones estructurales críticas hasta que se desarrollen soluciones técnicas que mitiguen sus efectos adversos en la resistencia a la compresión.

Este estudio aporta trabajos en donde se evidencia sobre las ventajas del PET y el caucho reciclado como materiales sostenibles. Se requiere un enfoque integral que aborde tanto sus beneficios como sus limitaciones para garantizar su viabilidad técnica, económica y ambiental. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas como las de Infante-Alcalde y Valderrama-Ulloa (2019) quienes resaltan el potencial económico del uso de materiales reciclados, pero también destacan la necesidad de superar barreras técnicas y normativas para su implementación exitosa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Borbón Almada, A.C. et al. (2019) “Materiales reciclados aligerados y su influencia en el consumo de energía eléctrica en viviendas económicas”, Acta universitaria, 29, pp. 1–15. Disponible en: https://doi.org/10.15174/au.2019.2096.
2. Gandel, Radoslav & Jerabek, Jan & Varak, Jaromir. (2024). The influence of the use of recycled rubber in concrete on its selected properties. E3S Web of Conferences. 550. 10.1051/e3sconf/202455001041.
3. Alsina Rangel, K. F. (2023). Análisis económico y ambiental del uso de tereftalato de polietileno (PET) para construcción de muros divisorios en viviendas (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CD. MX.
4. Plastics Technology México (2017) Casas de PET, una oportunidad para-México luego del sismo, Plastics Technology México. Disponible en: https://www.pt-mexico.com/noticias/post/casas-de-pet-una-oportunidad-para-mexico-luego-del-sismo (Consultado: el 20 de febrero de 2025).
5. Ecoce | Registro Acopiadores [en línea], (2023). Ecoce | Cuidamos el Medio Ambiente A través del acopio y reciclaje de envases y empaques en México. [Consultado el 18 de febrero de 2025]. Disponible en: https://www.ecoce.mx/cifras_y_estadisticas
6. El sector de plástico y caucho. Parte 1: Mercado y economía - Revista IDE envase embalaje packaging [en línea], (2020). IDE. [Consultado el 18 de febrero de 2025]. Disponible en: https://ide-e.com/el-sector-de-plastico-y-caucho-parte-1-mercado-y-economia/
7. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). Informe sobre contaminación acústica en México.
8. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Directrices sobre Ruido Ambiental.
9. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal [PAOT]. (s.f.). Problemática del Ruido y las Vibraciones. Recuperado de https://paot.org.mx/centro/paot/ruido02-05.pdf
10. Cano Barrita, P. F. d. J., Vásquez López, M. B., León Martínez, F. M. y Reyes Hidalgo, M., (2023b). Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción. Ciencia Nicolaita [en línea]. (87). [Consultado el 24 de febrero de 2025]. Disponible en: doi: 10.35830/cn.vi87.664
11. Taccone, V., Oviedo, N., Montenegro, S., Ganiele, M. J., Melo, M., Quinteros, L., Artaza, M., Gonzalez, G., Abadie, L., Fabbro, S., Attorresi, L. y Ponzoni, L., (2022). Diseño y fabricación experimental de placas cemento-PET para ser utilizadas en la construcción de muros no portantes en ecoviviendas. Ciencia y Tecnología [en línea]. 57–72. [Consultado el 24 de febrero de 2025]. Disponible en: doi: 10.18682/cyt.vi22.7058
12. Cobos-Sáenz de Viteri, L. A., & Valle-Benítez, A. W. (2021). Estudio comparativo sobre el comportamiento mecánico del concreto con fibra de polietileno tereftalato (PET) reciclado y concreto con fibra de acero. Dom. Cien., ISSN: 2477-8818, 7(5), 798-818.
13. Becerra, B. X. (2022, 24 febrero). Hoy en día se produce el doble de desechos plásticos en el mundo que hace 20 años. Diario la República. https://www.larepublica.co/globoeconomia/hoy-en-dia-se-produce-el-doble-de-desechos-plasticos-en-el-mundo-que-hace-20-anos-3310507

14. Caucho y neumáticos – Mas Azul Planeta [en línea], (2020). Mas Azul Planeta. [Consultado el 18 de febrero de 2025]. Disponible en: https://www.masazulplaneta.com.ar/2020/07/24/caucho-y-neumaticos/
15. Gaggino, R. (2003) 'constructivos con PET reciclado'.
16. Villalta-Góngora, V., González-Tobar, E., & Valero-Fajardo, C. (2023). Diseño de un bloque alivianado utilizando poliestireno expandido, PET, vermiculita como agregados. 593 Editorial Digital CEIT, 8(3), 383-394. https://doi.org/10.33386/593dp.2023.3.1708
17. Carreño Cornejo, F. V. (2020). Análisis técnico-económico del uso de PET reciclado como reemplazo parcial de áridos finos en hormigones (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
18. Infante-Alcalde, J. y Valderrama-Ulloa, C., (2019). Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET). Información tecnológica [en línea]. 30(5), 25–36. [Consultado el 25 de febrero de 2025]. Disponible en: doi: 10.4067/s0718-07642019000500025
19. Castillo, L. M., & Trujillo De La Cruz, E. (2019). Elaboración de concreto permeable con adición de material plástico reciclado para pavimentación en el distrito de Pariacoto-Ancash [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Santa. https://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/4035
20. Hernández-Zamora, M. F., Jiménez-Martínez, S., & Sánchez-Monge, J. I. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. Tecnología en Marcha, 34(2), 3-10. https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831
21. Flores Medina, D. (2013). Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (NFUs) (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
22. Solorzano Dueñas, Y. L. (2024). Elaboración de ladrillos ecológicos a partir de residuos plásticos para la construcción sostenible (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador.
23. Lafalce, H. R., Larroque, L. A., García Zúñiga, F., Piñeyro, M. S., Medina, D., & Oliva, J. A. (2016). Plásticos reciclados de RSU en la construcción. PRECO - Diseño y evaluación de soluciones constructivas. Taller Vertical No 3 de Procesos Constructivos, FAU - UNLP.
24. Albir Ribera, A. (2021). Análisis de materiales sostenibles, ciclo de vida y su aplicación en construcción (Trabajo Final de Grado). Universitat Politècnica de València, España.
25. Núñez, L. Andrade, R. Ortíz, C. Bustamante, S.(2023).Determinación de la Transmitancia Térmica Para Bloques con Polietileno de Tereftalato Reciclado. RevistaG-ner@ndo, V°4(N°1). 800–813.
26. Quintana Tito, C. D., & Vega Mayta, N. F. (2023). Elaboración de tejas ecológicas utilizando neumáticos, botellas y bolsas plásticas usadas.
27. Palacio-Leon, O., Chávez, A., y Velásquez, Y. (2017). Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados. Revista Tecnura, 21(53), 96-106, doi: 10.14483/22487638.8195
28. Archana, A. et al. (2023) "Comparative study on strength aspects of light weight concrete by replacing coarse aggregate with shredded Tyre waste", en AIJR Proceedings. AIJR Publisher, pp. 49–53.
29. Lurita Suárez, R. y Choque Flores, L. (2024) "Adición de caucho molido y piedra caliza para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas para un concreto sostenible", Gaceta Técnica, 26(1), pp. 109–125. Disponible en: https://doi.org/10.51372/gacetatecnica261.7.
30. Tamanna, K., Tiznobaik, M., Banthia, N. & Alam, M.S., 2020. Mechanical properties of rubberized concrete containing recycled concrete aggregate. ACI Materials Journal, 117(3), pp.169–179. doi:10.14359/51722409.
31. Ramírez, C. P. (2018). Comportamiento físico-mecánico y térmico de los morteros de cemento aditivados con fibras minerales procedentes de residuos de construcción y demolición. https://doi.org/10.20868/upm.thesis.54144
32. Rodas León, C.V. y Ordoñez Villagómez, J.F., 2016. Desarrollo tecnológico, investigativo y experimental de ecobloques de hormigón en base a vidrio y polietileno de tereftalato (PET)

reciclado, como alternativa sustentable al bloque tradicional. Trabajo de titulación, Universidad del Azuay.

33. Montoya Gomez, T. (2021) 'Exportación de textil y prendas de vestir hechas con PET y algodón reciclados para Corea del Sur', Revista Mundo Asia Pacífico, 10(19), pp. 44–66. doi: https://doi.org/10.17230/map.v10.i19.03

34. Khatib, J. M., & Bayomy, F. M. (1999). Rubberized Portland cement concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 11(3), 206-213.

35. C. A. Batallanos Pozo y A. P. Romero Zenteno, Mortero para tarrajeo de exteriores reemplazando parcialmente el agregado fino por caucho reciclado para mejorar las condiciones térmicas de las viviendas de la zona alto andina del departamento de Apurímac-Perú, Tesis de licenciatura, Univ. Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, 2022, p. 74. Disponible en: http://hdl.handle.net/10757/659189

36. E. J. Lara Guerrero, D. P. Guerrero Cuasapaz y B. I. Altamirano León, "Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto," Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, vol. 43, no. 3, pp. 134-141, 2020, p. 9. DOI: https://doi.org/10.22209/rt.v43n3a03.

37. Mahecha Rico, J. (2016). *Propiedades mecánicas de un concreto reforzado con fibras de PET* [Tesis de pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

38. Flores Medina, D. (2013). *Diseño, fabricación, caracterización y aplicaciones constructivas de hormigones de consistencia seca con adiciones de materiales de procedencia orgánica e inorgánica de neumáticos fuera de uso (NFUs)* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.

39. Silva Herrera, R., & Ochoa González, G. H. (2019). Integración de PET reciclado a flexión en un elemento constructivo de concreto. Vivienda Y Comunidades Sustentables, (6), 99–117. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i6.106

40. Cano Barrita, P. F. de J., Vásquez López, M. B., León Martínez, F. M. ., & Reyes Hidalgo, M. . (2023). Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción. *Ciencia Nicolaita*, (87). https://doi.org/10.35830/cn.vi87.664

41. Ojeda, Juan Pablo, Mercante, Irma Teresa, & Fajardo, Nicolás Horacio. (2020). DISEÑO Y ENSAYO DE FIBRAS PLÁSTICAS RECICLADAS PARA REFUERZO DE MORTERO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *36*(1), 55-62. Epub 22 de diciembre de 2020.https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.53423

42. Gaggino, Rosana; Elementos constructivos con PET reciclado; Universidad Central de Venezuela. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción; Tecnología y Construcción; 19; 2; 12-2003; 51-64

43. Millones Mamani, B. A. (2002). Gestión ambiental de desperdicios de neumáticos generados por el parque automotor de la ciudad de Lima [Informe de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Universidad Nacional de Ingeniería.

44. Pinto Ranilla, P. C., & Cuba Delgado, P. H. (2019). Estudio de las propiedades térmicas y acústicas en ladrillos con plásticos PET, Lima 2019 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional https://hdl.handle.net/20.500.12692/45777

DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA DETECCIÓN EN TIEMPO REAL DE MALEZA EN CULTIVOS DE LA REGIÓN

José Roberto Martínez Martínez[1], Dalyndha Aztatzi-Pluma[1], Jesús Norberto Guerrero Tavares[2], Jesús Ignacio Castro Salazar[3] y Coraquetzali Magdaleno López[4]

[1] Tecnológico Nacional de México/ ITS de Abasolo, Coordinación de Ingeniería Mecatrónica,
[2]Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato, Coordinación de Ingeniería Mecatrónica,
[3]Tecnológico Nacional de México/ ITS de Abasolo, Coordinación de Ingeniería Ambiental,
[4]Tecnológico Nacional de México/ ITS de Abasolo, Coordinación de Ingeniería en Energías Renovables.
dalyndha.ap@abasolo.tecnm.mx

RESUMEN

El uso excesivo de agroquímicos en la agricultura ha sido un problema que impacta el medio ambiente, la salud y la economía de los productores. En la gran mayoría de los cultivos agrícolas, el control de maleza suele realizarse de manera uniforme, aplicando herbicidas sin distinguir las zonas que realmente lo necesitan. Esto no solo incrementaba los costos, sino que también afectaba la calidad del suelo. Por lo que, durante mucho tiempo se ha buscado desarrollar diversas estrategias para realizar de forma más eficiente y efectiva los procesos de contención de la maleza en los cultivos, y hoy en día existen dispositivos automatizados para agregar los herbicidas en donde se localiza la maleza. Sin embargo, estos dispositivos suelen ser de difícil acceso para la mayoría de los agricultores, principalmente debido a su alto costo. Por lo que se continúa buscando soluciones tecnológicas innovadoras que permitan optimizar la gestión de los cultivos y mejorar su rendimiento a menores costos. Uno de los enfoques más prometedores es la integración de tecnologías avanzadas, basados en la inteligencia artificial (IA) la cual permite el monitoreo y análisis de datos para determinar el estado de los cultivos. Las redes neuronales forman parte de la IA y son capaces de procesar grandes volúmenes de datos y aprender patrones complejos a través del entrenamiento. El entrenamiento de los modelos desarrollado con redes neuronales permite la identificación de maleza en cultivos agrícolas. Sin embargo, para que estas tecnologías sean efectivas, es prioridad que los agricultores cuenten con dispositivos accesibles y fáciles de usar para que conlleve un fácil monitoreo y detección en tiempo real. En este proyecto se desarrolló un dispositivo portátil para el reconocimiento de maleza en tiempo real en cultivos de maíz. Para realizar la detección se empleó un modelo de redes neuronales convolucionales del tipo VGG19 y MobileNetV2, el cual fue entrenado y validado con 2,000 imágenes para cada una de las etapas; posteriormente se probó el modelo con 1,000 imágenes. El entrenamiento consistió en detectar los principales tipos de maleza que afectan al maíz en su etapa de crecimiento. El modelo presento una exactitud de entre 98.5% a 99.5% para las etapas de entrenamiento, validación y prueba. Posteriormente se implementó el modelo en una Raspberry Pi 4 modelo B de 8GB de RAM, junto con un módulo de cámara, lo que permitió su uso en entornos agrícolas. En este dispositivo se montó una interfaz gráfica para que el usuario lo emplee de forma más sencilla. La exactitud del modelo implementado en el dispositivo en tiempo real es de aproximadamente 90%; es decir su exactitud en tiempo real disminuyó, sin embargo, aun los resultados son alentadores, sobre todo considerando los costos del dispositivo.

INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) ha transformado diversos sectores, ya que su capacidad para procesar grandes cantidades de datos como son identificar patrones complejos, reconocer y rastrear objetos y personas en imágenes y/o videos en tiempo real ha abierto un gran campo de aplicación. En el ámbito de la agricultura, su implementación permite optimizar el monitoreo de los cultivos, como en la detección de plagas, enfermedades y el control de maleza en diferentes tipos de cultivos, esto ayuda a incrementar la productividad y costos al agricultor [1]. Sin embargo, hoy en día su aplicación en tiempo real tiene ciertas limitaciones.

Unos de los enfoques más prometedores de la IA aplicado en la agricultura es el uso de redes neuronales convolucionales (CNN), esta una técnica de clasificación de imágenes para realizar un aprendizaje profundo especializada o aplicada para le resolución de problemas que se tiene en la agricultura. Las CNNs han demostrado una alta precisión en problemas de detección y/o clasificación, en gran medida, esto es posible ya que existen modelos pre-entrenados para clasificación como son: VGG16 / VGG19 , ResNet , MobileNetV2, entre otros, mientras que para detección son: YOLO (You Only Look One), SSD (Single Shot MultiBox Detector) y Faster R-CNN, algunas de las aplicaciones se centra en elementos visuales como son detección de enfermedades, plagas y en la detección de maleza [2].

En las regiones agrícolas como el Bajío, el uso excesivo de agroquímicos representa un problema crítico. Estudios recientes indican que Guanajuato concentra altos niveles de producción agrícola intensiva, apoyada en fertilizantes químicos, lo cual ha derivado en problemas ambientales, como son degradación del suelo, contaminación del agua y resistencia de cierta maleza como es Leotochoa virgata al glifosato [3].

En respuesta a estos desafíos, este proyecto presenta un dispositivo para la detección de malezas en tiempo real en cultivos de maíz, utilizando una Raspberry Pi 4 Modelo B , con un acelerador Coral de Google TPU y dos modelos de red neuronal convolucional tipo VGG19 y MobileNetV2,entrenado con 2000 imágenes para cada etapa de entrenamiento y validación, el sistema fue integrado en una interfaz gráfica de manera local y subida a un servidor web para que sea ejecutada por cualquier persona y desde cual punto.

TEORÍA

La IA es el campo científico de la informática que se centra en la creación de programas y mecanismos que pueden mostrar comportamientos considerados inteligentes [4]. Gracias al desarrollo tecnológico, la IA es capaz de analizar datos en grades cantidades de datos, identificar patrones y tendencias y por lo tanto en formular predicciones de forma automática con rapidez y precisión. El desarrollo de la IA no pretende reemplazar en su totalidad la inteligencia humana ni la toma de decisiones, el objetivo esta centrado y con un solo objetivo de resolver problemas de distintos ámbitos en áreas de la salud, industria, finanzas, educación, seguridad y la agricultura, sino en apoyar en problemas específicos como son en la detección de plagas, enfermedades y malezas en una edad temprana en los cultivos.

Una de las ramas de la IA que mayor relevancia ha tomado son las redes neuronales artificiales donde su concepto se basa en modelos matemáticos o computacionales compuestos por un gran número de elementos simples (neuronas artificiales) interconectados, que procesan la información de manera similar a como lo hacen las neuronas biológicas del ser humano [5]. Dentro de las redes neuronales artificiales, las redes neuronales convolucionales profundas han mostrado resultados éxitos en problemas de clasificación.

Redes neuronales convolucionales profundas

Las CNNs son un tipo de redes neuronales efectivas que ayudan a las tareas de la visión artificial, como la clasificación, detección y segmentación de imágenes, estas consisten en modelos de aprendizaje automático diseñados para procesar datos estructurados en forma de matrices, especialmente imágenes. Su arquitectura está compuesta por múltiples capas de neuronas artificiales interconectadas, las cuales son capas convolucionales (para extraer características), capas de pooling (para reducir dimensionalidad) y capas totalmente conectadas (para realizar la clasificación).

El proceso de aprendizaje de las redes neuronales convolucionales profundas se basa en detectar patrones jerárquicos; es decir, las primeras capas identifican bordes y colores, mientras que las capas profundas combinan estas características para reconocer objetos peculiares en escenarios complejos.

Existen varios tipos de redes neuronales convolucionales profundas, cada una con arquitecturas peculiares y características específicas de acuerdo con su aplicación en el ámbito de la visión artificial y procesamiento de imágenes. A continuación, se mencionan algunas redes neuronales entrenadas que han sido empleadas con otros datos y se ha observado que arrojan mejores exactitudes que otros modelos:

-LeNet-5: Fue una de las primeras CNN exitosas, desarrolladas por Yann LeCun para el reconocimiento de dígitos escritos a mano.

-ResNet (Residual Networks): Introduce bloques residuales que permiten entrenar redes muy profundas (mas de 100 capas) sin perder información es ampliamente utilizada y citada por su capacidad de evita el problema del gradiente.

-Inception (GooLeNet): Utiliza módulos de inception que permiten analizar la imagen en diferentes escalas simultáneamente, tiene una arquitectura eficiente para extraer características complejas.
-MobileNet: Utilizada para ser eficiente en recursos computacionales, ideal para aplicarse en dispositivos móviles con bajo recursos.

-DenseNet: Utilizada para ser eficiente con un bajo número de parámetros en el área de clasificación y segmentación de imágenes lo que permite crear redes mas compactas y eficientes.

-VGGNet(VGG16/VGG19): Su estructura es uniforme y tiene una eficacia en la extracción de características jerárquicas ya que utiliza filtros pequeños de 3x3.

Dentro de la VGGNet, existen dos modelos el VGG16 y VGG19, donde el número se refiere al número de capas con pesos sinápticos que tiene cada red. En la **Figura** se muestra la arquitectura del VGG19 donde fue propuesta en 2014 por Simonyan y Zisserman de la Universidad de Oxford donde el modelo tiene 19 capas entrenables 16 capas convolucionales y 3 capas densas completamente conectadas, esta red utiliza filtros pequeños de tamaños 3x3 en todas las capas, lo cual la VGG19 tiene alrededor de 138 millones de parámetros, lo cual implican una gran capacidad para aprender representaciones complejas, pero también tiene un alto costo computacional. Dentro del modelo VGG19 ha sido utilizada en clasificación de imágenes, incluyendo tareas tan simples como en la clasificación de objetos y animales como, por ejemplo: teclado , mouse , ropa , perros y gatos , y hasta tareas complejas como en la clasificación de detección de cáncer cervical o de mama [6].

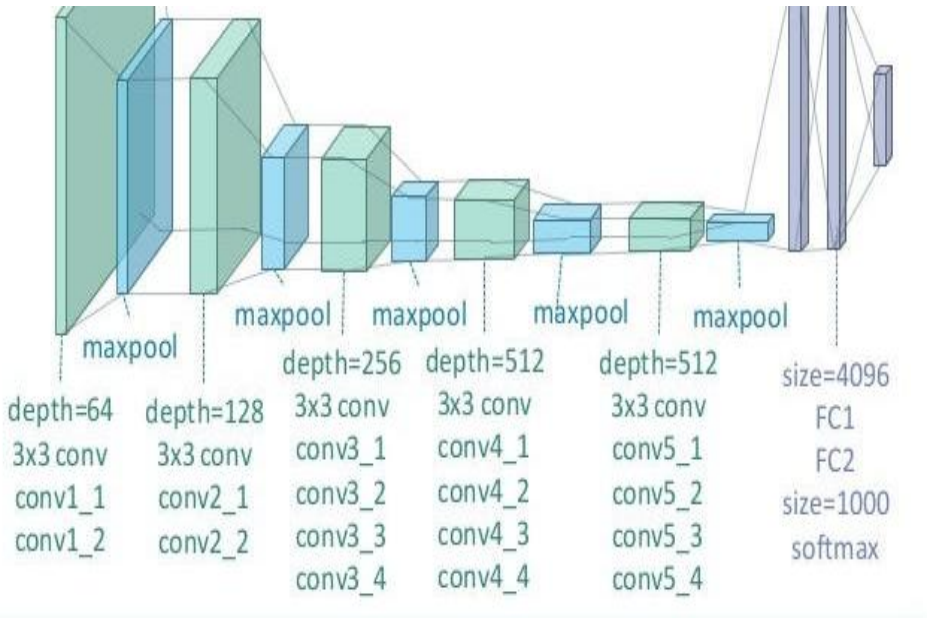


Figura 1 Descripción gráfica de la arquitectura de la red neuronal convolucional profunda del modelo VGG19 [7].

Para el modelo MobinetV2 es un modelo de red neuronal convolucional profunda creada por Mark Sandeler, Andrew Howard, Menglong Zhu y Andrey Zhmoginov en Google Research, diseñada para ser eficiente en dispositivos con recursos limitados, como móviles y equipos de bajos recursos computacionales. En la figura 2 se muestra su arquitectura donde se basa en bloques invertidos residuales esto con el objetivo de reducir la dimensionalidad, mejorando la eficiencia y la capacidad en la hora del entrenamiento, también tiene capas convolucionales separables donde aplica un filtro por canal de 1x1 que combina los canales esto reduce de gran medida el número de parámetros y cálculos. Dentro de sus parámetros tiene 3.4 millones de parámetros con α donde se incluye el multiplicador de ancho α, que ajusta la cantidad de filtros para balancear eficiencia y rendimiento, y la resolución de entrada, que también puede modificarse para optimizar la velocidad [8].

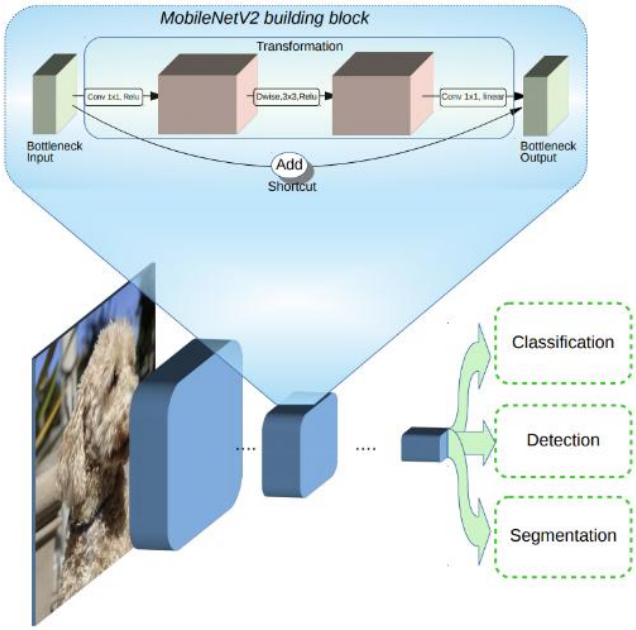


Figura 2. Arquitectura de la red neuronal convolucional profunda del modelo MobinetV2 [8].

El uso de las CNN para problemas de detección, clasificación y segmentación ha tenido un gran avance tecnológico por su amplia variedad de aplicación en distintas áreas, el lenguaje de programación para entrenar los modelos VGG19 y MobinetV2 fue Python, siendo un lenguaje con muchas aplicaciones, pero especialmente para usarlo en aprendizaje profundo ya que es un lenguaje de programación de código abierto y amigable. Para el estudio de CNNs en Python las librerías más relevantes son las siguientes:

-TensorFlow: Proporciona las herramientas necesarias para construir, entrenar e inferir redes neuronales
-Keras: Es una librería de alto nivel que simplifica la creación y configuración del modelo de red neuronal.
-Matplotlib: Permite la visualización grafica de los resultados, como curvas de perdida, precisión o las predicciones del modelo.
-Numpy: Facilita la manipulación de matrices y operaciones matemáticas avanzadas, esenciales para el procesamiento de datos.
Para el desarrollo de la interfaz grafica (GUI) basado en la implementación en los modelos de redes neuronales convolucionales profundas se emplearon los siguientes programas:
-JavaScrip: Es un lenguaje de programación ligero, interpretado y con compilación justo-a-tiempo (JIT) , es multiplataforma permite la ejecución de modelos de redes neuronales en tiempo real, también se usa en el frontend(navegador) como el backend(servidores) y es compatible con muchos frameworks.
-CSS(Cascading Style Sheets): Es una librería que describe la presentación visual de documentos HTML y XML , permite controlar colores, fuentes, márgenes, alineación, tamaños y otros aspectos.
-Bootstrap: Es un framework frontend popular que facilita el desarrollo rápido de sitios web modernos, combina HTML,CSS y JavaScrip para ofrecer componentes predefinidos para interfaces atractivas.

PARTE EXPERIMENTAL

En este estudio, se presenta la solución del problema planteado y una metodología integral para el reconocimiento y la detección de malezas en cultivos de maíz usando modelo de redes neuronales entrenables CNN del cual se uso su arquitectura VGG19 y MobinetV2 para obtener modelos entrenados y así poderlos ejecutar en una interfaz gráfica de usuario accesible. La interfaz gráfica (GUI) se implementó en un sitio web para que cualquier usuario tenga la facilidad de usar los modelos entrenados para la detección de malezas en cultivos de maíz. Además, los modelos se implementaron en el microcontrolador Raspberry Pi 4 para su ejecución de forma local, de tal manera que se desarrolló un dispositivo portátil para la detección de malezas en cultivos de maíz en la región.

En la **Figura** 3 se muestra el diagrama de flujo de la metodología implementada para el desarrollo de este proyecto. La arquitectura que se usó para la solución del problema con las arquitecturas usadas de los modelos del VGG19 y MobinetV2.

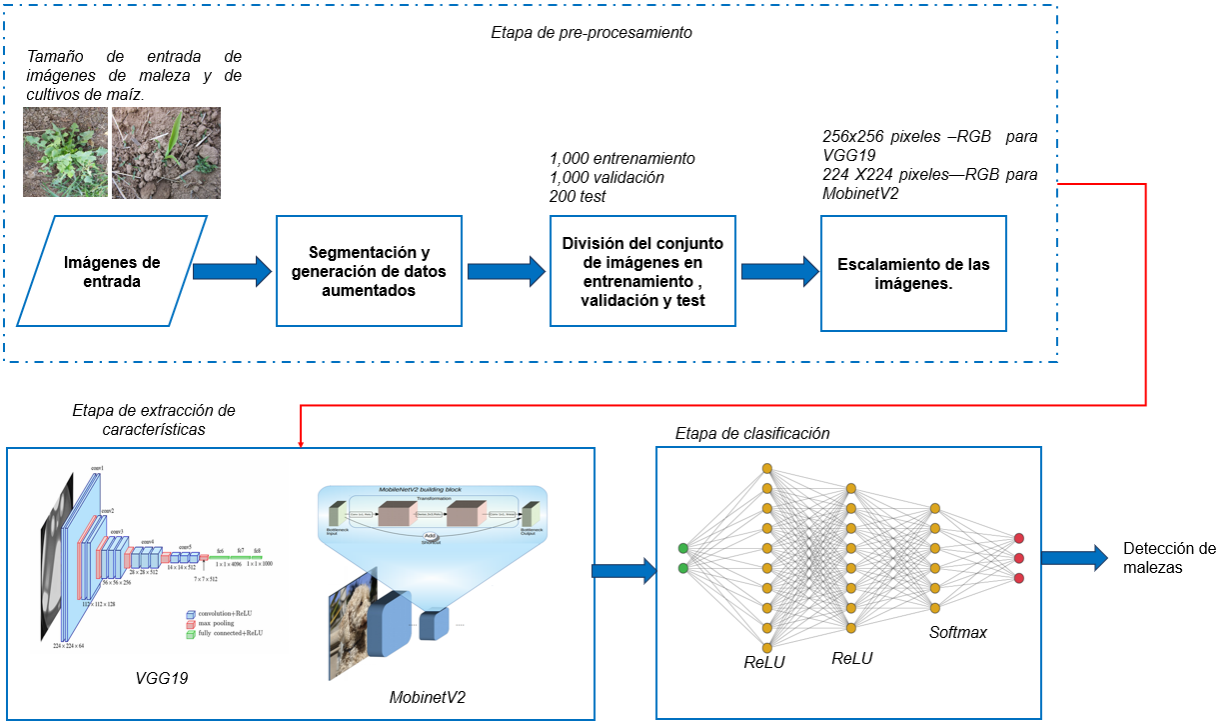


Figura 3. Arquitectura propuesta para el entrenamiento del modelo VGG19 y MobinetV2.

En la **Figura**4 se muestra el flujo del proceso de entrenamiento de los modelos VGG19 y MobileNetV2, los cuales fueron personalizados para la detección de maleza. El proceso inicia con imágenes de entrada que atraviesan varias capas convolucionales, donde se aplican filtros (kernels) que detectan bordes, texturas y otras características relevantes. Posteriormente, se emplean capas de maxpooling que reducen la dimensionalidad de las características, conservando la información más significativa. Estas características pasan por una capa densa con activación ReLU , personalizada por aproximadamente 256 neuronas, que permite al modelo aprender combinaciones no lineales de las características extraídas, diferenciando entre diversos tipos de maleza y cultivos de maíz. Para prevenir el sobreajuste, se aplica un Dropout del 30%, desactivando aleatoriamente una proporción de neuronas durante el entrenamiento.A continuación, se añade otra capa densa con 120 neuronas con la función de activación ReLU, lo cual permite refinar aún más las representaciones internas del modelo, mejorando su capacidad de clasificación. Finalmente, se incorpora una capa de salida con activación Softmax, configurada para dos clases: maleza y maíz. Esta función convierte las salidas del modelo en probabilidades, facilitando la interpretación de la predicción. La salida generada se compara con la etiqueta real para calcular el error. Este error se retro-propaga a través de toda la red neuronal, ajustando los pesos sinápticos y filtros durante cada iteración del entrenamiento. Este proceso permite mejorar progresivamente el rendimiento de los modelos VGG19 y MobileNetV2.

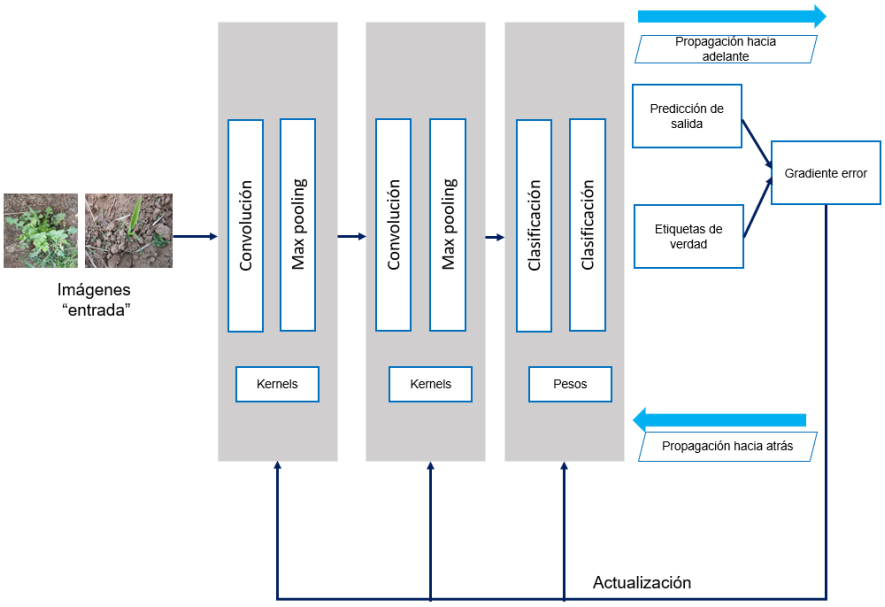


Figura 4. Flujo de entrenamiento de modelos CNN personalizados para la detección de maleza.

Una vez obteniendo los modelos ya entrenados y validados, se genera el entorno en donde se desarrolla la interfaz de programación para el despliegue del backend y, en consecuencia, a la preparación del entorno de desarrollo del frontend. Una vez iniciado el trabajo con el frontend, fue necesario codificar su funcionalidad, definir su estructura, establecer su ubicación dentro del proyecto y someterlo a diversas pruebas para garantizar su correcto funcionamiento. Posteriormente, se desarrolló la interfaz de usuario tanto de forma local para su ejecución en la Raspberry Pi 4, como en el frontend de la página web, con el objetivo de facilitar la utilización del modelo de detección de malezas en cultivos de maíz. Por último, se realza el lanzamiento de la interfaz de usuario implementada de manera local y de forma remota en el navegador para la prueba de detección de malezas en cultivos de maíz en tiempo real. Como parte fundamental de la ejecución de los modelos fue necesario convertir los modelos obtenidos en el entrenamiento a formato Tensorflowjs que es un punto clave para la ejecución de modelos en interfaces graficas en desarrollo web (html) para la ejecución de cualquier dispositivo y para la ejecución de forma local se realizó un pequeño script en Python para la ejecución de forma local, por lo tanto para el cambio de los modelos VGG19 a MobinetV2 o viceversa fueron los formatos .bin y .json lo que permitieron realizar el cambio de los modelos ya entrenado, ya que solo se mandaron llamar a la interfaz gráfica dentro del script donde se desarrolló la interfaz gráfica.

RESULTADOS

Se entrenaron los modelos con un total de 2,000 imágenes, cada una con sus respectivas etiquetas correspondientes a malezas y cultivos de maíz. Además, se implementó una etapa de validación para evaluar el rendimiento del modelo. Se muestra en la **Tabla** 1 los tipos de malezas recolectados en los cultivos de maíz en la región de Abasolo, Gto., con las cuales se entrenaron los dos modelos.

Tabla 1. Tipos de malezas recolectadas y más recurrentes en los cultivos de maíz de la región de Abasolo, Gto.

Amaranthus Viridis
Ambrosia tomentosa
Sonchus oleraceus
Chenopodium
Phyllanthus urinaria
Parthenium hysterophorus
Argemone mexicana

Se puede ver en la **Figura**5 una muestra representativa de una maleza y de un cultivo de maíz proveniente del banco de datos para el entrenamiento de los modelos.



Figura 5. Imágenes de la base da datos del cultivo de maíz a edad temprana y de un tipo de maleza (Argemone mexicana).

Una vez entrenados los modelos, se realizó una prueba utilizando aproximadamente el 10% de imágenes distintas, capturadas bajo diversas condiciones y que no habían sido vistas, ni utilizadas previamente por los modelos para realizar pruebas y determinar la exactitud de los modelos en estas condiciones. En la **Figura**6 se muestra un ejemplo gráfico de los resultados obtenidos en la etapa de prueba, utilizando diferentes tipos de malezas presentes en cultivos de maíz en la región de Abasolo, Guanajuato. En esta Figura se puede observar que la exactitud varía entre el 88.2% y el 100% para los dos modelos entrenados.

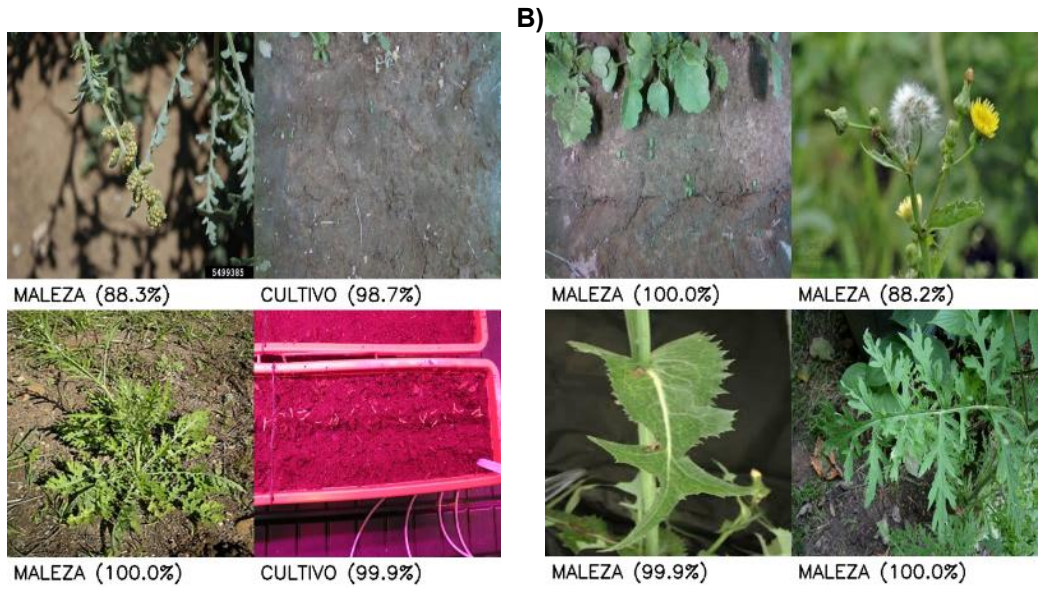


Figura 6. Resultado de la prueba utilizando los dos modelos A) VGG19 y B) MobinetV2.

En la **Figura** 7 se muestran gráficos de pérdida y precisión (exactitud) de la red neuronal empleando el modelo VGG19 en la etapa de entrenamiento y validación, donde se consideraron 50 épocas; se puede observar que el modelo alcanza una precisión de aproximadamente el 98%, con una pérdida cercana a 0.050. Para el modelo MobinetV2 se muestra en la Figura las gráficas de precisión y perdida del modelo, para este modelo se entrenó durante 30 épocas, obteniendo una precisión del 99% y una pérdida de aproximadamente 0.010. Es decir, el modelo MobinetV2 mostró un ligero incremento en los parámetros de evaluación; sin embargo, se requirieron menos épocas para su entrenamiento, lo que podría indicar que es una mejor opción este modelo.

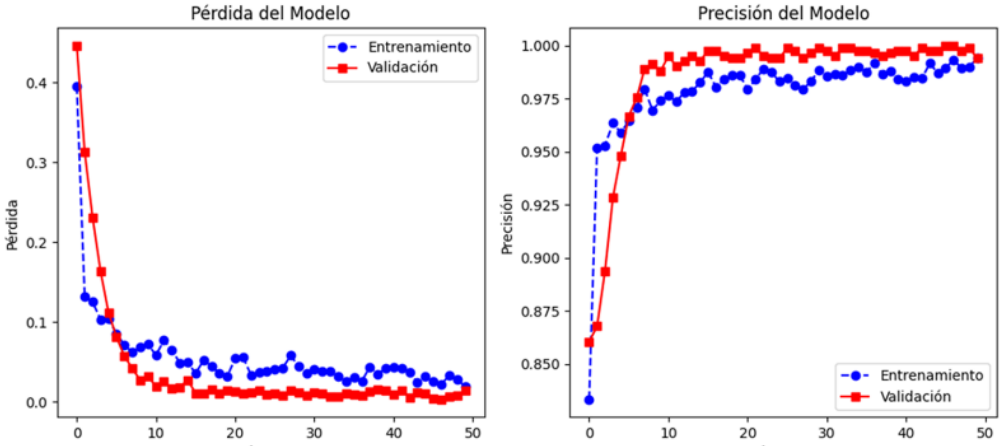


Figura 7. Gráficos de la pérdida y precisión del modelo con la arquitectura de VGG19 en las etapas de entrenamiento y validación, considerando 50 épocas.

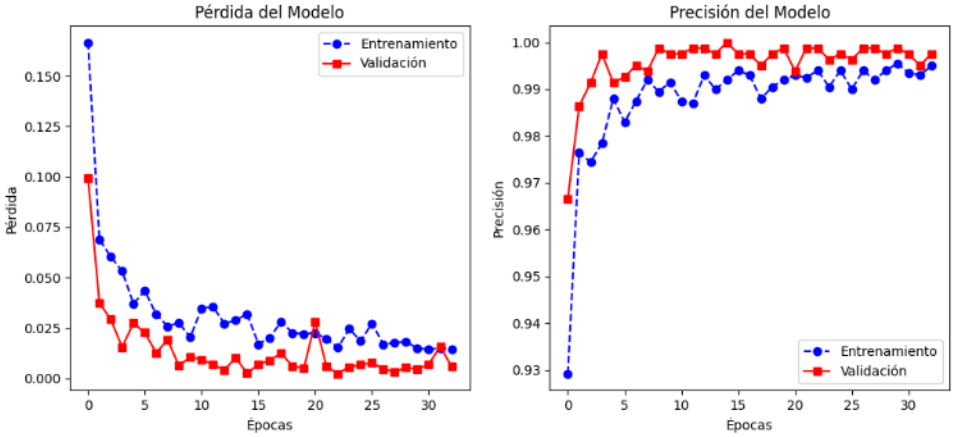


Figura 8. Gráficos de la pérdida y precisión del modelo con la arquitectura de MobinetV2 en las etapas de entrenamiento y validación, considerando 30 épocas.

Finalmente, la implementación de los modelos en la interfaz gráfica desarrollada en una página de internet para dominio pública permite realizar en tiempo real con un celular. Cabe mencionar que montaron los dos modelos en la página con el fin de seguir evaluando la eficiencia de cada uno de los modelos. En la Figura se muestra una captura de la ejecución de los dos modelos, en el inciso A) el modelo VGG19 y el inciso B) el modelo MobinetV2. El uso de ambos modelos ha sido funcional y con aproximadamente un 90% de exactitud en tiempo real, sin embargo, es importante mencionar que aún se está analizado y determinando el rendimiento computacional para ver cual modelo es más viable a fin de ejecutarlo de forma sencilla y con bajo costo computacional. Por ello, se continúan

realizando pruebas en campo bajo diferentes condiciones en cultivos de maíz con sus malezas en la región de Abasolo, Gto.

A) **B)**

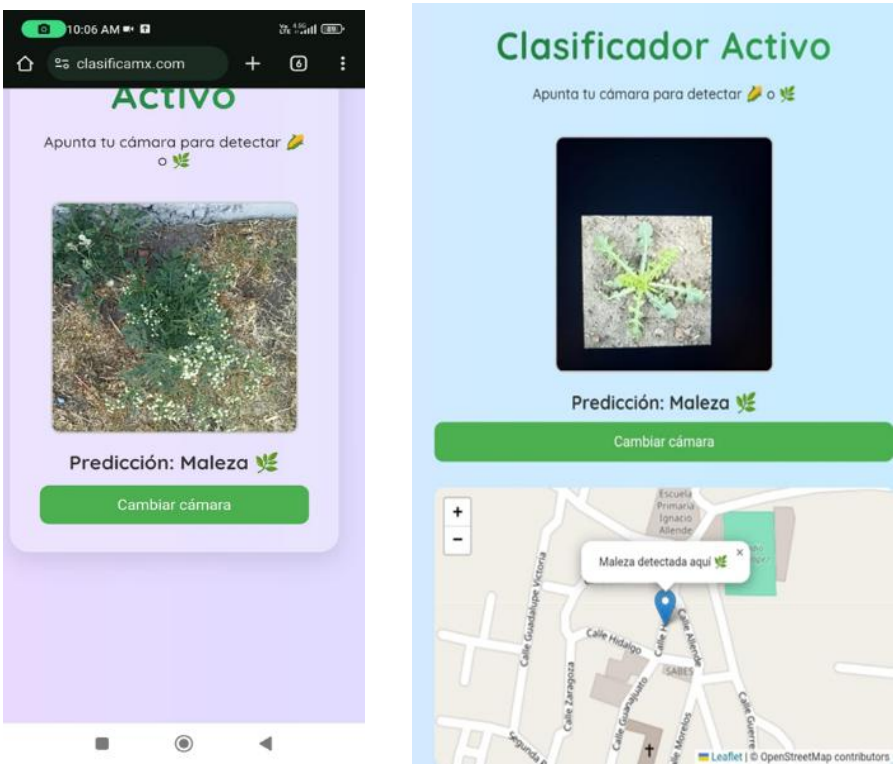


Figura 9 Capturas de la interfaz de programación donde se implemento los dos modelos entrenados.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una GUI local y en línea para un dispositivo portátil, integrando modelos entrenados para reconocer malezas en cultivos de maíz en Abasolo, Guanajuato. De los modelos entrenados se logró analizar su utilidad ya que los modelo tiene diferentes arquitecturas en términos computacionales uno requiero menos entrenamiento que el otro esto es útil para términos de recursos computacionales del cual se lograron una exactitud del 99% y un error aproximado de 0.010 tanto en entrenamiento como en validación, manteniendo un alto rendimiento en pruebas en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Kamilaris y F. X. Prenafeta-Boldú, «Deep learning in agriculture,» *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 147, pp. 70-90, 2018.
2. K. P. Ferentinos, «Deep learning models for plant disease detection and diagnosis,» *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 145, pp. 311-318, 2018.
3. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), «Informe sobre el uso de glifosato en México y su impacto ambiental,» Gobierno de Mexico, Ciudad de Mexico, 2018.
4. J. Morales Ascencio, «Una mirada a la inteligencia artificial,» *Revista de Tecnología Informática,* vol. 3, nº 2, pp. 45-52, 2019.

5. J. Pérez, J. López y M. Sánchez, «Redes neuronales artificiales: fundamentos y aplicaciones,» *Revista de Ingeniería Informática,* vol. 8, nº 2, pp. 23-34, 2022.
6. M. A. Bravo Ortiz, H. B. Arteaga Arteaga, R. Tabares Soto, J. I. Padilla Buriticá y S. Orozco Arias, «Clasificación de cáncer cervical usando redes neuronales convolucionales, transferencia de aprendizaje y aumento de datos,» *Revista EIA,* vol. 18, nº 35, pp. 1-12, 2021.
7. «ICHI.PRO,» 10 Noviembre 2019. [En línea]. Available: https://ichi.pro/es/arte-con-ia-transferencia-de-estilo-neuronal-109749021858154. [Último acceso: 27 Mayo 2025].
8. M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov y L.-C. Chen, «MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks,» 10 Abril 2015. [En línea]. Available: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/papers/Sandler_MobileNetV2_Inverted_Residuals_CVPR_2018_paper.pdf. [Último acceso: 28 Mayo 2025].

DESARROLLO DE UN ELECTRODO MULTIELEMENTO PARA LA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA NO INVASIVA DE LA CÓRNEA HUMANA

Víctor Manuel Carpio Verdín, Natiely Hernández Sebastián, Bernardino Barrientos García, Carlos Ismael Mares Castro, y Erik Rene Bojorges Valdez

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
victorcv@cio.mx

RESUMEN

Las enfermedades degenerativas de la retina (EDRs) conforman un grupo de trastornos heterogéneos caracterizados por la pérdida progresiva de la visión debido a la degeneración de las células retinianas. Las EDRs de mayor prevalencia incluyen: la degeneración macular relacionada con la edad (DMRE), la retinopatía diabética (RD) y la retinosis pigmentosa (RP); afectando a más de 300 millones de personas a nivel mundial. Hoy en día, no existe cura para estas enfermedades, los tratamientos actuales basados en suplementos nutricionales o inyecciones intravítreas anti-factor de crecimiento endotelial vascular (anti-VEGF) están enfocados en aliviar los síntomas o ralentizar su progresión. Esta limitante, ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias enfocadas en proteger, restaurar y reemplazar las células de la retina, incluyendo: terapia genética, prótesis de retina y estimulación eléctrica (EE). Entre estas, la EE transcorneal (EET) ha mostrado un gran potencial para preservar y mejorar la función visual en pacientes con EDRs. Este método mínimamente invasivo consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad a la superficie de la córnea para activa la retina y las estructuras posteriores del ojo, y de esta manera ejerce efectos terapéuticos en los pacientes.

Actualmente, la terapia de EET se aplica utilizando un electrodo monoelemento, generalmente un electrodo Dawson, Trick y Litzkow (DTL) o ERG-JET. Estos electrodos de superficie metálica continua limitan la resolución espacial, por lo cual, la EE selectiva y variable están limitadas. Bajo esta premisa, en este trabajo presentamos el desarrollo de un prototipo de electrodo multielemento, que, a diferencia de los electrodos convencionales, permite aplicar EE selectiva y focalizada. El diseño propuesto consiste de 18 microelectrodos independientes y dos electrodos de referencia, distribuidos en la región central y paracentral de la córnea. El proceso de fabricación se basa en la tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS) y electrónica flexible, y utiliza solo tres materiales: aluminio (Al), poliimida (PI) y titanio (Ti), lo que nos permite obtener un proceso de fabricación simplificado, ergonómico y reproducible. El prototipo fabricado se validó en laboratorio mediante pruebas eléctricas, electroquímicas y térmicas, mostrando una conductividad eléctrica relativamente alta, una impedancia promedio de 791 kΩ a 1.75 MΩ en el rango de frecuencia clínicamente relevante (11 Hz a 30 Hz) y un incremento de temperatura mínimo. Además, se demostró la biocompatibilidad del prototipo de electrodo mediante pruebas in-vivo. El prototipo de electrodo resultante es robusto, mecánicamente flexible y biocompatible, con un alto potencial para su uso en la EE selectiva de la córnea.

INTRODUCCIÓN

La EET es tratamiento terapéutico no farmacologico en el que se aplica una corriente eléctrica de baja intensidad (10 mA – 30 mA) sobre la superficie de la córnea para activar y regenerar la retina y las estructuras posteriores del ojo, y de esta manera mejorar la percepción visual en pacientes con enfermedades degenerativas de la retina, tales como: la degeneración macular relacionada con la edad (DMRE), la retinitis pigmentosa (RP) y la retinopatía diabética (RD) [1-2].

Diversos estudios han demostrado que la EET protege las celulas ganglionares de la retina (CGR) y los fotorreceptores, previniendo los procesos degenerativos. Aunque el mecanismo exacto sigue sin estar claro, se cree que la EET regula positivamente ciertos factores bioactivos, como el factor de

crecimiento similar a la insulina 1 (IGF-1), el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) y el factor neurotrófico ciliar (CNTF) [3-9].

Actualmente, el sistema OkuStim® es la única alternativa comercialmente disponible para realizar EET [1, 10]. Este sistema está diseñado específicamente para el tratamiento de la RP y utiliza un electrodo DTL para aplicar la señal eléctrica sobre la superficie de la córnea. Estudios recientes han demostrado que el uso del sistema OkuStim® es beneficioso para el tratamiento de la RP [10]. Sin embargo, el al tratarse de un electrodo monoelemento, la resolución espacial y la EE selectiva estan limitadas, lo cual puede ser útil, por ejemplo, para tratar la pérdida de visión central, periférica o total [11-13].

En este trabajo presentamos el diseño, fabricación y caracterización de un nuevo prototipo de electrodo para aplicar EE selectiva y variable sobre la superficie de la córnea. El electrodo propuesto se fabricó combinando la tecnología de micromaquinado de superficie y electrónica flexible, y fue caracterizado para evaluar su comportamiento eléctrico, electroquimico y térmico. Además, su biocompatibilidad se evaluo mediante pruebas in-vivo y espectroscopía FTIR.

METODOLOGÍA

Diseño

La Figura 1, muestra el diseño del arreglo de microelectrodos propuesto, realizado en el software Tanner L-Edit. Este diseño contempla dos niveles de mascarillas y está compuesto por 18 microelectrodos independientes, dos electrodos de referencia, 20 líneas conductoras y 20 contactos eléctricos (pads). Cada microelectrodo tiene un tamaño de 250 µm × 250 µm, y se encuentran distribuidos en las regiones central y paracentral de la córnea. Los electrodos de referencia fueron diseñados con una longitud de arco de 5.5 mm y un ancho de 170 µm, mientras que los pads se diseñaron conforme al conector Molex modelo 5051102091. La longitud total del electrodo es de 40 mm y el diámetro de la parte superior (pétalos) es de 12 mm, correspondiente al diámetro promedio de una lente de contacto corneal.

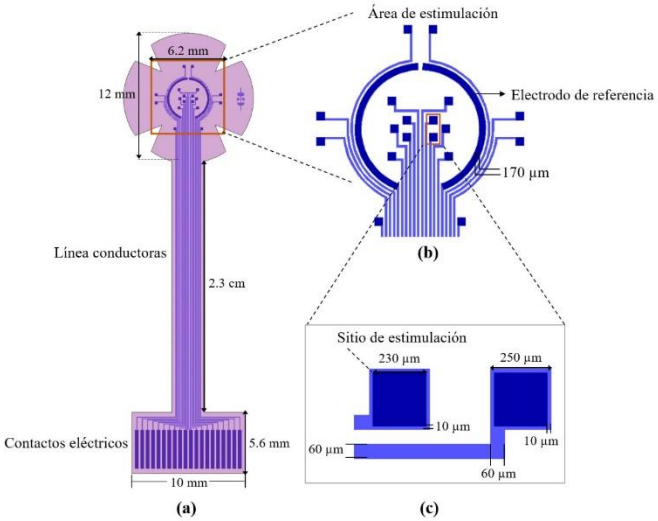


Figura 1. (a) Layout del arreglo de microelectrodos, y (b, c) parámetros de diseño.

Los microelectrodos y los pads están conectados eléctricamente mediante lineas conductoras. Estas líneas metálicas tienen aproximadamente 31 mm de largo y 60 µm de ancho. La forma del dispositivo y las vías de contacto están definidas por el segundo nivel de la máscara (patron rosa, ver Figura 1a). La estructura en forma de petalos en el área de estimulación se diseño para facilitar su acoplamiento a una lente de contacto.

Simulación

La temperatura que alcanzan las estructuras metálicas de los microelectrodos durante su operación es un parámetro crítico, ya que el tejido corneal puede sufrir daños a partir de los 45 °C. El aumento de temperatura en los microelectrodos se debe al paso de corriente durante su funcionamiento, por lo que, previo a la fabricación del diseño propuesto, se llevó a cabo un análisis térmico mediante simulaciones en el software COMSOL Multiphysics.

El proceso de simulación se realiza construyendo el modelo pad-microelectrodo utilizando las dimensiones y materiales considerados en el diseño. Una vez definido el modelo, se generó una malla y se realizaron simulaciones para evaluar la distribución de corriente y el incremento de temperatura en la estructura. El análisis se llevó a cabo aplicando un barrido de voltaje de 1 V a 10 V, y considerando una temperatura ambiente inicial de 293 K (19.85 °C) en ausencia de voltaje. La Figura 2, muestra el modelo tridimensional de la estructura pad–microelectrodo implementado en COMSOL Multiphysics.

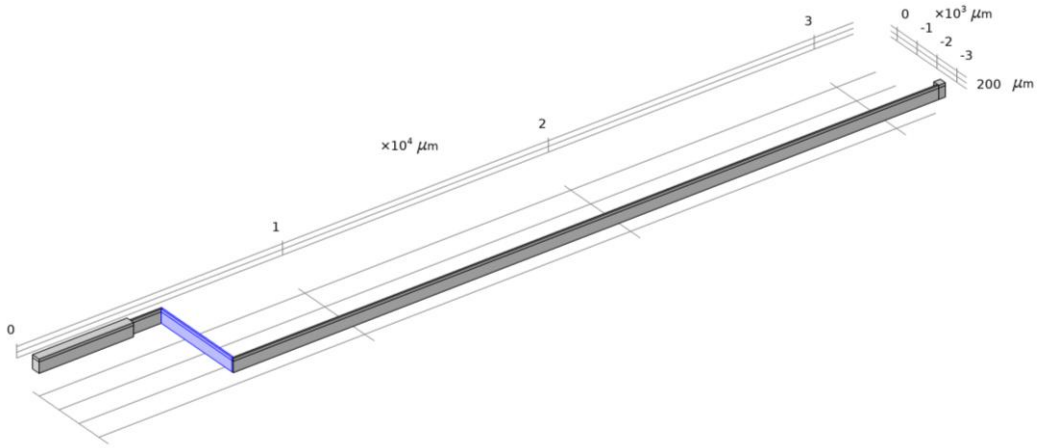


Figura 2. Modelo del pad-microelectrodo definido en Comsol Multiphysics.

Proceso de fabricación

La Figura 3 muestra el diagrama de los principales pasos del proceso de fabricación del electrodo propuesto. Como se observa, el proceso inicia con la limpieza química general de las obleas de silicio. Posteriormente, se depositan tres películas consecutivas de poliimida (PI) por la técnica de spin coating como material de substrato flexible. La primera película es de PI-2610 y se utiliza para mejorar la adherencia del substrato flexible con el soporte mecánico (oblea de silicio), mientras que las dos películas subsecuentes son de PI-2611 y se utilizan para formar un substrato de aproximadamente 20 μm de espesor. Entre cada depósito se realiza un pre-curado térmico a 90°C y 150°C, y curado térmico final a 350°C por dos horas. A continuación, la superficie del substrato de PI se trata con plasma de O_2 en el sistema RIE para incrementar su rugosidad.

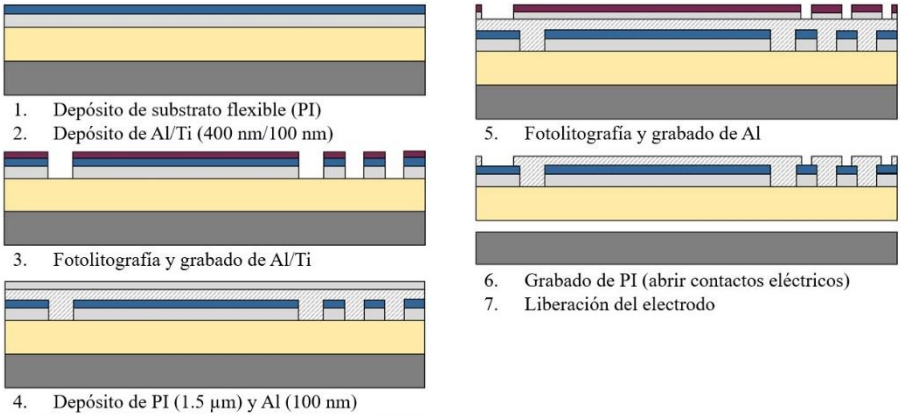


Figura 3. Diagrama esquemático del proceso de fabricación del electrodo propuesto.

Después del tratamiento con plasma se deposita una bicapa metálica de Al/Ti de 150 nm y 50 nm de espesor, respectivamente por pulverización catódica. Enseguida se realiza un proceso de fotolitografía estándar con fotorresina positiva para definir los microelectrodos, pistas de interconexión y los pads (primer nivel de mascarilla). Después, se graba selectivamente la bicapa metálica de Al/Ti con una solución a base de agua, ácido fluorhídrico (HF) y ácido nítrico (HNO_3) por 28 segundos, y se remueve la fotorresina con acetona durante 10 minutos en ultrasonido.

Posteriormente, se deposita una película de PI-2610 de 1.5 µm de espesor como material de pasivación y se cura a 350°c por 2 horas. Enseguida se trata la superficie de la película pasivadora en plasma de O_2 y se deposita una película de Al de 100 nm de espesor. Se realiza un proceso de fotolitografía estándar utilizando el segundo nivel de mascarillas para definir las ventanas de contacto eléctrico sobre los pads y los microelectrodos, así como la forma geometría del prototipo. La película de Al y PI se graban selectivamente utilizando la solución comercial Al-etch tipo A (por 2 minutos) y plasma de O_2 (por 9 horas), respectivamente. Finalmente, se decapa la película de Al se libera el electrodo del soporte mecánico en agua DI.

Caracterización

Evaluación eléctrica

Las pruebas de caracterización eléctrica del prototipo fabricado se realizaron a temperatura ambiente en la estación de pruebas Summit 12000 y el analizador de parámetros Keithley 4200a. Las mediciones se realizaron para cada estructura pad-microelectrodo, colocando una punta de pruebra sobre uno de los pads de conexión y la otra sobre el microelectrodo correspondiente. El analisis se llevó a cabo aplicando un barrido de voltaje de -5 V a +5 V con incrementos de 0.01 V.

Las mediciones se realizaron bajo dos condiciones experimentales: (1) con el prototipo flexible dispuesto sobre una superficie plana, y (2) sobre una superficie concava con curvatura similar a la curvatura de la córnea humana, a fin de evaluar el comportamiento eléctrico en condiciones anatómicamente relevantes.

Impedancia electroquímica

La impedancia electroquímica de los microelectrodos fabricados se evaluó utilizando un sistema de tres electrodos, como se muestra en la Figura 4. Los microelectrodos bajo prueba se conectaron mediante puntas de prueba y se sumergieron en una solución salina tamponada con fosfato (PBS) a temperatura ambiente. El sistema de medición está compuesto por un alambre de platino (Pt) como contraelectrodo (CE), un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) como electrodo de referencia, y el microelectrodo fabricado como electrodo de trabajo (WE).

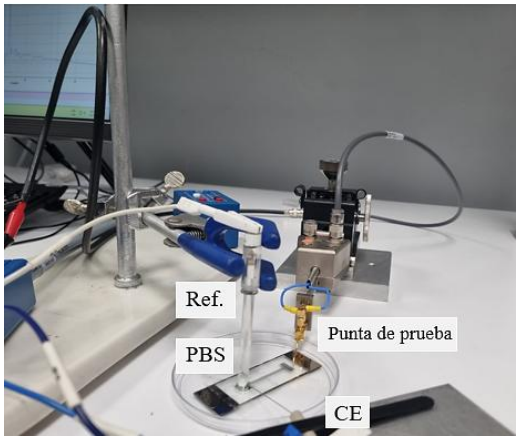


Figura 4. Configuración experimental para la medición de impedancia de los microelectrodos fabricados.

Las mediciones se realizaron aplicando una señal sinusoidal de 15 mV de amplitud, con un barrido de frecuencia en el rango de 1 Hz a 100 Hz. Tanto la aplicación de la señal como el registro de la respuesta electroquímica se llevaron a cabo utilizando un potenciostato-galvanostato VSP300. En esta prueba, el barrido de frecuencia se seleccionó entre 1 Hz y 100 Hz. Sin embargo, para evaluar los microelectrodos se utilizó el valor de impedancia en el rango de 11 Hz a 30 Hz, ya que los valores de frecuencia de señal típicos para estimular la retina están alrededor de estos valores.

Caracterización térmica

El método óptico Background Oriented Schlieren (BOS) se empleó para estimar la distribución de temperatura del aire que se encuentra justo por encima de la superficie del microelectrodo durante su operación. La Figura 5 muestra el arreglo óptico utilizado, el cual está compuesto por un LED de luz blanca, una rejilla con frecuencia espacial de 1000 lpi (equivalente a un período espacial de 25 µm), una cámara CCD de 11 Mpix (2672 × 4008 píxeles) con su lente formadora de imagen (300 mm de distancia focal), y el microelectrodo fabricado.

Para realizar las mediciones, el prototipo se colocó longitudinalmente sobre una platina, y se conectaron dos puntas de prueba: una sobre el pad y otra sobre el microelectrodo correspondiente. Se aplicó un barrido de voltaje de 2 V a 10 V en incrementos de 2 V utilizando una fuente de voltaje programable.

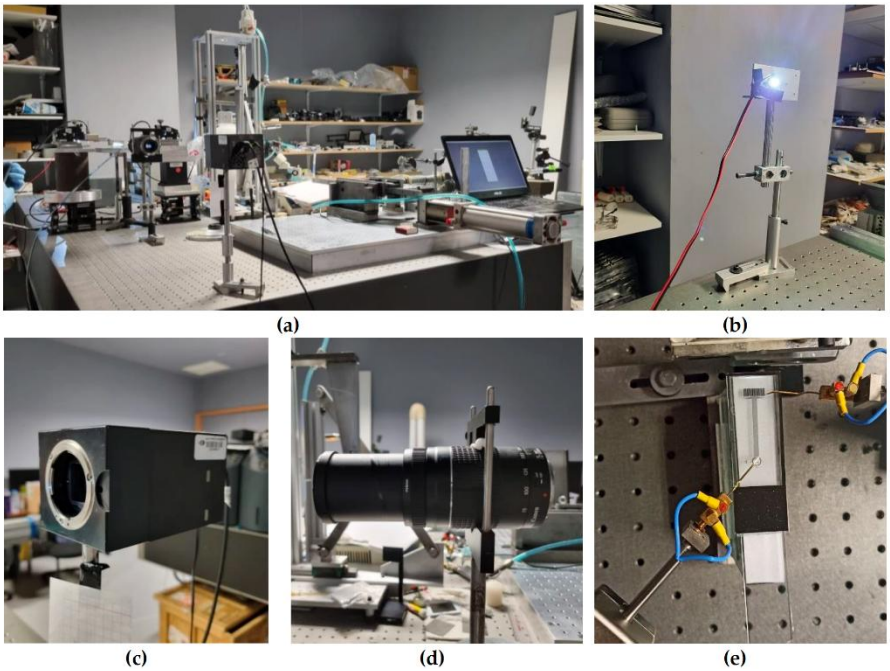


Figura 5. (a) arreglo óptico utilizado para medir la temperatura de los microelectrodos por la técnica BOS, (b) LED, (c) cámara CCD, (d) lente, (e) prototipo sobre la platina y conectado a dos puntas de prueba.

Biocompatibilidad

La biocompatibilidad del prototipo fabricado se evaluó mediante la implantación del arreglo de microelectrodos en el cráneo de una rata durante un periodo de dos semanas. El procedimiento quirúrgico fue llevado a cabo por personal calificado en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México.

Después de la cirugía, la rata recibió cuidados posoperatorios que incluyeron monitoreos periódicos de salud, así como inspecciones visuales de la herida y del tejido circundante para detectar posibles signos de inflamación o infección. Al finalizar el periodo de implantación, el dispositivo fue extraído y examinado bajo microscopía con el fin de identificar posibles daños estructurales en el arreglo de microelectrodos.

RESULTADOS

Simulación

La Figura 5 muestra los resultados de la simulación térmica para una de las estructuras pad–microelectrodo, considerando un voltaje aplicado de 10 V. Este valor se seleccionó por ser el que presenta con mayor claridad el incremento térmico en la estructura.

Los resultados indican que el aumento de temperatura se concentra principalmente en el volumen del microelectrodo (35.6 °C) y en la superficie inferior de las pistas metálicas (35.4 °C). Este comportamiento se atribuye al reducido tamaño de los microelectrodos y a la baja resistividad eléctrica de la película de aluminio (Al), en comparación con la película de titanio (Ti) (cuya temperatura se mantiene cercana a la temperatura ambiente). La mayor conductividad del Al permite un flujo de corriente más intenso, lo que genera una mayor disipación de calor en esa región.

En general, la temperatura promedio simulada en la estructura varió de 19.99 °C a 24.66 °C para voltajes aplicados entre 1 V y 10 V, respectivamente.

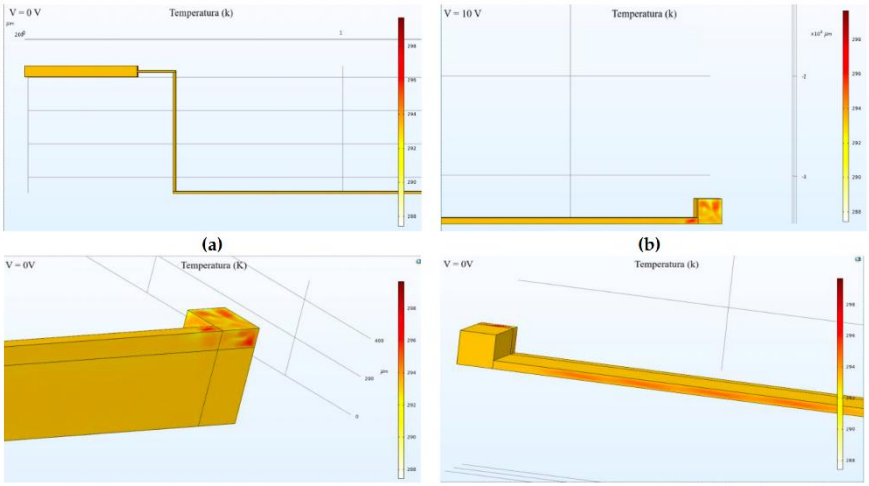


Figura 6. Resultados del proceso de simulación termicaa un voltaje aplicado de 10 V: (a y b) vista superior de las estructuras y (c y d) distribución de la temperatura.

Es importante mencionar que el voltaje que se aplica para estimular eléctricamente el ojo humano se encuentra por debajo de 1 V, por lo cual, el arreglo de microelectrodos fabricado es adecuado para su uso en EE de la córnea, ya que el incremento máximo de temperatura registrado para 1 V es de 0.17 °C.

Proceso de fabricación

La Figura 6 muestra el electrodo de superficie seccionado fabricado y las imágenes microscópicas de las estructuras definidas. Como se observa, se obtuvo un arreglo de microelectrodos espacialmente selectivo, mecánicamente flexible y con integridad estructural. Además, al utilizar únicamente tres materiales estructurales fue posible obtener un proceso de fabricación simplificado y reproducible.

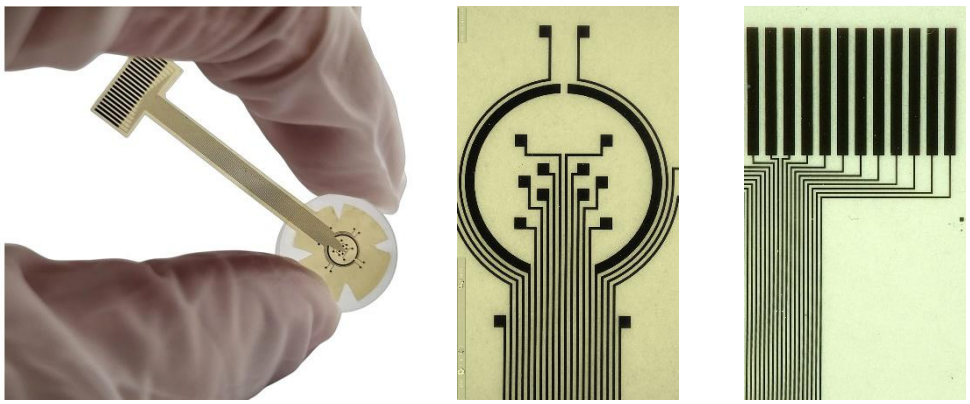


Figura 7. Electrodo fabricado: (a) (b)acercamiento de las estructuras.

Caracterización eléctrica

La Figura 7 muestra una comparación entre los valores de resistencia eléctrica calculados analíticamente y los valores medidos experimentalmente. Como se observa, las mediciones experimentales obtenidas para el electrodo colocado sobre una superficie plana (puntos negros) muestran un incremento promedio de 2 Ω respecto a la resistencia calculada (puntos azules). Esta variación minima en la resistencia eléctrica demuestra la fiabilidad y reproducibilidad del proceso de fabricación propuesto y las técnicas utilizadas.

En el caso de las estructuras evaluadas sobre una superficie cóncava, se observa un incremento promedio de 1.5 Ω, atribuible al estrés mecánico inducido en la bicapa metálica durante la flexión. No obstante, este aumento es mininimo y no compromete el desempeño funcional del prototipo, lo que evidencia la estabilidad eléctrica de las estructuras incluso bajo condiciones de deformación.

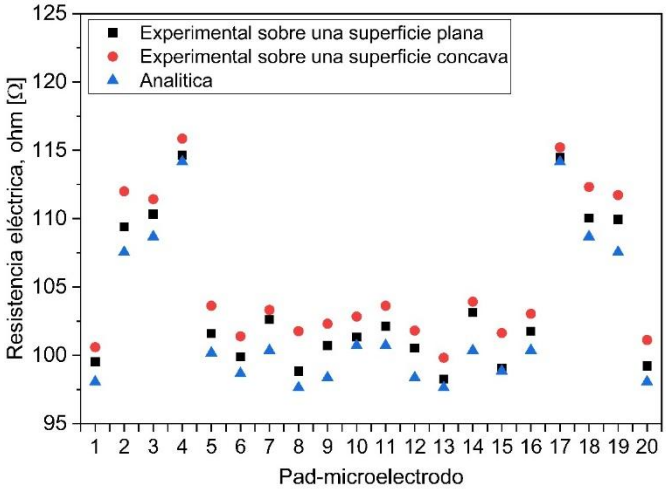


Figura 8. Comparación entre los valores de resistencia eléctrica calculados y obtenidos experimentalmente.

Impedancia electroquímica

La Figura 8 muestra la impedancia electroquímica promedio obtenida para cada uno de los microelectrodos. Los resultados muestran una disminución en la magnitud de la impedancia de 6.4 MΩ a 1 Hz hasta 213 kΩ a 100 Hz. Los datos recopilados para los 18 microelectrodos presentan tendencias consistentes, lo que evidencia la buena uniformidad y fiabilidad del proceso de fabricación del dispositivo.

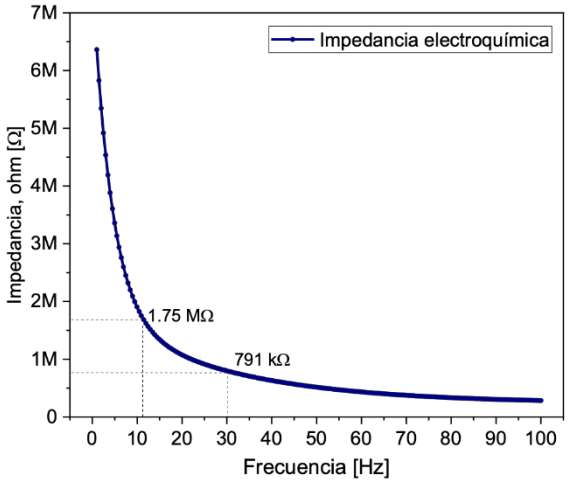


Figura 9. (a) Impedancia electroquímica promedio medida para cada microelectrodo fabricado.

En el rango de frecuencias clínicamente relevante (11 Hz a 30 Hz), los valores de impedancia obtenidos oscilan entre 1.75 MΩ y 791 kΩ. Estos resultados son comparables con los reportados para otros microelectrodos utilizados en estimulación eléctrica, cuyos valores típicos se encuentran en el orden de varios cientos de kiloohmios. Lo anterior sugiere que la matriz de microelectrodos

fabricada presenta características eléctricas adecuadas para aplicaciones de estimulación eléctrica (EE).

Caracterización térmica

Los resultados obtenidos mediante la técnica BOS para un voltaje de alimentación de 10 V se presentan en la Figura 9. La Figura 9a muestra la imagen de referencia capturada sin voltaje aplicado; la Figura 9b, la transformada de Fourier correspondiente; la Figura 9c, el mapa de fase óptica (donde los colores representan la fase en radianes); y la Figura 9d, el mapa de temperatura derivado.

En este último, es posible observar un gradiente térmico de aproximadamente 0.5 °C generado por la aplicación del voltaje. Se seleccionó un voltaje de 10 V con el propósito de hacer visible este gradiente, ya que a voltajes menores el incremento de temperatura es mínimo y no pudo ser detectado con precisión mediante esta técnica.

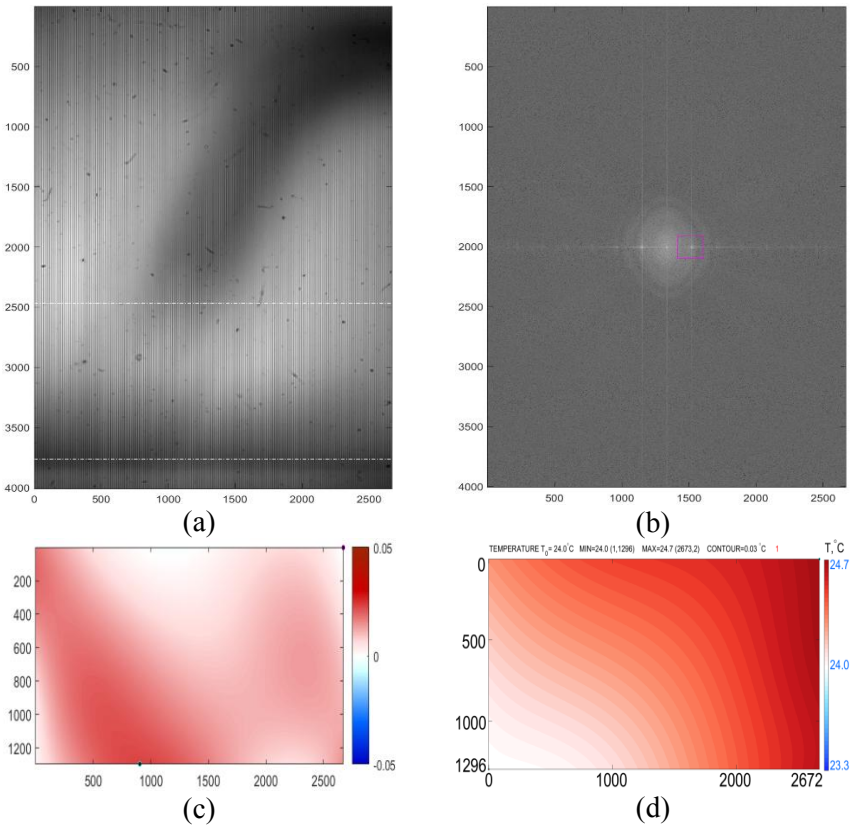


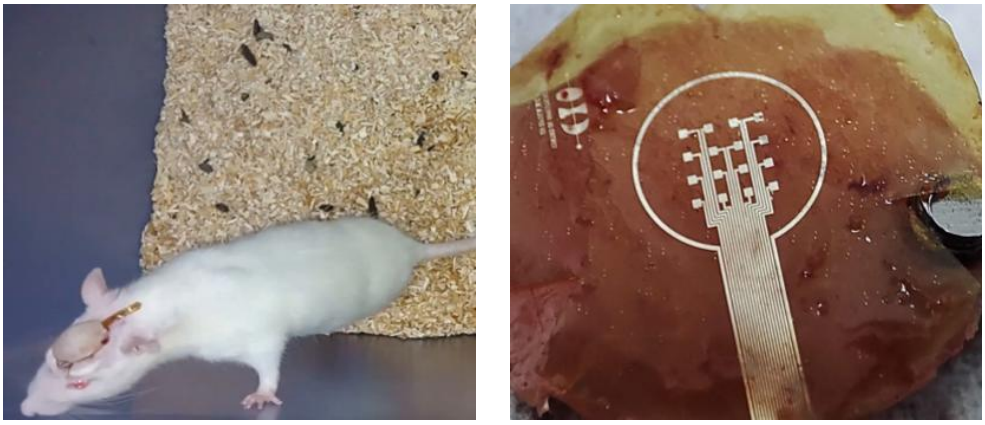
Figura 10. Resultados obtenidos con la técnica BOS para un voltaje aplicado de 10 V, (a) imagen de referencia, (b) transformada de Fourier, (c) mapa de fase óptica y (d) mapa de temperatura.

Biocompatibilidad

La Figura 10a muestra el prototipo de electrodo implando en el craneo de una rata, y la Figura 10b el prototipo extraido después de la implantación. Durante el periodo de implantación no se observaron alteraciones en los parámetros fisiológicos monitoreados, ni signos visibles de inflamación, infección o cambios en la piel o el cráneo del animal.

En cuanto al comportamiento, el animal no presentó signos de angustia, dolor, comportamientos erráticos ni movimientos anómalos. En esta etapa del desarrollo del prototipo, la evidencia sugiere la ausencia de reacciones inmunológicas o efectos tóxicos sistémicos. Además, el análisis visual del conjunto extraído no mostró signos de daño estructural ni alteraciones visibles en la región en contacto con el tejido, como se observa en la Figura 10b.

Estos resultados preliminares indican que el prototipo no presenta efectos citotóxicos aparentes y es biocompatible con el tejido biológico. No obstante, para avanzar hacia su aplicación en humanos, será necesario realizar estudios adicionales de citotoxicidad, tanto en tejido de rata como en cultivos celulares.



(a) **(b)**

Figura 11. (a) Evolución del implante después de una semana y (b) conjunto de microelectrodos extraído.

CONCLUSIONES

Reportamos el diseño, fabricación y caracterización de un nuevo electrodo de estimulación electríca selectiva. El diseño propuesto integra una matriz de 18 microelectrodos independientes, dos electrodo de referencia y 20 pads de conexión sobre un sustrato ergonómico flexible. Los microelectrodos tienen un tamaño de 250 µm × 250 µm, y están distribuidos en la región central y periferica de la córnea. El diseño propuesto puede adaptarse fácilmente para cubrir la región periférica o total de la córnea, dependiendo de la zona objetivo de estimulación. El electrodo fue fabricado exitosamente usando tecnología MEMS y electrónica flexible usando solo tres materiales: PI, Al y Ti. A diferencia de otros trabajos que integran microelectrodos de Ti/Pt o Ti/Au sobre sustratos de PI, propusimos el uso de Al/Ti como material estructural del electrodo. De esta forma, logramos obtener un proceso de fabricación simpleficado y reproducible, y obtener un prototipo de electrodo mecanicaménte flexible y biocompatible

La caracterización eléctrica y electroquíca del prototipo muestra una conductividad eléctrica relativamente alta de las estructuras y un valor de impedancia promedio de 791 kΩ a 1,5 MΩ en un rango de frecuencia de 11 Hz a 30 Hz. Además, la prueba de calentamiento mostró que el electrodo es seguro de utilizar sobre tejido biologico, ya que a una temperatura de 10 V exhibio un incremente de temperatura de 0.5 °C. Finalmente, la prueba de biocompatibilidad indicó que el prototipo no es citotóxico y es biocompatible con el tejido biológico.

Una limitación del electrodo propuesto se relaciona con el cableado para su alimentación, ya que esto genera incomodidad para el paciente. El siguiente paso es integrar el conjunto de microelectrodos en un sistema de alimentación inalámbrico.

El estado actual del prototipo representa un avance positivo hacia la estimulación eléctrica selectiva de la córnea.

AGRADECIMEINTOS

Al Laboratorio Nacional de Óptica de la Visión (LANOV), en particular al proyecto N° ApoyosLNC-2023-121 denominado “Desarrollo de dispositivos oftálmicos de última generación en el Laboratorio

Nacional de Óptica de la Visión"; y al Laboratorio Nacional Conahcyt en Microtecnología y BioMEMS (LaNMiB).

BIBLIOGRAFÍA

1. N. Hernández-Sebastián *et al.*, "Fabrication and Characterization of a Flexible Thin-Film-Based Array of Microelectrodes for Corneal Electrical Stimulation", *Micromachines*, vol. 14, n.º 11, p. 1999, oct. 2023, doi: 10.3390/mi14111999.
2. Y. Tao, T. Chen, B. Liu, L. Wang, G. Peng, L. Qin, Z. Yan, and Y. Huang, "The transcorneal electrical stimulation as a novel therapeutic strategy against retinal and optic neuropathy: a review of experimental and clinical trials", *Int J Ophthalmol*, jun. 2016, doi: 10.18240/ijo.2016.06.21.
3. M. T. Pardue and R. S. Allen, "Neuroprotective strategies for retinal disease", *Progress in Retinal and Eye Research*, vol. 65, pp. 50-76, jul. 2018, doi: 10.1016/j.preteyeres.2018.02.002.
4. J. Li *et al.*, "Noninvasive electrical stimulation as a neuroprotective strategy in retinal diseases: a systematic review of preclinical studies", *J Transl Med*, vol. 22, n.º 1, p. 28, ene. 2024, doi: 10.1186/s12967-023-04766-4.
5. N. A. Sharif, "Optic Nerve and Retinal Ganglion Cell Protection, Rejuvenation, and Regeneration as Glaucoma Treatment Strategies", in *Glaucoma - Recent Advances and New Perspectives*, P. Gunvant Davey, Ed., IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.108914.
6. J. Liu, A. K. H. Ma, K. F. So, V. W. H. Lee, and K. Chiu, "Mechanisms of electrical stimulation in eye diseases: A narrative review", *Advances in Ophthalmology Practice and Research*, vol. 2, n.º 2, p. 100060, ago. 2022, doi: 10.1016/j.aopr.2022.100060.
7. P. Sun *et al.*, "Comparison of cortical responses to the activation of retina by visual stimulation and transcorneal electrical stimulation", *Brain Stimulation*, vol. 11, n.º 4, pp. 667-675, jul. 2018, doi: 10.1016/j.brs.2018.02.009.
8. T. Morimoto, T. Miyoshi, T. Fujikado, Y. Tano, and Y. Fukuda, "Electrical stimulation enhances the survival of axotomized retinal ganglion cells in vivo":, *Neuroreport*, vol. 13, n.º 2, pp. 227-230, feb. 2002, doi: 10.1097/00001756-200202110-00011.
9. A. Y. Chow, "The Artificial Silicon Retina Microchip for the Treatment of VisionLoss From Retinitis Pigmentosa", *Arch Ophthalmol*, vol. 122, n.º 4, p. 460, abr. 2004, doi: 10.1001/archopht.122.4.460.
10. Retina.net e. V. *et al.*, "Transkorneale Elektrostimulation bei Retinitis pigmentosa: Prüfplan einer multizentrischen, prospektiven, randomisierten, kontrollierten und doppelblinden Studie im Auftrag des Gemeinsamen Bundesausschusses (G-BA-Erprobungsrichtlinie)", *Ophthalmologe*, vol. 118, n.º 5, pp. 512-516, may 2021, doi: 10.1007/s00347-021-01360-1.
11. Z. Lu *et al.*, "An in-silico analysis of retinal electric field distribution induced by different electrode design of trans-corneal electrical stimulation", *J. Neural Eng.*, vol. 19, n.º 5, p. 055004, oct. 2022, doi: 10.1088/1741-2552/ac8e32.
12. L. Fu, A. C. Y. Lo, J. S. M. Lai, and K. C. Shih, "The role of electrical stimulation therapy in ophthalmic diseases", *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, vol. 253, n.º 2, pp. 171-176, feb. 2015, doi: 10.1007/s00417-014-2889-7.
13. J. Xie *et al.*, "Modeling and percept of transcorneal electrical stimulation in humans", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 58, n.º 7, pp. 1932-1939, jul. 2011, doi: 10.1109/TBME.2010.2087378.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO EN LA FORMACIÓN DE CAPAS DE BORURO EN UN ACERO INOXIDABLE 316 L

Omar Vázquez Flores[1*], Manuela Díaz Cruz [1], A. Cervantes Tobón[1], Antonieta García Murillo [2], Felipe de Jesús Carrillo Romo [2].

[1]Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México. [2]Instituto Politécnico Nacional-CIITEC Azc., cerrada de Cecati s/n, Sta. Catarina, Azc., C.P. 02250, Ciudad de México, México.
ovazquezf1501@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Este estudio muestra la caracterización de capas formadas de boruro (Fe_2B y FeB) sobre la superficie de un acero inoxidable AISI 316 L mediante el proceso de borurización de empaquetamiento. Las condiciones del tratamiento fueron temperaturas de 850°C, 925°C y 1000°C, con tiempos de exposición de 2, 4 y 6 para cada una de las muestras. Se utilizó una mezcla de carburo de boro (B_4C), tetrafluoroborato de potasio (BF_4K) y carburo de silicio (SiC).

La caracterización de las capas de boruro se llevó a cabo mediante técnicas de microscopía óptica metalográfica (M.O.), microscopia electrónica de barrido (MEB) con espectroscopía de dispersión de energía (EDS), difracción de rayos X (DRX), además de instrumentos de medición de dureza como el Microdurómetro Vickers y Perfilometría óptica. Los resultados mostraron que el espesor de capa aumenta significativamente con la temperatura y el tiempo del tratamiento, obteniendo espesores de 33.14 µm a 1000°C durante 6 horas.

No obstante, las muestras con condiciones de tratamiento de 1000°C durante 4 y 6 horas presentaron una dureza de 16 veces superior a los del acero sin tratamiento. Del mismo modo, la cinética de crecimiento mostró una energía de activación de 159.16 KJ/mol, este valor se asemeja a resultados obtenidos por otros autores. Mediante la perfilometría óptica se observaron las diferentes rugosidades de las muestras, definiendo que, a mayores temperaturas las capas son más homogéneas y menos rugosas.

La investigación enfatiza la relación entre las condiciones ideales del tratamiento para obtener mejor uniformidad y definición de capas de boruro, proporcionando información relevante para aplicaciones industriales que requieren aumento significativo de dureza y resistencia al desgaste.

INTRODUCCIÓN

El acero inoxidable AISI 316 L es principalmente utilizado por sus excelentes propiedades mecánicas, físicas y térmicas, tal es el caso que se emplea en la industria química, biomédica y alimenticia. No obstante, el comportamiento cuando es expuesto a desgaste y a la fatiga suele desarrollar un deterioro irreversible y con el tiempo puede sufrir fractura y corrosión, esto ocurre cuando es sometido a altas temperaturas o ambientes ácidos. Para mejorar su durabilidad, existen hoy en día gran variedad de tratamientos térmicos y termoquímicos, uno de ellos es la borurización, la cual consiste en crear una capa superficial mediante el proceso de difusión, la capa formara fases cristalinas de boruros de hierro (Fe_2B y FeB) cuyas principales características es aumentar la dureza, la resistencia al desgaste causada por fricción y realizar una protección frente al fenómeno de corrosión. En este estudio, se empleó un análisis sobre el efecto de la temperatura y el tiempo de la borurización por empaquetamiento en la superficie de un acero inoxidable AISI 316 L, en donde se realizó una caracterización empleando técnicas de microscopia óptica metalográfica, microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX), así como también se desarrollaron estudios de microdureza y perfilometría, además, se calculó la energía de activación correspondiente al crecimiento de capas formadas de Fe y Fe_2B.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El diagrama de la Figura 1 se muestra el procedimiento experimental, considerando las condiciones, tiempo y temperatura, así como los equipos y técnicas utilizadas.

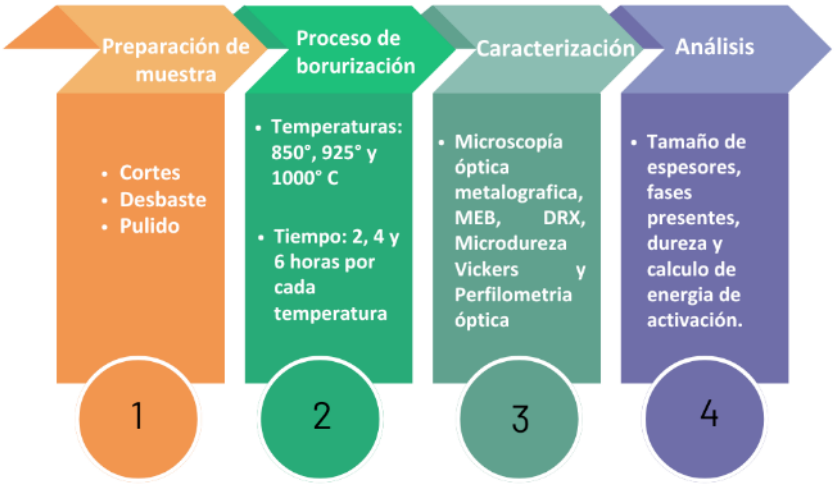


Figura 1. Metodología experimental.

El proceso de borurizacion por empaquetamiento se realiza colocando mezcla borurante dentro de un recipiente de acero inoxidable AISI 310, posteriormente se introduce la muestra de acero 316 L previamente desbastada y pulida en acabado espejo en la parte central del recipiente y se cubre completamente con más mezcla borurante. El proceso finaliza añadiendo bentonita sódica como tapa, la bentonita tiene el objetivo de crear una capa impermeable que favorece la retención y la liberación de gases que se forman durante el tratamiento. Una vez listo el recipiente, se coloca en una mufla a altas temperaturas por un tiempo determinado.



Figura 2. Borurización de empaquetamiento.



Figura 3. A) Recipiente dentro de la mufla, B) Mufla con temperatura controlada.

De una barra de acero AISI 316 L se realizaron 9 cortes con dimensiones de 1/2" de diámetro y 0.19" de espesor. La Tabla 1 proporciona la composición química de la barra sin ningún tratamiento térmico previo, así mismo la Figura 4 muestra los cortes realizados para la elaboración de probetas/muestras para el proceso de borurizacion antes y después del tratamiento.

Tabla 1. Composición química acero AISI 316 L.

Hierro (Fe)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdeno (Mo)	Manganeso (Mn)	Silicio (Si)	Carbono (C)	Fósforo (P)	Azufre (S)
62 – 65 %	16 – 18 %	10 – 14 %	2 – 3 %	≤ 2 %	≤ 1 %	≤ 0.03 %	≤ 0.045%	≤ 0.03 %

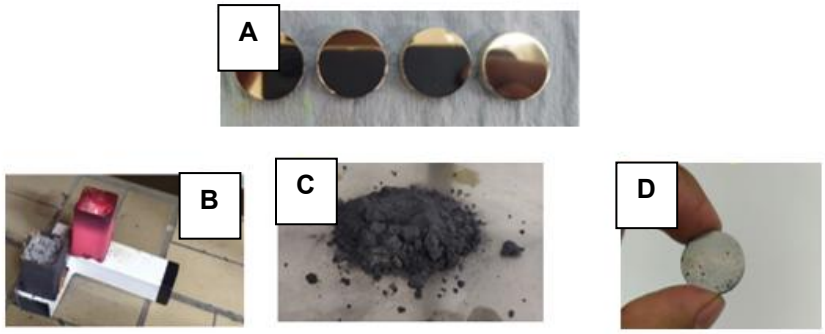


Figura 4. A) Muestras pulidas en acabo espejo, B) Recipiente después del tratamiento, C) Extracción de muestra del material borurante, D) Obtención de muestras boruradas.

RESULTADOS OBTENIDOS

Microscopía óptica

En los resultados obtenidos de la microscopía óptica se observó la formación de capa en todas las muestras, la temperatura y el tiempo influyen en el crecimiento de la capa, así mismo se distinguen dos tonos en la capa, cada tono representa fases cristalinas (FeB y Fe_2B). Específicamente las

muestras con condición de 1000°C por 4 y 6 horas, en donde se determina un tamaño de espesor en promedio de 26.90 y 33.14 µm respectivamente. La Figura 5 muestra el crecimiento de capa en función de las condiciones de tiempo y temperatura, así también la Tabla 2 proporciona las condiciones de temperatura, tiempo y tamaño de espesor.

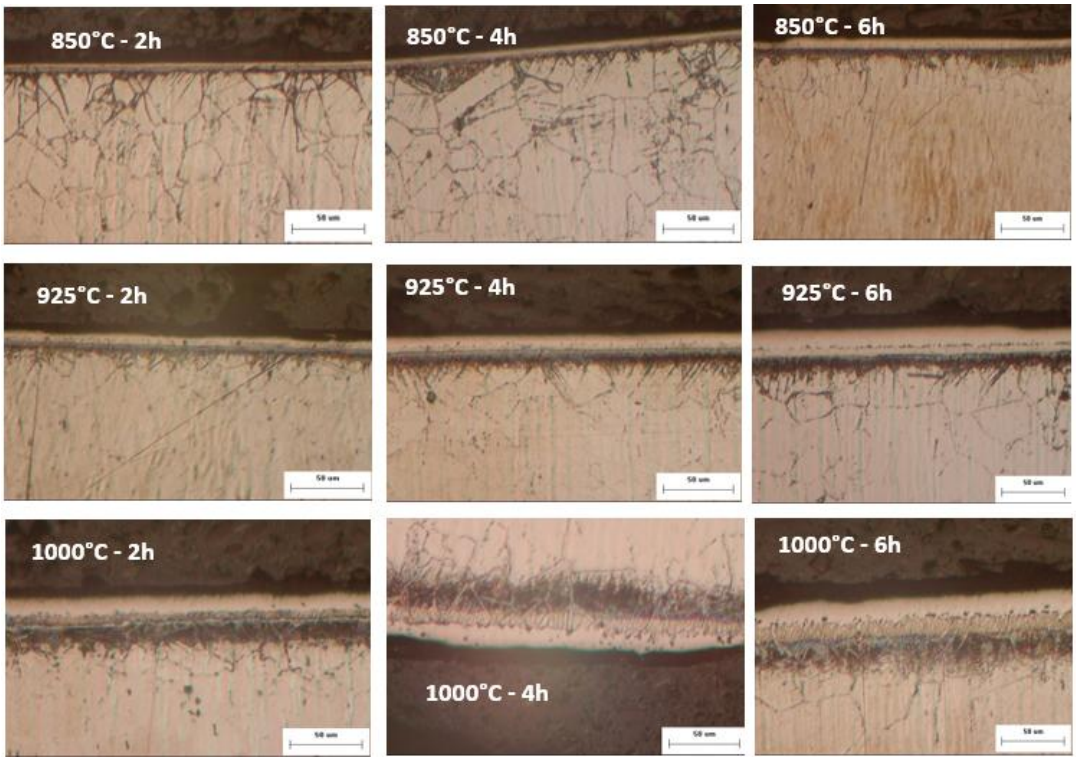


Figura 5. Micrografías del acero inoxidable AISI 316 L con tratamiento de borurización.

Tabla 2. Composición química acero AISI 316 L

Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento (h)	Espesor (µm)
850	2	4.54
850	4	9.32
850	6	12.29
925	2	12.07
925	4	16.71
925	6	18.03
1000	2	20.44
1000	4	26.90
1000	6	33.14

Microscopía Electrónica de Barrido

Con la microscopía electrónica de barrido (MEB) se distinguen las fases cristalinas, zona de difusión y la capa borurada tal y como se muestra en la Figura 6, y mediante el uso de la técnica de espectroscopia de dispersión de energía (EDS) se puede visualizar en la Figura 7 la presencia de boro en la muestra de 1000°C – 4 horas, la cual define la formación de capas boruradas. No obstante, como el boro tiene un radio atómico pequeño, es difícil encontrarlo, así que no siempre puede visualizarse en el EDS.

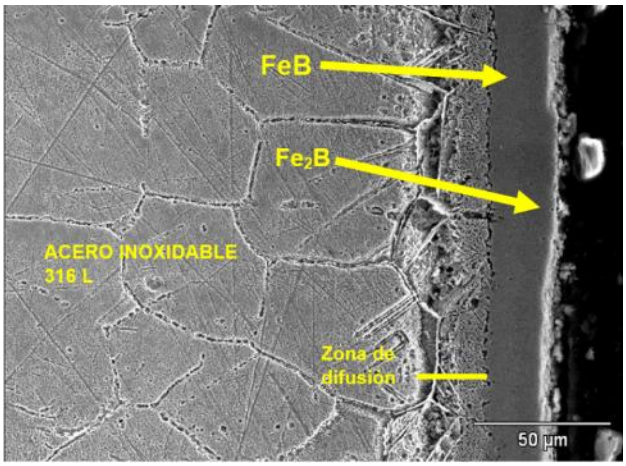


Figura 6. Micrografía del MEB 1000°C – 4 h, se identifican fases presentes en la capa.

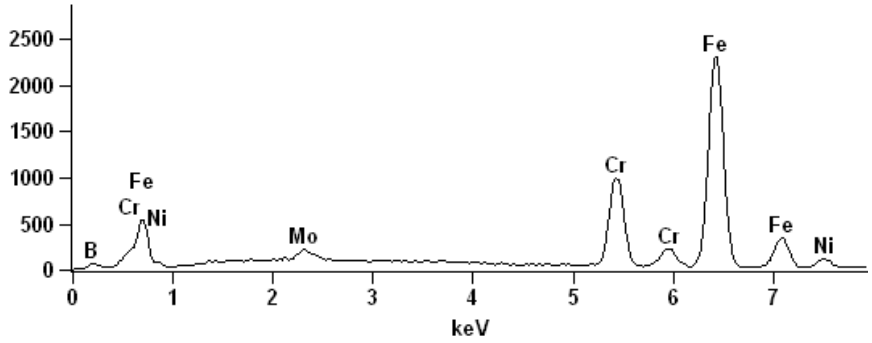


Figura 7. Grafica EDS de elementos presentes en las zonas de la muestra 1000°C – 4h.

Difracción de rayos X

Los picos obtenidos mediante el uso de difracción de rayos X, representan la formación de fases cristalinas de boruros de hierro, No obstante, se detectaron otras fases en el estudio, tal es el caso de las fases de CrB, Cr_2B, NiB y Ni_2B en los difractogramas. Por otra parte, las muestras tratadas a 1000°C presentan fase Fe_2B y patrones con picos cortos que indican la presencia de la fase FeB, además de fases secundarias de CrB y NiB, las cuales parecían haber desplazado parte de la fase FeB hacia la superficie debido a la exposición de los 1000°C de temperatura. No obstante, todas las fases cristalinas corresponden a; FeB, Fe_2B, Cr_2B, CrB, NiB y Ni_2B. Los difractogramas de las

muestras expuestas a temperaturas de 850°C, 925°C y 1000°C se pueden apreciar en las Figuras 8-10.

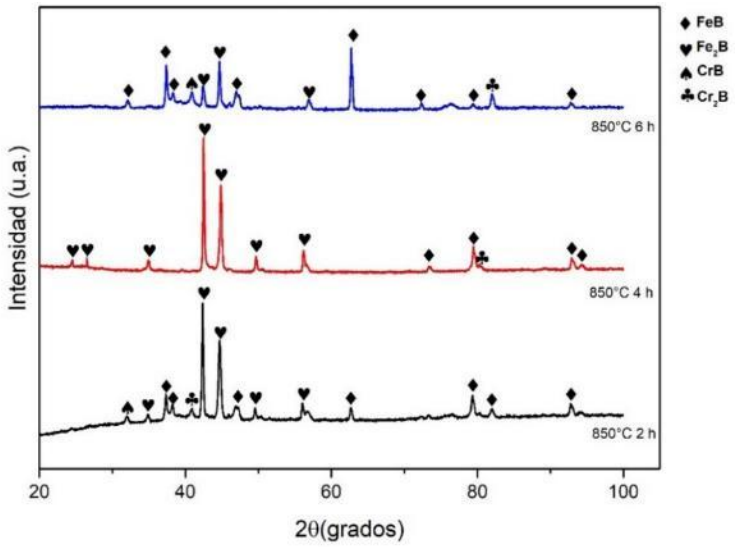


Figura 8. Difractograma de rayos X de las muestras de 850°C.

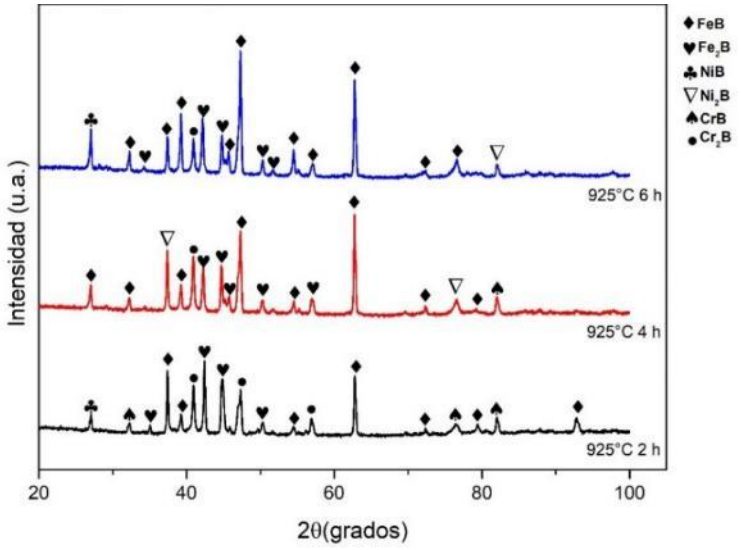


Figura 9. Difractograma de rayos X de las muestras de 925°C.

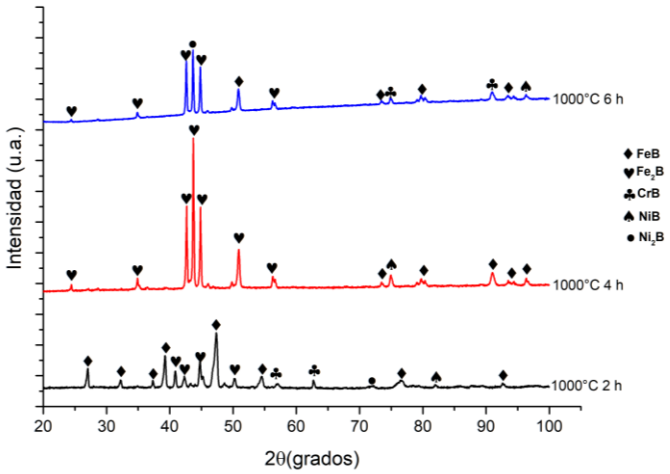


Figura 10. Difractograma de rayos X de las muestras de 1000°C.

Perfil de microdureza

En la muestra de 850°C a 2, 4 y 6 horas, las indentaciones obtenidas tienen mayores dimensiones que el espesor de capa, esto sucede debido a que, en las muestras a esta temperatura, la formación de capa no es suficientemente grande de espesor, debido a esto, sería complejo realizar el perfil de microdureza, así que solo se realizaron 5 indentaciones por muestra para determinar la microdureza promedio, obteniendo 1097.3 HV 0.025 kgF.

Para el resto de las muestras fue posible realizar el perfil de microdureza, esta es representada con las Figuras 11 y 12.

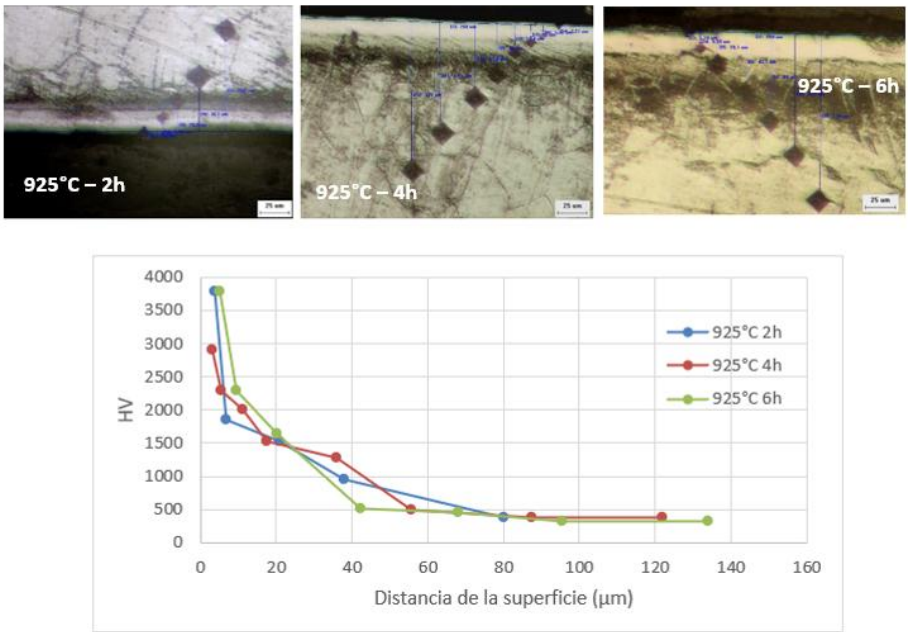


Figura 11. Perfil de microdureza de la muestra de 950°C – 2, 4 y 6 horas.

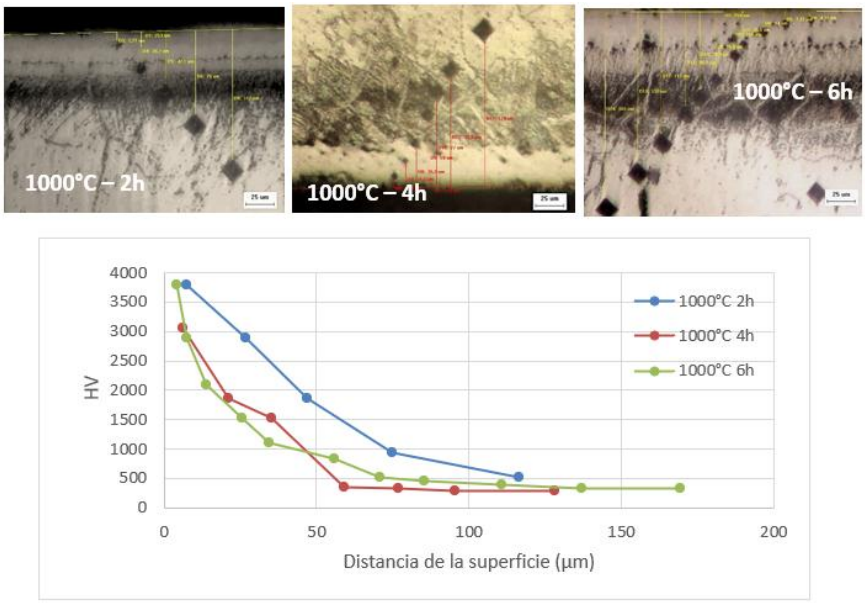


Figura 12. Perfil de microdureza de la muestra de 1000°C – 2, 4 y 6 horas.

Tabla 3. Microdurezas obtenidas de las muestras de 950°C y 1000°C

Muestra 925 2h		**Muestra 925 4h**		**Muestra 925 6h**	
Dureza HV	**Distancia (µm)**	**Dureza HV**	**Distancia (µm)**	**Dureza HV**	**Distancia (µm)**
3784	3.78	2897,5	3.21	3784	5.24
1854.5	6.98	2289	5.52	2289.5	9.59
1532.6	20.93	2012.3	11.05	1650.5	20.06
946.2	38.08	1532	17.44	513.7	42.15
383	79.94	1287	36.04	463.6	68.02
/	/	492	55.81	322	95.63
/	/	383	87.50	322	134.01
/	/	383	122.09	/	/
Muestra 1000 2h		**Muestra 1000 4h**		**Muestra 1000 6h**	
Dureza HV	Distancia (µm)	Dureza HV	Distancia (µm)	Dureza HV	Distancia (µm)
3784.7	7.27	3048.2	6.39	3784	4.37
2897.7	26.74	1854.5	21.22	2897.7	7.27
1854.5	47.09	1532.6	35.17	2098.8	13.95
946.2	74.99	350.6	59.01	1532.6	25.58
513	116.56	320	77.03	1097.3	34.59
/	/	296	95.63	824.2	55.81
/	/	296	128.19	513.7	70.93

Al finalizar el perfil de microdureza HV, se puede comparar la dureza del acero AISI 316 L sin tratamiento con la dureza obtenida de las capas boruradas, la Figura 13 muestra la comparación de estas muestras.

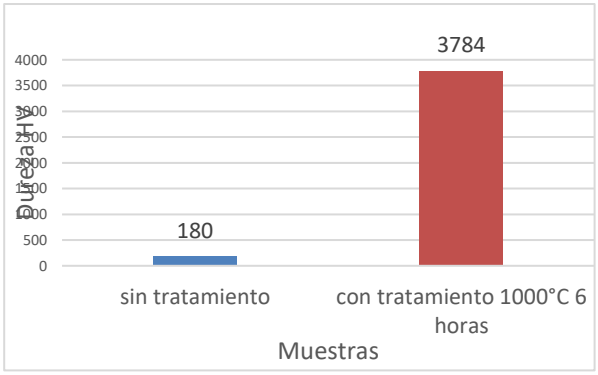


Figura 13. Comparación de microdureza HV de una muestra sin tratamiento con una muestra tratada.

Energía de activación

Para obtener la energía de activación, fue necesario ajustar los valores de espesor obtenidos del análisis metalográfico así también como la temperatura y el tiempo, la Tabla 4 realiza el ajuste necesario para un modelo de Arrhenius y ley de Hess, con la finalidad de obtener las constantes de crecimiento parabólico, graficando espesor en función del tiempo.

Tabla 4. Ajuste de temperatura, tiempo y espesor para modelo cinético.

Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento (h)	Espesor (µ)	Tiempo de tratamiento (s)	Espesor (m²)
850	2	4.54	7200	2.06 x10-11
850	4	9.32	14400	8.69 x10-11
850	6	12.29	21600	1.51 x10-10
925	2	12.07	7200	1.46 x10-10
925	4	16.71	14400	2.79 x10-10
925	6	18.03	21600	3.25 x10-10
1000	2	20.44	7200	4.18 x10-10
1000	4	26.90	14400	7.23 x10-10
1000	6	33.14	21600	1.10 x10-09

La Figura 14 proporciona la tendencia lineal para cada condición de tiempo y temperatura, en donde la pendiente es igual a la constante de crecimiento parabólico K (m²/s), se obtuvo el logaritmo natural

de la constante K realizar el ajuste del modelo de Arrhenius. Se realizó nuevamente una gráfica (Figura 15) y se obtuvo una línea de tendencia.

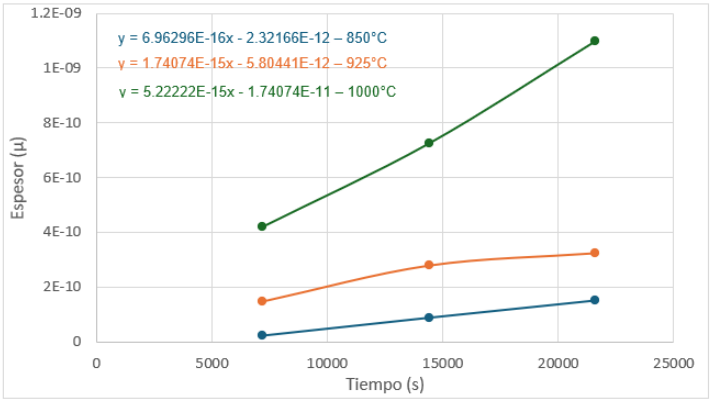
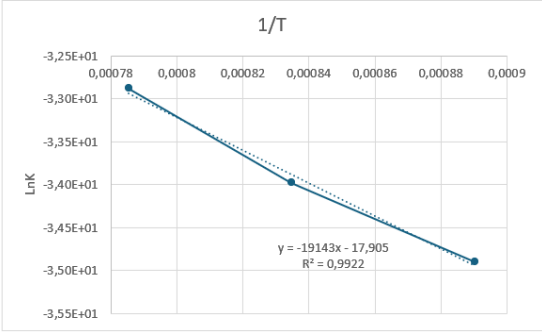


Figura 14. Espesores de capa para diferentes temperaturas en función del tiempo.

Tabla 5. Cálculo de las constantes de crecimiento y modelo cinético Lnk vs 1/T

Temperatura (°C)	Constantes de crecimiento parabólico K (m²/s)	Temperatura (K)	Lnk	1/T
850	6,96E-16	1123,15	-3,49E+01	0,000890353
925	1,74E-15	1198,15	-3,40E+01	0,00083462
1000	5,22E-15	1273,15	-3,29E+01	0,000785453

Figura 15. Variación de la constante de crecimiento parabólico en relación con la temperatura de tratamiento.



La energía de activación se obtiene de despejar Q en la ecuación (1), así mismo reemplazar los valores de la pendiente (m) y la ordenada al origen (b) con los datos obtenidos de la ecuación general de la recta (y=mx+b) correspondiente a la línea de tendencia de la gráfica que se muestra en la Figura 15.

$$m = \frac{Q}{R} \qquad (1)$$

Despejando

$$Q = m\ x\ R \tag{2}$$

A reemplazar los valores para el cálculo de la energía de activación ecuación (2), se multiplico por la constante de los gases ideales que tiene un valor de 8.3144 J/mol*K, obteniendo los valores que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 6. Resultados obtenidos de la línea de tendencia del crecimiento parabólico.

Pendiente	ordenada al origen	K_0	Energía de activación Q (KJ/mol)
1,91E+04	3,77E+01	1,79E+01	**159,1625592**

La energía de activación reportada en investigaciones realizadas por otros autores se encuentra en un rango de 100 – 200 KJ/mol, lo cual demuestra que el cálculo desarrollado coincide en el rango proporcionado. Esto afirma que es posible realizar el proceso de borurizacion y encontrar fases de boruros FeB y Fe_2B con las condiciones de temperatura de 850°C, 925°C y 1000°C con tiempos de 2, 4 y 6 horas para cada temperatura.

Perfilometría

En las muestras a 850°C, las rugosidades en las caras A y B son significativamente similares. Por otra parte, en la Figura 16 se observa un incremento en la rugosidad en la cara B de las muestras expuestas durante 4 horas de exposición. Esto se relaciona con la orientación de la muestra en el recipiente, donde la cara B se encontraba en contacto con la primera cama de mezcla borurante, lo que resultó una morfología y textura más uniforme con un aumento de la rugosidad.

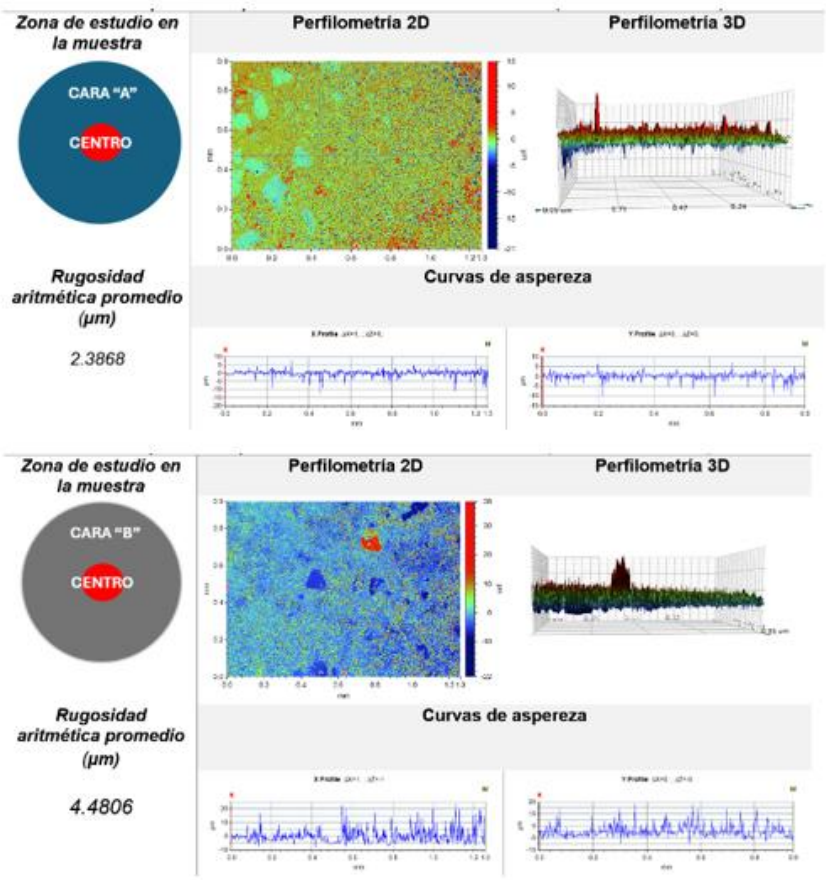


Figura 16. Perfilometría de las muestras tratadas a 850°C – 4 horas, cara A y B.

En las muestras de 925°C y 1000°C expuestas a 4 horas, se observó una tendencia similar, se obtiene una rugosidad mayor en la cara A. y menor en la cara B. La Figura 17 muestra los resultados obtenidos de la perfilometría de las muestras a 1000°C – 4 h. de la cara B, en donde se muestra una morfología y textura mas uniforme, definida y con una rugosidad menor comparado a las de 850°C.

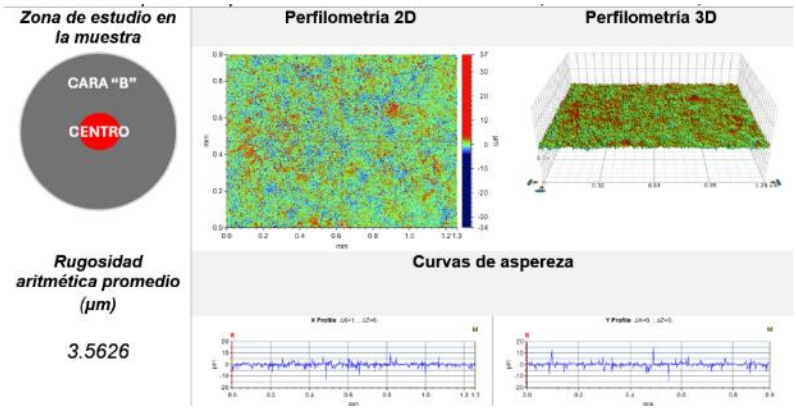


Figura 17. Perfilometría de las muestras tratadas a 1000°C – 4 horas, cara B.

En las muestras con condiciones de 1000°C – 4 y 6 horas de tratamiento, obtuvieron mayor homogeneidad, morfología y baja rugosidad, esto es debido a que a mayores condiciones de temperatura y tiempo mejor se define la capa.

CONCLUSIONES

Se demostró que la temperatura influye directamente en el crecimiento, espesor y homogeneidad de las capas de boruros de FeB y Fe_2B. Mediante el uso de la microscopía electrónica de barrido se observaron capas uniformes y se identificaron zonas de difusión, fases y capas boruradas en muestras expuestas a 1000°C, mientras que las muestras con condiciones de temperatura de 850 °C el crecimiento fue limitado. El análisis por difracción de rayos X identificó fases predominantes como Fe_2B y FeB, así como fases secundarias de CrB y NiB. La dureza del acero con tratamiento incremento 16 veces más respecto a la muestra sin tratamiento. La condición óptima de tratamiento de borurización fue de 1000 °C durante 4 horas, con una energía de activación de 159 kJ/mol, coherente con estudios previos. La perfilometría óptica mostró que, a mayor temperatura y tiempo, las capas presentaron menor rugosidad.

REFERENCIAS

[1] Campos-Silva, I., & Rodríguez-Castro, G. (2015). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. In Thermochemical Surface Engineering of Steels (pp. 651-702). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857096524.4.651

[2] López Tapia, L. I. Estudio tribológico de un acero 4140 sujeto a tratamientos termoquímicos de borurado, nitrurado y boronitrurado

[3] Hernández-Sánchez, E., & Velázquez, J. C. (2018). Kinetics of Growth of Iron Boride Layers on a Low-Carbon Steel Surface. In Laboratory Unit Operations and Experimental Methods in Chemical Engineering (pp. 37-55). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.73592

[4] Sánchez, E. H., Torres Avila, I. P., Chino-Ulloa, A., Alvarez, C. O., Hernández-Rodríguez, M. A. L., Tadeo-Rosas, R., Carrera-Espinoza, R., & Yescas-Hernández, J. A. (2020). Tribological behavior of a self-lubricant surface film of H3BO3 formed on a borided biomedical steel by a post-treatment. Defect and Diffusion Forum, 400, 65-74

[5] Campos-Silva, I., & Rodríguez-Castro, G. (2015). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. In Thermochemical Surface Engineering of Steels (pp. 651-702). Woodhead Publishing.

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESCINCIFICACIÓN O CORROSIÓN SELECTIVA DEL ZINC EN ALEACIONES DE LATÓN

Manuela Díaz Cruz [a*], Arturo Cervantes Tobón [a], Antonieta García Murillo [b], Felipe de Jesús Carrillo Romo [b].

[a] Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, U.P. Adolfo López Mateos, Zacatenco, C.P. 07738, Ciudad de México, México.[b] Instituto Politécnico Nacional-CIITEC Azc., Cerrada de Cecati s/n, Sta. Catarina, Azc., C.P. 02250, Ciudad de México, México.
neladiaz1346@gmail.com

RESUMEN

La descincificación es una corrosión exclusiva de aleaciones de latón con un 15% de Zinc. En caso de descincificación del latón, el zinc se disuelve dejando una débil capa de cobre y óxido de cobre, resultando una estructura relativamente porosa y con una alta rugosidad. Este proceso puede minimizarse o prevenirse fabricando latones con menor contenido de cinc, es decir latones con 85% de Cu y 15% de Zn, o cambiando a aleaciones cuproníquel, de 70-90% de Cu y de 10-30% de Ni. Otras posibilidades son modificar el ambiente corrosivo o usar una protección catódica. Las aleaciones cobre-zinc que contienen más de un 15% de Zn son susceptibles al proceso de corrosión selectiva llamado descincificación. En las descincificacion de latones, la remoción selectiva de zinc deja una capa de cobre relativamente porosa y débil y óxida de cobre. Es posible detectar microscópicamente descincificacion en latones después de 24 h de exposición en agua de mar artificial a un 50 °C de temperatura, ya sea por simple inmersión o en una celda de aireación diferencial. El proceso ocurre tanto en probetas sin tratamiento, así como en probetas recristalizadas a 700 °C. Las zonas descincificadas tienden a reemplazar de preferencia a la fase beta 3 de la estructura. En las probetas recristalizadas las áreas descincificadas tienden a seguir estrictamente los bordes de grano. Esta tendencia es mucho menos notoria en probetas duras. En ambos casos, las zonas en que el latón ha sido reemplazado por cobre están situadas hacia los bordes de las probetas.

En el presente trabajo fue posible determinar el espesor de la disolución del zinc en dos aleaciones de latón (A y B) con el fin de proponer un método de estandarización de las mismas, para que la corrosión o disolución del zinc (desincificación) no afecte las propiedades de dichas aleaciones en alguna aplicación práctica donde sean expuestas a dicho proceso como por ejemplo en aguas ácidas o alcalinas.

INTRODUCCIÓN

La disolución selectiva es la eliminación preferencial de un elemento de una aleación sólida por procesos corrosivos. El ejemplo más común de este tipo de corrosión es el descincificado que tiene lugar en los latones, consistente en la eliminación selectiva del cinc que está aleado con cobre. Por ejemplo, en la descincificación de latón con 70% de Cu y 30% de Zn, el cinc se elimina preferentemente del latón, dejando una matriz esponjosa y débil [1], como se observa en la Figura 1. El mecanismo de descincificación del cobre involucra las tres etapas siguientes:1) Disolución del latón.2) Permanencia de los iones cinc en la disolución.3) Electrodeposición del cobre en solución sobre el latón.

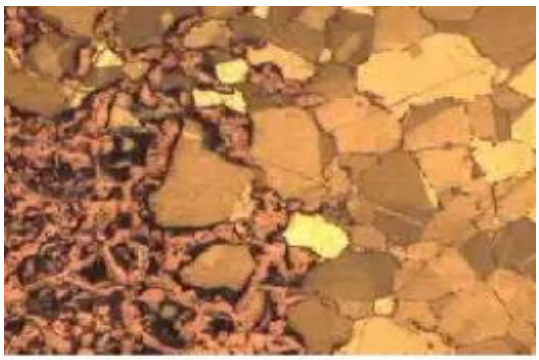


Figura 1. Descincificación del latón.

Puesto que el cobre que permanece no tiene la textura del latón, la firmeza de la aleación y su resistencia es considerablemente menor. Este proceso puede minimizarse o prevenirse fabricando latones con menor contenido de cinc, es decir latones con 85% de Cu y 15% de Zn, o cambiando a aleaciones cuproníquel, de 70-90% de Cu y de 10-30% de Ni. Otras posibilidades son modificar el ambiente corrosivo o usar una protección catódica.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 2 se muestra el desarrollo experimental que se llevó a cabo para la presente investigación.

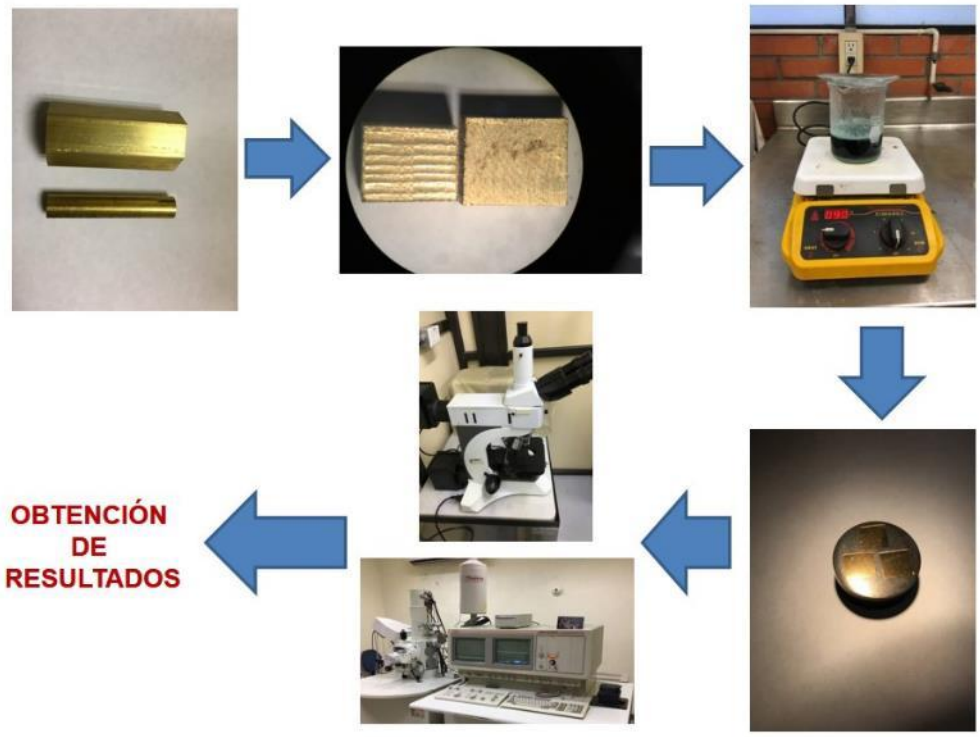


Figura 2. Metodología experimental.

MATERIALES

Se proporcionaron barras de latón de dos empresas, las cuales se clasificaron de la siguiente manera:

ALEACIÓN A

ALEACIÓN B

PREPARACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS

1) Se llevó acabo el corte de las barras como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Barras de latón proporcionadas para el estudio.

2) Se realizó un maquinado de las barras una vez cortadas para tener probetas cuadradas de 1cm x 1cm de las secciones longitudinal y transversal como se muestra en la Figura 4.

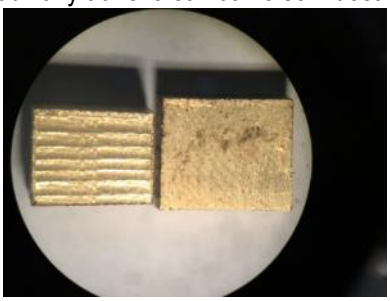


Figura 4. Probetas de latón cuadradas de 1cm x 1cm de las secciones longitudinal y transversal.

3) Se montan las probetas en resina epóxica, cuyas superficies de prueba que se expondrán al proceso de descincificación se deben pulir con lija de diferentes grados de grano, terminando con una lija de grado 600.

4) Las muestras de prueba (probetas) se colocan en un vaso que contiene una solución de cloruro de cobre (II) (Disolver 12,7 g de cloruro de cobre (II) dihidratado ($CuCl_2 \cdot 2H_20$) en agua desionizada y completar el volumen a 1 000 ml) [2], de modo que las superficies de prueba sean verticales y al menos 15 mm por encima del fondo del vaso de precipitados, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Vaso con cloruro de Cobre II conteniendo las muestras montadas en resina epóxica a 75°C de temperatura.

5) El vaso de precipitados que contiene las muestras de prueba se coloca en una parrilla, cuya temperatura se debe mantener a 75 °C ± 5 °C durante 24 horas.

6) Finalmente una vez transcurridas las 24 horas se sacan las probetas de la solución, se enjuagan con agua destilada y se secan con aire a presión y se liberan de la resina epóxica y se montan ahora en baquelita conductora, para llevar a cabo las mediciones de los espesores de la disolución del zinc se realiza mediante microscopía óptica y electrónica de barrido en un microscopio electrónico de barrido como el que se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación en la Figura 7 se muestran las imágenes tomadas en el microscopio óptico y de barrido de la sección transversal y longitudinal de las aleaciones A y B, donde se puede apreciar claramente una zona de ataque del Cloruro de Cobre II sobre las muestras de latón lo cual indica que existe una disolución del Zinc, llevándose a cabo la descincificación de las mismas.

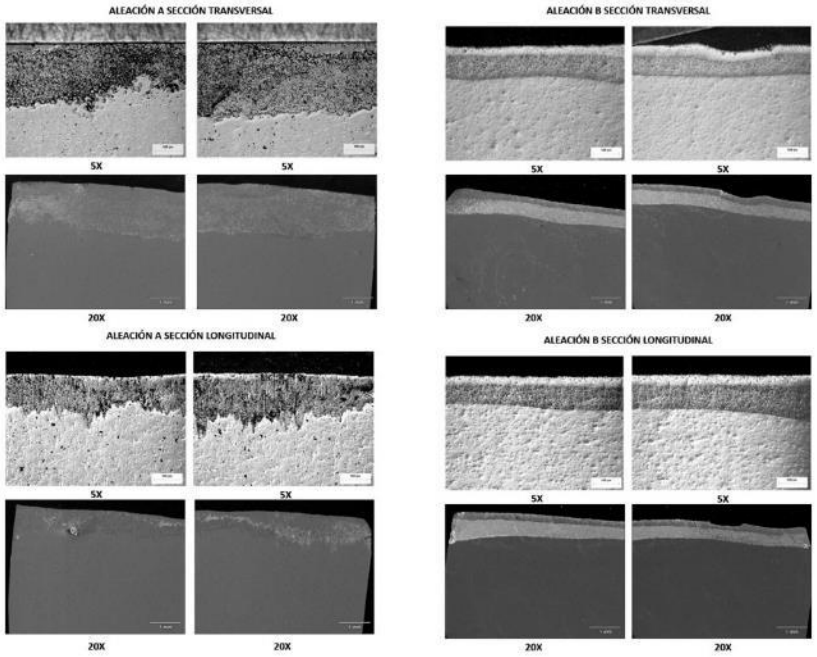


Figura 7. Imágenes en el microscopio óptico y de barrido (MEB) de la sección transversal y longitudinal de las aleaciones A y B.

En la Figura 8 se muestran las micrografías obtenidas en el microscopio electrónico de barrido (MEB), en las cuales mediante un software acoplado al equipo es posible medir el espesor de la disolución del zinc en la superficie de las muestras, obteniendo un valor a través de un promedio de los valores obtenidos con cada una de las lecturas realizadas y reportados en la Tabla 1.

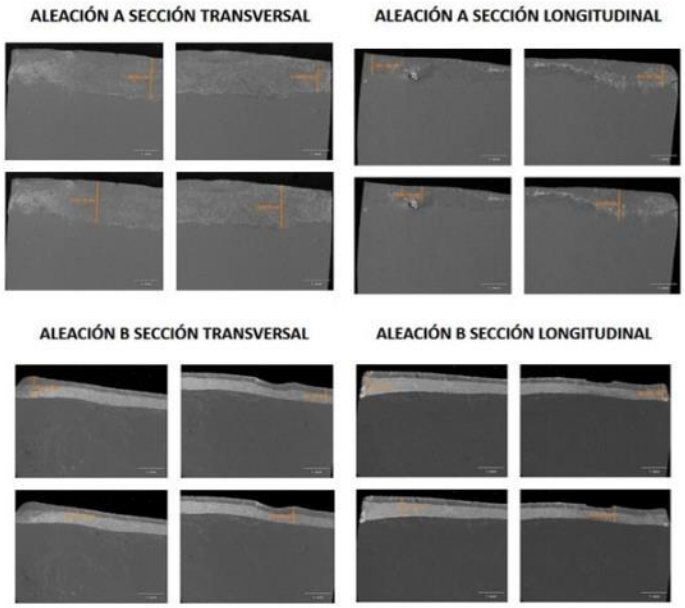


Figura 8. Micrografías de la sección transversal y longitudinal de las aleaciones A y B obtenidas por MEB para medir la profundidad.

Tabla 1. Profundidad o espesor promedio de desincificación.

Aleación	Profundidad media de descincificación, µm (máx.) Sección Transversal	Profundidad media de descincificación, µm (máx.) Sección longitudinal
ALEACION A	1.39825 mm	758.94111 µm
ALEACION B	647.3494 µm	649.90775 µm

CONCLUSIONES

Es posible determinar el espesor de la disolución del zinc en aleaciones de latón con el fin de proponer un método de estandarización de las mismas, para que la corrosión o disolución del zinc (descincificación) no afecte las propiedades de dichas aleaciones en alguna aplicación práctica donde sean expuestas en aguas ácidas o alcalinas.

REFERENCIAS

[1] https://industriapedia.com/que-es-descincificacion/

[2] Norma Internacional ISO 6509-1:2014, Corrosion of metals and alloys -- Determination of dezincification resistance of copper alloys with zinc -- Part 1: Test method.

DISEÑO DE SISTEMAS DE FILTRADO BASE MATERIALES POROSOS MODIFICADOS CON CERÁMICOS HÍBRIDOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES OLEOS

Sofía Vianney Zacaríaz Martínez[1], Santa Margarita Méndez Luna[1], Mercedes Salazar Hernandez[2], Juan Manuel Mendoza Miranda[1], Enrique Elorza Rodríguez [2], María del Rosario León Reyes[1], Carmen Salazar Hernández[1*]

[1]Instituto Politécnico Nacional-UPIIG, [2]Universidad de Guanajuato-DI Campus Guanajuato
Departamento de Minas, Metalurgia y Geología.
msalazarh@ipn.mx

RESUMEN

La calidad del agua es esencial para la existencia de todo ser vivo, ya que se requiere en casi todos los aspectos de la vida. Sin embargo, se sabe que el suministro del agua es finito y está siendo amenazado por diferentes tipos de contaminación, además de los ciclos de sequía prolongada. Entre los contaminantes más persistentes, se encuentran las sustancias oleosas (aceites, grasas, lubricantes, gasolina, etc) que se mezclan con el agua formando emulsiones que contaminan volúmenes altos del líquido. Por lo que, en esta propuesta se buscó diseñar sistemas de filtración empleando membranas obtenidas a partir de la modificación de poliuretano con cerámicos híbridos hidrofóbicos base SiO2/PDMS empleando la metodología sol-gel para la síntesis del cerámico; se utilizó TEOS como precursor de la fase orgánica y DMS-15 (grupo funcional metilo) y PDS (grupo funcional metilo/fenilo) como modificadores orgánicos variando su concentración del 10 hasta el 40% en peso. Los filtros modificados se caracterizaron por espectroscopia de infrarrojo y se evalúo el carácter hidrofóbico a partir de la medición del ángulo de contacto. Por otra parte, se determinó la capacidad de remoción de vegetal y aceite observando un excelente desempeño en la remoción de estos contaminantes para concentraciones bajas (1 mL aceite en 10mL de agua) además, se probaron filtros cilíndricos con diámetro de 24 mm y 96 mm y membranas rectangulares con área de 400 mm^2 y 70 mm de altura. Los filtros mostraron la remoción total de los contaminantes; teniendo diferente capacidad de carga de acuerdo con el porcentaje de PDMS en la estructura del cerámico y el grupo funcional en la cadena del siloxano (metilo o metil/fenil). De acuerdo con los resultados obtenidos; el grupo funcional fenilo tiene una mejor capacidad de remoción para los tres contaminantes debido a su incremento en el carácter hidrofóbico.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de sistemas adsorbentes como medio para la remoción de contaminantes es una alternativa eficiente que ha permitido la eliminación de diferentes tipos de contaminantes controlando la interacción entre sorbato y adsorbente. En este sentido, la sílice mesoporosa es un sólido inorgánico estructurado con una gran cantidad de poros teniendo una alta capacidad de adsorción [1-3], en estos materiales se han adsorbido eficientemente diferentes tipos de contaminantes que van desde metales pesados [4], colorantes [5], compuestos clorados [6], pesticidas[7]; observando una buena a excelente capacidad de remoción.

Por otra parte, una ventaja de la sílice es su fácil funcionalización de la superficie; donde como se indica en la Figura 1 a partir de reacciones con los grupos silanoles presentes en la superficie se pueden llevar a acabo reacciones de condensación con alquil-alcoxisilanos logrando la adición de diferentes tipos de moléculas [8,9], que van desde grupos amino, tiol, alquilo, hasta proteínas, azucares, encimas y reconocedores moleculares [10] por lo que se ha empleado como adsorbentes selectivos en diferentes áreas, como son la metalurgia [11], la farmacéutica [12], la ambiental [13-15]; así como en la adsorción de aceites vegetales [16,17].

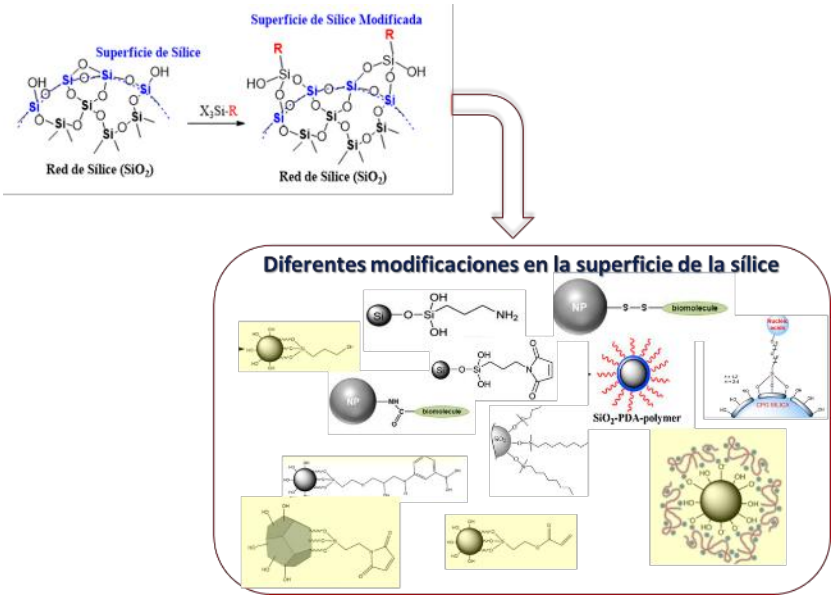


Figura 1. Modificación de la superficie de la sílice con diferentes grupos funcionales [8,9]

PARTE EXPERIMENTAL

Modificación de la Membrana de Filtración.- Se emplearon dos geometrías para realizar la modificación de las esponjas y creación de las membranas de filtración; la circular (24 y 9.6 mm de diámetro con 30 mm de altura) los cuales se emplearon como membranas de filtración adaptadas a sistemas de filtración con el matraz kitazato y una rectangular (400 mm^2 de área con 70 mm de altura). Las esponjas fueron lavadas con agua des-ionizada en un baño de ultrasonido por 10 min para eliminar polvo y suciedad; posteriormente se secan a 80ºC por 24 hr. Los cerámicos modificados se sintetizaron de acuerdo con la metodología sol-gel reportada por C. Salazar-Hernández y colaboradores [9] donde se emplea como precursor de la sílice, tetra-etil-orto-silicato (TEOS; Aldrich 98% pureza) como catalizador de poli-condensación el dibutil-dilaurato de estaño (DBTL; Aldrich 90% pureza). La fracción orgánica en el cerámico se incorpora al adicionar diferentes porcentajes (10-40% en peso) de polidimetilsiloxano; tres cadenas de siloxano fueron empleadas (véase Figura 4b). DMS-15 (polidimetilsiloxano hidroxi terminado, Gelest; 16-32 cst) que proporciona solo grupos metilos como grupo funcional, el co-polímero difenilsiloxano-dimetilsiloxano (PDS; Gelest; 40-80 cst) que inserta los grupos funcionales fenilo y metilo; además se utilizó el polidimetilsiloxano-amino-propil terminado (DMS-A11; Gelest; 10-15 cst) que proporciona los grupos funcionales metil y amino al cerámico. La Tabla 1 resume las diferentes concentraciones empleadas para la modificación de las esponjas; la cual se realizó por inmersión simple introduciendo la esponja a la solución sol dejando que esta se impregnara por un tiempo de 1 min y posteriormente se dejó escurrir y finalmente secar por 24 hr a 80ºC.

Tabla 1. Porcentaje de Composición para los Recubrimientos de SiO2/DMS-15 Concentraciones de reactivos empleados para la modificación de las esponjas (membranas de filtración).

	TEOS (g)	DMS-15 (g)	DBTL (g)
SiO2/DMS-CH3-1	10	1	0.1-0.2
SiO2/DMS-CH3-2	10	2	0.1-0.2
SiO2/DMS-CH3-4	10	4	0.1-0.2
	TEOS(g)	PDS (g)	DBTL
SiO2/PDS-1	10	1	0.1-0.2
SiO2/PDS-2	10	2	0.1-0.2

SiO2/PDS-4	10	4	0.1-0.2
	TEOS (g)	DMS-A11 (g)	DBTL (g)
SiO2/DMS-A-1	10	1	0.1-0.2
SiO2/DMS-A-2	10	2	0.1-0.2
SiO2/DMS-A-4	10	4	0.1-0.2

Caracterización de los Recubrimiento

Espectroscopía de infrarrojo.- La modificación de la membrana con el cerámico se verifica con espectroscopía de infrarrojo empleando un equipo ATR-FTIR thermo Scientific Nicolet iS10 midiendo el promedio de 16 scans en una ventana espectral de 4000-600 cm^{-1} con resolución de 4 cm^{-1}.

Ángulo de Contacto.- El ángulo de contacto para la esponja y esponja-modificada se determinó empleando gota de agua destilada de 1 µL. La Fotografía se obtiene con la cámara convencional de celular y se medirá el ángulo de contacto con el software libre IC-Measure; para ello se deberá trazar la base horizontal como referencia.

Capacidad de Remoción (Columna de Filtración).- Dos sistemas de filtración fueron propuestos; uno a escala laboratorio donde se adapta la membrana de filtración a un matraz kitazato y la filtración del agua mezclada con diferente volumen de contaminante que se suspende hasta formar la emulsión (Tabla 2) y se llevó a cabo filtrando con vacío. Al agua se adiciona colorante vegetal; dando una coloración azul para lograr identificar en el agua el aceite vegetal (transparente), gasolina y diésel. Los volúmenes de contaminante no removidos pasan por el filtro, se dejan decantar y se mide de acuerdo con el volumen con micro-pipeta, probeta volumétrica.

Tabla 2. Emulsiones empleadas para las pruebas de filtración

	Volumen de Agua (mL)	Volumen de Aceite Vegetal (mL)	Volumen de Aceite de Motor (mL)
Emulsión 1	10	0.5	0.5
Emulsión 2	10	1	1
Emulsión 3	100	3	3
Emulsión 4	100	6	6

RESULTADOS

Modificación de la Membrana con los cerámicos SiO2/PDMS

La Figura 2a muestra los espectros para el cerámico de SiO2/DMS-CH3 con las diferentes concentraciones de cadena siloxano; en la Figura 6a' se muestran ampliaciones para la región del agua fisisorbida a 3400cm^{-1}; donde se aprecia esta señal solo para el recubrimiento con el 10% de DMS-12; a 2900 cm^{-1} se observan las señales correspondientes para los grupos C-H de los metilos y metilenos. La unión entre el clúster de sílice formados a partir del TEOS con la cadena de PDMS se identifica con la señal Si-CH3; del Si-D correspondiente a la cadena polisiloxano a 1260 cm^{-1} y 786 cm^{-1} como señales muy intensas y a 864 cm^{-1} como una señal ancha de intensidad moderada por otra parte el grupo Si-O-Si de la red de sílice se identificó a 1010 cm^{-1} y con señales de intensidad moderada entre 698-661 cm-1; para el cerámico con el 10% de DMS-12 se forman forma otro tipo de clúster de silicio que se identifican como dos hombros anchos a 1200 y 1160 cm^{-1}. Estructura similar para el cerámico SiO2/DMS-A (grupo amino; Figura 2b) es observado; sin embargo, el grupo amino de la cadena siloxano es incrustado en le estructura observando el doblete del grupo -NH2 a 3360 cm^{-1} como señales poco intensas para la concentración del 20 y 40%; al 10% se empalma la

señal con la de agua fisisorbida. La cadena lineal siloxana se observa con la señales del Si(D) a 1260 cm^{-1}, 841 cm^{-1} y 791 cm^{-1}; se forman dos clúster diferentes de sílice; observando a 1018 cm^{-1} la señal para Si-O-Si y un solo hombro a 1178 cm^{-1} (Figura 2b'). Para la cadena PDS (co-polimero dimetilpolisiloxano y difenilpolisiloxano; véase Figura 2c) en concentraciones del 10 y 20% se presenta agua fisiorbida a 3400 cm^{-1} que se elimina con la concentración del 40%; sin embargo, en todas las concentraciones se identificó la señal a 3600 cm-1 que corresponde a silanoles libres; por otra parte los grupos -CH3 se identificaron como triplete a 2960-2840 cm^{-1}; mientras que el –C-H del anillo aromático a 3070 cm^{-1} (cuatriplete). En cuanto a la cadena lineal del PDS; esta se idéntico el Si(D) a 1260 cm^{-1}, 843 cm^{-1} y 791 cm^{-1}; similar a los otros recubrimientos, Si-O-Si se observa a 1010 cm^{-1} y un hombro a 1180 cm^{-1} que desaparece para la concentración del 40%. Por otra parte el Si unido al grupo fenil se encuentra con señales intensas a 762cm^{-1}, 717cm^{-1} y 706 cm^{-1} (véase Figura 2c') [18].

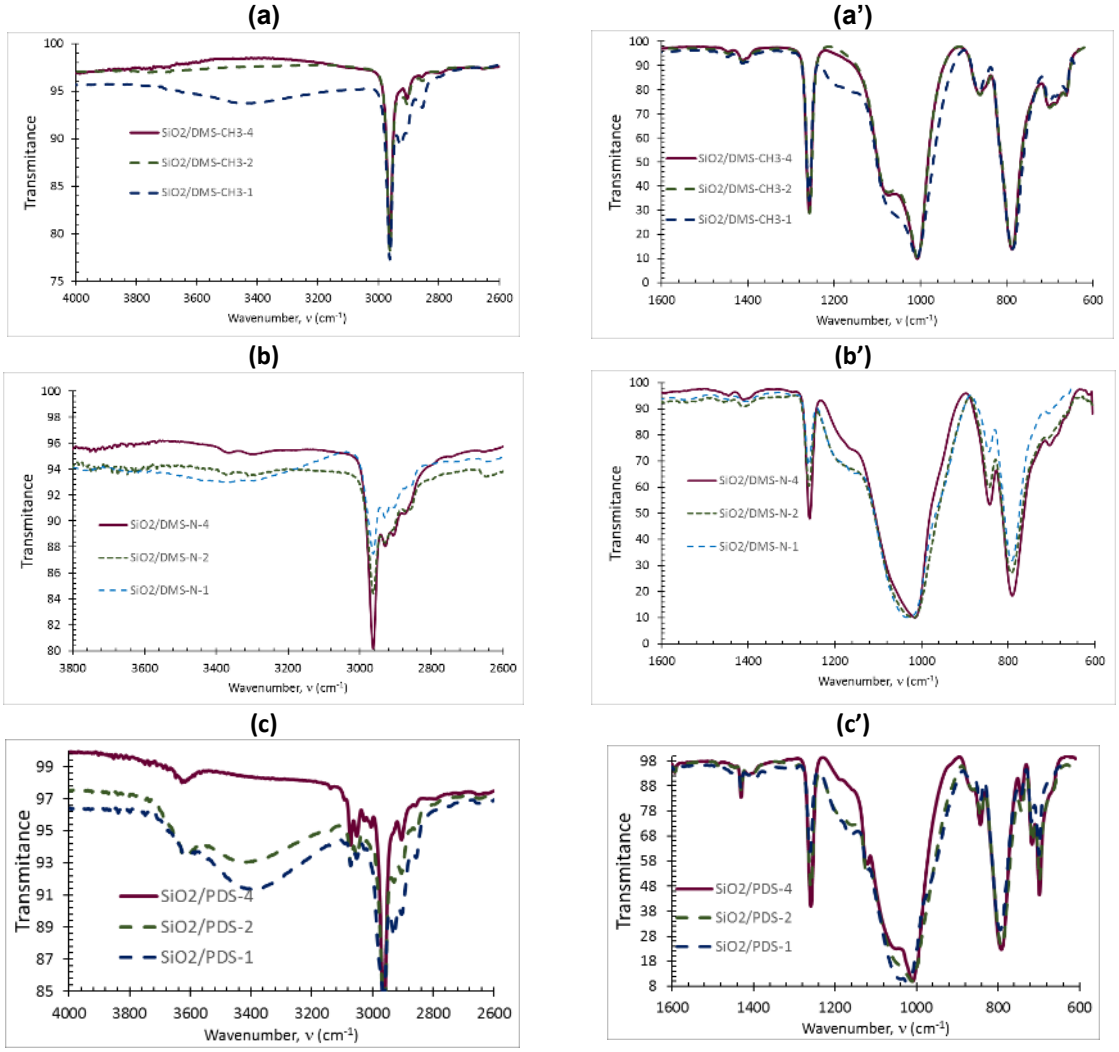


Figura2. IR-FT Espectroscopia (a) SiO_2/DMS-CH_3 (b) SiO_2/DMS-N (c) SiO_2/PDS

EL ángulo de contacto se evalúa para determinar el grado de hidrofobicidad que se genera en la membrana; la Figura 3a muestra el comportamiento para los tres tipos de modificadores; donde se observa comportamientos superhidrofóbicos con ángulos de contacto que van de 136-157°; mientras que la esponja sin modificar presenta un comportamiento hidrofílico con ángulo □ de 49°. La Figura 3b se muestra el cambio en la gota, observándose el comportamiento superhidrofóbico; por otra

parte, se tiene un incremento lineal del ángulo □□con el incremento del porcentaje de cadena siloxano en la estructura de los cerámicos (Figura 3c).

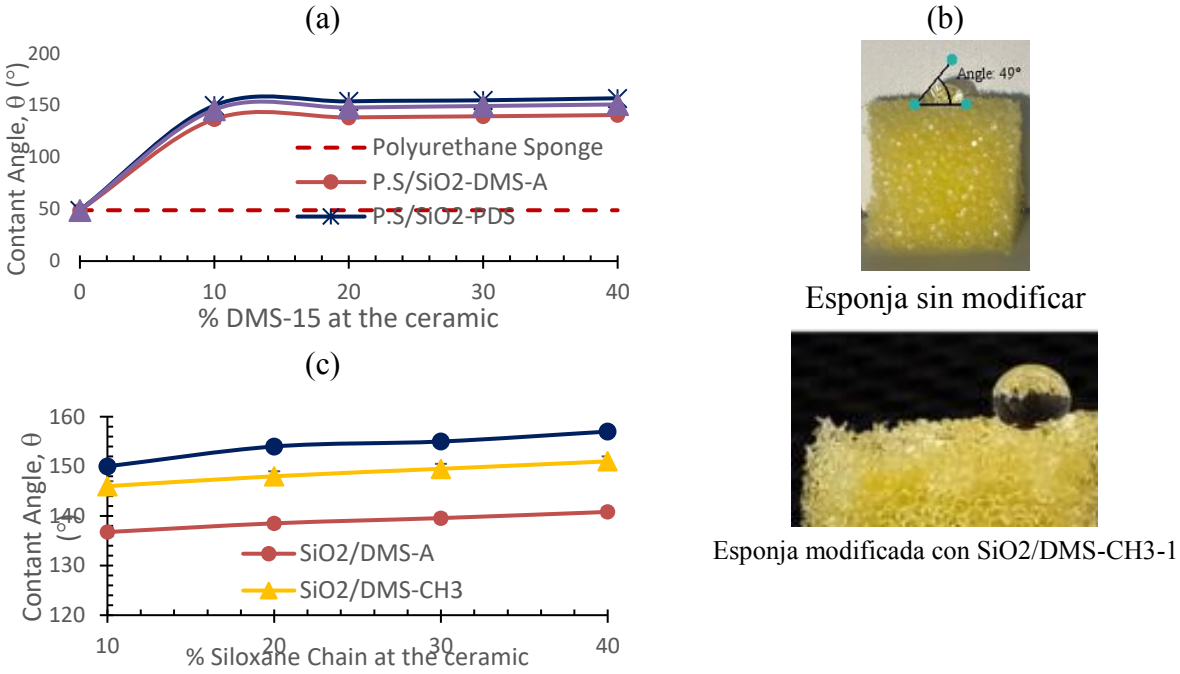


Figura 3. Carácter hidrofóbico de las membranas modificadas (a) Comparación de las membrana modificada con los cerámicos híbridos y la membrana sin modificar (b) Cambio en el comportamiento hidrofílico-hidrofóbico visto con la gota de agua (c) Comportamiento lineal en el incremento de □ con respecto al contenido de cadena siloxano en la membrana modificada.

Pruebas de Filtración en Prototipo de Laboratorio: filtración a Vacío

Las filtraciones a vacío se llevaron a cabo haciendo la emulsión de los contaminantes con diferente contenido en volúmenes. Las filtraciones se realizaron sin y con vacío obteniendo remociones cuantitativa (>99%) de los contaminantes para relaciones bajas de volúmenes (0.5 y 1mL de hidrocarburos) hasta que se alcanza la saturación de esponja o membrana. Las Figura 4 muestran el porcentaje de remoción cuantificada en las diferentes membranas modificadas; teniendo la mejor capacidad de remoción para las membranas modificadas con el grupo fenilo; en general mayor remoción es observada conforme se incrementa el porcentaje de cadena siloxana en las membranas.

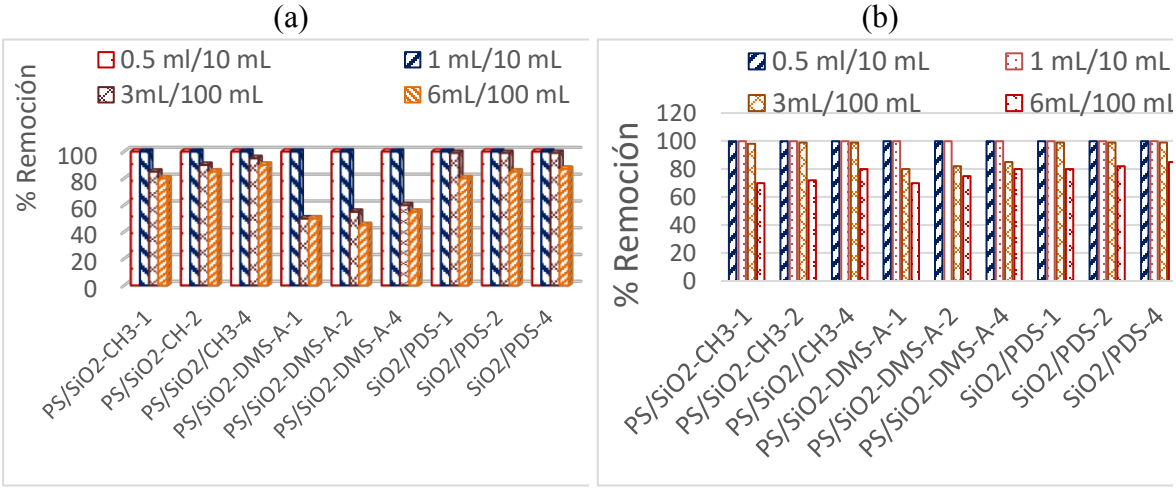


Figura 4. Capacidad de Remoción en las membranas modificadas con los cerámicos híbridos (a) Aceite Vegetal (b) Aceite de Motor

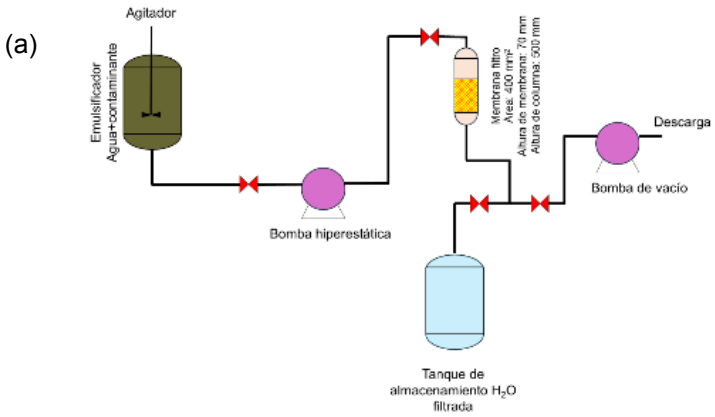
Las membranas modificadas tienen una excelente capacidad de remoción observando adsorción y no fisisorción. Aun cuando se aplica el vacío el contaminante queda retenido en la membrana de filtración y solo una pequeña cantidad (fisisorbida) se puede filtrar. La Figura 5 muestra las membranas después de las filtraciones; donde la esponja sin modificar retiene por fisisorción alrededor de 10-20% del aceite.



Figura 5. Membranas después de la filtración de los contaminantes utilizando la relación de 6 mL/100mL agua (a) aceite vegetal (b) aceite de motor2

Diseño del Dispositivo de Filtración en CAD (Columna de Filtración)

La Figura 6a muestra un plano propuesto para la construcción de la columna de filtración; la cual requiere de un recipiente que contiene el agua contaminada adaptada de un sistema de agitación; la agitación es necesaria debido a la cantidad de contaminante adicionados a los volúmenes de agua; cabe hacer mención que en condiciones reales la cantidad de éstos es baja y no requieren la agitación para suspender el contaminante (emulsión). El flujo empleado en la columna de filtración fue constante de 4.44 mL/s; se probaron dos concentraciones de 1 mL de contaminante en 200 mL de agua (0.5%volumen) y 6 mL en 200 mL agua (3%volumen). La Figura 6b muestra el sistema de filtración empleado; los resultados son similares a los obtenidos en la filtración con kitazato; cuantitativa para ambas concentraciones; en la siguiente liga se puede observar el proceso de filtración y adsorción del contaminante en la membrana de filtración. (https://drive.google.com/file/d/1L7Y01dg7oMuUmQPwUBcog9V_k8IBd_DJ/view?usp=drive_link



(b)

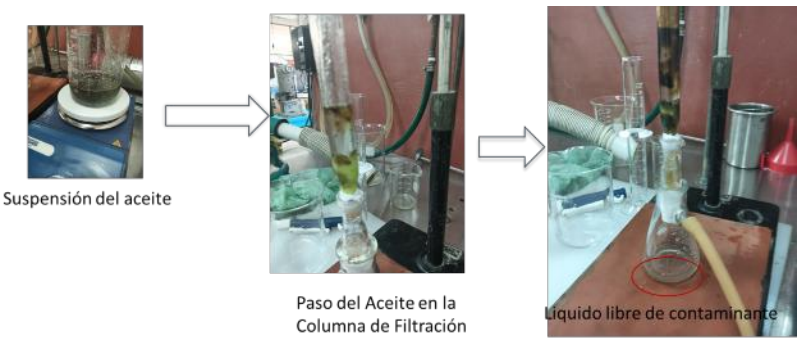


Figura 6. (a)Diseño CAD del sistema de filtración- Primer Escalamiento (b) Filtración de aceite de motor en SiO2/PDS-2

CONCLUSIONES

De acuerdo con el carácter hidrofóbico se incrementa la capacidad de remoción siendo mayor para el cerámico con el grupo fenilo, seguido del metilo y la menor capacidad de remoción se determinó para el grupo amino. Todas las membranas presentaron remoción por fisisorción; donde el contaminante puede ser removido casi en su totalidad con la filtración al vacío. Sin embargo, una cantidad de contaminante queda atrapado en la membrana debido a su retención por adsorción; lo cual no se observa en la esponja sin modificar. En ambos tipos de filtración se requiere que la membrana cubra todo el espacio para evitar que por los laterales se filtre el contaminante sin tener contacto con el adsorbente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo financiero a través del proyecto **SIP-2024-2847.**

BIBLIOGRAFÍA

1) Optimización del tratamiento de aguas residuales industriales en México: regulación más estricta y escases de agua. Recuperado 20/02/2024.
2) https://es.genesiswatertech.com/blog-post/optimizing-industrial-wastewater-treatment-in-mexico/
3) Flores D, Almeida C.M.R, Gomes C.R, Balula S.S, Granadeiro C.M, Tailoring of mesoporous silica base materials for enhanced water pollutants removal, Molecules (2023) 28(10) 4038. https://doi.org/10.3390/molecules28104038
4) Grozdov D, Zincovscaia I, Mesoporous materials for metal-laden wastewater treatment, Materials (Basel) (2023) 16(17) 5864. doi: 10.3390/ma16175864
5) Ulfa M, Prasetyoko D, Trisunaryanti W, Bahruji H, Fadila Z.A, Sholeha N.A, The effect of gelatin as pore expander in green synthesis mesoporous silica for methylene blue adsorption, Scientific Reports (2022) 12, 15271. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19615-5
6) Nicola R, Muntean S.G, Nistor M.A, Putz A.M, Almásy L, Sacarescu L, Highly efficient and fast removal of colored pollutants from single and binary systems, using magnetic mesoporous silica, Chemosphere (2020) 261, 127737. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127737
7) Kong X.P, Zhang B.H, Wang J, Multiple roles of mesoporous silica in safe pesticide application by nanotechnology: A review, Journal of Agricultural and Food Chemistry (2021) 69 (24) 6735-6754. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01091
8) Ghosh S, Goswami S.S, Mathias L.J, Surface modification of nano-silica with amides and imides for use in polyester nanocompositest, Journal of Chemestry A (2013) 1,6073-6080. DOI: 10.1039/c3ta10381a.

9) Tian J, Zhang H, Liu M, Deng F, Huang H, Wan Q, Li Z, Wang K, He X, Zhang X, Wei Y, A bioinspired strategy for surface modification of silica nanoparticles, Applied Surface Science (2015) 357 Part B, 1996-2003. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.171
10) Kong X.P, Zhang B.H, Wang J, Multiple roles of mesoporous silica in safe pesticide application by nanotechnology: A review, Journal of Agricultural and Food Chemistry (2021) 69 (24) 6735-6754. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01091
11) Salazar-Hernández M, Salazar-Hernández C, Elorza-Rodr{iguez E, Mendoza-Miranda J.M, Puy-Alquiza M.J, Miranda-Aviles R, Rodríguez-Rodríguez C, Using of green silica amine-Fe3O4 modified from recovery Ag(I) on aqueous system, Silicon (2023) https://doi.org/10.1007/s12633-023-02779-8.
12) Kucinski K, Jankowska-Wajda M, Ratajczak T, Balabanska-Trybus S, Schulmann A, Maciejewski H, Chmielewski M, Hreczycho G, Silica surface modification and its application in permanent link with nucleic acids, ACS-Omega (2018) 6, 5931-5937. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00547
13) Xu P, Nan Z, Facile synthesis of magnetic hollow mesoporous silica spheres with assembled shell by nanosheets as an excellent adsorbent, Materials Letters (2018) 218, 209- 212. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.022
14) Song Y, Ding Y, Wang F, Chen Y, Jiang Y, Construction of nano-composites by enzyme entrapped in mesoporous dendritic silica particles for efficient biocatalytic degradation of antibiotics in wastewater, Chemical Engineering Journal (2019) 375, 121968. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.121968
15) Abdulazeez I, Alrajjal A.S, Ganiyu S, Baing N, Salhi B, AbdElazem S, Facile engineering of mesoporous silica for the effective removal of anionic dyes from wastewater: Insights from DFT and experimental studies, Heliyon (2023) 9(11) e21356. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21356
16) Salazar-Hernández C, Salazar-Hernández M, Hernández-Arias LJ, Mendoza-Miranda J.M, Removal of Oil Pollution in water using hydrophobic silica, Journal of Systematic Innovation (2021) 5(16) 2021, 1-5. DOI: 10.35429/JSI.2021.16.5.1.5.
17) Gómez-López R.V, Salazar-Hernánez M, Moreno-Palemrín J, Salazar-Hernández C, SiO2-PDMS as oil removal system, Journal of technology and Innovation (2022) 9 (24) p.p. 29-35. DOI: 10.35429/JIT.2022.24.9.29.5
18) P.J. Launer (1987) Infrared Analysis of Organosilicon Compounds: Spectra Structure Correlation Silicon Compounds, B. Arkles (Ed.), Gelest Inc, Morrisville, P

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PINÁCULOS UBICADOS SOBRE FACHADAS DE EDIFICIOS DELCENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN

Guillermo Martínez Ruiz[1], Bertha Alejandra Olmos Navarrete[1], Wendy Marlen Conejo Contreras[1], Rodolfo Gaytan Rodríguez[1]

[1]Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
guillermo.martinez@umich.mx, bertha.olmos@umich.mx, wendy.conejo@umich.mx, rodolfo.gaytan@umich.mx

RESUMEN

Se presenta una evaluación del comportamiento sísmico de pináculos, ubicados sobre los muros de fachada de gran parte de los edificios de la Avenida Francisco I. Madero de la ciudad de Morelia, la cual es la avenida principal que atraviesa al centro histórico. Estos elementos no estructurales que fueron construidos con fines ornamentales, se encuentran en su gran mayoría simplemente apoyados sobre la parte superior de muros de fachada de 1 a 3 niveles, sin un sistema de fijación adecuado en su base, por lo que se analiza su estabilidad al vuelco ante terremotos de gran intensidad, ya que por su gran peso propio representan un gran riesgo para las personas que saldrán a la calle durante eventos sísmicos futuros.

INTRODUCCIÓN

Los pináculos son elementos de cantería que en México fueron construidos con fines ornamentales entre los siglos XVI y XIX, los cuales se encuentran en su gran mayoría simplemente apoyados sobre la parte superior de muros de fachada de 1 a 3 niveles en el centro histórico de muchas ciudades patrimonio (Figura 1).

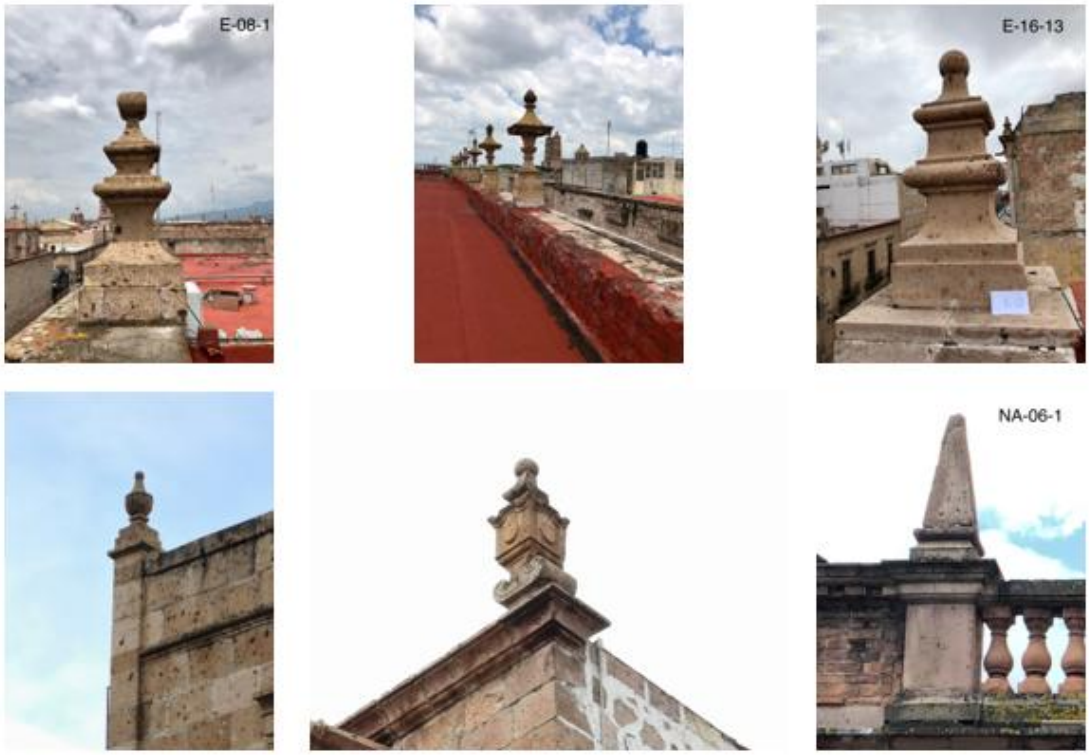


Figura 1. Pináculos sobre muros de fachada en edificios.

Estos elementos no estructurales también en común encontrarlos sobre los muros de templos y en las cornisas de torres campanario, ubicándose en este último caso a mayor altura con respecto a los existentes sobre muros (Figura 2). En realidad, estos elementos vienen del estilo gótico europeo, donde su función era por un lado estilizar la imagen del edificio, así como darle una mayor altura, y por el otro, aportar peso a los contrafuertes para estabilizar los empujes provenientes de las bóvedas a través de los arbotantes. Su forma original era piramidal, sin embargo, fue cambiando en estilos arquitectónicos posteriores siendo en el barroco renacentista más ornamentales que estructurales, decorados con motivos vegetales y adoptando complejas formas geométricas.

Estos remates por su edad y falta de mantenimiento en muchos casos presentan un nivel de deterioro importante, tanto en y entre los sillares que los conforman, así como en su base llegando incluso a carecer de un sistema de fijación adecuado (Figura 3).



Figura 2. Pináculos o remates sobre muros y cornisas de edificios religiosos.



Figura 3. Diferentes tipos de deterioro en pináculos.

En ocasiones se colocaban barra de hierro o acero verticales al centro de los remates o bien grapas de hierro para intentar unir los sillares entre sí, lo cual en muchos casos ha resultado inadecuado debido a la incompatibilidad entre los dos materiales (Figura 4), que produce desintegración de la cantería debido a la corrosión del hierro o acero. Resulta entonces relevante la posibilidad de desplazamiento o "Rocking" entre los sillares o en la base de los pináculos, por lo que en el presente trabajo se analiza su estabilidad al vuelco ante terremotos de gran intensidad, ya que por su gran peso propio representan un gran riesgo para las personas que de manera instintiva saldrán a la calle para intentar resguardarse durante la ocurrencia de eventos sísmicos futuros, lo cual es fácil de imaginar al observar la Figura 5.



Figura 4. Diferentes tipos de deterioro en pináculos.



Figura 5. Ubicación de pináculos sobre los muros de fachada del Palacio de Gobierno de la ciudad de Morelia.

ESTRUCTURAS EN ESTUDIO

Derivado de una extensa campaña de campo realizada con el apoyo de estudiantes de la Maestría en Ingeniería en el área de Estructuras de la UMSNH, se obtuvo información de patologías y geometría de 26 pináculos (Figura 6), ubicados sobre muros de fachada de edificios localizados sobre la Avenida Francisco I. Madero de la ciudad de Morelia, la cual es una vialidad que atraviesa la ciudad de oriente a poniente, pero en la cual los edificios históricos se ubican mayormente en la zona de monumentos. Para el presente trabajo se utilizó como banco de pruebas tres pináculos tipo, los cuales se muestran en la Figura 7.

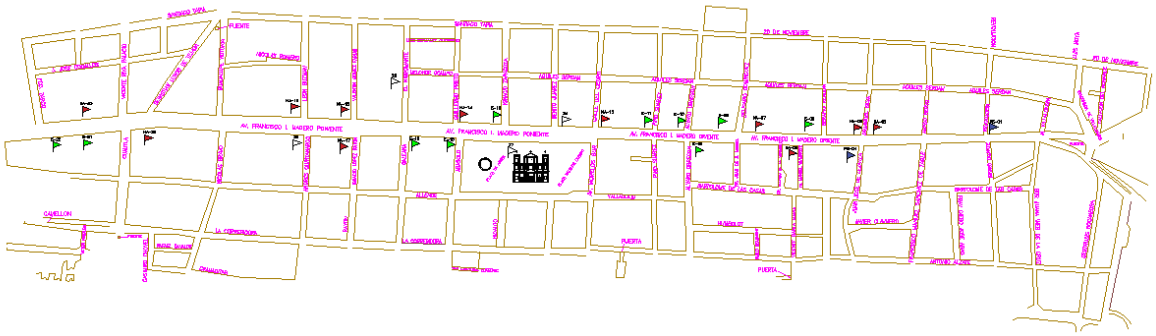


Figura 6. Localización de pináculos evaluados sobre la Avenida Francisco I. Madero de Morelia.

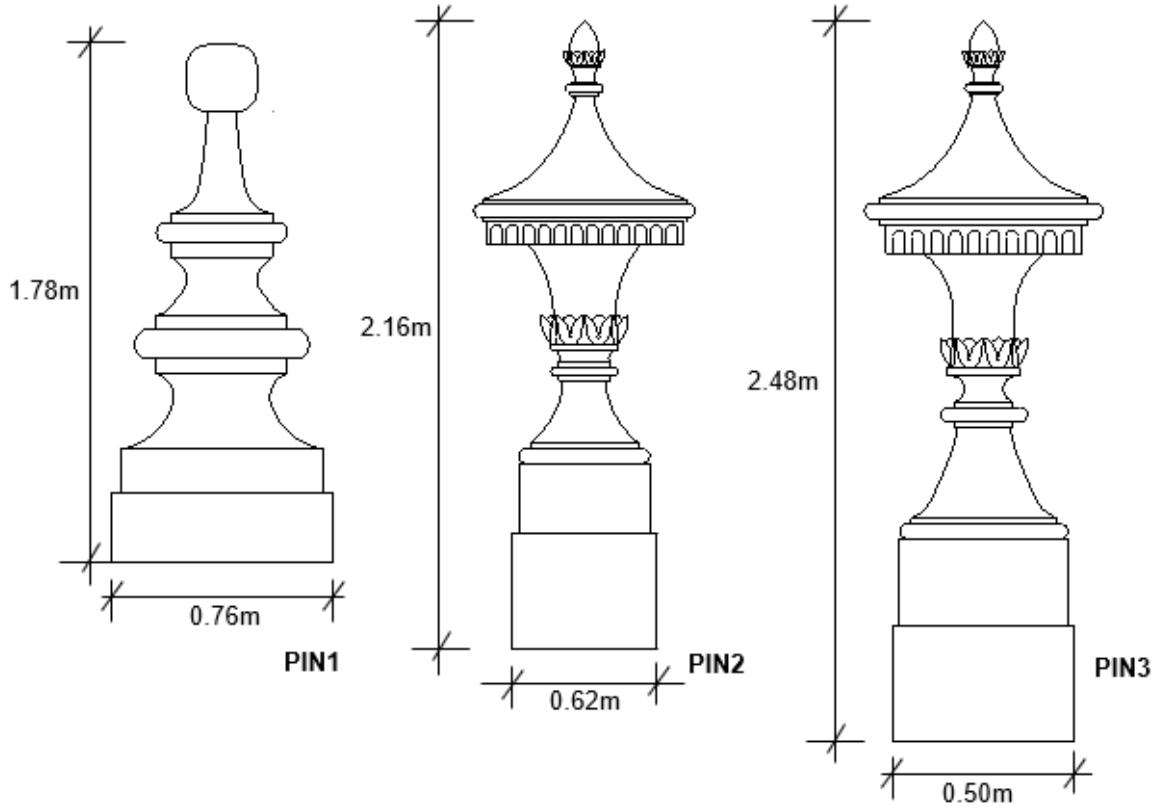


Figura 7. Pináculos evaluados estructuralmente.

El peso aproximado es de 565 kilogramos para el pináculo PIN1, 750 kilogramos para el PIN2 y 885 kilogramos para el PIN3. Para el análisis se consideró que los tres remates están apoyados sobre un muro de 10.70 metros de altura, la cual se corresponde aproximadamente con un promedio de dos niveles, y los anchos propuestos para los muros fueron los mismos de las bases de los pináculos, es decir, 0.76 metros para PIN1, 0.62 metros para PIN2 y 0.50 metros para PIN3.

MODELO NUMÉRICO

Se construyeron modelos bidimensionales de elementos finitos elásticos lineales tanto para el muro como para los pináculos. Los muros se modelaron considerando que tienen un ancho unitario y los pináculos un ancho igual al equivalente al peso propio de los mismos. Los muros fueron empotrados en su base y los pináculos fueron conectados a los nodos del extremo superior de los muros. Las mallas de elementos finitos se muestran en la Figura 8.

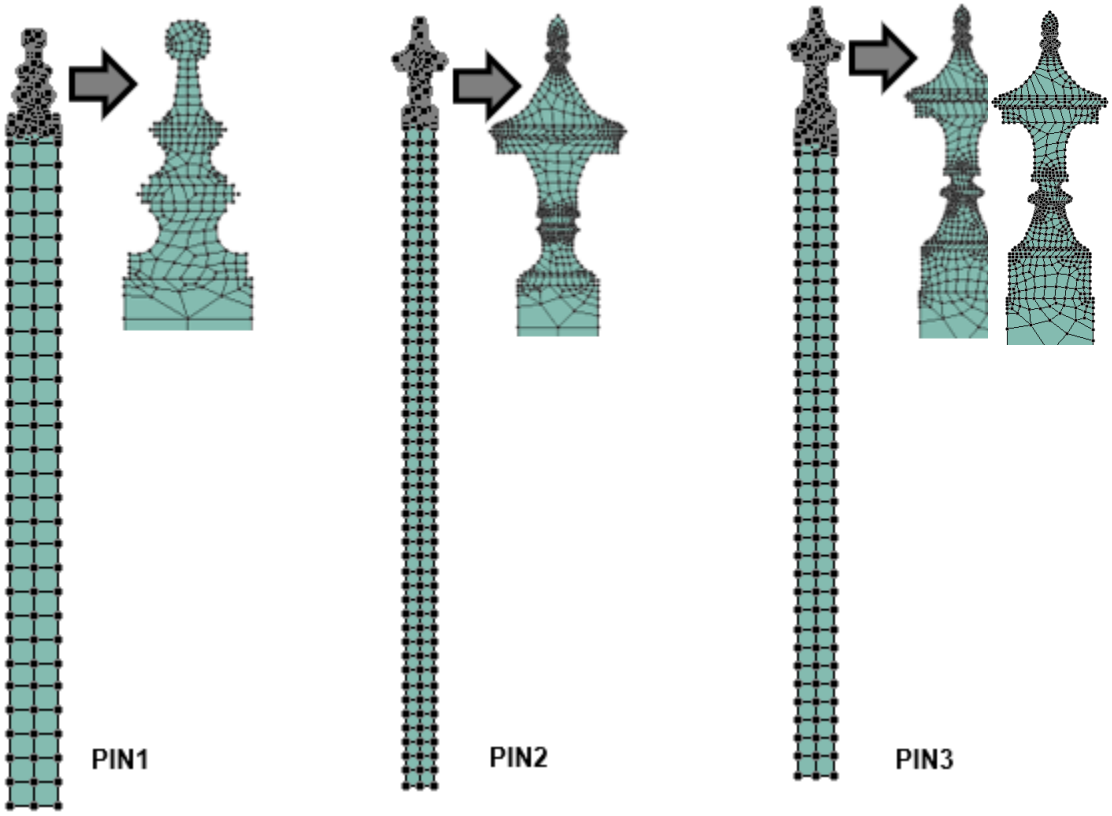


Figura 8. Mallas de elementos finitos de los pináculos sobre muros evaluados estructuralmente.

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Las tres estructuras descritas fueron sometidas a la combinación de su peso propio y el sismo actuando horizontalmente a los modelos, efecto que se traduce en poder obtener el comportamiento fuera del plano de los muros y el posible vuelco hacia el exterior de los pináculos. Debido a que se llevó a cabo un análisis elástico lineal de elementos finitos, el efecto de “rocking” o giro sobre la base de los remates no podrá ser visualizado debido a la continuidad en los nodos propias de este tipo de modelos, sin embargo, puede estimarse a partir de los desplazamientos laterales resultantes, así como de los valores de esfuerzos principales de tensión en las zonas críticas.

De acuerdo a las técnicas clásicas de estabilidad presentes en tratados antiguos, se utilizará como valor límite de desplazamiento una distancia igual a una tercera parte de la base de los muros sobre los que se apoyan los pináculos, y en cuanto a esfuerzos permisibles, se utilizará un valor

conservador de 17kg/cm^2 a compresión (Duran, 2025) y para los esfuerzos de tensión un esfuerzo de 0.85kg/cm^2 que equivale a un 5% del esfuerzo admisible a compresión (PIET70, 1970).

Análisis sísmico

Se llevaron a cabo análisis modales espectrales en las tres estructuras considerando un espectro elástico de diseño obtenido a partir del peligro sísmico del sitio, incorporando los efectos del sitio a partir de funciones de amplificación obtenidas mediante la Red Sísmica Nicolaita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Jara *et al.*, 2025). El espectro elástico empleado (Figura 9) presenta un valor máximo de aceleración en su meseta igual a 3.70m/s^2 y fue construido para un periodo de retorno de 475 años y un porcentaje de amortiguamiento crítico del 5% de manera conservadora.

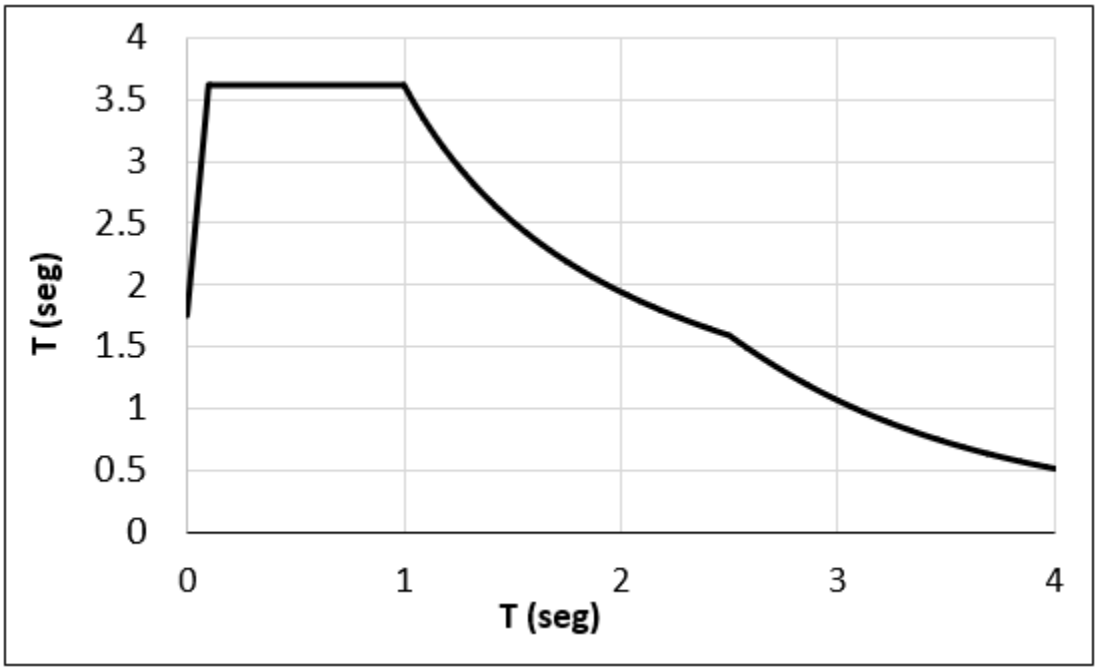


Figura 9. Espectro elástico para un periodo de retorno de 475 años.

RESULTADOS

Desplazamientos laterales

Los desplazamientos laterales máximos obtenidos fueron de 31.8cm para la estructura PIN1, 65.6cm para la PIN2 y 36cm para la PIN3, los cuales en todos los casos exceden de manera significativa una distancia igual al tercio del espesor de la base, es decir, 25.3cm para PIN1, 20.67cm en el caso de la estructura PIN2 y 16.67cm para la PIN3 (Figura 10).

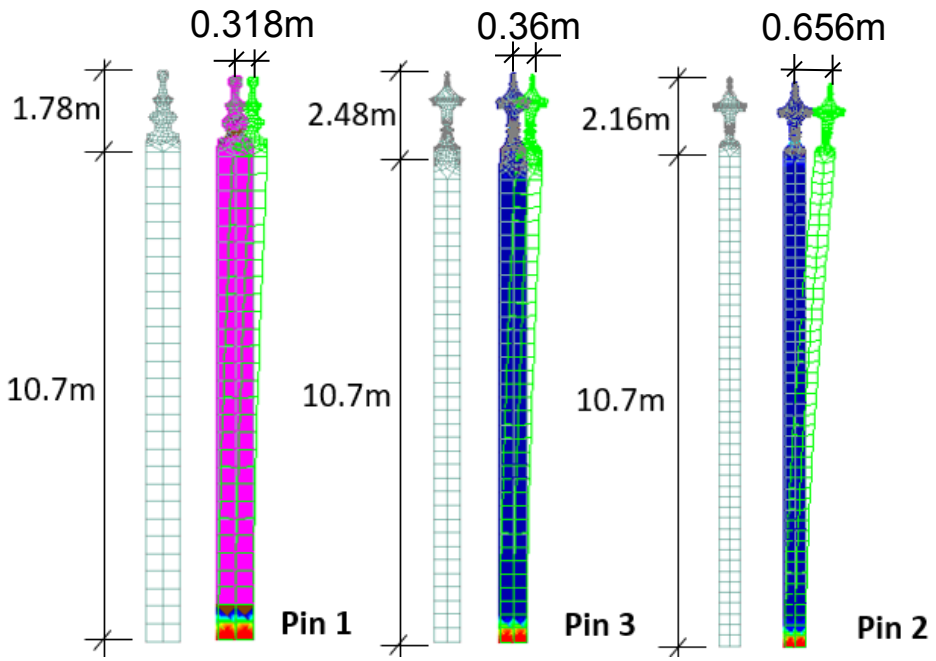


Figura 10. Desplazamientos laterales máximos ante el sismo con recurrencia de 475 años.

Esfuerzos en los pináculos

Para las tres estructuras se obtuvo una concentración importante de esfuerzos en la garganta o zona con sección transversal más reducida, observándose un esfuerzo máximo en tensión de 2.88kg/cm^2 para el pináculo PIN1, 14.6kg/cm^2 para el PIN2 y un valor igual a 14.02kg/cm^2 para el remate PIN3 (Figura 11). Resulta relevante hacer notar que dicha concentración de esfuerzos de tensión se debe al peso propio de los elementos que se encuentra por encima de tales zonas críticas, masa que experimenta una importante amplificación de la aceleración sísmica con respecto a la base del muro debido a su comportamiento como apéndices no estructurales.

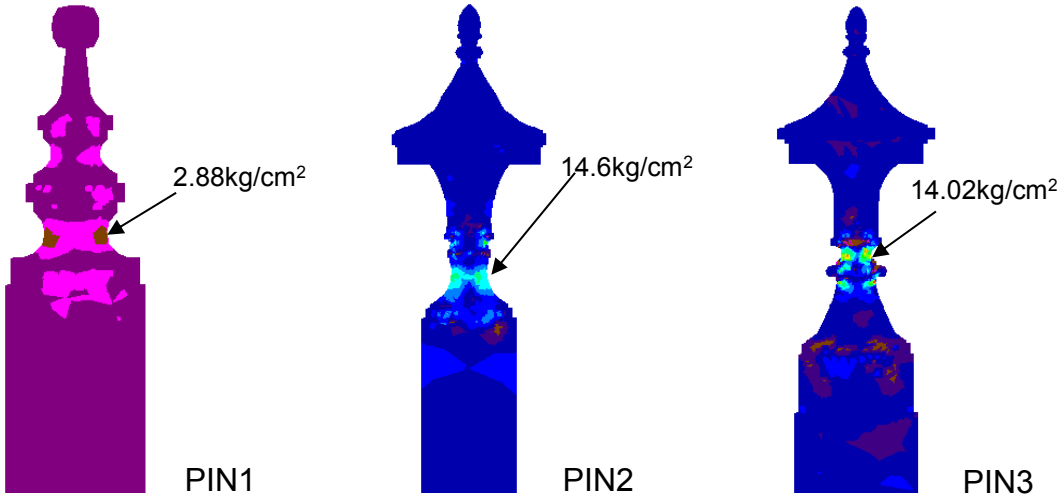


Figura 11. Esfuerzos máximos de tensión para la condición de peso propio más sismo de diseño con periodo de retorno de 475 años.

CONCLUSIONES

De los resultados se puede concluir que, en cuanto a los desplazamientos laterales máximos, en los tres sistemas estructurales analizados éstos exceden la tercera parte del ancho de los apoyos, es decir, la resultante centroidal del peso de los pináculos se sale del tercio de medio de la base, lo cual se puede considerar que produce una condición de inestabilidad que derivaría en el vuelco del remate en todos los casos. En cuanto a los esfuerzos máximos de tensión, éstos se presentan en la zona con sección transversal menor o garganta de los tres remates analizados, encontrando en todos los casos que se excede de manera significativa el esfuerzo permisible en tensión de 0.85kg/cm^2 recomendado por las normas PIET70, lo cual produciría la ruptura de la cantería en dichas zonas. Por lo anterior, se concluye que los pináculos ubicados sobre los muros de edificios históricos de la ciudad de Morelia, representan un grave riesgo para la sociedad ante un evento sísmico con la intensidad esperada para la ciudad, por lo que deberán realizarse estudios con un mayor nivel de detalle, de cara a establecer acciones preventivas que eviten futuras pérdidas humanas y patrimoniales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Durán, D. “Evaluación de la influencia del tipo de cubierta en el comportamiento sísmico de templos del Estado de Morelia”, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2025.
2. Jara JM, Estrada A, Gaytan R, Olmos BA, Martínez G. “Effect of the Seismic Source on the Probabilistic Hazzard Assessment a Heritage City in Mexico: A case study of Morelia”. Nat. Hazards Rev., ASCE, 2025, 26(2): 05025002. DOI: 10.1061/NHREFO.NHENG-2281.
3. Prescriptions of the Eduardo Torroja Institute (PIET). 70 Masonry works. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Spain, 1971 (in Spanish).

INTEGRACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA Y CAD COMO HERRAMIENAS DE APRENDIZAJE ACTIVO

Bravo Moreno Tania Abigail[1], Sandoval Marín Carolina[2], César Manuel Hernández Mendoza[3], Luz María Rodríguez Vidal[4].

TECNM / ITS de Irapuato
cesar.hm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La adopción de tecnologías emergentes como la Realidad Aumentada (RA) y tecnologías aplicadas como el Diseño Asistido por Computadora (CAD) en entornos educativos representan una oportunidad para transformar la formación de ingenieros. En particular, estas tecnologías ofrecen ventajas significativas para el desarrollo de competencias en diseño, análisis y simulación de componentes en diversas industrias, específicamente en la industria automotriz de la región. Sin embargo, su implementación se enfrenta a desafíos como el acceso a software especializado, la necesidad de hardware avanzado, a requerimientos mínimos en los equipos de cómputo y la escasa disponibilidad de plataformas colaborativas accesibles para estudiantes. Este proyecto aborda dichos retos mediante el uso de herramientas basadas en la nube como Onshape (CAD) y Blippar (RA), integradas en un enfoque pedagógico activo.

Se aplicó una estrategia de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) y Aula Invertida con 35 estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Los participantes diseñaron modelos 3D de diversos tipos de piezas en Onshape, aplicando funciones como bocetos, extrusiones, barrido, ensamblaje y animación. Posteriormente, estos modelos fueron exportados a Blippar para su visualización en RA utilizando dispositivos móviles. Se realizó una validación técnica de cinco modelos seleccionados, mediante criterios como ensamblaje funcional, escala, nivel de detalle, viabilidad de manufactura (impresión 3D) y correcta visualización en RA.

El análisis técnico mostró que la mayoría de los modelos cumplieron con los requisitos de ensamblaje funcional, otro porcentaje de los modelos presentaron escala adecuada respecto a su referencia automotriz, mientras que una minoría fueron viables para manufactura mediante impresión 3D sin ajustes adicionales, por otra parte, todos los modelos fueron correctamente visualizados en RA, permitiendo el análisis espacial y estructural desde distintos ángulos y perspectivas.

Además, se observó una mejora en la autonomía, motivación y creatividad de los estudiantes, así como en el dominio de herramientas CAD y conceptos clave de diseño mecánico. El uso de plataformas SaaS permitió eliminar barreras económicas, técnicas, licencias y de infraestructura.
La integración de CAD y RA en entornos educativos mixtos permitió mejorar el aprendizaje práctico, así como validar técnicamente los productos generados por los estudiantes, acercándolos a estándares reales de la industria automotriz. El enfoque propuesto demuestra ser replicable, accesible y alineado con las tendencias de la industria 4.0, potenciando el desarrollo de ingenieros más preparados para enfrentar retos tecnológicos actuales.

INTRODUCCIÓN

El Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) ha revolucionado y evoluciona constantemente la manera en que los ingenieros conceptualizan, modelan y validan sus diseños. Mediante diversas herramientas, programas especializados y plataformas, los estudiantes pueden generar modelos tridimensionales precisos que simulan el comportamiento de componentes mecánicos, estructuras y en el caso del Ingeniero en Sistemas Automotrices: sistemas y componentes vehiculares. Por otro lado, la Realidad Aumentada (RA) permite superponer elementos virtuales en entornos reales, facilitando la visualización y manipulación de diseños en tiempo real, la manera más práctica de generar y obtener elementos de RA, es utilizando el teléfono móvil para

acceder a este tipo de contenido, la tecnología permite integrar tres o cuatro maneras de RA, destacando principalmente el uso de un código QR para visualizar elementos digitales en el mundo real o “alrededor de ti”, la cual consiste en girar en 360 grados y observar los elementos que nos rodean, entre otras. La integración de estas tecnologías en la formación del Ingeniero en Sistemas Automotrices potencia su capacidad de análisis, resolución de problemas y toma de decisiones fundamentadas en base a los elementos creados en CAD y observados en el mundo real.

El uso combinado de CAD y RA en la enseñanza de la ingeniería no solo permite optimizar el aprendizaje teórico-práctico o el proceso enseñanza - aprendizaje, también permite que los estudiantes se motiven e interesen para adquirir competencias clave en diseño, manufactura y simulación desde una perspectiva práctica. Sin embargo, la implementación de estas herramientas en entornos educativos puede verse limitada por problemas técnicos, como la conectividad a internet, el ancho de banda, interferencia o la demanda de equipos y dispositivos que podemos encontrar en instituciones públicas. Para mitigar estos desafíos, el enfoque de aula invertida se presenta en este proyecto como una estrategia efectiva, ya que permite que los estudiantes exploren los conceptos y realicen prácticas desde casa con acceso a software y recursos en línea, mientras que en el aula se enfocan en la resolución de dudas y la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos.

Además, se considera una metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) para fomentar el desarrollo de habilidades de investigación y colaboración mediante la resolución de problemas reales de la industria automotriz. Los estudiantes pueden trabajar en proyectos que involucren el diseño y optimización de piezas vehiculares, integrando herramientas de CAD y RA para mejorar sus propuestas. En este contexto, la implementación de Software como Servicio (SaaS) proporciona acceso a plataformas especializadas sin la necesidad de potentes equipos de cómputo locales, facilitando la colaboración remota y la gestión eficiente de los proyectos.

La combinación de estas estrategias pedagógicas y tecnológicas brinda beneficios significativos tanto para los docentes como para los estudiantes. Los profesores pueden personalizar la instrucción, proporcionar retroalimentación en tiempo real y optimizar la evaluación del desempeño estudiantil. Por su parte, los alumnos desarrollan competencias digitales avanzadas, fortalecen su autonomía en el aprendizaje y adquieren una preparación más alineada con las demandas del sector industrial. De esta manera, la integración de CAD, RA, el aula invertida, el ABP y SaaS en la formación académica contribuye a la generación de ingenieros altamente capacitados y adaptables a los retos de la industria actual.

TEORÍA

La aplicación de tecnologías digitales de vanguardia orientadas a la educación ha evolucionado rápidamente gracias a herramientas como el Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la Realidad Aumentada (RA). El CAD permite a los estudiantes y profesionales generar diseños precisos en 2D y 3D de componentes y ensamblajes vehiculares. Plataformas como **Onshape**, un software basado en la nube, facilitan el acceso a modelos de diseño desde cualquier dispositivo sin requerir una computadora de alto rendimiento (Zhu & Ferreira, 2020). Sin embargo, el uso de herramientas CAD avanzadas suele enfrentar barreras técnicas, como la necesidad de equipos con procesadores potentes, tarjetas gráficas dedicadas y suficiente memoria RAM, lo que puede ser un obstáculo en entornos educativos con recursos limitados (González & Ramírez, 2019). Es decir, el estudiante debe tener un equipo con altas prestaciones para hacer uso de este software especializado, contar con una licencia y además que sus compañeros y profesores tengan la misma versión del software para colaborar de manera eficiente, por estas razones en ocasiones es difícil dar seguimiento a sus prácticas y clases, situación que el Software como Servicio contribuye a evitar.

La RA, permite superponer elementos digitales sobre componentes físicos, facilitando la visualización y comprensión de diseños complejos (Azuma, 2017). Herramientas como **Blippar** ofrecen entornos interactivos donde los estudiantes pueden explorar partes de un motor o sistemas de transmisión mediante sus dispositivos móviles o tabletas. La implementación de RA mejora la

retención del conocimiento y fomenta una comprensión práctica sin necesidad de modelos físicos costosos (Milgram & Kishino, 1994). En ambos casos, Blippar y Onshape son plataformas en las que el estudiante solo requiere de un correo electrónico para aprender y utilizar tecnologías de vanguardia, ya que la mayor parte del procesamiento y memoria se realiza en los servidores de estos proveedores.
El modelo de aula invertida permite que los estudiantes accedan a materiales teóricos desde sus hogares, reservando las sesiones presenciales para la resolución de dudas y la aplicación práctica de los conocimientos (Bishop & Verleger, 2013). Esta metodología es particularmente beneficiosa en institutos donde la conexión a internet puede ser limitada, ya que los estudiantes pueden descargar los recursos previamente y trabajar de manera autónoma en sus hogares. Este proyecto puso en práctica esta estrategia para que los estudiantes pudieran aprender a utilizar la RA en sus casas, observando y dando seguimiento a las instrucciones que su profesor les proporcionaba en sus videos.

El Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) fomenta el desarrollo de habilidades colaborativas y de investigación. Los estudiantes trabajan en problemas reales, como el diseño y optimización de componentes vehiculares, integrando software CAD y herramientas de RA para validar sus propuestas (Barron & Darling-Hammond, 2008). En este caso el proyecto generado fue un boceto en 2D, al que posteriormente se le aplicaron modificadores como extrusiones, cortes, terminaciones y acabados, finalmente se realizaron ensambles y se transfirió el modelo a la RA.

El uso de Software como Servicio (SaaS) en este proyecto permitió acceder a herramientas especializadas sin necesidad de instalaciones locales, es decir en los equipos de cómputo de los estudiantes. Esto reduce la dependencia de equipos costosos y facilita la colaboración en línea (Marston et al., 2011). Plataformas como Onshape permiten a los estudiantes trabajar en diseños colaborativos desde cualquier ubicación, paralelamente y en tiempo real. Todas estas tecnologías y metodologías educativas aplicadas en el proyecto permitieron proporcionan a los futuros ingenieros, un entorno de aprendizaje flexible, colaborativo y alineado con las tendencias de la industria.

PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto comienza cuando se crea una cuenta en la plataforma Onshape, la cual solo requiere un correo electrónico, datos de identificación generales y una contraseña segura para su acceso. El uso y configuración es más simple que otros programas especializados en CAD, además se puede cambiar con facilidad el idioma y las unidades en las que se trabaja. En la Figura 1, se presenta la organización de la plataforma con un diseño generado en la misma.

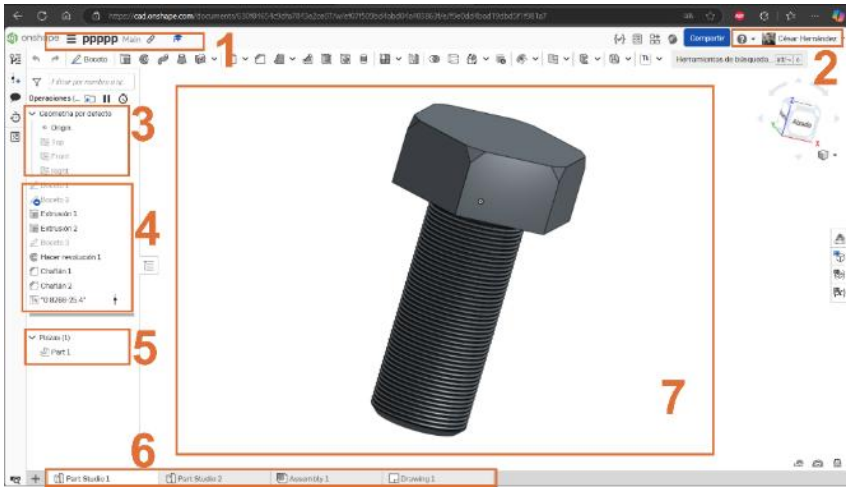


Figura 1. Estructura y organización del área de trabajo en Onshape

En el número 1, puede observar el nombre del proyecto que se asigna antes de comenzar cualquier diseño, este puede cambiar fácilmente, únicamente se requiere dar doble clic sobre este elemento y escribir el nuevo nombre. En el número 2 se observa el nombre del usuario, este puede establecerse después de acceder por primera vez a la plataforma, en caso de que no se asigne un nombre, Onshape carga el correo electrónico con el que se dio de alta. En el número 3 se observan las tres vistas posibles: x, y, z, o bien, en este caso, top, front, right, según las necesidades del diseño el usuario puede cambiar a estas vistas para observar los diseños desde otras perspectivas. En el número 4, se observa el historial de modificadores que se fueron realizando en el transcurso del diseño, estos pueden irse configurando, ocultando o inhabilitarlos si es necesario. En el número 5, se observan las piezas que se han creado, por lo general en este espacio suele ser una pieza, ya que para un ensamble cada pieza suele tener su propio espacio. En el número 6, se observa la barra de los complementos que puede tener una pieza, tales como el dibujo en CAD con cotas, el ensamble, la simulación, entre otros. Finalmente, en el número 7, se observa el área de trabajo, se requiere el uso del mouse para que en base a los botones y scrollbar el usuario puede navegar y cambiar las vistas rápidamente.

El diseño de piezas con ensamble y simulación requiere conocer las funciones y herramientas básicas de diseño con CAD, observe por ejemplo la Figura 2, la cual contiene dos bocetos, varios modificadores y algunas transformaciones para generar la pieza. En el primer boceto, se ha utilizado líneas de construcción en el origen y en el eje Z para crear el punto al que posteriormente se elevara la pieza en base al modificador "*barrido*", puede observar que se está trabajando en la vista "top", creando una línea de construcción a 75 grados y a una distancia de 122mm.

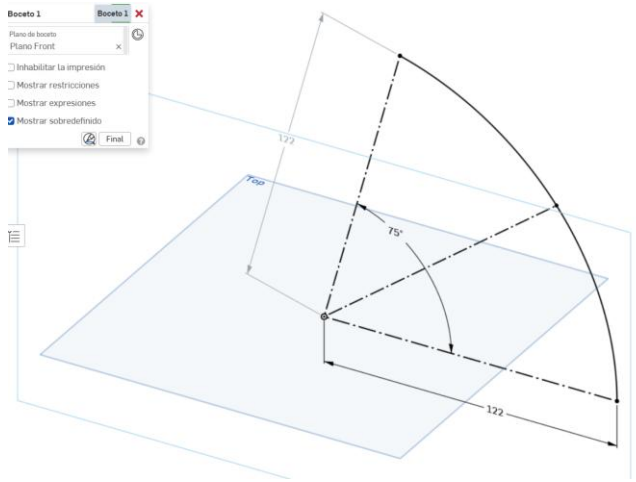


Figura 2. Líneas de construcción creadas en el eje *x* y *z* desde la vista top

Mientras que en la Figura 3, puede observar el boceto 2 de esta pieza, el cual contiene la base de la misma y en la que se utiliza la vista "top" para crear las circunferencias y líneas de construcción.

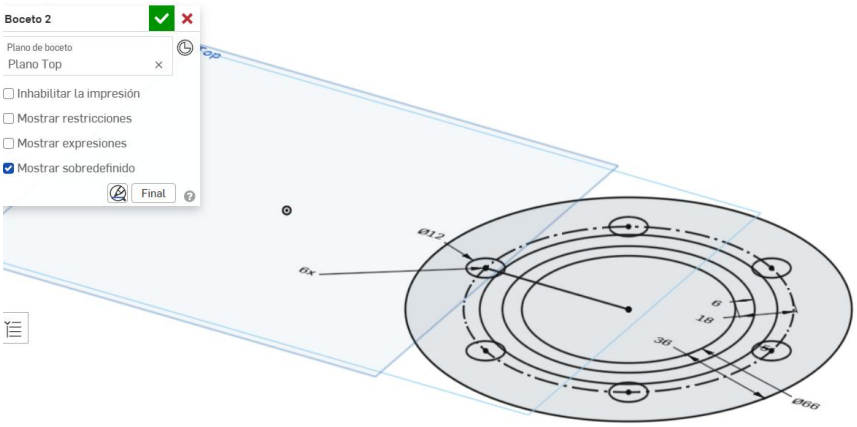


Figura 3. Segundo boceto utilizando la vista “top” en el eje *x*

Una vez que se aplican los modificadores a la pieza, y se realizan ciertos ajustes a las dimensiones y medidas, podemos observar el resultado en la Figura 4. En este caso los modificadores que hacen la mayor carga de trabajo son las *extrusiones* y el *barrido*, ya que este último genera la forma de tubo curvado que va desde el origen en el plano x, hasta la línea de construcción que se creó en el boceto 1 a los 75 grados.

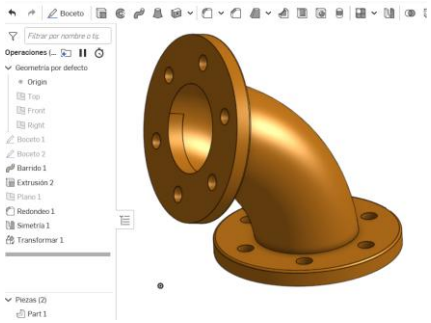


Figura 4. Modificadores y extrusiones aplicadas a la pieza

Posteriormente, en la Figura 5, puede observar que la pieza se ha duplicado, se ha cambiado el color y las piezas están listas para llevar a un ensamble.

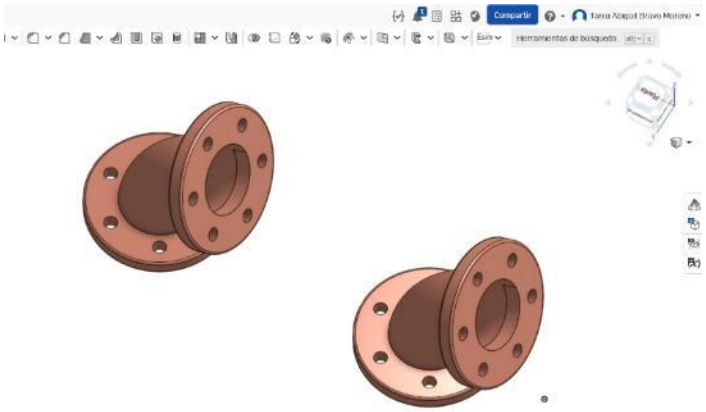


Figura 5. Pieza duplicada en el mismo plano

Finalmente, en la Figura 6, se observa el ensamble de estas dos piezas, utilizando la herramienta "*coincidencia cilíndrica*", con el propósito de que el ensamble sea perfecto desde el punto de origen de ambas piezas.

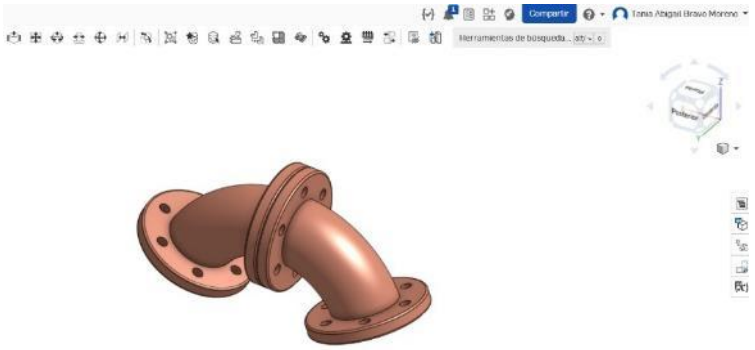


Figura 6. Ensamble de las piezas realizada en Onshape

Como parte del proyecto, los estudiantes suelen tener interés en generar piezas del sector automotriz, utilizando cotas y los modificadores disponibles en la plataforma. Es en esta parte, donde los estudiantes tienen la posibilidad de crear y generar piezas en base a su imaginación y creatividad. Observe por ejemplo la Figura 7, la cual contiene la idea de un "rin" y en la parte inferior se muestra el ensamble de un tornillo y tuerca con el dibujo en CAD que genera en automático Onshape.

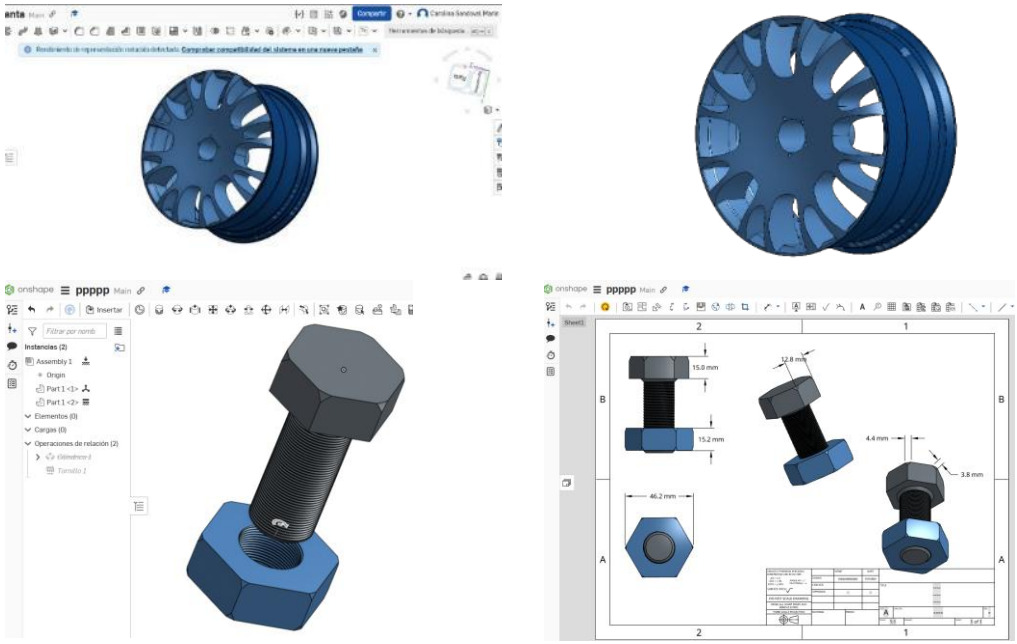


Figura 7. Desarrollo de piezas automotrices generadas con ideas y creatividad de los estudiantes.

Posteriormente, se utiliza la plataforma Blippar para llevar a cabo el traslado de estos modelos a la Realidad Aumentada. Los archivos generados en Onshape se descargar como archivos STL, los cuales son compatibles para impresoras 3D o bien entre programas de diseño y CAD. Posteriormente, en Blippar se exportan estos archivos y se visualizan como figuras en color base gris. Observe en la Figura 8, la interfaz de Blippar en la que se generan los archivos a presentar.

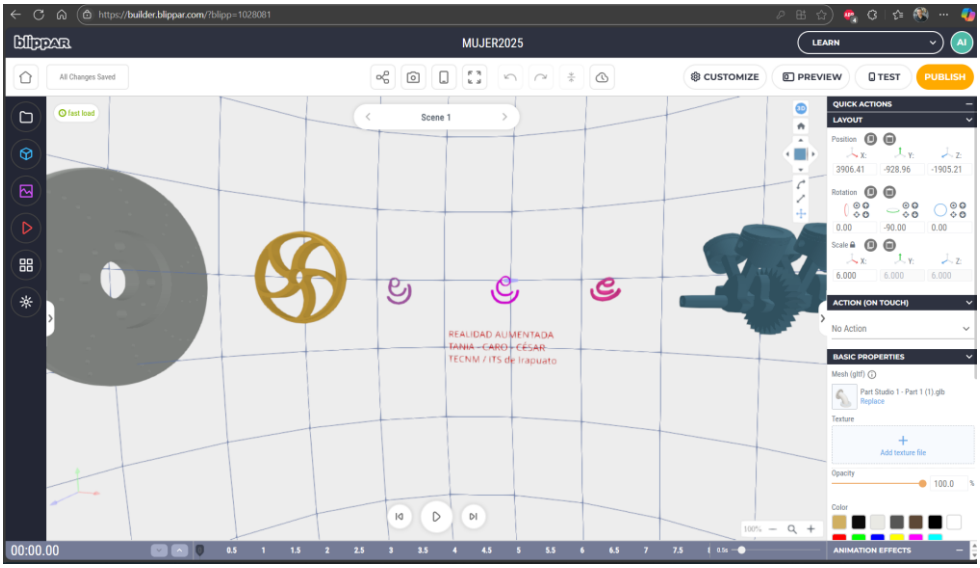


Figura 8. En este caso la R.A. esta trabajando la modalidad “alrededor de ti, colocando piezas alrededor del usuario

Además, en la parte inferior de la plataforma se pueden realizar ajustes para dar efectos de animación a las piezas generadas en la R.A., observe por ejemplo la Figura 9, en donde se aprecian ajustes en la rotación de algunas figuras.

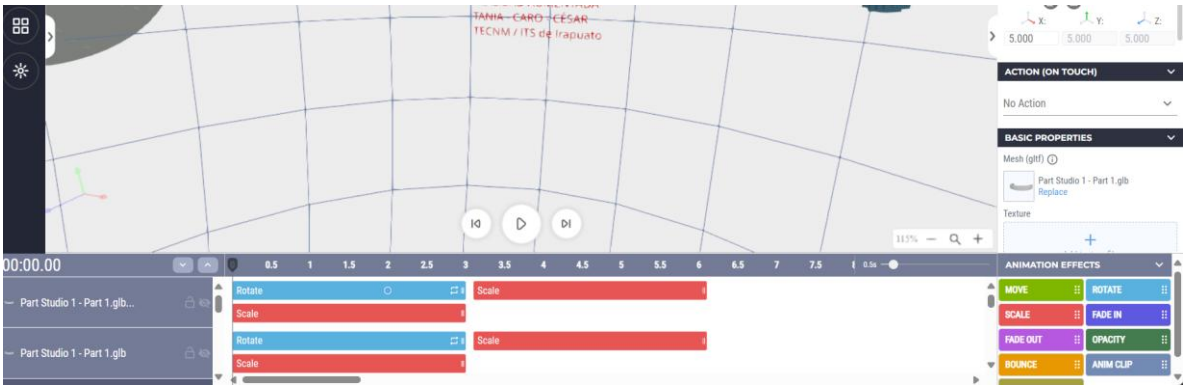


Figura 9. Las animaciones pueden ser movimientos de rotación, traslación, escalación o transparencias.

Por otra parte, la aplicación del Aula Invertida, se lleva a cabo utilizando la plataforma institucional Teams, en donde se crea un grupo enfocado en atender a los estudiantes de la materia. El profesor previamente genera un primer video explicativo del tema, se plantea desde cero, considerando que será la primera vez que los estudiantes interactúan con la tecnología, por lo que a la vez que se dando clic en los apartados y botones necesario el profesor explica lo que esta sucediendo. Una vez que el video termina explicando una primera práctica en donde se presentan las características y un primer ejemplo, el video se descarga. Se agregan algunas diapositivas a modo de presentación en el video y se almacena en el One Drive institucional para que este a disposición de los estudiantes. Finalmente se crea una actividad/tarea en Teams, dando acceso al enlace del video y se colocan las instrucciones para evaluar la actividad. Observe en la Figura 10 esta actividad. Los estudiantes realizan estas prácticas como tareas en sus casas.

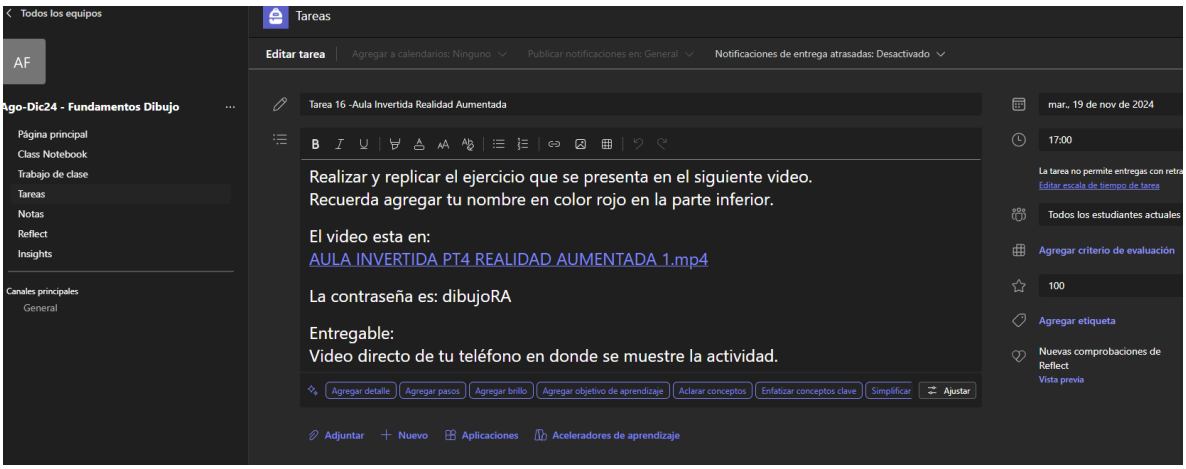


Figura 10. Las actividades en Teams sobre aula invertida para la R.A., se presentan en esta imagen.

RESULTADOS

En la materia se llevaron a cabo un total de 35 modelos, los cuales fueron diseñados en OnShape, de los cuales, el 95% ha cumplido con los criterios de ensamblaje funcional, es decir, se acoplaban bajo las normas y criterios establecidos el módulo “ensamblaje” de OnShape. El 82%, ha presentado una escala y proporción adecuadas al compararse con los bocetos de origen y generados en otras plataformas. Se considero la impresión 3D de 3 piezas al azahar, de donde se revelo que existían áreas de mejora en cuanto a tolerancias únicamente si las piezas estaban consideradas para un modelo articulado, de lo contrario las piezas entran a presión y se ajustan perfectamente. Al finalizar el semestre, los estudiantes presentaban un dominio sobre la aplicación de modificadores avanzados del CAD, tales como barrido, extrusión, cortes, vaciado, chaflan o redondeo, observe la Figura 11.

Por otra parte, se ha observado un incremento del 87% en la participación activa de los estudiantes comparados con su cohorte anterior y en donde no se presento el tema de R.A. En base a las listas y calificaciones del profesor, se observa que el trabajo autónomo de cada estudiante aumento significativamente, ya que el 92% de los estudiantes completo por medio del Aula Invertida las prácticas solicitadas en el tema de R.A., sin necesidad o intervención del profesor.

Desde una perspectiva cualitativa, el profesor observó que el grupo se sintió mas motivado a terminar sus modelos por su propia cuenta con el fin de poderlos ver materializados digitalmente con la tecnología de R.A., además de que lograron comprender a la perfección perspectivas tridimensionales y componentes técnicos de un modelo 3D, como escalación, rotación, traslación, entre otros. Todos estos resultados fueron validados mediante una revisión personal con los entregables de cada estudiante, ya que uno de los propósitos del Aula invertida es que los estudiantes lleguen con las prácticas hechas al salón de clases, por lo que la observación directa y el cumplimiento de una rubrica validan estas actividades y resultados.



Figura 11. Modelos generados en Onshape y visualizados como Realidad Aumentada

CONCLUSIONES

La integración del CAD en plataformas de acceso libre como Onshape y la plataforma Blippar para el caso de la Realidad Aumentada, demostró que es una estrategia efectiva para fortalecer competencias claves en estudiantes de Ingeniería en Sistemas Automotrices. La visualización de modelos 3D en R.A., ha permitido tener una comprensión más profunda de las piezas diseñadas por los estudiantes desde cero.

Además, el uso de Aula invertida ha logrado fomentar el aprendizaje autodirigido y autorregulado por el estudiante y que les permitió explorar funciones avanzadas con esta tecnología.

La aplicación de la Realidad Aumentada es un medio por el cual los estudiantes pueden complementar de manera eficiente sus desarrollos en CAD. Considere que el CAD es también una manera de presentar información y comunicación visual, por lo que la R.A., se ajusta perfectamente a los propósitos de esta área tecnológica. Los estudiantes además se motivan por perfeccionar y visualizar sus modelos de manera profesional. Finalmente, la experiencia ha demostrado que la implementación de esta estrategia es viable de replicar en otros modelos educativos con mínimas aportaciones gracias al utilizar el denominado Software como servicio, tales como Blippar y Onshape.

BIBLIOGRAFÍA

1. Azuma, R. T. (2017). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 6*(4), 355-385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355

2. Barron, B., & Darling-Hammond, L. (2008). Teaching for meaningful learning: A review of research on inquiry-based and cooperative learning. *Powerful Learning: What We Know About Teaching for Understanding*, 11-70.

3. Bishop, J. L., & Verleger, M. A. (2013). The flipped classroom: A survey of the research. *ASEE National Conference Proceedings, 30*(9), 1-18.

4. González, A., & Ramírez, J. (2019). The impact of computer-aided design (CAD) in engineering education: A case study. *International Journal of Engineering Education, 35*(2), 120-135.

5. Marston, S., Li, Z., Bandyopadhyay, S., Zhang, J., & Ghalsasi, A. (2011). Cloud computing—The business perspective. *Decision Support Systems, 51*(1), 176-189. https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.12.006

6. Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems, 77*(12), 1321-1329.

7. Zhu, H., & Ferreira, P. (2020). Cloud-based CAD applications and their impact on design collaboration. *Journal of Computing and Information Science in Engineering, 20*(3), 031001. https://doi.org/10.1115/1.4047100

REMOCIÓN DE ZINC DE UN EFLUENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DE HIERRO POR ELECTRODIÁLISIS

Lucia Hernández Lavalle[1], Jaime Cristóbal Rojas Montes[1], María Teresa Alarcón Herrera[1], Víctor Jesús Martínez Gómez[2], Diana Cristina Martínez Casillas[3]

[1]Instituto Tecnológico de Durango (UPIDET), [2]Centro de Investigación en Materiales Avanzados Unidad Durango.
lucia.hernandez@cimav.edu.mx

RESUMEN

La industria minero-metalúrgica representa una actividad primaria en México, sin embargo, en el procesamiento de minerales existe la problemática de la disposición final de sus efluentes. El zinc es uno de metales más comunes en la contaminación del agua, que se utiliza en una amplia variedad de procesos industriales. La electrodiálisis es una técnica electroquímica utilizada para la eliminación de iones metálicos, en dónde, estos se separan de la solución acuosa mediante un proceso de transporte bajo la influencia de un campo eléctrico. En este trabajo se plantea la electrodiálisis como un proceso que, por sus características, permite remover iones metálicos de zinc en una solución mediante el uso de membranas de intercambio iónico. Para ello, es necesario conocer las mejores condiciones de densidad de corriente aplicada en el sistema, pH y velocidad de recirculación, así como la influencia de estas variables en la remoción de zinc en un efluente sintético y uno real proveniente de la industria procesamiento de minerales. Las pruebas de electrodiálisis se ejecutaron en una celda particionada de tres compartimentos con una membrana de intercambio catiónico y una de intercambio aniónico, esta celda cuenta con un sistema de recirculación para el electrolito diluido, como electrodos se emplean una placa de grafito como ánodo, y como cátodo una placa de acero inoxidable, para posteriormente determinar su concentración mediante análisis químico. A partir de los datos obtenidos se calcularon porcentajes de remoción total de zinc, de igual manera se realizó un análisis estadístico con la finalidad de determinar si existe alguna influencia significativa en las variables estudiadas y así sustentar los mejores parámetros de operación que se obtuvieron. También se hace una discusión desde una perspectiva de la termodinámica, que involucra la especiación que existe de zinc en este tipo de procesos electroquímicos. El porcentaje máximo de remoción de zinc con el efluente sintético fue 95.80% con variables de operación de densidad de corriente de 120 A/m^2, una velocidad de recirculación de 30 mL/min y un pH de 6, mientras que con el efluente real el mejor porcentaje de remoción de zinc fue de 99.99% con variables de operación de densidad de corriente de 90 A/m^2 y un pH de 4.

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento y desarrollo a nivel mundial, tanto de la población humana como de la industria ha causado que cada vez sea mayor el consumo de los recursos naturales, teniendo como consecuencia la alteración al medio ambiente y provocando la contaminación de diversos ecosistemas. Esta contaminación ha generado la acumulación de diversos compuestos que son tóxicos para los seres vivos, siendo este el caso de los metales pesados, los cuales resultan ser contaminantes bioacumulativos para diversos sustratos como lo pueden ser el suelo, agua y aire.

Actualmente, hablar sobre metales pesados se ha convertido sin lugar a duda en uno de los temas de mayor importancia tanto a nivel medio ambiental como en salud. Sin embargo, mediante la implementación de normas se ha buscado minimizar el impacto de dichos metales en la industria, así como evitar en la mayor forma posible la exposición de la población a estos metales tóxicos. No hay manera de que exista una calidad de vida, así como desarrollo económico sin la minería, sin embargo, si no se toman las medidas necesarias para proteger el medio ambiente, puede haber consecuencias irreparables, ya que en la actualidad se ha generado un incremento en la actividad

minera en dónde el Estado se enfoca exclusivamente en la producción dejando de lado la protección del medio ambiente [1].

La industria minera, es uno de los ejes económicos más importantes del país, pues es una actividad económica primaria en México que incluye operaciones de prospección, exploración, extracción, fundición, recuperación y el aprovechamiento de los minerales. Según la Secretaría de Economía en el 2021 a nivel mundial, México se ubica en la primera posición como productor de plata y se encuentra dentro de los diez primeros lugares en la producción de minerales metálicos que contienen metales como plata, bismuto, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, oro y cobre y así como de minerales no metálicos como wollastonita, diatomita, sal, fluorita, celestita, barita, grafito y yeso [4] [5].

Sin embargo, a pesar de la importancia económica de esta gran industria, la contaminación del agua con metales pesados representa una problemática para la salud humana y el medio ambiente. El zinc es uno de metales más comunes en la contaminación del agua, que se utiliza en una amplia variedad de procesos industriales. La presencia de este metal se da principalmente de manera antropogénica (efluentes municipales e industriales, actividades mineras y geológicas), así como algunas fuentes difusas secundarias, es decir, que no se vinculan directamente con la producción de zinc (incendios forestales y la actividad volcánica). Según la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 [3], se establece que el límite máximo permisible (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales con respecto al zinc es de 10 mg/l promedio mensual (P.M.), este valor es el límite para varias actividades (uso público urbano, riego agrícola y para la protección de vida acuática en embalses naturales y artificiales, aguas costeras, explotación pesquera, navegación, de recreación estuarios, etc.).

Los principales tratamientos para la eliminación de metales en aguas, entre ellos el zinc, se basan en métodos fisicoquímicos, estos originan cambios en el agua por medio de la aplicación de fuerzas físicas o reacciones químicas. En especial la electrodiálisis ha tomado un gran interés en años recientes ya que permite la separación de iones de aguas tratadas mediante el uso de membranas que, mediante la influencia de un campo eléctrico, permiten la extracción de sustancias ionizadas. Este proceso se basa en la transferencia de masa a través de una membrana mediante el transporte de especies iónicas de bajo peso molecular de una solución a través de membranas selectivas.

El objetivo de esta investigación es realizar una serie de pruebas con un efluente sintético el cual tenga las características muy similares a la de un efluente real, con la finalidad de evaluar la eficiencia del método y posteriormente en una segunda etapa, poderlas implementarlas a un efluente real minero. Ya que este método se emplea para tratar efluentes que contienen metales pesados y otros residuos tóxicos con el fin de eliminarlos, siempre y cuando estén ionizados, aunque también se pueden concentrar con el fin de darles un tratamiento posterior ya sea para recuperarlos o depositarlos en vertederos.

En una investigación realizada por Babilas y Dydo (2018), en la recuperación selectiva de zinc de aguas residuales de galvanoplastia, mediante electrodiálisis con membranas compuestas activadas se estudiaron condiciones del proceso para la recuperación de zinc a través de una separación selectiva que permite la eliminación de hierro (impureza presente en este tipo de efluentes) mediante la adición de agentes quelantes (ácido láctico, málico y cítrico). Todos los experimentos se realizaron en un módulo de electrodiálisis de cinco compartimentos con un área de membrana de 16 cm^2. Todas las soluciones presentes en el proceso se recircularon mediante una bomba peristáltica a un caudal que correspondía a una velocidad de flujo lineal de 1 cm/s dentro de cada cámara. El experimento se realizó a una densidad de corriente eléctrica constante de 250 A/m^2, que se mantuvo durante las pruebas. La duración de cada experimento para la determinación de flujo molar fue de una hora, este tiempo es el necesario para eliminar aproximadamente el 10% de zinc del compartimento diluido. Se encontró que el ácido cítrico es el mejor. La efectividad del método propuesto se validó en un experimento de laboratorio realizado en régimen batch (por lotes), en la cual las membranas compuestas activadas en el proceso de electrodiálisis permitieron una separación eficiente de los iones de zinc del hierro contenidos en este tipo de efluentes. Se observó un coeficiente de retención

de hierro del 92.36%. Simultáneamente, el método permitió una recuperación de zinc del 86.6% con una eficiencia de corriente del 84.95%. Se llegó a la conclusión de que el tipo de adición de agente complejante, así como el tipo de membranas de intercambio iónico, si influyen en la selectividad de la eliminación de zinc en el proceso de electrodiálisis.

En otro estudio publicado en la revista Separation and Purification Technology en 2011 de Huang y Col. (2011) investigó la remoción de zinc de soluciones acuosas mediante la técnica de electrodiálisis. En particular, los autores evaluaron la eficiencia de la técnica en la remoción de zinc de soluciones con diferentes concentraciones iniciales de este metal. Para llevar a cabo el estudio, los autores utilizaron una celda de electrodiálisis que consistía en una serie de membranas de intercambio iónico alternadas, separadas por soluciones alimentadas. En cada celda se aplicó una corriente eléctrica continua para impulsar los iones a través de las membranas.

Los resultados mostraron que la remoción de zinc mediante electrodiálisis dependía de varios factores, incluyendo la concentración inicial de zinc en la solución, la corriente eléctrica aplicada y el pH de la solución. En general, los autores encontraron que la electrodiálisis era una técnica efectiva para la eliminación de zinc de soluciones acuosas, y que se podían lograr tasas de remoción de hasta el 99% en condiciones óptimas.

Este estudio proporciona evidencia de que la electrodiálisis es una técnica efectiva para la remoción de zinc de soluciones acuosas, lo cual es relevante para el tratamiento de efluentes industriales o sintéticos que contienen este metal.

Finalmente, en un estudio publicado en la revista Chemical Engineering Journal en 2014, por Goh y Col. se enfocó en la remoción de zinc de efluentes sintéticos de la industria galvánica mediante la técnica de electrodiálisis. Los autores evaluaron la eficiencia de la técnica en la remoción de zinc de efluentes sintéticos que contenían diferentes concentraciones de este metal, así como otros contaminantes como sulfato y cloruro. Para llevar a cabo el estudio, los autores utilizaron una celda de electrodiálisis con dos compartimentos separados por una membrana selectiva de iones. En un compartimento se colocó el efluente sintético, mientras que en el otro se colocó una solución de rechazo. Se aplicó una corriente eléctrica continua para impulsar los iones a través de la membrana y así remover los contaminantes de la solución.

Los resultados mostraron que la electrodiálisis fue capaz de remover eficientemente el zinc del efluente sintético, y que la eficiencia de remoción fue mayor a concentraciones más bajas del metal. Además, los autores encontraron que la electrodiálisis también fue capaz de remover otros contaminantes presentes en el efluente, como sulfato y cloruro, lo que indica que esta técnica puede ser útil para tratar efluentes complejos. Este estudio sugiere que la electrodiálisis es una técnica efectiva para la remoción de zinc y otros contaminantes de efluentes sintéticos de la industria galvánica.

PARTE EXPERIMENTAL

Se evalúa el método de electrodiálisis como una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de efluentes generados en el procesamiento de minerales con el propósito de remover y/o disminuir la presencia del zinc. Las variables estudiades en este proyecto son la densidad de corriente, la velocidad de recirculación y el pH. Las condiciones de operación que se llevaron a cabo en las pruebas de electrodiálisis se establecen en el Tabla 1. Las pruebas fueron realizadas en una celda de electrodiálisis que contenía una placa de grafito como ánodo y una placa de acero inoxidable como cátodo, ambas con un área superficial expuesta de 68 cm^2. La celda de electrodiálisis está separada por una membrana de intercambio aniónico MA-7500 y una membrana de intercambio catiónico modelo CMI-7000. El suministro de energía eléctrica se realizó con una fuente de poder de corriente directa de la marca Tektronix DC (PWS4305) y la recirculación se llevó a cabo con una bomba peristáltica marca CONTRO1079.

Tabla 1 Variables de operación

Variable	Rangos de operación
Densidad de corriente (A/m^2)	10, 30, 60, 90, 120, 150
Velocidad de recirculación (ml/min)	10, 30, 50, 78, 107
pH	4, 5, 6, 7, 8

El primer paso consistió en elaborar una celda de electrodiálisis a partir de polimetilmetacrilato con una capacidad de aproximadamente 630 cm^3. La Figura 1 representa un esquema gráfico de la celda de electrodiálisis que se empleó. La duración de las pruebas de electrodiálisis fue de 60 minutos. La concentración inicial del efluente sintético fue de 50 ppm de zinc. Durante la fase experimental se realizó un muestreo a distintos intervalos de tiempo para determinar la concentración de zinc, tomando una muestra del efluente para aforarla con agua destilada en un matraz volumétrico y posteriormente determinar la concentración de zinc mediante análisis químico, el cual, se llevó a cabo por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica Marca GBC Modelo AVANTA.

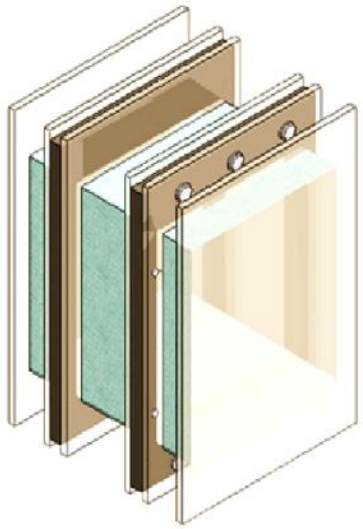


Figura 1. Esquema gráfico de la celda de electrodiálisis.

Con base en los valores obtenidos en el análisis químico, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar los porcentajes de remoción alcanzados en cada intervalo de tiempo. Finalmente, se realizaron gráficos de acuerdo con los resultados obtenidos mismos que representen el porcentaje de remoción total y la cinética de remoción para determinar los mejores resultados.

RESULTADOS

En la Figura 2 el gráfico muestra la evolución de la remoción de zinc (%) en función del tiempo para diferentes densidades de corriente, que van desde 10 A/m^2 hasta 150 A/m^2. Se observan varias tendencias clave; a medida que la densidad de corriente aumenta, la remoción de zinc es más eficiente. La densidad de 150 A/m^2 y 120 A/m^2 logran la mayor eficiencia, alcanzando cerca del 90% de remoción en 60 minutos, mientras que las curvas con menor densidad de corriente (10 A/m^2 y 30 A/m^2) presentan una remoción significativamente menor, lo que sugiere que una baja densidad limita el proceso. De igual manera se observa que la remoción de zinc no es lineal con el tiempo; en las primeras etapas (0-10 min), la pendiente es más pronunciada para las densidades más altas, indicando una rápida eliminación inicial del contaminante. Después de los 30 minutos, la tasa de remoción se estabiliza en la mayoría de los casos, lo que puede deberse a la disminución de la concentración de iones Zn^{2+} en la solución. Sin embargo, la diferencia entre 120 A/m^2 y 150 A/m^2 es

mínima en tiempos prolongados, lo que sugiere que más allá de cierto umbral, aumentar la densidad de corriente no mejora significativamente la remoción. Esto podría deberse a limitaciones en la transferencia de masa o a efectos secundarios como el sobrepotencial y la evolución de gases.

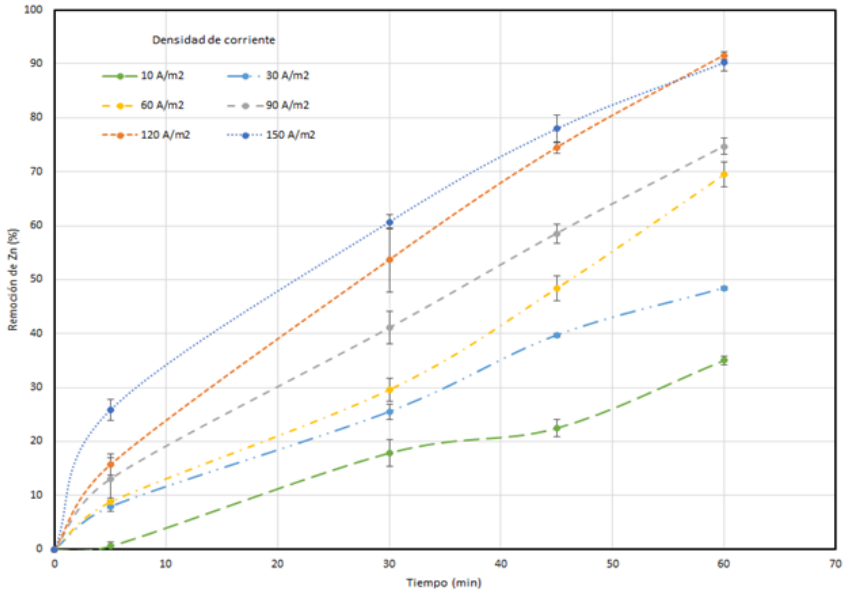


Figura 2. Cinética de Remoción de zinc en función de la densidad de corriente. Velocidad de recirculación: 50 ml/min; pH_i=6, t=60 min.

En la Figura 3 se muestran las remociones finales en función de la densidad de corriente, a medida que la densidad de corriente aumenta, el porcentaje de remoción de Zn también incrementa, lo que sugiere una relación positiva entre ambos parámetros. A partir de 120 A/m², la remoción de Zn parece estabilizarse, lo que sugiere que incrementar aún más la densidad de corriente podría no generar una mejora significativa en la remoción. Este comportamiento es común en procesos electroquímicos, donde la eficiencia de remoción mejora con la densidad de corriente hasta un punto donde otros factores, como la resistencia del sistema o la formación de productos secundarios, pueden limitar la eficacia.

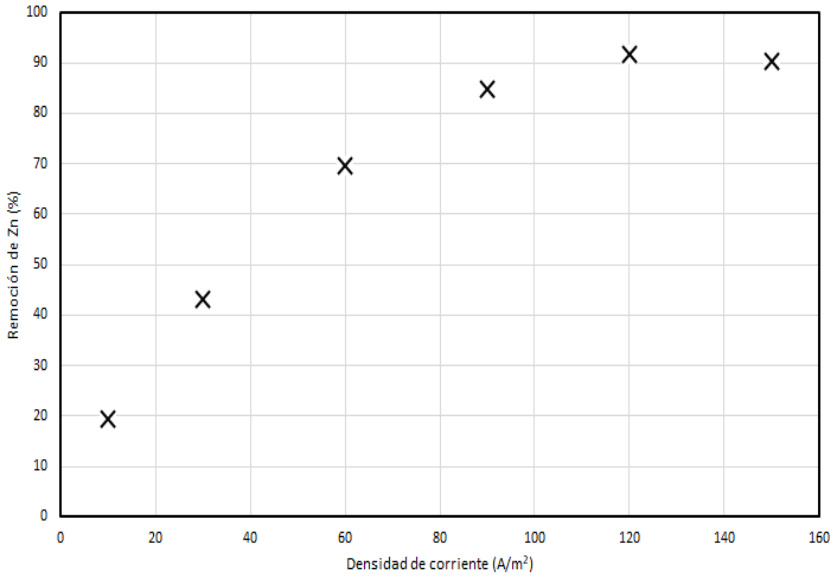


Figura 3. Comparación de la densidad de corriente en el porcentaje de remoción de zinc a pH_i=6; velocidad de recirculación 50 ml/min, t=60 min.

En la Figura 4 se observa una relación positiva entre la densidad de corriente y el voltaje aplicado. A medida que la densidad de corriente aumenta, el voltaje requerido también lo hace, por lo que la relación entre ambos parámetros parece ser aproximadamente lineal, con un aumento progresivo del voltaje conforme la densidad de corriente se incrementa. A grandes rasgos se puede observar que a densidades de corriente bajas (~20 A/m²), el voltaje es menor a 10 V, a densidades intermedias (~60-80 A/m²), el voltaje se encuentra entre 15 y 20 V y a densidades altas (~140 A/m²), el voltaje alcanza valores cercanos a 25 V. Este comportamiento es típico en procesos electroquímicos, donde el voltaje aumenta con la densidad de corriente debido a la resistencia interna del sistema. Sin embargo, un voltaje elevado puede estar asociado con pérdidas energéticas, por lo que es importante evaluar la eficiencia del proceso y determinar si hay un punto óptimo de densidad de corriente donde se maximiza la remoción sin un gasto excesivo de energía.

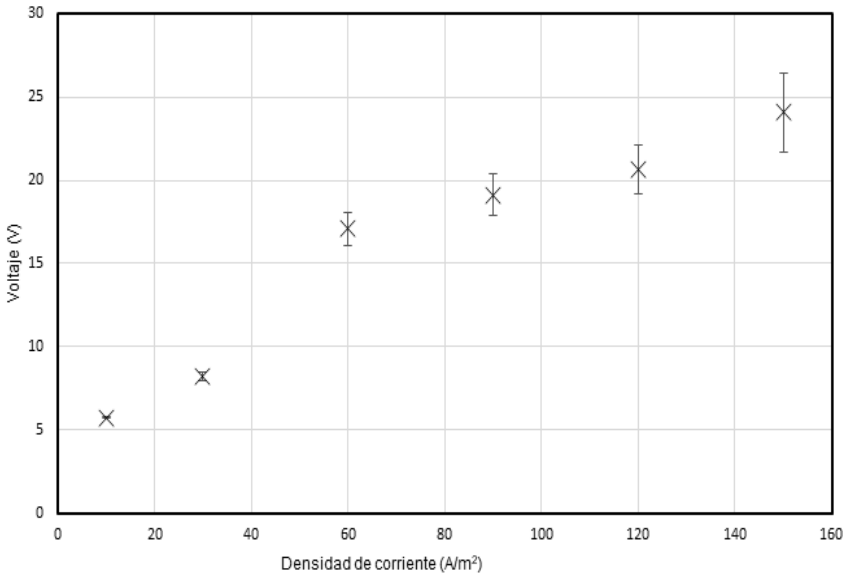


Figura 4. Voltaje de celda en función de la densidad de corriente. velocidad de recirculación: 50 ml/min; ph_i=6; t=60 min.

La segunda variable estudiada fue la velocidad, durante estas pruebas se trabajó con un pH inicial (pH_i) de 6, y una densidad de corriente en un valor de 120 A/m^2, ya que representó la mejor condición para la remoción. Los resultados obtenidos para esta variable se muestran en la Figura 5, es evidente como esta variable afecta en mayor medida durante los primeros cinco minutos, ya que a medida que el valor de la velocidad de recirculación disminuye de igual manera disminuyen los porcentajes de remoción. Sin embargo, en la Figura 6, se puede observar que al final de la prueba los porcentajes de remoción resultan con valores muy similares de 95.8, 95.45 y 94.1% que corresponden a una velocidad de recirculación de 30, 107 y 78 mL/min, respectivamente.

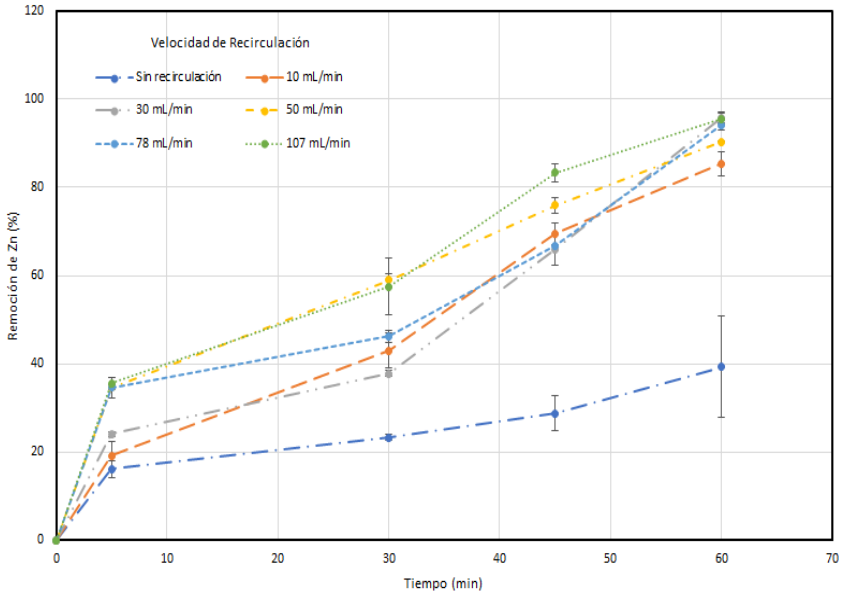


Figura 5. Cinética de Remoción de zinc en función de la velocidad de recirculación. Densidad de corriente:120 A/m^2; pH$_i$=6; t=60 min.

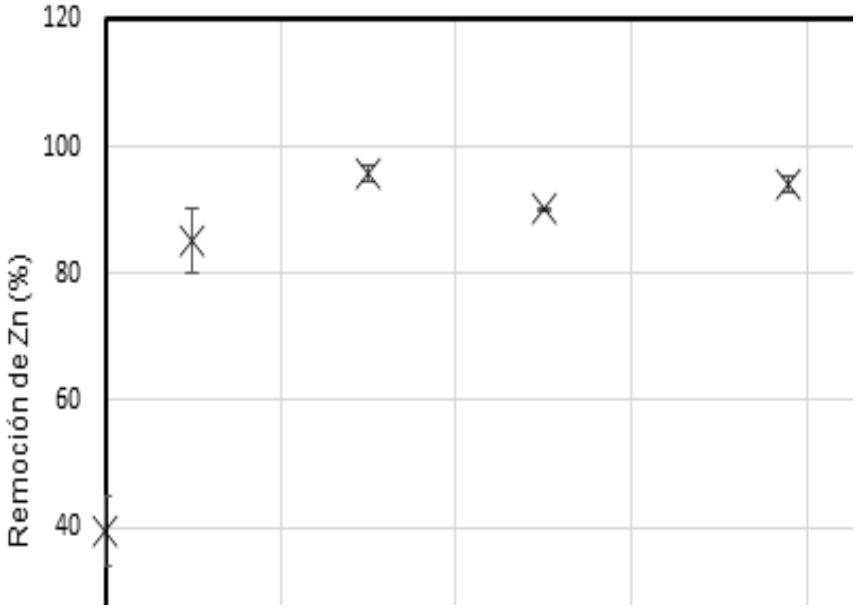


Figura 6. Porcentaje de Remoción Final de zinc en función de la velocidad de recirculación. Densidad de corriente:120 A/m^2; pH$_i$=6, t=60 min.

Los resultados que se alcanzaron en cada una de las pruebas de electrodiálisis para esta variable se muestran en la Figura 7, en la cual se puede observar que, durante los primeros cinco minutos la prueba realizada con un valor el pH de 8 alcanzó valores de remoción mucho mayores en comparación con los otros valores, sin embargo, una vez concluidas las pruebas se puede observar que el pH de 6 fue el que obtuvo el mejor porcentaje de remoción con un valor de 90.35%, mientas que las remociones para los otros valores de pH rondaron en valores entre 77.7% y 70.65%, por lo que se determinó que el pH de 6 presenta las mejores condiciones.

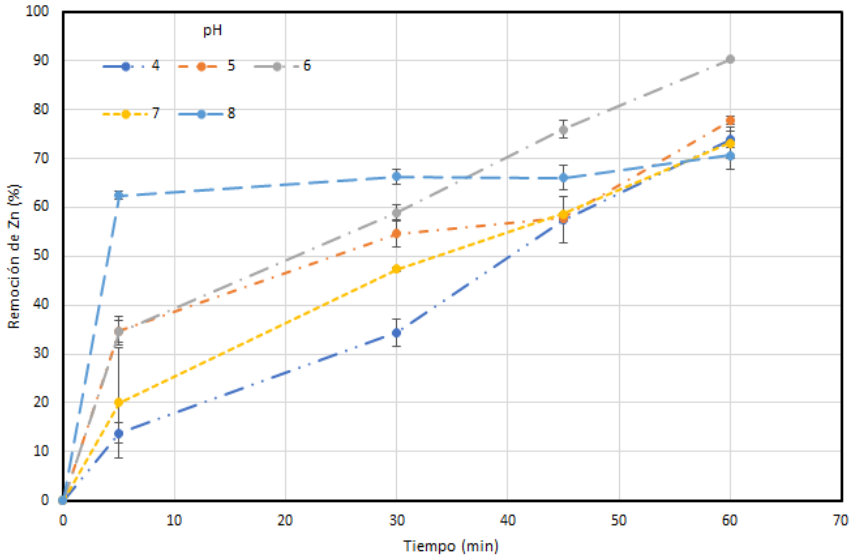


Figura 7. Cinética de Remoción de zinc en función del pH Densidad de corriente:120 A/m^2; Velocidad de recirculación: 30 ml/min y t=60 min.

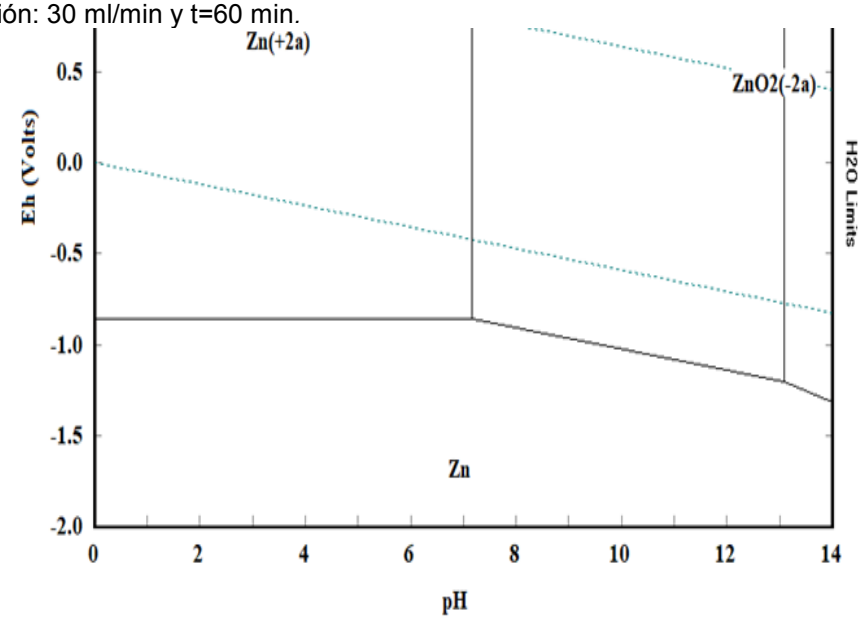


Figura 8. Diagrama de Pourbaix del sistema Zn-S-H_2O

Para poder tener una evaluación más completa y acertada de esta variable fue necesario realizar una simulación de diagrama de Eh-pH (Pourbaix) con ayuda del software HSC Chemistry 6.1. La simulación fue elaborada de acuerdo con las condiciones de la solución y la concentración de esta (50 mg/l de zinc). En la Figura 8 se presente un diagrama de Pourbaix dónde se representan las principales áreas de estabilidad termodinámica de la especie de interés (zinc) en función del potencial y del pH. En dicha figura se puede observar que la especie predominante en este sistema es el zinc II (Zn^{+2}) para la mayoría de los valores (4 a 7) de pH estudiados y el óxido de zinc (ZnO) el cual comienza a aparecer en el pH de 8, por lo que de acuerdo con estos resultados la variable de pH si tuviese algún efecto sobre el proceso de electrodiálisis. Sin embargo, este tipo de diagramas solo nos proporciona una visualización general, por lo que fue necesario realizar un diagrama de distribución de especies.

La simulación del diagrama de especiación (distribución de especies) fue realizada con ayuda del mismo software, dicho diagrama se encuentra representado por la Figura 9. En este diagrama se puede observar que se encuentra la presencia nuevas especies los cuales no aparecían en el diagrama de Pourbaix, como es el caso de algunos cloruros ($ZnCl^{+1}$ y $ZnCl3^{-1}$) así como de hidróxidos ($Zn(OH)_2$ y $ZnOH^{+1}$). Analizando con más cuidado este diagrama se puede observar que a medida que el valor del pH aumenta (valores mayores a 7), el óxido de zinc (ZnO) se aumenta su concentración, por lo que la concentración de los iones de zinc II comienza a disminuir.

Realizando un análisis más profundo sobre los resultados obtenidos en el estudio de esta variable (pH), en la Figura 6 mostrada anteriormente se puede observar que el pH de 6 fue el que obtuvo mejores porcentajes en la remoción de zinc con un valor de 90.35%, y pese a que el pH de 8 durante los primeros cinco minutos alcanza buenas remociones, esto se debe a que los iones de zinc tienden a precipitarse debido al rango de pH con el que se está trabajando inicialmente de acuerdo con el análisis termodinámico. Esto quiere decir, que este porcentaje de remoción se debe principalmente al proceso de precipitación y no al proceso de electrodiálisis, por lo que no se recomienda trabajar con este rango de pH para esta técnica. Lo antes mencionado queda respaldado con el diagrama de distribución de especies.

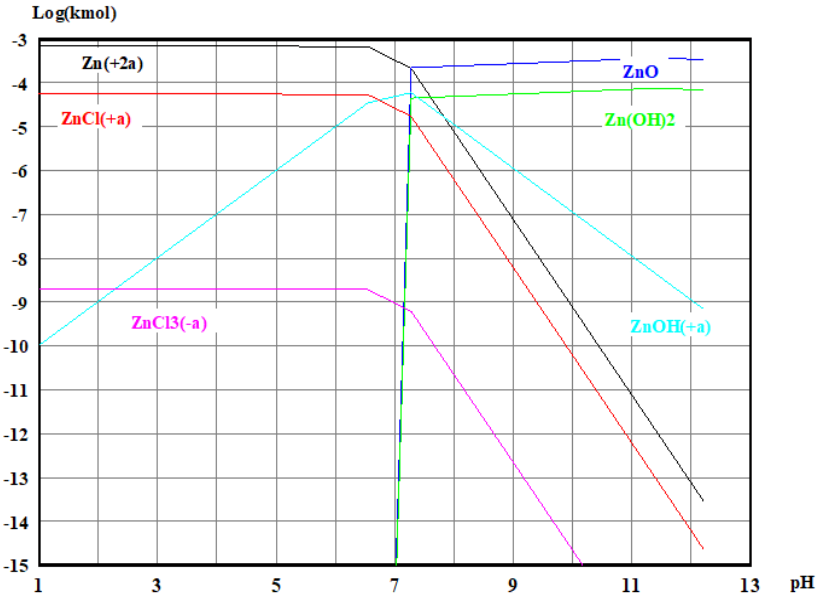


Figura 9. Diagrama de distribución de especies para C_{Zn}= 50 mg/L.

CONCLUSIONES

Para la primera variable evaluada (densidad de corriente) se observó que en los primeros 5 minutos de proceso se observan cambios evidentes en la remoción de zinc, para altas densidades de corrientes (120 y 150 A/m^2).

Un aumento de la densidad de corriente resulta en un aumento en la remoción de zinc, sin embargo, esto solo se observa hasta una densidad de corriente de 120 A/m^2, aumentar más allá de este valor termina en remociones muy similares.

Para la segunda variable, (velocidad de recirculación) los porcentajes de remoción fueron muy similares, por lo que se escogió la que alcanzó un mayor porcentaje de remoción de zinc.

La mejor condición de trabajo en función del pH se alcanzó a un valor de 6, a pesar de que en un pH 8 se alcanzan buenas remociones durante los primeros 5 minutos, estas no se alcanzan por la electrodiálisis, si no por el proceso de precipitación química.

Como conclusión general, el mayor porcentaje de remoción alcanzado fue de 95.80% y las mejores condiciones de operación están representadas por de densidad de corriente de 120 A/m^2, una velocidad de recirculación de 30 mL/min y un pH de 6.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, Julio. 2017. “Impactos económicos y sociales de las políticas nacionales mineras en Ecuador (2000-2006)”. Revista de Ciencias Sociales 23 (4): 53-64. DOI: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28055641005

Babilas, D. y Dydo, P., 2018. Selective zinc recovery from electroplating wastewaters by electrodialysis enhanced with complex formation. Separation and Purification Technology, 192: 419-428 DOI: https:// doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.013

SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.* DOF (Diario Oficial de la Federación).

Secretaria-de-Economía, 2021. Minería. Acciones y Programas. Recuperado de: https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria

Secretaría-de-Economía, 2017. Contexto de México en la Minería. Recuperado de: https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf

MODIFICACIÓN DE ESTRATEGÍA DE MODULACIÓN SPWM A MODULACIÓN VECTORIAL CON APLICACIONES EN DSP PARA CONVERTIDORES CD-CA

Pablo Alejandro Ramírez Vargas[1], Adolfo Rafael López Núñez[1], Gerardo Vázquez Guzmán[2], Mario Alberto Juárez Balderas[1], Marcos Jesús Villaseñor Aguilar[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Silao-Irapuato km 12.5 El Copal, 36821, Irapuato. Gto,. México, [2]Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y Tecnología (CIACyT), Universidad autónoma de San Luis Potosí, México.
pablo_prav@hotmail.com

RESUMEN

La implementación de una adecuada estrategia de modulación en un convertidor CD a CA es una etapa importante para que el convertidor funcione adecuadamente. Estas modulaciones pueden realizarse mediante microcontroladores o FPGAs, los cuales generan los pulsos adecuados de dicha modulación. La implementación de las técnicas de modulación típicas involucra la comparación directa de la señal portadora y moduladora para topologías típicas como puente completo (FB) y medio puente (HB). Sin embargo, para topologías poco comunes (Tipo T, Unidades SC), los pulsos que controlan los interruptores no surgen directamente de las comparaciones, sino que tienen que pasar por una etapa digital, la cual por medio de operaciones lógicas adaptan las señales de comparación directa a las señales de control de los interruptores. En este trabajo se presenta el cambio de la modulación senoidal por ancho de pulsos (SPWM) a una modulación vectorial (SVM). La modulación SPWM de la que se parte, consta de cuatro señales triangulares (portadoras) y una señal senoidal (moduladora), las cuales son comparadas y posteriormente pasan por una etapa digital. Esta modulación se modifica para que conste únicamente de una señal triangular, una señal senoidal portadora y una señal de referencia. Esta modificación elimina la etapa digital que generalmente se hace por medio de hardware. En ambas modulaciones, las señales triangulares tienen una frecuencia de 10kHz y las señales de referencia manejan la frecuencia de red (60Hz). Las simulaciones se llevaron a cabo en un inversor multinivel de cinco niveles con una carga RL. Como resultados de este trabajo, se presentan las comparaciones de los pulsos de compuerta en ambas modulaciones en simulación y señales a la salida del inversor, mostrando la ventaja en el ahorro de componentes de hardware con la SVM.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a diversos problemas ambientales como el calentamiento global y el efecto invernadero, han provocado que científicos busquen energías limpias para sustituir las energías derivadas de los restos fósiles [1], por lo que los convertidores CD a CA (inversores) juegan un rol importante en la conversión de la energía eléctrica.

Debido a lo anterior, la implementación de una adecuada estrategia de modulación en un inversor es una etapa importante para su correcto funcionamiento. Estas modulaciones pueden realizarse mediante microcontroladores o arreglo de compuertas programables en campo (FPGAs), los cuales generan los pulsos digitales adecuados para la modulación [2].

La implementación de las técnicas de modulación comunes involucra la comparación directa de la señal portadora y moduladora en topologías típicas como el puente completo (FB) y medio puente (HB). Sin embargo, en topologías poco comunes como la topología Tipo T y la topología de unidades de capacitores conmutados (SC-Units) [3], los pulsos que controlan los interruptores no surgen directamente de las comparaciones, sino que tienen que pasar por una etapa digital, la cual por medio de operaciones lógicas adaptan las señales de comparación directa a las señales de control de los interruptores.

En este trabajo se presenta el cambio de la modulación senoidal por ancho de pulsos (SPWM) a una modulación vectorial (SVM) para eliminar la etapa digital y obtener los pulsos de control para los interruptores directo de un DSP. Los resultados de este trabajo se obtuvieron mediante el software PSIM. En la Figura 1 se muestra la estructura de un inversor genérico con las señales de control para los interruptores (S_n).

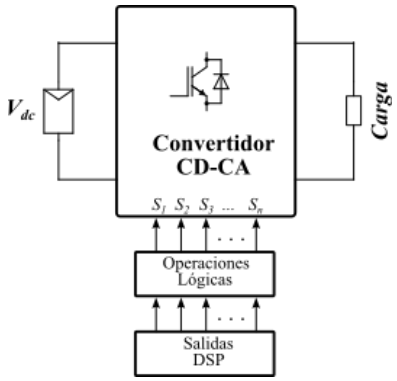


Figura 1. Estructura básica para un inversor genérico.

METODOLOGÍA

La modulación SPWM de la que se parte, consta de cuatro señales triangulares (portadoras) y una señal senoidal (moduladora) A 60 Hz, las cuales son comparadas y posteriormente pasan por una etapa digital. Esta modulación se modifica para que conste únicamente de una señal triangular, una señal senoidal portadora y una señal de referencia, la modificación propuesta en este trabajo elimina la etapa digital que generalmente se hace por medio de hardware, en ambas modulaciones, las señales triangulares tienen una frecuencia de 10 kHz y las señales de referencia manejan la frecuencia de red (60 Hz). Para validar el cambio de modulación se toma como referencia un inversor que necesite una etapa digital para la implementación de su modulación. En la Figura 2 se muestra un inversor multinivel de cinco niveles con conexión de tierra común (CGC) y con capacitores conmutados (SC) [4]. Y en la Tabla 1 se muestran sus estados de conmutación para analizar los pulsos digitales de los interruptores.

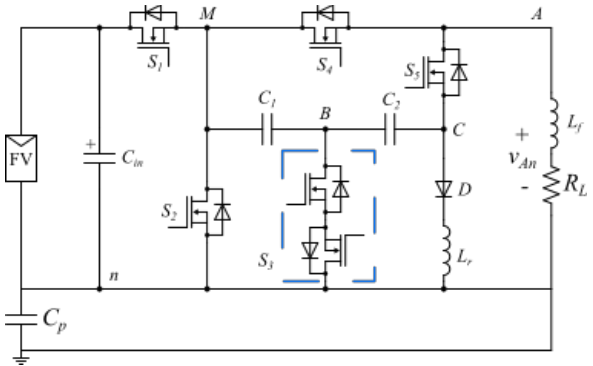


Figura 2. Topología CGCSC para validar el cambio de modulación.

Tabla 1. Estados de conmutación para el inversor CGCSC.

Nivel	Interruptores					v_{An}
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
1	1	0	0	1	0	V_{FV}
2	0	0	1	1	0	$0.5\,V_{FV}$
3	1	0	0	0	1	$0\,V_{FV}$

4	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**	$-0.5\,V_{FV}$
5	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	$-V_{FV}$

Tomando en cuenta la Tabla 1, cuando se trabaja con inversores multinivel, es importante nombrar los espacios en donde ocurre un cambio de nivel de voltaje (vectores o sectores), por ejemplo, el espacio donde sucede la conmutación entre el nivel 3 y 2, se le llama sector 1 ($S-I$), para el espacio de conmutación entre los niveles 2 y 1 se le nombra sector 2 ($S-II$), $S-III$ es nombrado al espacio en donde sucede una conmutación entre los niveles 3 y 4, finalmente el $S-IV$ es el espacio donde sucede la conmutación entre los niveles 4 y 5.

A la hora de implementar la modulación SPWM se consideran cuatro señales portadoras y una señal moduladora ya que los interruptores no conmutan en al menos un sector. En la Figura 3(a) se muestran las señales portadoras y moduladora y en la Figura 3(b) se muestran los pulsos de comparación entre ambas señales de la modulación.

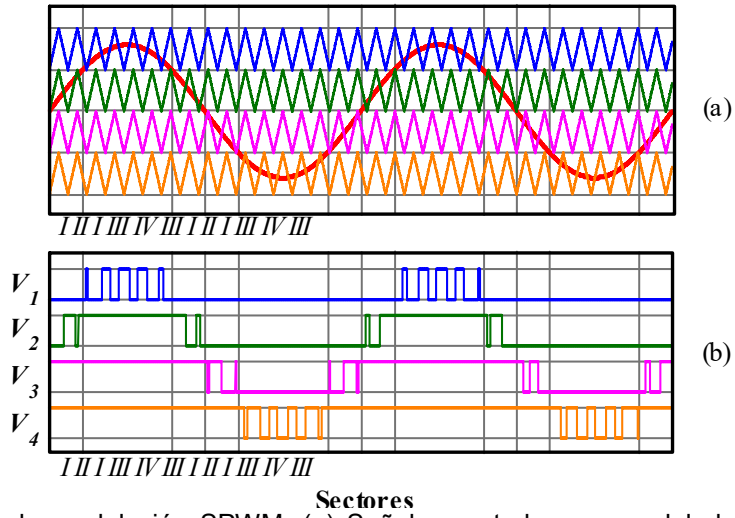


Figura 3. Base de la modulación SPWM. (a) Señales portadoras y moduladora, (b) Señales de comparación entre las señales de modulación.

Para que los pulsos de la comparación sean iguales a los pulsos de los interruptores de la Tabla 1, se requiere una etapa digital, en donde se realicen operaciones lógicas, las cuales se muestran en las ecuaciones de la (1) a (5). La Figura 4 muestra los pulsos de control para cada interruptor del inversor utilizando las ecuaciones lógicas.

$$S_1 = V_3 \wedge (V_1 \vee \neg V_2) \quad (1)$$

$$S_2 = \neg V_4 \quad (2)$$

$$S_3 = [V_3 \wedge (V_1 \vee \neg V_2)] \vee [\neg V_4] \quad (3)$$

$$S_4 = V_2 \quad (4)$$

$$S_5 = \neg V_2 \quad (5)$$

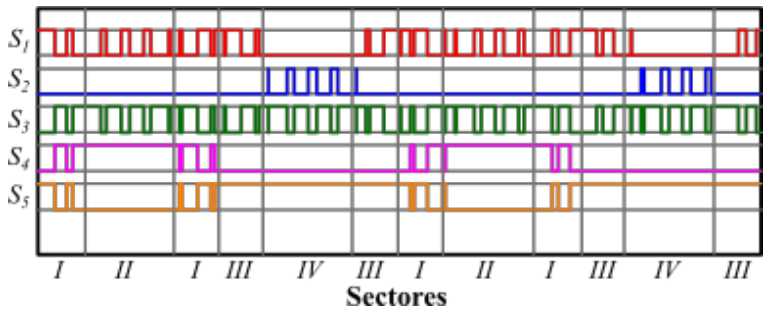


Figura 4. Pulsos de control para los interruptores col inversor utilizando la modulación SPWM y etapa digital.

MODIFICACION DE LA MODULACIÓN

Esta modificación consta de solo una señal moduladora y una señal portadora. Lo cual hace el recurso computacional del microcontrolador sea menor. Las señales generadas en esta modulación son comparadas para generar la señal de control para el interruptor S_3 y por medio de vectores se elige la forma de comparación para los demás interruptores. En la Figura 5 se muestra la señal portadora en color azul y la señal moduladora o de referencia en color rojo.

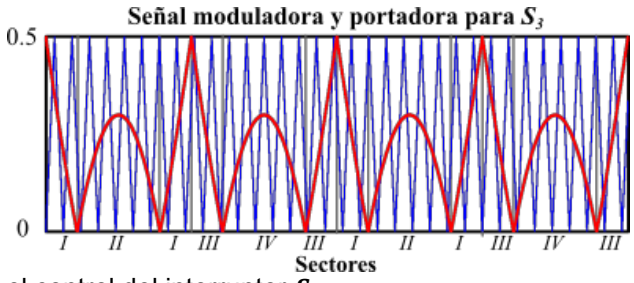


Figura 5. Señales para el control del interruptor S_3.

Si el vector se encuentra en el sector 1 entonces S_1 y S_5 serán la señal S_3 negada, para el interruptor S_2 permanece apagado y las señales de los interruptores S_3 y S_4 son iguales. En la tabla 2 se muestra el comportamiento de los interruptores en función de que sector apunta el vector.

Tabla 2. Comportamiento de los interruptores en función de S_3.

Sector	Interruptores			
	S_1	S_2	S_4	S_5
I	$\neg S_3$	0	S_3	$\neg S_3$
II	$\neg S_3$	0	1	0
III	$\neg S_3$	S_3	0	1
IV	0	1	0	1

RESULTADOS

Los resultados de simulación con PSIM muestra la comparación de los pulsos de control, voltaje y corriente a la salida del inversor para ambas modulaciones (Figura 6).

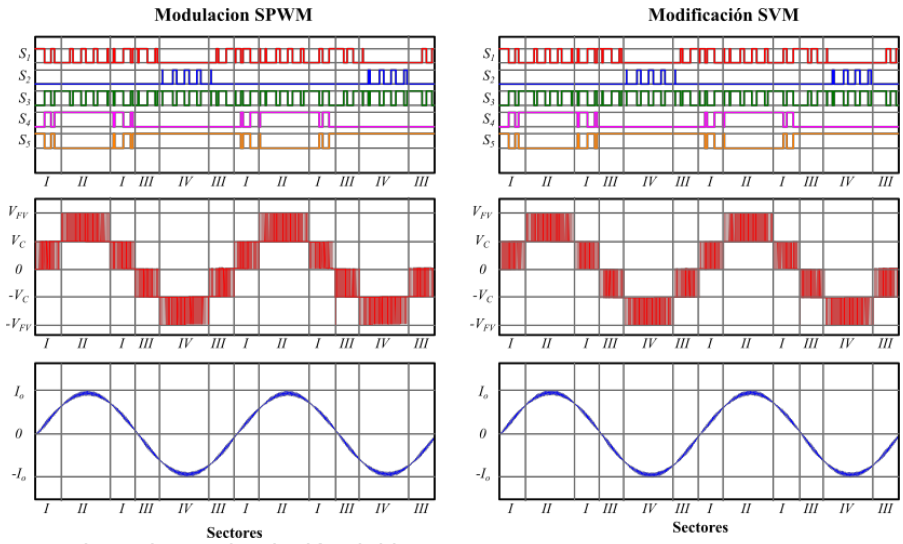


Figura 6. Formas de onda en simulación del inversor.

A simple vista se muestra una similitud exacta entre formas de onda, pero analíticamente también se pueden medir características eléctricas que demuestran que las señales son iguales. Para el voltaje y corriente se puede medir su distorsión armónica total (THD) que es un parámetro en porcentaje utilizado en inversores para determinar qué tan parecida es una señal a una señal senoidal. Si el parámetro es cercano a cero significa que es una señal sumamente parecida a una señal senoidal. Por medio de la ecuación (6) y (7) se determina la THD para el voltaje y corriente.

$$\boldsymbol{THD_V = \left(\frac{\sum_{j=2}^{\infty}\sqrt{V_j}}{V_1}\right)100} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{THD_i = \left(\frac{\sum_{j=2}^{\infty}\sqrt{i_j}}{i_1}\right)100} \quad (7)$$

Para este inversor, el rizo de voltaje en los capacitores $\boldsymbol{C_1}$ y $\boldsymbol{C_2}$ $(\boldsymbol{\Delta V_C})$ es de suma importancia ya que mantiene el voltaje a la salida del inversor simétrico. Al igual que la componente de corriente directa $(\boldsymbol{i_{CD}})$ y la corriente de modo común del inversor $(\boldsymbol{i_{MC}})$. En la Tabla 3 se muestran algunas mediciones del inversor para la comparación del cambio de modulación.

Tabla 3. Mediciones y características eléctricas del inversor con ambas simulaciones.

Característica / Medición	Modulación	
	SPWM	SVM
$\boldsymbol{THD_V}$	**38 %**	**38 %**
$\boldsymbol{THD_i}$	**3.4 %**	**3.4 %**
$\boldsymbol{i_{CD}}$	**2.8 %**	**2.8 %**
$\boldsymbol{i_{MC}}$	**0 A**	**0 A**
$\boldsymbol{\Delta V_C}$	**2.5 %**	**2.5 %**

Cabe mencionar que todas las mediciones y características eléctricas están bajo los parámetros de la mormas IEC 62116, IEC 61000-3-2. Las cuales regulan la generación de energía eléctrica desde sistemas renovables de energía.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que no existe diferencia de formas de onda y características eléctricas indistintamente de la modulación, esto debido a que la modificación propuesta elimina una etapa que suele implementarse por hardware. Esta metodología se puede implementar en cualquier inversor que requiera una etapa digital en el control de sus interruptores. La principal ventaja de la modificación es reducir el recurso computacional del microcontrolador, y además poder evitar un problema de sincronización entre el microcontrolador y la etapa digital.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Hedberg, S. Kullander, and H. Frank, “The world needs a new energy paradigm,” *Ambio*, vol. 39, no. 1, pp. 1–10, 2010. doi: 10.1007/s13280-010-0057-9.

2. Z. Li, H. Cai, X. Li and X. Kong, "Modulation Strategy Research for Dual Bridge Matrix Converter on DSP," 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Zhangjiajie, China, 2009, pp. 396-399, doi: 10.1109/ICMTMA.2009.572.

3. R. Barzegarkhoo, M. Forouzesh, S. S. Lee, F. Blaabjerg and Y. P. Siwakoti, "Switched-Capacitor Multilevel Inverters: A Comprehensive Review," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 9, pp. 11209-11243, Sept. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3164508.

4. J. F. Ardashir, M. Ghassemi, B. Rozmeh, F. Blaabjerg and S. Peyghami, "A Five-Level Transformer-Less Grid-Tied Inverter Structure with Capacitive Voltage Divider Concept with Leakage Current Elimination," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 5, pp. 6025-6036, Sept.-Oct. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3275928.

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DETERIORO DE FACHADAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE MORELIA

Diana M. Torres, José M. Jara, Luis Olmos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
jose.jara@umich.mx

RESUMEN

El Centro Histórico de la ciudad de Morelia es uno de los sitios en México declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. La conservación de estos sitios es de vital importancia para la sociedad y para la economía del lugar. Cuando las construcciones, y particularmente las fachadas, de un centro histórico se empiezan a deteriorar, aumenta la probabilidad de daño y colapso poniendo en riesgo no solo el reconocimiento de la UNESCO sino también la seguridad de las personas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el estado de deterioro de las fachadas del centro histórico de Morelia. Para ello, se aplicó una metodología de evaluación desarrollada en Italia para construcciones históricas y modificada en Portugal. La metodología se basa en cuantificar un conjunto de parámetros que se determinan con base en la inspección visual de las fachadas. En este trabajo se propone una modificación a la metodología inicialmente desarrollada para particularizar su uso en Morelia. Además de las inspecciones visuales, se estudiaron muestras representativas de algunas fachadas con tomografía computarizada para conocer con mayor precisión el estado de conservación del material. Los resultados mostraron las zonas del centro histórico con mayor y con menor deterioro y se identificaron las fachadas que no solo presentan importante deterioro, sino que en su estado actual presentan un peligro para los transeúntes por la posibilidad de volteo ante la acción de un evento sísmico.

INTRODUCCIÓN

En el año de 1990 se le dio a la ciudad de Morelia la categoría nacional de cuidad con Zona de Monumentos históricos, y en el año de 1991 la UNESCO le asignó la categoría de patrimonio mundial. Teniendo una impresionante belleza arquitectónica en el centro Histórico de Morelia, destaca el uso de la cantera como principal material de construcción en diferentes tamaños, formas, así como con diferentes técnicas de construcción, complementándose el uso de la cantera con otros materiales como la madera y la arcilla. Las manzanas de casas se construyeron sin afectar la armonía que presenta el trazado de la ciudad.

La conservación de estos sitios es de vital importancia para la sociedad y para la economía del lugar. Cuando las construcciones, y particularmente las fachadas, de un centro histórico se deterioran, aumenta la probabilidad de daño y colapso poniendo en riesgo no solo el reconocimiento de la UNESCO sino también la seguridad de las personas. La evaluación del estado de conservación de las fachadas proporciona también información necesaria para determinar su vulnerabilidad y para clasificarlas desde el punto de vista del a seguridad de las construcciones.

TEORÍA

De acuerdo con Caicedo et al. (1994), la vulnerabilidad sísmica se define como el daño que podría presentarse en una estructura ante la presencia de un evento sísmico de cierta intensidad. Se puede describir la función de vulnerabilidad como la relación existente entre las intensidades que se presentan durante un evento sísmico y el daño que se generar en la estructura. La vulnerabilidad de una estructura depende del diseño y forma de construcción, pero no está determinada por su ubicación. Cada tipo de estructura tiene su propia función de vulnerabilidad, y cómo se determina esta función depende de cómo la estructura se comporta bajo la presencia de un sismo.

La evaluación del índice de vulnerabilidad de las fachadas del centro histórico de Morelia se realizó a través de la inspección visual. Se cuantifican los 13 parámetros (Ferreira, 2009; Ferreira, et al, 2017) que se muestran en la Tabla 1.

Cada uno de los parámetros evaluados se clasifica en una de cuatro clases cualitativas (A, B, C o D), según las características observadas en las fachadas analizadas. Estas clases se asocian con valores numéricos, para la clase A (0), clase B (5), clase C (20) y clase D (50). Posteriormente, estos valores se multiplican por los pesos específicos asignados a cada parámetro, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros de evaluación del índice de vulnerabilidad

Parámetro 1	Geometría del muro de fachada
Parámetro 2	Esbeltez del muro
Parámetro 3	Área de aberturas de muro
Parámetro 4	Desalineación de aberturas de muro
Parámetro 5	Interacción con fachadas adyacentes
Parámetro 6	Calidad de la mamposteria
Parámetro 7	Estado de conservación
Parámetro 8	Reemplazo del sistema original de piso
Parámetro 9	Conexión a muros ortogonales
Parámetro 10	Conexión a diafragmas horizontales
Parámetro 11	Conexión a sistema de techo
Parámetro 12	Elementos conectados a la fachada
Parámetro 13	Elementos beneficiosos para el comportamiento

Tabla 2. Pesos asignados para cada parámetro

	Peso
Parámetro 1	0.5
Parámetro 2	0.5
Parámetro 3	0.5
Parámetro 4	0.5
Parámetro 5	0.25
Parámetro 6	2
Parámetro 7	2
Parámetro 8	0.25
Parámetro 9	2
Parámetro 10	0.5
Parámetro 11	2
Parámetro 12	0.5
Parámetro 13	-2

Parámetro 1. Geometría de la fachada

El primer parámetro evalúa la relación geométrica entre la altura y la base de la fachada de la edificación, una característica fundamental en la estimación de su estabilidad frente a cargas sísmicas.

La clase A corresponde a relaciones donde $H/B < 0.4$, fachadas bajas y anchas, con proporciones geométricas que ofrecen mayor estabilidad ante sismos. Esta clase representa el nivel más bajo de vulnerabilidad. La clase B corresponde a relaciones donde $0.4 \leq H/B < 0.6$, fachadas con un riesgo ligeramente mayor, aunque aún dentro de límites razonables de seguridad estructural.

La clase C corresponde a relaciones donde 0.6 ≤ H/B < 1.0, fachadas que presentan una mayor susceptibilidad a sufrir daños por movimientos sísmicos debido a su menor rigidez lateral. La clase D corresponde a relaciones donde H/B ≥ 1.0, son fachadas esbeltas y altas en relación con su base, las cuales presentan una alta vulnerabilidad sísmica, especialmente si no cuentan con elementos de refuerzo o confinamiento adecuados.

Parámetro 2. Esbeltez máxima

Un muro entre más esbelto sea presenta mayor probabilidad de volcarse. Con este parámetro se evalúa la relación que tiene la altura entre el espesor de la fachada.

La clase A H/s ≤ 9, corresponde a muros robustos con baja esbeltez, presentan mayor rigidez y resistencia ante esfuerzos sísmicos. Representan el nivel más bajo de vulnerabilidad. La clase B 9 < H/s ≤ 15, corresponde a muros con esbeltez moderada, en los que la capacidad estructural comienza a verse comprometida, aunque aún se consideran aceptables.

La clase C 15 < H/s ≤ 20, corresponde a muros más esbeltos que ofrecen menor resistencia lateral, con un riesgo significativo de falla estructural, sobre todo en construcciones sin refuerzo. La clase D H/s ≥ 20, corresponde a muros extremadamente esbeltos que presentan muy alta vulnerabilidad sísmica, especialmente frente a movimientos horizontales intensos. Esta clase representa el nivel más crítico de riesgo.

Parámetro 3. Área de aberturas

Este parámetro depende de las dimensiones de las aberturas de ventanas y puertas. Para asignar la clase a este parámetro se obtiene un porcentaje del área de las aberturas respecto al área total de la fachada.

La clase A serán fachadas que su área de aberturas es inferior al 20%. La clase B corresponde a fachadas donde su área de aberturas es inferior al 35%.

La clase C corresponde a fachadas donde su área de aberturas es inferior al 60% y la clase D son fachadas con aberturas superior al 60%.

Parámetro 4. Desalineación de aberturas

Tanto el área, como la manera en que están distribuidas las aberturas en una fachada, pueden determinar su comportamiento sísmico. Si las aberturas no están bien alineadas, tanto vertical como horizontalmente, pueden debilitar la estructura y afectar su capacidad para soportar carga.

La clase A son fachadas con aberturas de tamaño regular alineadas en altura. La clase B son fachadas con aberturas de tamaño regular o irregular que presentan desalineación horizontal en más de la mitad de su ancho.

La clase C son fachadas con aberturas de tamaño regular o irregular con desalineación vertical superior a la mitad del ancho. En la clase D se presentan dos casos el primero son fachadas con aberturas completamente desalineadas tanto en sentido vertical como horizontal, el segundo caso son fachadas con presencia de grandes aberturas o vanos abiertos en cualquier nivel de planta.

Parámetro 5. Interacción con fachadas adyacentes

Este parámetro evalúa entre una fachada y sus colindantes, las diferencias de altura entre muros adyacentes pueden originar el fenómeno de golpeteo durante un sismo.

Clase A: La fachada y ambas colindantes poseen idéntica altura, lo cual minimiza el riesgo de golpeteo y favorece una respuesta sísmica homogénea.

Clase B: Solo una de las fachadas adyacentes comparte la misma altura que la fachada en estudio, mientras que la otra presenta distinto nivel.

Clase C: Ninguna de las fachadas contiguas coincide en altura con la fachada analizada, por lo que hay desigualdad que aumenta la probabilidad de daños por impacto en ambos lados.

Clase D: La fachada se ubica en esquina, careciendo en uno de sus costados de muro colindante.

Parámetro 6. Calidad de los materiales

La calidad de la mampostería fue determinada a través de algunas fachadas con tomografía computarizada para conocer con mayor precisión el estado de conservación del material. Cada tomografía que se realizó de la cantera dio como resultado la cantidad de poros que se presenta en el material, a mayor cantidad de poros disminuye la calidad del material.

Parámetro 7. Estado de conservación

Para evaluar este parámetro se determina la humedad, erosión, suciedad, asentamiento, agrietamiento, fisuras, desprendimiento, lesiones químicas y perdida de juntas que está presente en cada fachada.

Parámetro 8. Reemplazo del sistema de piso original

Normalmente uno de los cambios que más se encuentran presentes en los edificios antiguos es el cambio del piso original (P) por pisos de concreto u otros materiales, que aportan más peso al sistema e incluso llegan a ser incompatibles con el material presente en la fachada. Las losas pueden generar un empuje fuera del plano de las fachadas. La clase A $0 \leq P < 25\%$, la clase B $25\% \leq P < 50\%$, la clase C $50\% \leq P < 75\%$, la clase P $\geq 75\%$.

Parámetro 9. Conexión a muros ortogonales

Para evaluar el nivel de conexión entre la fachada y los muros ortogonales, se analizan las esquinas, identificando la dimensión y disposición de las piedras. En las esquinas se puede verificar si existe conexión que reduzca la posibilidad de volteo. La tabla 3 muestra las clases para este parámetro.

Tabla 3. Determinación de clase para el parámetro 9

A	La fachada está bien conectada a las paredes perpendiculares, a los pisos y a la cubierta (mediante elementos metálicos de cintaje, tirantes y también mediante buenas técnicas de asentamiento y trabado de la albañilería). Estas formas de conexión se verifican en todas las esquinas y conexiones ortogonales entre las paredes.
B	La fachada está solamente bien conectada mediante buenas técnicas de asentamiento y trabado de la albañilería en las esquinas, y no hay señales de fragilización. Se observan condiciones de clase A únicamente en algunas esquinas y conexiones ortogonales.
C	La fachada no está bien conectada a las paredes de empena ortogonales (una situación común en edificios adosados construidos en fases distintas), pero no hay señales de fragilización. Se podrían verificar condiciones de clase B únicamente en algunas esquinas y conexiones ortogonales.
D	La fachada presenta deformaciones, con un riesgo considerable de colapso (grietas que indican esta falta de estabilidad). Se observa desprendimiento, desligamiento o grietas que atraviesan en las esquinas y conexiones ortogonales.

Parámetro 10. Conexión a diafragmas horizontales

Para evaluar conexión a diafragmas horizontales y techo, se evalúa la eficiencia de las conexiones entre los diafragmas horizontales (losas, techos o pisos) y la pared de fachada, ya que los diafragmas pueden dar estabilidad fuera del plano cuando se presente un sismo. La tabla 4 presenta las clases para este parámetro.

Parámetro 11. Conexión a sistema de techo

Este parámetro evalúa el empuje que puede transmitir el techo a la fachada del edificio. Los criterios para su definición se centran en la configuración estructural del techo, incluyendo su peso, el tamaño de abertura y las condiciones de soporte en el perímetro. La capacidad de la cubierta para generar impulsos horizontales en las paredes es crucial en el comportamiento esperado de las fachadas. Las clases para este parámetro se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Determinación de clase para el parámetro 10

Número de conexiones eficientes de diafragmas horizontales (%)	CLASE	FZA o DA o FS
≥ 75%	A	B
≥ 50% e < 75%	B	C
≥ 25% e < 50%	C	D
< 25%	D	-
FZA: Fragilización de los pavimentos en la zona de apoyo. DA: Signos de deformación, pudrimiento, retracción y distorsión grave. FS: Falta de seguridad de circulación.		

Tabla 5 Determinación de clase para el parámetro 11

				Estado de consevación	
Empuje	Cinta Perimetral	Tirantes	clase	Malo	Pésimo
No impulsivo	1 (si)	1 - 0	A	B	C
	1 - 0	1	A	B	C
	0 (No)	0	B	C	D
Poco impulsivo	1	1 - 0	B	C	D
	1-0	1	B	C	D
	0	0	C	D	D
Impulsivo	1	1 - 0	C	D	D
	1 - 0	1	C	D	D
	0	0	D	-	-

Parámetro 12. Elementos no estructurales

Este parámetro evalúa aquellos elementos que están en la fachada y que pueden caerse durante la acción de un sismo. Ejemplos de ello son balcones, gabinetes de aire acondicionado, etc. Las clases para este parámetro se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Determinación de clase para el parámetro 12

A	No hay balcones, cornisas, adornos, jardineras ni otros elementos (como equipos mecánicos, aire acondicionado, letreros luminosos u otros tipos de anuncios) conectados a la fachada del edificio
B	Hay algunos elementos de peso ligeros como lámparas, señales luminosas, letreros, toldos, etc., que están conectados a la fachada. Sin embargo, no hay balcones ni cornisas en la fachada.
C	Hay elementos pesados como equipos mecánicos, aparatos de aire acondicionado, etc., que están conectados a la fachada. Sin embargo, no hay balcones ni cornisas en la fachada.
D	Hay balcones, cornisas u otros elementos pesados que están conectados a la fachada del edificio.

Parámetro 13. Elementos de mejora

También existe el caso donde las intervenciones o elementos que se agregaron a la fachada pueden mejorar su comportamiento ante un sismo lo que la hace menos vulnerable; ejemplo de este tipo de mejoras son la presencia de escaleras, arcos exteriores y muros de mayor espesor a nivel de planta baja. Las clases en las que se puede encontrar este parámetro se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Determinación de clase para el parámetro 13

A	Sin mejora
B	Escaleras exteriores, arcos, gigantes, etc.
C	Acciones de refuerzo
D	Acciones de fortalecimiento

El índice de la vulnerabilidad sísmica se calcula como la suma de las ponderaciones de los 13 parámetros, y este índice marca el daño que podría presentar la fachada del edificio.

Usando las ecuaciones 1 y 2 se relaciona el índice de vulnerabilidad con las intensidades macrosísmicas y posteriormente se obtiene el grado medio de daño.

$$V = 0.592 + 0.0057\, x\, I_{vf} \quad (1)$$

$$\mu_D = 2.5 + 3\, x \tanh\left(\frac{I+6.25\, x\, V-12.7}{Q}\right) f(V,I);\ \ 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (2)$$

$$f(V,I)\begin{cases} e^{V/2(I-7)} & I \leq 7 \\ 1 & I > 7 \end{cases}$$

I es la intensidad de Mercalli Modificada, Q es la demanda de ductilidad esperada en la fachada. Por los materiales que integran las fachadas de edificios históricos se asumió Q=1

INSPECCIONES VISUALES

Para recopilar la información, se llevaron a cabo visitas técnicas de campo al centro histórico de la ciudad de Morelia. Durante estas inspecciones se procedió a la elaboración de un registro fotográfico, complementado con anotaciones detalladas in situ, con el fin de obtener la información necesaria para la evaluación de las edificaciones seleccionadas.

Las visitas permitieron capturar la información de la tabla 8, correspondiente a los trece parámetros establecidos para la determinación del Índice de Vulnerabilidad Sísmica, conforme a la metodología adoptada en el estudio. Dichos parámetros, que consideran aspectos constructivos, estructurales y de conservación, se integran en esta tabla.

CALIDAD DEL MATERIAL

Para analizar la posible pérdida de resistencia de la mampostería de las construcciones del centro histórico de morelia, se realizaron imágenes 3D de muestras de rocas de cantera de las edificaciones y se evaluó la porosidad contenida en ellas. Para obtener un valor de reducción de las propiedades mecánicas se utilizó la ecuación propuesta por Cabezas Villa y col. (2018), que fue obtenida ajustando la ecuación de Gibson and Ashby (1997) a partir de materiales porosos fabricados con porosidades controladas y evaluadas experimentalmente. La ecuación sugiere que el módulo de Young o la resistencia al límite elástico sigue una función potencial como sigue:

$$E = E_0(1-p)^4 \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0(1-p)^4 \quad (4)$$

En donde E y E_0 son el módulo del material con poros sin poros respectivamente, p es la porosidad, σ y σ_0 son la resistencia al límite elástico del material con poros sin poros respectivamente.

Tabla 8. Ejemplo de la obtención del índice de vulnerabilidad

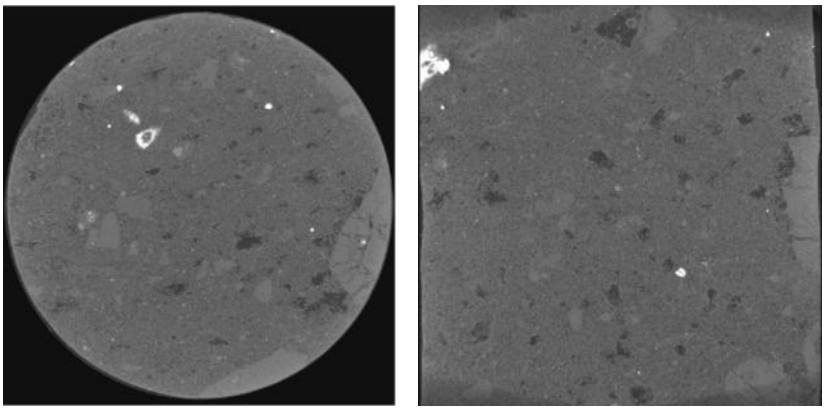
FORMATO DE EVALUACIÓN



Parámetros de evaluación del índice de vulnerabilidad y pesos (Ferreira et. al; (2017))

PARAMETROS		Clases Cvi				Peso	
		A	B	C	D	pi	
Grupo 1. Geometría de la fachada y huecos							TOTAL
P1	Geometría del muro de fachada	0	**5**	20	50	0.5	2.5
P2	Esbeltez del muro	**0**	5	20	50	0.5	0
P3	Área de aberturas de muro	**0**	5	20	50	0.5	0
P4	Desalineación de aberturas de muro	**0**	5	20	50	0.5	0
P5	Interacción con fachadas adyacentes	0	5	**20**	50	0.25	5
Grupo 2. Materiales de construcción y conservación							
P6	Calidad de la mamposteria	0	**5**	20	50	2	10
P7	Estado de conservación	0	**5**	20	50	2	10
P8	Reemplazo del sistema original de piso	0	5	**20**	50	0.25	5
Grupo 3. Eficiencia de conexión a otros elementos estructurales							
P9	Conexión a muros ortogonales	0	**5**	20	50	2	10
P10	Conexión a diafragmas horizontales	0	**5**	20	50	0.5	2.5
P11	Conexión a sistema de techo	0	**5**	20	50	2	10
Grupo 4. Elementos conectados a la fachada							
P12	Elementos conectados a la fachada	**0**	5	20	50	0.5	0
P13	Elementos beneficiosos para el comportamiento	**0**	5	20	50	-2	0
						TOTAL	55.00
						Ivf	**16.30**

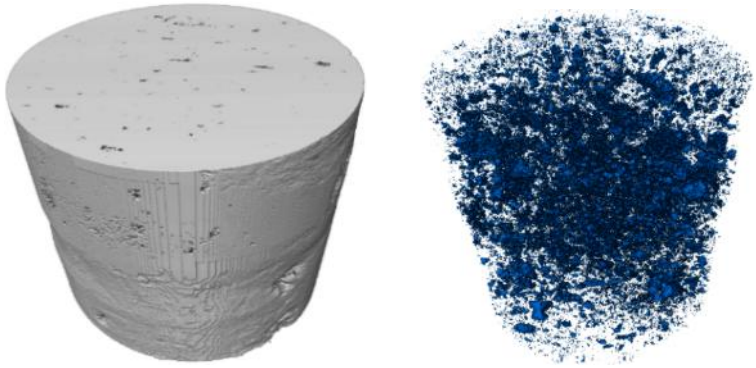
Se inició con las imágenes obtenidas en niveles de grises. A manera de ejemplo se muestra un corte virtual 2D en la Figura 1. Se observa que la porosidad aparece de manera dispersa y aparentemente aislada en el plano xy (Fig. 1a) y el plano xz (Fig. 1b) del cilindro observado.



(a) (b)

Fig. 1 Imágenes de la tomografía computacional de las muestras. (a) Plano xy; (b) plano xz.

Para tener una representación 3D se realizó el renderizado de la parte sólida y de la porosidad contenida en toda la muestra, las Figuras 2a y 2b muestran la parte sólida de la roca y los poros interiores, respectivamente.



(a) (b)

Figura 2. Representación en 3D de la muestra. (a) Parte sólida; (b) poros interiores.

Con ello, se determinó el volumen de poros ocupado en toda la muestra mediante el conteo de voxéles ocupados por espacio que fue determinado como porosidad. Además, se realizó la cuantificación del volumen ocupado por la parte solida de la roca lo que permitió obtener el volumen total de la muestra. Enseguida, la fracción en volumen de poros de toda la muestra es obtenida dividiendo la fracción en volumen ocupada por los poros por el volumen total de la muestra.

A partir de la medición de la porosidad se realizó la estimación de la reducción de las propiedades mecánicas de las rocas utilizando las ecuaciones 3 y 4. Para este caso se asume que la reducción de las propiedades mecánicas sigue el mismo comportamiento en función de la porosidad. La mayoría de las muestras presenta una reducción del 10 al 20%, excepto por una muestra que presentó un valor mayor al 50% de pérdida de la resistencia mecánica.

RESULTADOS

Las fachadas visitadas del centro histórico de Morelia se muestran en la figura 3, los índices de vulnerabilidad sísmica promedio por manzana se encuentran en un intervalo que oscila entre el 14 % y el 25 %, según los resultados obtenidos a partir del análisis aplicado. Esta distribución de valores se presenta de manera gráfica en la Figura 4, donde se observa el comportamiento relativo de la vulnerabilidad estructural en las distintas manzanas evaluadas dentro del área de estudio.

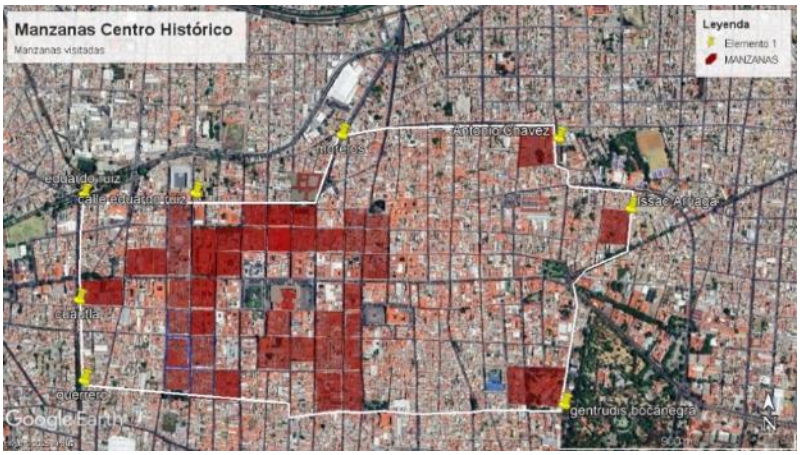


Figura 3. Manzanas visitadas del Centro Histórico de Morelia

El nivel de daño esperado fue evaluado para dos escenarios de intensidad sísmica: uno correspondiente a un sismo de servicio y otro a un sismo extraordinario.

En el caso del sismo de servicio, que representa un evento de baja a moderada magnitud que puede ocurrir con mayor frecuencia, el daño esperado es mínimo, tanto en términos de severidad como de número de edificaciones afectadas. Las afectaciones serían leves y localizadas, sin comprometer la integridad estructural de las fachadas en la mayoría de los casos.

Por el contrario, ante un sismo extraordinario, que representa un evento de gran magnitud y baja recurrencia, se prevé un grado de daño considerablemente mayor. En este escenario, un gran número de fachadas sufriría afectaciones severas, con manifestaciones estructurales y no estructurales significativas que podrían comprometer la estabilidad o funcionalidad de las edificaciones. Esta diferencia entre ambos escenarios resalta la vulnerabilidad del patrimonio edificado frente a eventos sísmicos de alta intensidad.

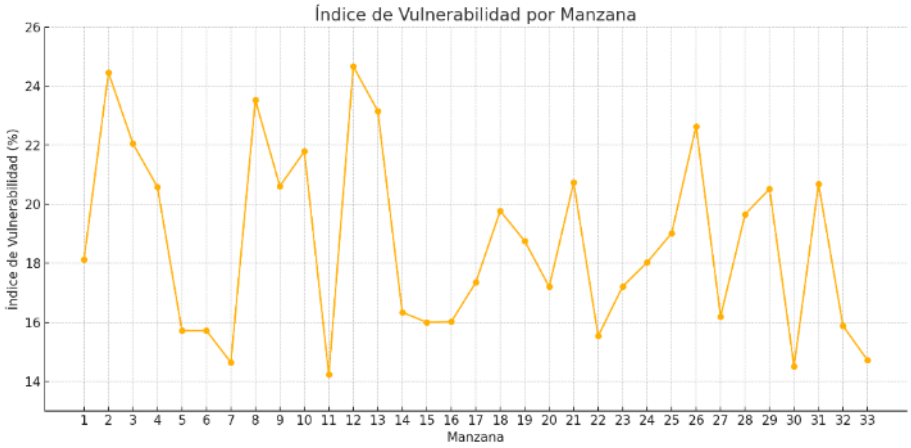


Figura 4. Índices de vulnerabilidad por manzana

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se expone la metodología utilizada para estimar el daño potencial en las fachadas de edificaciones históricas ubicadas en el centro de la ciudad de Morelia, ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Esta metodología toma en cuenta las características constructivas del patrimonio edificado.

Como antecedente histórico relevante, se hace referencia al sismo ocurrido en el año 1858, cuyo epicentro se localizó en las inmediaciones de Morelia y cuya intensidad fue lo suficientemente alta (estimada en IX en la escala de Mercalli Modificada) que causó afectaciones importantes en las construcciones de la época. Con base en este evento, se proyecta un escenario sísmico hipotético con una intensidad similar.

Si un evento sísmico de características comparables al de 1858 llegara a repetirse en el futuro, los resultados obtenidos a través de la metodología indican que el nivel de daño esperado sería severo, afectando de manera considerable un número importante de edificios históricos. Las afectaciones incluirían daños estructurales graves en fachadas, deterioro de elementos arquitectónicos relevantes y, en algunos casos, riesgo de colapso parcial o total de ciertas edificaciones vulnerables, especialmente aquellas que no han recibido intervenciones de refuerzo o mantenimiento adecuados. Esto pone en evidencia la necesidad de implementar medidas preventivas que permitan mitigar la vulnerabilidad sísmica del patrimonio arquitectónico de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. L. Cabezas-Villa, L. Olmos, D. Bouvard, J. Lemus-Ruiz, O. Jiménez (2018). “Processing and properties of highly porous Ti6Al4V mimicking human bones”, Journal of Materials Research 33, 650–661 (2018). https://doi.org/10.1557/jmr.2018.35
2. J. E. Caicedo, A.H. Barbat, J.A. Canas (1994). “Vulnerabilidad sísmica de edificios”, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). DOI: 10.13140/2.1.4258.3366. ISBN: 84-87867-43-X
3. T. M. Ferreira (2009). “Avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria”. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil. Tesis de maestría.
4. L. J. Gibson, M. F. Ashby, (1997) “Cellular Solids: Structure and Properties”. 1st ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1997
5. T. M. Ferreira, R. Vicente, R. A. Maio, (2017). “Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of a simplified methodology”. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(6), 2533–2561. https://doi.org/10.1007/s10518-016-0059-1

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y LUMINISCENTES DEL FÓSFORO $CaAl_2Si_2O_8$ DOPADO CON Tb^{3+} Y Eu^{3+}

Maria Jose Soto Miranda[1], Angel de Jesús Morales Ramírez[2], Héctor Javier Dorantes Rosales[1], Maria Luz Carrera Jota[1], Margarita García Hernández[1], Carlos Felipe Hernández Fuentes[3]

[1]Escuela Superior de Ingeniería química e Industrias Extractivas (ESIQIE) - IPN, [2]Centro de Investigación e Innovación Tecnológica – Instituto Politécnico Nacional, [3]Otra.
Sotomajo90@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se sintetizó un fosforo luminiscente a partir de aluminosilicato de calcio ($CaAl_2Si_2O_8$) en fase anortita, dopada con 2.5 mol-X (X=Eu o Tb) mediante el método sol-gel. Posteriormente, los materiales fueron tratados térmicamente a 900, 1000 y 1100 °C durante 2 horas.

El estudio de las propiedades estructurales y luminiscentes de polvos de $CaAl_2Si_2O_8$:Eu^{3+}, Tb^{3+}, se llevaron a cabo mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectrometría de fluorescencia. Los resultados confirman la presencia de la fase anortita a partir de los 900°C de tratamiento para todas las condiciones. Las muestras consisten en partículas micrométricas con la presencia de porosidad, mostrando en contraste composicional, la presencia de dos regiones que corresponden a la fase anortita (gris) y la fase anortita dopada (blanca), tanto para $CaAl_2Si_2O_8$-Eu como para $CaAl_2Si_2O_8$-Tb. Adicionalmente, los espectros de emisión fueron obtenidos a una longitud de onda de excitación de 233 a 393 nm, de las cuales se obtuvieron bandas de emisión de 614 nm para el Eu^{3+} y 542 nm para Tb^{3+}, presentando los colores reales en el diagrama CIE, siendo rojo y verde para Eu^{3+} y Tb^{3+}, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

Se le llama material luminiscente, material centelleante o “fósforo” a aquel que es capaz de emitir luz como resultado de la absorción de energía. Este comportamiento puede ser iniciado por el bombardeo con fotones, electrones, iones positivos y por esfuerzo mecánico, reacción química o por calentamiento. Además, son capaces de transformar ciertos tipos de energía en radiación electromagnética, lo que significa que, en respuesta a un estímulo específico, estos materiales emiten luz típicamente dentro de la región espectral ultravioleta (UV) a infrarroja (IR), es decir, absorbe luz por debajo de los 380 nm y esta a su vez es emitida entre 380 y 750 nm.

Los materiales luminiscentes han impulsado el desarrollo de diodos emisores de luz mejorando aspectos tecnológicos para la sociedad. La generación de nuevos materiales permite el uso de compuestos como las tierras raras, permitiendo dopar matrices y obtener compuestos luminiscentes permitiendo mejorar las tecnologías ya existentes. Particularmente, los sistemas de iluminación requieren de lámparas fluorescentes libres de mercurio con la finalidad de reducir los riesgos ambientales y toxicológicos que se puedan presentar.

Por otro lado, una parte esencial de los síntomas luminiscentes lo representa la matriz sobre la cual se dispersan los elementos que luminiscerán, para lo cual se ha analizado diversos compuestos cómo óxidos, boratos, vanadatos, fosfatos, etc. En la última década los feldespatos han llamado la atención debido a que constituyen el grupo mineralógico más abundante en la corteza terrestre constituidos esencialmente de óxidos de silicio y aluminio en combinación de cationes como calcio, magnesio, sodio y potasio, y han demostrado que pueden ser dopados de manera efectiva con cationes de tierras raras, logrando transmitir eficientemente la energía a los centros luminiscentes.

En general, el aluminosilicato de calcio ($CaAl_2Si_2O_8$) en su fase anortita ha sido dopado con tierras raras para su estudio como luminóforo, sintetizado y caracterizado en la búsqueda de mejores

fuentes de iluminación y/o aplicaciones optoelectrónicas, tal es el cado de Diodos Emisores de Luz (LED's), sensores, etc.

Teoría

Un haz de luz visible tiene un determinado rango de largos de onda del espectro electromagnético, que varía entre los 380 nm (largo de onda del color violeta) y 740 nm (largo de onda del color rojo) (1 nm = 1 nanómetro = 1.10-9 metro), Las ondas luminosas visibles (espectro de luz visible) son las únicas ondas electromagnéticas que podemos ver y el color de cada una corresponde a una longitud de onda diferente.

La luminiscencia puede ser de origen luminoso o provocado por radiaciones próximas a las de la luz y a su vez puede subdividirse en fluorescencia o fosforescencia debido a un tiempo característico (τ) después de la absorción de la radiación La emisión de luz en los compuestos luminiscentes se debe a las transiciones electrónicas de los átomos que componen el sistema emisor previamente excitado, usualmente las impurezas son de la familia de los lantánidos (tierras raras), en una matriz anfitriona (Eu^{3+}, Tb^{3+} en $CaAl_2Si_2O_8$).

Las recientes investigaciones se han enfocado en el $CaAl_2Si_2O_8$ dopado con iones lantánidos (III) los cuales llevan a aplicaciones en diodos emisores de luz, comparando sus estructuras cristalinas y los mecanismos luminiscentes de estas. Cabe mencionar, que el desarrollo de estos materiales ha sido en su mayoría por el método de reacción en estado sólido o el método de combustión en solución donde, se utilizan temperaturas de tratamiento térmico entre los 1200 y 1500 °C. Al tener esta matriz la capacidad de alojar iones Ln^{3+}, se presentan las bandas de absorción CT y los colores de emisión registrados son representados en el diagrama de color CIE 1931.

Con la finalidad de reducir la temperatura de obtención de la fase anortita y acortar el método de síntesis, se utiliza el método sol-gel, ya que permite obtener materiales de alta pureza a bajas temperaturas y tiempos de reacción.

PARTE EXPERIMENTAL

La síntesis para la obtención de polvos luminiscentes de $CaAl_2Si_2O_8$ con 2.5% mol de Tb ó Eu se realizó mediante el método sol-gel a partir de Nitrato de Aluminio (99.3 % ACS reagent, sigma), Nitrato de Calcio (99 % Sigma – Aldrich), Nitrato de Europio (99.9 % Sigma – Aldrich), Nitrato de Terbio (99.9 % Sigma – Aldrich) y TEOS (98 % ACS Aldrich) como precursores y Agua destilada y Etanol como disolventes. Para la síntesis de polvos luminiscentes se parte de dos soluciones con los precursores: la primera corresponde a una disolución en agua destilada con los precursores de Ca y Al, manteniéndose en agitación constante durante 30 min y una temperatura de 60 °C, transcurrido ese tiempo se adiciona el ion dopante (Eu o Tb) a una concentración molar de 2.5 %mol. En la segunda solución se tiene el precursor de Si disuelto en etanol en agitación constante por 30 min, el cual se añade a la primera solución gota a gota durante 15 minutos para posteriormente permanecer en agitación constante por un lapso de 2 horas. El "sol" obtenido se coloca en una estufa a 60 °C por 24 horas con la finalidad de obtener un "gel" homogéneo y transparente.

Posteriormente, la evaporación de los disolventes se lleva a cabo con un tratamiento de secado a 120 °C por 24 horas, seguido de un tratamiento de calcinación de la materia orgánica a una temperatura de 500 °C por 2 horas. Finalmente, los materiales son sometidos a tratamientos térmicos a 900, 1000 y 1100 °C por 2 horas.

La caracterización estructural y morfológica se llevó a cabo mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX-D8 advanced Bruker) y microscopía electrónica de barrido (MEB-6701F JEOL), mientras que la caracterización luminiscente se llevó a cabo por espectrometría de fluorescencia (F7000 Hitachi).

RESULTADOS

Sistema $CaAl_2Si_2O_8$ – Eu^{3+}

La Figura 1 muestra la evolución de los patrones de DRX a diferentes temperaturas y la morfología de las partículas en contraste composicional obtenida en el MEB. Los patrones de DRX de la muestra $CaAl_2Si_2O_8$–2.5% mol Eu^{3+} (ver Fig. 1(a)) se observa que, para la muestra calcinada a 500 °C con la finalidad de eliminar materia orgánica, la presencia de picos anchos está relacionados con un material ya sea de características nanométricas o amorfas. Cuando el material es tratado a 900°C, ocurre la formación de una fase cristalina por la presencia de picos característicos, los cuales se definen mejor a 1000 y 1100 °C. La fase cristalina fue indexada como $CaAl_2Si_2O_8$ en fase anortita de acuerdo con la carta ICDD-00-012-0301 perteneciente al grupo espacial p-1. Los picos máximos de difracción son los que se encuentran a 27.335°, 27.858° y 28.587°, los cuales pertenecen a los planos (131), ($2\bar{2}3$) y (220), respectivamente.

En recientes investigaciones de R. Sharma y col., Yinhai Wang y col., se llevó a cabo la síntesis del $CaAl_2Si_2O_8$ por reacción en estado sólido, para lo cual se obtuvo la fase anortita por encima de los 1300 °C, por otro lado, Baoling Wang y col., utilizaron el método sol-gel para obtener los polvos luminiscentes, en este caso obteniendo la fase a partir de los 950 °C.

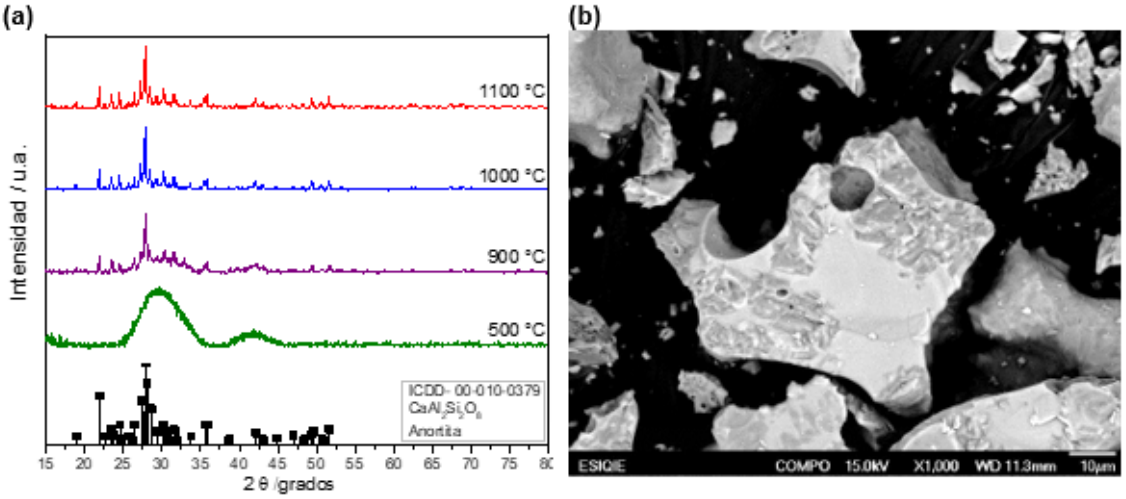


Figura 1. Caracterización estructural y morfológica del $CaAl_2Si_2O_8$:Eu^{3+}: **(a)** Evolución de los Patrones de DRX a diferentes temperaturas y **(b)** Micrografía de MEB en contraste composicional.

En la figura 1 (b) se observa la micrografía de $CaAl_2Si_2O_8$:Eu^{3+} haciendo uso del contraste composicional a 1000 aumentos, donde, se observan partículas irregulares con un tamaño de aproximadamente 80 micras en su parte más ancha y que además presentan porosidad. Es posible observar dos regiones con diferentes tonalidades: una blanca ya otra gris, donde en ambos casos se tiene la fase anortita, con la diferencia de que la parte blanca tiene además el ión dopante.

En la figura 2 se muestran las propiedades ópticas del sistema, donde, en (a) se muestra los espectros tanto de emisión como de excitación. El espectro de emisión fue obtenido excitando a una longitud de onda de 272 nm, que corresponde a la banda de transferencia de carga (CT) entre los enlaces Eu-O, además igualmente se excito a 393 nm, que corresponde a la banda de transferencia entre iones del mismo orbital atómico (ff), es decir, los enlaces Eu-Eu. Demostrando que la emisión más intensa se encuentra a 616 nm, correspondiente a la transición $^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ del Eu^{3+} dentro de la zona de color rojo según el espectro electromagnético. En (b) se observan las coordenadas de color CIE según las emisiones correspondientes a ambas longitudes de excitación, donde cada una se encuentran en la zona correspondiente al color rojo.

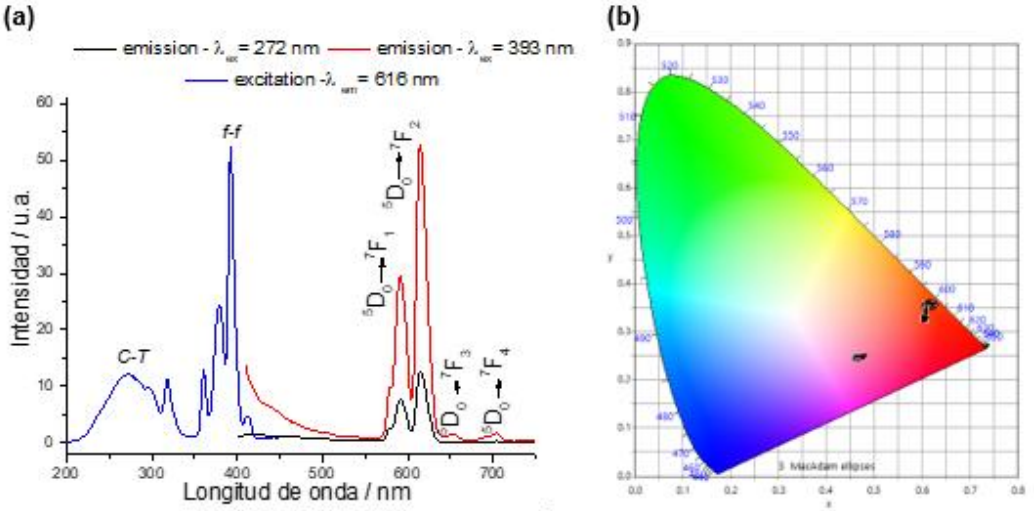


Figura 2. Propiedades ópticas del $CaAl_2Si_2O_8:Eu^{3+}$ **A)** Espectro de emisión y excitación. **B)** Diagrama CIE

Sistema $CaAl_2Si_2O_8$ – Tb^{3+}

La Figura 3 muestra la evolución de los patrones de DRX a diferentes temperaturas y la morfología de las partículas en contraste composicional obtenidas por MEB. Los patrones de DRX de la muestra $CaAl_2Si_2O_8$–2.5% mol Tb^{3+} (ver Fig. 3(a)) se observa que cuando la muestra es calcinada a 500 °C se elimina la materia orgánica, y se da la presencia de picos anchos, siendo esto relacionado a los materiales con características nanométricas o amorfas. Cuando el material es tratado a 900°C, ocurre la formación de la fase cristalina indexada como anortita de acuerdo a la carta ICDD-00-012-0301, obteniendo picos más definidos en los tratamientos térmicos a 1000 y 1100 °C.

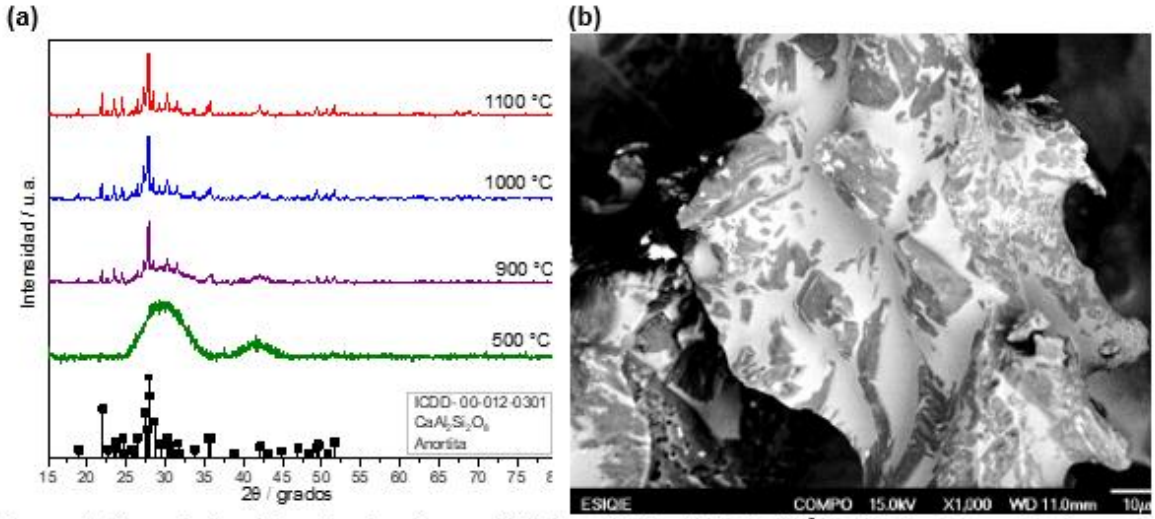


Figura 3. Caracterización estructural y morfológica del $CaAl_2Si_2O_8:Tb^{3+}$ **(a)** Estructura cristalina según las temperaturas de tratamiento térmico (DRX). **(b)** Morfología (MEB)

En la figura 1 (b) se observa la micrografía de $CaAl_2Si_2O_8$: Tb^{3+} haciendo uso del contraste composicional a 1000 aumentos, donde, se observan partículas irregulares. Es posible observar dos regiones con diferentes tonalidades: una blanca ya otra gris, donde en ambos casos se tiene la fase anortita, con la diferencia de que la parte blanca tiene además el ión dopante.

En la figura 4 se muestran las propiedades ópticas del sistema $CaAl_2Si_2O_8:Tb^{3+}$, donde, en (a) se muestran los espectros tanto de emisión como de excitación. El espectro de emisión fue obtenido a 233 nm correspondiente a la banda de transferencia de carga entre los enlaces Tb-O; además a 375 nm correspondiente a la banda de transferencia entre los enlaces de Tb. Los resultados muestran que la emisión más intensa se encuentra a 514 nm, correspondiente a la transición $^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ del Tb^{3+} dentro de la zona de color verde según el espectro electromagnético. En (b) se observan las coordenadas CIE de las emisiones correspondientes a ambas longitudes de excitación donde todas se encuentran en la zona correspondiente al color verde.

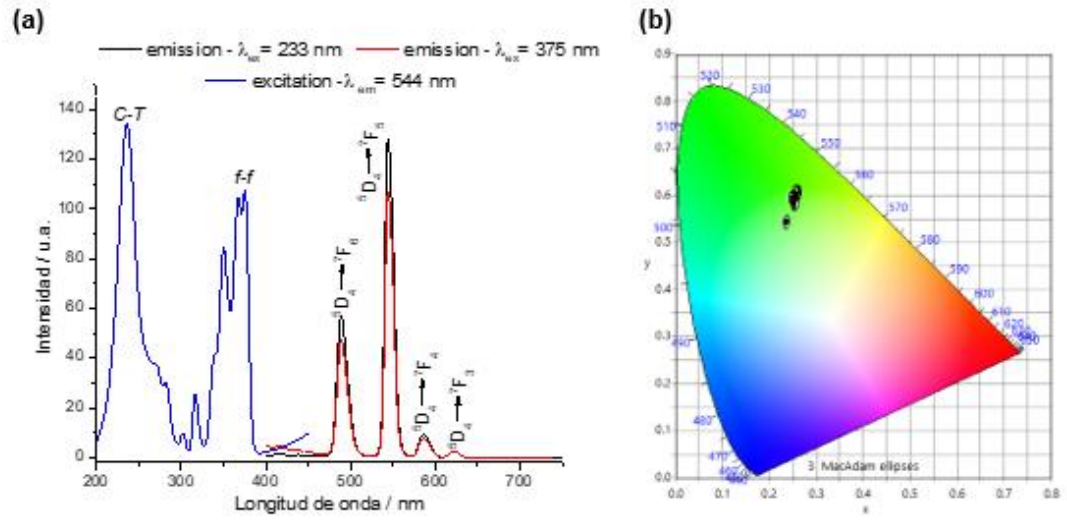


Figura 4. Propiedades ópticas del $CaAl_2Si_2O_8:Tb^{3+}$ **(a)** Espectro de emisión y excitación. **(b)** Diagrama CIE

CONCLUSIONES

El método de síntesis sol-gel y su posterior tratamiento térmico a partir de 900°C permitió la obtención de materiales luminiscentes del fosforo de $CaAl_2Si_2O_8$ dopado con Tb^{3+} y Eu^{3+}. Es importante mencionar que posterior a la síntesis y su calcinación para eliminar los residuos orgánicos a 500°C se formó un material con características amorfas. La fase anortita dopada fue identificada mediante un contraste composicional en MEB, la cual coexiste con una fase anortita sin dopar.

Adicionalmente, los espectros de emisión fueron obtenidos a una longitud de onda de excitación de 233 a 393 nm, de las cuales se obtuvieron bandas de emisión de 614 nm para el Eu^{3+} y 542 nm para Tb^{3+}, presentando los colores reales en el diagrama CIE, siendo rojo y verde para Eu^{3+} y Tb^{3+}, respectivamente los cuales pueden ser controlados según el contenido y el tipo de ion dopante, así mismo la temperatura de tratamiento térmico

BIBLIOGRAFÍA

1. M. G. Brik y A. M. Srivastava, Luminescent Materials: fundaments ans aplications, Alemania : Gruyter , 2023.
2. L. G y J. B, Spectroscopic Properties of Rare Earths in Optical Materials, vol. 18, doi:10.1007/3-540-28209-2, 2005.
3. R. L. Kohale , V. B. Pawade , D. S.J. y A. Hakeem Deshmukh, «Chapter 1 - Introduction to phosphate phosphors,» Optical Properties of Phosphate and Pyrophosphate Compounds, vol. ISBN 9780128230442, nº https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823044-2.00003-6, pp. 1-53, 2021.

4. J. Rodrigues, «Materiales luminiscentes: Síntesis, caracterización y aplicaciones,» MDPI, vol. 13, nº 15, pp. 8703 - 8705 , 2023.

5. H. Bouchoicha , G. Panczer, D. de Ligny, Y. Guyot, M. Baesso, L. Andrade, S. Lima y R. Ternane, «Synthesis and luminescent properties of Eu3+/Eu2+ co-doped calcium aluminosilicate glass–ceramics,» Journal of Luminescence , vol. 169, nº B, pp. 528-533, 2014.

6. N. Mahn Son , D. T. Tien y N. T. Quynh Lien , «Luminescence properties and energy transfer processes in Ce3+-Sm3+ co-doped calcium aluminosilicate materials,» Optical Materials , vol. 123, 2022.

7. Á. d. J. M. Ramírez, «Obtención de películas delgadas de Ln2O3:Eu3+, Tb3+ (Ln=Gd, Y, Lu) para imagenología de Rayos X,» Sección de estudios de posgrado e investigación , Altamira, Tamaulipas , 2009.

8. R. Sharma , G. C. Mishra, S. Dohble y A. K. Srivastava , «Study of europium doped CaAl2Si2O8 phosphor prepared by solution combustion synthesis: Optical, fracto-mechanoluminescence and thermoluminescence,» Optik, vol. 226, nº 2, pp. 1 - 8 , 2021.

9. Y. Wang, Z. Wang, P. Zhang, Z. Hong, X. Fan y G. Qian, «Preparation of Eu2+ and Dy3+ co-activated CaAl2Si2O8-based phosphor and its optical properties,» Materials Letters, vol. 58, nº 26, pp. 3308-3311, 2004.

10. B. Wang, L. Sun , H. Ju, S. Zhao, D. Deng, H. Wang y S. Xu, «Single-Pahsed White- Light emitting CaAl2Si2O8: Eu3+, Mn3+ phosphors prepared by a sol-gel method,» Journal of sol-gel science and technology , vol. 50, pp. 368-371, 2009.

11. F.-C. Lu y L.-J. Bai, «Room and high temperature photoluminescence of Eu2+ doped CaAl2Si2O8 phosphors,» Materials Letters, vol. 129, pp. 104-106, 2014.

DESARROLLO DE MODELOS PREDICTIVOS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINATES EN TIEMPO REAL

Francisco Jacob Ávila Camacho Autor[1], María de la Luz Delgadillo Torres[1], Sandra Paulina Castillo Cárdenas[1], Ana Rosa Velázquez Cordero[1], Miguel Ángel Olvera Orozco[1], Leonardo Miguel Moreno Villalba[1], Juan Manuel Stein Carrillo[1]

[1]Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
fjacobavila@tese.edu.mx

RESUMEN

La calidad del aire y la identificación de agentes temprana de contaminantes son aspectos críticos en ambientes urbanos e industriales. La integración de tecnologías de visión por computadora y sensores químicos (narices electrónicas) abre nuevas posibilidades para el monitoreo ambiental en tiempo real. El desarrollo de modelos predictivos para la detección de contaminantes ambientales ha avanzado significativamente gracias a la integración del aprendizaje automático (ML) y la inteligencia artificial (IA). Estas tecnologías de ML e IA mejoran los sistemas de monitoreo, lo que permite responder oportunamente a los eventos de contaminación. Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real utilizan sofisticados sensores y algoritmos de aprendizaje automático para rastrear los contaminantes y ´pronosticar la calidad del aire Estos sistemas permiten que las agencias ambientales intervengan oportunamente, lo que mejora la planificación de la salud pública. Si bien la integración del aprendizaje automático y la inteligencia artificial en la monitorización ambiental es muy prometedora, los desafíos como la calidad de los datos y la escalabilidad de los sistemas siguen siendo cuestiones críticas que deben abordarse para aprovechar al máximo su potencial en las aplicaciones del mundo real. En este trabajo se desarrolló un sistema predictivo que combina datos visuales y químicos para detectar, clasificar y alertar sobre la presencia de contaminantes en tiempo real, permitiendo una respuesta rápida ante posibles riesgos ambientales donde se puntualiza la contribución de esta investigación interdisciplinaria y el liderazgo femenino en la innovación tecnológica, promoviendo la diversidad en áreas STEM. La metodología incluye la integración de sensores para visón por computadora y narices electrónicas para captar imágenes de las áreas de monitoreo, así como firmas químicas que permitan determinar la composición de la atmósfera. La fusión de datos multimodales para la extracción de características relevantes tanto en imágenes como en datos de sensores de gas. Con ello se generó el desarrollo del modelo predictivo para la clasificación y regresión con aprendizaje profundo. Se llevó a cabo el entrenamiento y validación con los datasets recopilados en campo y simulaciones para entrenar el modelo, seguido de técnicas de validación cruzada para evaluar su desempeño. El resultado del modelo permitió integrar el modelo predictivo con una arquitectura de IoT para la monitorización continua y el envío de alertas a centros de control o usuarios finales. Se obtuvieron métricas de rendimiento, precisión, sensibilidad, especificidad y F1-Score con la validación del modelo predictivo para la detección de partículas PM2.5 tanto en entornos simulados como reales, mostrando con ello la capacidad del sistema para anticipar riesgos. La combinación de técnicas de visión por computadora, análisis de datos y sensores químicos a través de modelos predictivos demuestran un gran potencial para la detección temprana de contaminantes, facilitando la toma de decisiones en tiempo real. Los resultados preliminares validan la viabilidad del sistema, que puede ser escalado y adaptado a diversas necesidades de monitoreo ambiental. La colaboración interdisciplinaria y el liderazgo femenino son pilares en este campo de investigación y generar impacto en la sociedad.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y la contaminación atmosférica representan dos de los mayores retos globales actualmente. La acumulación de gases y partículas contaminantes en la atmósfera ha generado un incremento significativo en la temperatura promedio del planeta. Este fenómeno ha provocado alteraciones en los patrones climáticos, afectando ecosistemas, economías y la salud (Tejada Ladino

& Cárdenas Agudelo, 2024). La contaminación del aire en ambientes urbanos e industriales representa un desafío crítico para la salud pública y el medio ambiente, afectando de manera significativa la competitividad en las ciudades (Franco R, 2012). Adicionalmente las emisiones derivadas de fuentes industriales y vehiculares han sido identificadas como los principales contribuyentes a la contaminación atmosférica (Ubilla & Yohannessen, 2017), en el 2015 fue un factor de riesgo líder para la carga mundial de enfermedades (Cohen, Brauer, Burnett, & Anderson, 2017).

La contaminación del aire por compuestos químicos volátiles y partículas, representan un grave problema de salud pública y ecológico a nivel mundial, como lo es el material particulado (PM), es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire, son tan pequeños que pueden inhalarse y provocar graves problemas a la salud resultantes de la actividad humana, como lo es la quema de combustibles, el tráfico, entre otras (Spiro & Stigliani, 2024), las partículas inhalables son las que miden menos de 10 µm denominadas PM 10, las partículas entre 2.5 µm denominadas PM 2.5 derivan de la combustión (Marchant, Leiva, Chistakos, & Cavieres, 2019), (Fuentealba Cruz, Quiróz López, Marchant Fuentes, & Ariza Bareño, 2024), el dióxido de nitrógeno (NO_2) han superado los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), estos contaminantes pueden provocar enfermedades respiratorias, cardiovasculares y afectar la calidad de vida afectando a niños y personas de edad avanzada.

Ante esta situación, es fundamental desarrollar modelos que permitan predecir la concentración de contaminantes con alta precisión. Tradicionalmente, el monitoreo de contaminantes se realiza mediante estaciones fijas con instrumentos analíticos de alta precisión, sin embargo, estas estaciones comúnmente son costosas, escasas y de cobertura espacial limitada (Arroyo, y otros, 2018). Como resultado, existe una baja resolución espaciotemporal en los datos ambientales, dificultando la detección temprana de eventos de contaminación localizados. En respuesta a estas limitaciones, se están desarrollando narices electrónicas (sistemas portátiles de sensores que limitan el olfato) y otras tecnologías de inteligencia artificial para el monitoreó ubicuo de la calidad del aire en tiempo real (Tastan & Gökozan, 2019). Estas narices electrónicas emplean sensores químicos de gas de bajo costo combinados con algunos algoritmos de aprendizaje automático para reconocer patrones de olores o contaminantes específicos, ofreciendo una alternativa escalable y económica para la vigilancia ambiental. Al mismo tiempo, la visión por computadora se ha convertido en una herramienta complementaria para la detección de contaminantes visibles (por ejemplo, el humo o partículas) mediante cámaras y algoritmos de detección de objetos en tiempo real (Wang, Yin, & Ji, 2022). La convergencia de estas tecnologías permite el desarrollo de modelos predictivos capaces de ¨olfatear¨ y ¨ver¨ la contaminación, generando alertas inmediatas cuando se detectan niveles peligrosos de contaminantes.

En este trabajo se presenta un sistema multidisciplinario que integra una nariz electrónica con algoritmos de IA y técnicas de visión por computadora para la detección real de contaminantes en el aire que busca no solo aportar una solución técnica al problema del monitoreo de la contaminación, sino también generar una solución para la detección temprana de contaminantes, facilitando la toma de decisiones en tiempo real.

METODOLOGÍA

La metodología incluye la integración de sensores para visión por computadora y narices electrónicas para captar imágenes de las áreas de monitoreo, así como firmas químicas que permiten determinar la composición de la atmósfera. La fusión de datos multimodales para la extracción de características relevantes tanto en imágenes como en datos de sensores de gas. Con ello se generó el desarrollo del modelo predictivo para la clasificación y regresión con aprendizaje profundo. Se llevó a cabo el entrenamiento y validación con los dataset recopilados en campo y simulaciones para entrenar el modelo, seguido de técnicas de validación cruzada para evaluar su desempeño, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos y componentes de medición del prototipo de estación meteorológica.

Sensor	Métrica
Partículas suspendidas	PM10
Partículas suspendidas	PM2.5
Partículas suspendidas	PM1
O_2	Oxigeno
O_3	Ozono
Radiación Ultravioleta	Índice UV
Velocidad del viento	Km/h
Humedad	%
Temperatura	^oC
Precipitación	ml2
Pureza del agua (TDS)	Pr
Presión	hPa

Arquitectura general del sistema.

El desarrollo del sistema consiste en un dispositivo de nariz electrónica conectado mediante tecnología inalámbrica a una plataforma de procesamiento que ejecuta los modelos predictivos. En la figura 1, se muestra el prototipo portátil de una nariz electrónica. Este dispositivo es de tamaño compacto (aprox. 60x60 mm), está ensamblado con cuatro sensores de gas de óxido metálico (MOX) para la detección de distintos contaminantes volátiles, junto con un sensor integrado de temperatura y humedad para compensación ambiental. Estos sensores se encuentran conectados en una placa electrónica controlada por un microcontrolador ATmega328P de la marca Atmel, el cual digitaliza las señales de los sensores, gestiona la adquisición de datos y se encarga de la comunicación inalámbrica a través del módulo ESP8266.

El prototipo envía la información a un servidor el cual y también tiene una aplicación para visualizar las medidas en tiempo real. En el servidor se ejecutan también los algoritmos de clasificación basado en IA. El sistema se alimenta con una fuente conectada a la corriente.Para complementar la detección basada en sensores de gas, el sistema incorpora un componente de visión por computadora dedicado a identificar señales de contaminación ambiental, se utilizó una cámara convencional para monitorear la presencia de humo o partículas visibles en la zona, las imágenes captadas son analizadas mediante un algoritmo ligero de detección de humo basado en redes neuronales convolucionales (CNN). Se utilizó un modelo de dos etapas optimizado para ejecutar en tiempo real (20 FPS), que combina la detección inicial con un módulo de atención contextual para depurar información falsa. Este componente visual corre de manera paralela a la nariz electrónica, de modo que el sistema global puede ¨oler¨ y ¨ver¨ contaminantes simultáneamente, incrementando la robustez de la detección.

Por ejemplo, en pruebas de laboratorio el algoritmo de visión fue capaz de detectar humo con una precisión promedio (AP_mean) de 59% y una velocidad de inferencia de 50 ms por imagen, cumpliendo los requisitos de tiempo real e integrándose con los módulos.

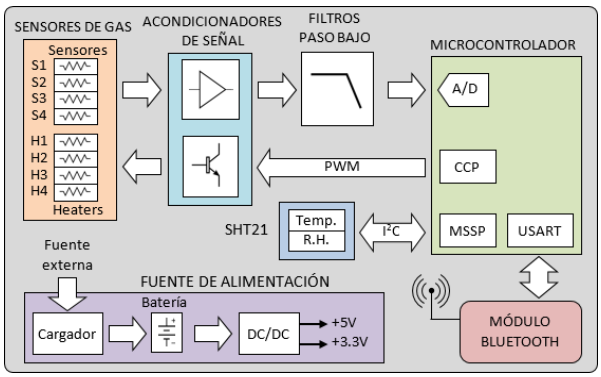


Figura 1. Diagrama de bloque de los componentes de la nariz electrónica.

Esquema electrónico y flujo de datos

En la figura 2, se presenta un diagrama de bloques funcional de módulo de la nariz electrónica, ilustrando la arquitectura interna y el flujo de información. El corazón del sistema es la matriz de sensores químicos (bloque de transducción), cuyos elementos MOX generan señales analógicas al estar expuestos a la presencia de diferentes compuestos volátiles, formando un patrón característico o ¨huella¨ olfativa para cada gas. Estas señales analógicas son acondicionadas y filtradas mediante circuitos electrónicos de pre-procesamiento (amplificadores operativos y filtros pasa-bajo) antes de ser convertidas a formato digital por el conversor A/D del microcontrolador. Este microcontrolador lee secuencialmente los valores de los sensores, incluyendo temperatura y humedad (a través de interfaz I^2C) para compensar los efectos ambientales en las mediciones, posteriormente los datos son empaquetados y enviados por la red hacia el sistema externo para su análisis. Adicionalmente el microcontrolador controla activamente las condiciones de medida, por ejemplo, ajusta la temperatura de los sensores MOX mediante señales PWM para los calentadores integrados en cada sensor, siguiendo un ciclo de ¨aspiración¨ y ¨expulsión¨ de aire que mejora la segregación de olores imitando inhalaciones y exhalaciones. Este esquema de operaciones cíclico ayuda a reducir efectos de deriva y a exponer los sensores alternadamente a aire limpio de referencia y a la muestra de aire contaminado, tal como se hizo en la etapa de calibración en laboratorio.

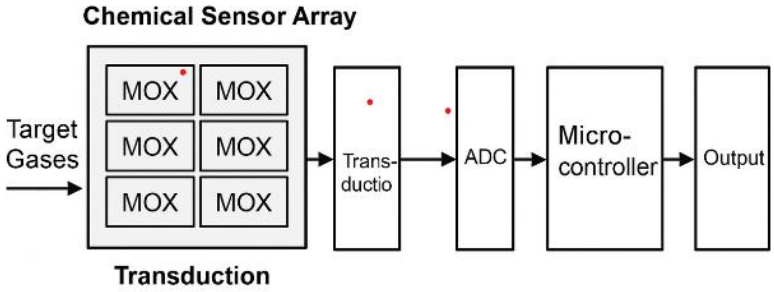


Figura 2. Diagrama de bloques funcional del módulo de la nariz electrónica.

En la figura 3 se muestra el esquema de la arquitectura del sistema de detección de contaminantes propuesto (nariz electrónica). La muestra de aire ingresa al módulo sensor, donde un arreglo de sensores de gas (S1-S4) detecta diversos compuestos volátiles. Cada circuito este asociado a un circuito de acondicionamiento y conversión A/D que transmite las lecturas al microcontrolador (ATmega328P). EL microcontrolador gestiona también un sensor digital de temperatura y humedad (SHT21) para corregir las variaciones ambientales.

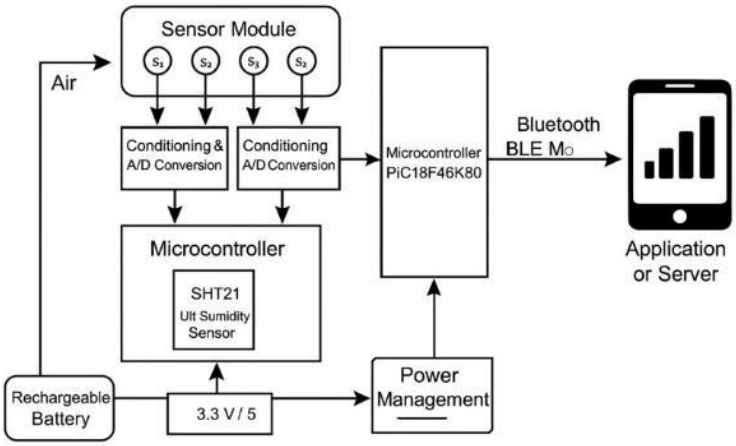


Figura 3. Esquema de la arquitectura del sistema.

Adquisición de datos y preparación del modelo

Para entrenar y validar el modelo predictivo, se realizaron experimentos controlados de detección con diversas sustancias contaminantes. En particular, se seleccionaron 7 compuestos orgánicos volátiles (COV s) representativos de emisiones industriales comunes: acetona, ácido acético, etilacetato, etilbenceno, etilbenceno, xileno, tolueno y dimetilacetamida. Estas sustancias se introdujeron de manera controlada en una cámara de prueba, empleando un generador de vapor calibrado para suministrar concentraciones conocidas (100 ppb) de cada compuesto.

El dispositivo de nariz electrónica registró las respuestas de los sensores para cada gas en múltiples ciclos de medición repetidos. Cada ciclo consistió en exponer la matriz de sensores primero en aire limpio (gas de frecuencia) durante 7 minutos y después a la muestra de gas contaminante durante 1 minuto manteniendo flujo y humedad constantes (Aleixandre & Gerboles, 2012). Se ejecutaron 20 ciclos por cada compuesto, descartando los primeros ciclos de cada serie para evitar el efecto de estabilización inicial de los sensores. Esta metodología de recopilación proporcionó un conjunto de datos con cientos de patrones de sensores etiquetados, abarcando las siete clases de contaminantes. Antes del entrenamiento del modelo, se aplicaron técnicas de preprocesamiento y extracción de características: en particular, se calculó la resistencia relativa de cada sensor (relación entre la resistencia bajo el gas y en aire limpio) para normalizar las señales, y se utilizó el análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de los datos sensores. Los primeros dos componentes principales explicaban la mayor parte de la varianza y permitían visualizar agrupamientos distinguibles para la mayoría de los gases, aunque con ligera superposición entre algunas parejas de compuestos (como tolueno y dimetilacetamida). Esta proyección PCA ayudo para guiar la selección de parámetros del modelo de clasificación.

Modelo predictivo y algoritmos de clasificación

Dada la naturaleza del problema (identificación multicategoría de contaminantes a partir de un vector de sensores), se optó por algoritmos de aprendizaje supervisado de clasificación multiclase. El mejor desempeño se logró con una red neuronal artificial de tipo probabilístico, específicamente una red de función de base radial (RBF) con arquitectura de 4 capas (entrada, capa oculta radial, capa de suma y capa de salida). Esta elección sigue trabajos previos donde las redes RBF han mostrado eficiencia en reconocimiento de patrones de sensores químicos. La red fue entrenada con los datos de características reducidas por PCA, usando un esquema de validación cruzada para aprovechar el conjunto completo de muestras limitado. Se utilizó validación cruzada *leave-one-out* de primer orden, entrenando la red con todos los ciclos menos uno y probando el ciclo excluido, iterando hasta cubrir todas las muestras. Como comparación, también se exploraron otros clasificadores como

máquinas de soporte vectorial (SVM) y árboles de decisión, sin embargo, la red RBF superó a estas técnicas en tasa de acierto global.

Para la detección de humo en imágenes, se entrenó paralelamente una red neuronal convolucional utilizando un conjunto de datos de imágenes de huno/no-humo. Este modelo de visión por computadora se integró de forma modular, de tal manera que sus alertas sirven para corroborar o complementar las alertas provenientes de la nariz electrónica (por ejemplo, si el modelo olfativo detecta un incremento de VOCs y simultáneamente el modelo visual detecta humo, se confirma un evento anómalo de contaminación). La fusión de ambas modalidades (olfativa y visual) se realiza a nivel de decisión tardía, el sistema genera una alarma de contaminación real solamente cuando cualquiera de los sub-sistemas detecta un contamínate por encima de umbrales predefinidos, minimizando falsos negativos. En futuros trabajos se prevé implementar una fusión más estrecha de datos multisensoriales mediante IA multimodal, estudios recientes indican que la combinación temprana de datos heterogéneos (lecturas de sensores de gas más imágenes térmicas) en una misma red neuronal puede elevar la precisión de detección hasta por 96%, superior a la de modelos basados en un solo tipo de sensor.

RESULTADOS

Se evaluó el rendimiento del sistema propuesto tanto en condiciones controladas de laboratorio como en pruebas preliminares de campo. En laboratorio, el modelo predictivo logró discriminar eficazmente entre los 7 contaminantes objetivo. La tabla 1 resume las principales métricas de desempeño obtenidas mediante validación cruzada para la clasificación de los VOCs. La tasa de acierto global (precisión global) alcanzo un 97.6%, lo que significa que casi todas las muestras fueron clasificadas correctamente en su clase correspondiente.

La exactitud obtenida se refleja en una matriz de confusión con muy pocos errores, solo 3 de un total de 126 casos fueron clasificados incorrectamente. En términos de sensibilidad el promedio macro fue 97%, indicando que el sistema detectó correctamente alrededor de 97% de las incidencias reales de contaminación para cada clase. La especificidad promedio fue cercana al 99%, evidenciando una baja tasa de falsas alarmas. El valor predictivo positivo se mantuvo alto, con promedios por encima del 95% en todas las clases y el puntaje de F1 (media armónica de precisión y sensibilidad) se ubicó alrededor de 0.97 en promedio, reflejando un balance favorable entre falsas alarmas y omisiones.

Cabe mencionar que dos de los compuestos (tolueno y dimetilacetamida) presentaron la mayor dificultad de separación, lo cual se alinea con la observación de sus patrones en el análisis PCA. El modelo obtuvo métricas superiores al 90%, es un resultado satisfactorio. Los demás contaminantes fueron identificados con 100% de aciertos. En la tabla 4 se muestra el desempeño del modelo de IA en la identificación de contaminantes (validación cruzada), se listan la sensibilidad, especificidad, precisión (valor predictivo positivo) y puntaje F1 para cada una de las 7 clases de compuestos orgánicos volátiles evaluados, junto con el promedio. Los resultados indican una alta capacidad de detección y baja tasa de falsos positivos en todos los casos.

Tabla 2. Desempeño del modelo de IA.

Compuesto	Sensibilidad (%)	Especificidad (%)	Precisión (%)	F1-Score (%)
Acetona	100.0	100.0	100.0	100.0
Ácido acético	100.0	100.0	100.0	100.0
Etilacetato	100.0	100.00	100.0	100.0
Etilbenceno	100.0	100.0	100.0	100.0
Xileno	100.0	100.0	100.0	100.0
Tolueno	94.4	98.7	94.4	94.4
Dimetilacetamida	94.4	98.7	94.4	94.4
Promedio	97.0	99.6	97.0	97.0

El resultado del modelo permitió integrar el esquema predictivo con una arquitectura de IoT para la monitorización continua y el envió de alertas a centros de control o usuarios finales. Se obtuvieron métricas de rendimiento precisión, sensibilidad, especificidad y F1-Score con la validación predictiva para la detección de partículas PM 2.5 tanto en entornos simulados como reales, mostrando con ello la capacidad del sistema para anticipar riesgos. La combinación de técnicas de visión por computadora, análisis de datos y sensores químicos a través de modelos predictivos demuestra un gran potencial para la detección temprana de contaminantes, facilitando la toma de decisiones en tiempo real. Los resultados preliminares validan la vialidad del sistema, que puede ser escalado y adaptado a diversas necesidades de monitoreo ambiental. La colaboración interdisciplinaria y el liderazgo femenino son pilares fundamentales para avanzar en este campo de investigación y generar impacto en la sociedad.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de este trabajo demuestran el potencial de la convergencia interdisciplinaria entre sensores químicos, visión e inteligencia artificiales para abordar retos de monitoreo ambiental. La precisión (≥97%) lograda en la identificación de múltiples contaminantes sugiere que las narices electrónicas inteligentes pueden llegar a igualar la capacidad de instrumentos de laboratorio en la discriminación de compuestos, con la ventaja adicional de su portabilidad y costo reducido (Arrollo, P. et al., 2018). En comparación con estudios previos, los resultados de este prototipo están a la par de los mejores reportados: por ejemplo, Arroyo et al. (2018) informaron tasas de acierto cercanas al 100% al clasificar 7 COVs usando una nariz electrónica portátil con redes neuronales, lo cual concuerda con el desempeño de nuestra red RBF.

La incorporación de técnicas de visión por computadora posiciona al sistema más allá de enfoques exclusivamente olfativos. En la literatura reciente, la supervisión visual de la contaminación (p. ej., detección de humo) ha cobrado relevancia, habiéndose desarrollado algoritmos capaces de funcionar en dispositivos móviles con alta velocidad y precisión (Wang, Z. et al., 2022). La solución mostrada integra esta capacidad, incrementando la cobertura de detección (gases invisibles y contaminantes visibles) y reduciendo la probabilidad de falsos negativos. Este enfoque multimodal es consistente con trabajos que señalan la importancia de fusionar datos de diferentes fuentes para lograr detecciones más confiables en entornos complejos (Narkhede, P, et al., 2021). Es decir, combinar la “vista” con el “olfato” artificial proporciona una imagen más completa de la situación ambiental, algo que es crucial, por ejemplo, en aplicaciones como la localización de fuentes de contaminación dispersas (Tastan, M., & Gökozan, H., 2019).

A pesar de los resultados positivos, es importante discutir las limitaciones y áreas de mejora del sistema. Una de las consideraciones es el desgaste de los sensores químicos con el tiempo y las condiciones ambientales. Aunque mitigamos parcialmente este efecto calibrando con aire limpio cada ciclo y utilizando sensores de temperatura/humedad para corrección, en despliegues prolongados los sensores MOX pueden sufrir cambios en su sensibilidad base debido al envejecimiento o la exposición continua a gases (Arrollo, P. et al., 2018). Para afrontar esto, se plantea implementar algoritmos de recalibración en línea y filtros adaptativos que compensen la deriva periódicamente.

Otra limitación es la escalabilidad del sistema en entornos reales. Si bien el prototipo es personal y portátil, el siguiente paso será desplegar redes de múltiples dispositivos para cubrir áreas geográficas amplias. En este sentido, se vuelve interesante aprovechar las plataformas de Internet de las Cosas (IoT) para comunicar varios nodos de sensores a una infraestructura centralizada en la nube (Tastan, M., & Gökozan, H., 2019). Esto permitirá construir mapas dinámicos de calidad del aire con alta resolución espacial y temporal, ofreciendo alertas geolocalizadas a autoridades, instituciones y ciudadanos. En estudios previos ya han explorado sistemas IoT similares para monitoreo de aire interior y exterior, mostrando que las ciudades inteligentes pueden beneficiarse enormemente de nodos distribuidos de bajo costo (Tastan, M., & Gökozan, H., 2019). Nuestro enfoque extenderá dichas ideas incorporando también la capa de visión (cámaras) en la red IoT, lo cual supone desafíos de transmisión de datos e interoperabilidad que deberán ser atendidos en trabajos futuros.

En términos de aplicaciones y casos de uso, los resultados obtenidos abren un abanico de posibilidades. Algunas de las aplicaciones más relevantes incluyen:

- Vigilancia medioambiental urbana: una red de narices electrónicas inteligentes desplegadas en zonas metropolitanas podría monitorear en tiempo real la calidad del aire a nivel de calle, detectando aumentos en contaminantes como benceno, NOx, ozono o material particulado, y enviando alertas inmediatas a la población cuando los niveles excedan umbrales seguros. Esto empodera a las comunidades para tomar medidas (por ejemplo, evitar ejercicios al aire libre en episodios de mala calidad del aire) y brinda datos finos a las autoridades para gestionar el tránsito vehicular o las fuentes de emisión en la ciudad.
- Detección temprana de fugas y emergencias industriales: en entornos industriales, nuestro sistema puede servir como un sistema de alarma temprana para escapes de gases tóxicos o incendios. Por ejemplo, la nariz electrónica detectaría rápidamente la presencia anómala de compuestos orgánicos volátiles en zonas cercanas a tanques o tuberías, mientras que las cámaras podrían identificar visualmente humo o llamas incipientes. De este modo, se pueden prevenir accidentes mayores al alertar al personal en tiempo real y activar protocolos de contención antes de que el evento escale. Algunos trabajos han sugerido incluso montar narices electrónicas en drones para inspeccionar plantas de tratamiento de residuos o áreas de difícil accesosciencedirect.com, lo cual podría combinarse con nuestro enfoque para patrullar amplias zonas industriales de manera autónoma.
- Monitoreo de espacios interiores y salud pública: otra aplicación es en interiores de edificios y hospitales, donde la detección de contaminantes (como formaldehído, solventes, o humo de cigarrillo) es crucial para la salud ocupacional. Un dispositivo portátil como el desarrollado, distribuido en distintos puntos de un edificio, podría rastrear la acumulación de compuestos dañinos y ventilar automáticamente el ambiente. Adicionalmente, está reportado que las narices electrónicas pueden aplicarse a diagnósticos médicos a través del aliento humano (por ejemplo, detección de enfermedades pulmonares).

Finalmente, merece discutirse el impacto de este trabajo desde la perspectiva de la participación de la mujer en la ciencia y la tecnología. El desarrollo de este sistema fue llevado a cabo por un equipo multidisciplinario en el cual las investigadoras tuvieron roles protagónicos en todas las fases: desde el diseño de los sensores hasta la programación de los algoritmos de IA y el análisis de los datos experimentales. Esta experiencia concreta refuerza la evidencia de que la diversidad en los equipos de I+D amplía la creatividad y la excelencia científica.

CONCLUSIONES

La integración de sensores visuales y químicos con modelos de aprendizaje profundo permiten detectar contaminantes ambientales en tiempo real, integrado una nariz electronica de múltiple sensor con algoritmos de inteligencia artificial y vision por computadora. El sistema logró identificar con alta exactitud una variedad de compuestos volátiles representativos de la contaminación del aire industrial, alcanzando métricas de rendimiento satisfactorios. Estos resultados igualan e incluso superan los registros reportados previamente para dispositivos de olfato de monitoreo visual que permite detectar humo u otras manifestaciones visibles de contaminación, lo que agrega robustez al sistema en escenarios donde las señales olfativas por sí solas podrían ser insuficientes. La combinación de modalidades sensoriales y modelos predictivos avanzados produce una herramienta integral de vigilancia ambiental en tiempo real que puede adaptarse a múltiples casos de uso, desde el monitoreo urbano cotidiano jasta aplicaciones industriales de seguridad.

Este sistema mejora la alerta temprana de contaminantes y la protección ambiental. El enfoque interdisciplinario, así como el liderazgo femenino impulsan la innovación y promueven la diversidad en las áreas STEM. Las contribuciones de este trabajo son tanto tecnológicas como sociales. En el plano técnico, se demostró una arquitectura escalable y portátil, basada en IoT, que puede extenderse fácilmente a redes de sensores distribuidos para cubrir áreas extensas. La utilización de IA tanto para análisis de datos de sensores químicos como de imágenes sienta un precedente para

futuros sistemas de alerta temprana en salud ambiental. En el plano interdisciplinario, se evidenció cómo la colaboración entre distintas ramas (ingeniería, computación, química, ciencias ambientales) produce soluciones más completas a problemas complejos como la contaminación. Por último, pero no menos importante, este proyecto puso de relieve el liderazgo de mujeres científicas y tecnólogas en todas sus etapas.

Al ser presentado en múltiples foros, sirve como ejemplo tangible del impacto positivo que tiene la inclusión de la mujer en proyectos de alto nivel técnico y científico. El éxito de la iniciativa refuerza el llamado a continuar promoviendo la participación femenina en STEM, derribando estereotipos y abriendo oportunidades para las próximas generaciones de ingenieras, investigadoras y desarrolladoras. El desarrollo de modelos predictivos para la detección de contaminantes no solo aporta una herramienta valiosa para proteger el medio ambiente y la salud pública en tiempo real, sino que también simboliza un avance hacia una ciencia más diversa, inclusiva y orientada al bienestar de nuestra sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aleixandre, M., & Gerboles, M. (2012). Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas. *Chemical Engineering Transactions 30*, 169-174.
2. Aron J. Cohen, M. B. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 1909-1918.
3. Arroyo, P., Suárez, J. I., Lozano, J., H. J., Herrero, J. L., & Carmona, P. (2018). Nariz electrónica personal para la detención de contaminantes en el aite. *Actas de las XXXIX* (págs. 394- 397). Badajoz: Jornadas de Automática.
4. Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., & Anderson, R. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 1911-1916.
5. Franco R, J. F. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. *EAN*.
6. Fuentealba Cruz, M. I., Quiróz López, D. I., Marchant Fuentes, C. I., & Ariza Bareño, Y. (2024). Intervención didñactica para la enseñanza de contaminación atmosférica por material particulado. *Scielo*.
7. IPCC. (2021). *Cambio climático 2021 Bases físicas.* OMM y PNUMA.
8. Marchant, C., Leiva, V., Chistakos, G., & Cavieres, F. M. (2019). Monitoring urban environmental pollution by bivariate control charts: New methodology and case study in Santiago, Chile. *Environmetrics*.
9. Marie Ramel Delobel, C. P. (2024). Delphine Praud, Béatrice Ferver & Pietro Salizzoni. *ScienceDirect*.
10. Narkhede, P., Walambe, R., Mandaokar, S., Chandel, P., Kotecha, K., & Ghinea, G. (2021). Gas Detection and Identification Using Multimodal Artificial Intelligence Based Sensor Fusion. Applied System Innovation, 4(1), 3. https://doi.org/10.3390/asi4010003
11. Spiro, T. G., & Stigliani, W. M. (2024). Química Medioambiental. Pearson-Prentice Hall.
12. Tastan, M., & Gökozan, H. (2019). Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose. *MDPI*.
13. Tejada Ladino, M., & Cárdenas Agudelo, M. F. (2024). El cambio climático y las problematicas ambientales territoriales. Caso de estudio en el Suroeste Antioqueño (Colombia). *ECOCIENCIA*, 102-103.
14. Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmoefectos en la salud respiratoria en el niño. *ScienceDirect*, 111-113.
15. Wang, Z., Yin, D., & Ji, S. (2022). Real.time factory smoke detection based on two-stange relation-guided algorithms . *Scientific reports*.

PROTOTIPO DE MÁQUINA DE ESTIRAMIENTO DE PLÁSTICO BIODEGRADABLE REFORZADO CON FIBRAS VEGETALES

Arturo Berumen Cervantes[1], Edith Adriana Méndez Saucedo[1], Andrea Abigail Hernández Torres[1], Hugo Alberto Rendón Mejía[1], Emmanuel Mendoza Hernández[1], Luz Adriana Arias Hernández[2] y Eladio Delgadillo Ruiz[2]

[1]Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, [2]Universidad de Guanajuato
arturo.bc@guanajuato.tecnm.mx

RESUMEN

La elaboración de una máquina de estiramiento para plástico biodegradable evidencia un gran interés en diversas áreas de investigación y enseñanza, consolidándose como un proyecto interdisciplinario de gran relevancia. Desde el ámbito académico, el uso de software CAD/CAM fue fundamental para el desarrollo en el diseño del prototipo, permitiendo obtener una propuesta tridimensional precisa, optimizar el modelo y realizar simulaciones previas a su fabricación. Este enfoque no solo facilitó la visualización del proyecto, sino que también contribuyó a mejorar la productividad, reducir costos y garantizar una mayor calidad en el producto final. Además, se implementaron diversas metodologías como la determinación de métricas, prototipado, diseño experimental y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. Estas herramientas aseguraron que el diseño de la máquina fuera completamente funcional y eficiente, mejorando la comprensión técnica y la percepción de los procesos involucrados. El uso de un simulador con un enfoque sistémico permitió modelar el objeto, aplicación de las matemáticas necesarias para describir el comportamiento de la máquina y evaluar el sistema a través de una interfaz gráfica tridimensional. Este proceso no solo incrementa el desarrollo del conocimiento técnico, sino que fomenta la innovación en distintas áreas del saber, destacando la integración entre ingeniería, sostenibilidad y tecnología para el desarrollo de soluciones modernas y funcionales. Dicho prototipo contribuirá en futuros trabajos y/o investigaciones enfocadas al manejo de plástico biodegradable con diferentes tipos de fibras vegetales que puedan ser manipuladas y dar a tamaños determinados para pruebas o usos en actividades específicas que puedan desarrollar nuevo conocimiento. De acuerdo con lo anterior se puede concluir que se logrará diseñar un prototipo de máquina estiradora de plástico biodegradable en el cual se pueda obtener un material con medios específicos a través de usos de software de diseño SolidWorks y la identificación de mecanismos de estiramiento y piezas móviles que ayudan a cumplir el objetivo. Esta experiencia demuestra cómo la combinación de herramientas tecnológicas avanzadas, metodologías de diseño y análisis, y un enfoque multidisciplinario puede contribuir significativamente al desarrollo de una maquinaria eficiente y amigable con el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los procesos industriales tienen como principal objetivo reducir el tiempo de respuesta en la resolución de problemas físicos y mecánicos provenientes de una necesidad real, es por ello, que se empieza por exponer un análisis integral del proceso de desarrollo y diseño de un prototipo funcional de una máquina creada específicamente para el estiramiento y comprensión de plásticos biodegradables. Este bioplástico se elabora a partir de residuos vegetales y componentes de bajo perfil contaminante, en este caso se implementó el uso de bagazo de maguey como reforzante (Arias *et. al*., 2025), el cual es un subproducto destacado de las diferentes industrias mezcaleras y tequileras del país, que ofrece un potencial significativo para aplicaciones sostenibles como la de acolchados en la agricultura debido a su origen renovable y bajo impacto ambiental.

El alcance planteado con el diseño del prototipo se centra en la producción nivel piloto poniendo especial atención en factores importantes como lo es la eficiencia energética del equipo, el costo asociado a su fabricación y la calidad del producto resultante, en términos de resistencia, flexibilidad y durabilidad del bioplástico propuesto. El enfoque tiene como objetivo asegurar que el prototipo

cumpla con los estándares básicos de funcionalidad, eficiencia y sostenibilidad, permitiendo asegurar su viabilidad técnica al momento de su operación en condiciones reales. Asimismo, se busca tener una base sólida para tomarlo como punto de partida dentro de la mejora continua, lo cual podría ser la base para desarrollos futuros en esta área.

Es importante destacar que se excluye explícitamente la comercialización y distribución a gran escala del prototipo desarrollado, así como la optimización y delimitación de su funcionamiento para otros tipos de bioplásticos que no utilicen bagazo de agave como reforzante mecánico. De esta manera, el estudio se limita a explorar el potencial de este subproducto dentro de un marco técnico y experimental, dejando abierta la posibilidad de que investigaciones posteriores amplíen el horizonte hacia aplicaciones más diversificadas o industriales.

TEORÍA

La industria manufacturera tiene como principal finalidad la planificación y la gestión de la producción de elementos necesarios para facilitar los procesos que generalmente se realizan en largos intervalos de tiempo y con una mano de obra robusta, agilizar los procesos y mejorar la calidad en el producto ha significado el reto permanente cuando de innovación se trata. Apoyado principalmente por softwares de diseño asistidos por computadora (CAD) que son ordenadores en conjunto con otros programas unidos para realizar modelos bidimensionales y tridimensionales (Sarabia *et al*., 2024). Uno de ellos es el caso de SolidWorks, que es un programa que tiene como fin el diseñar piezas de cualquier índole simulando el estudio que movimiento, del cual para este prototipo se genera una serie de propuestas adecuadas para la elaboración de prototipos con características específicas.

El CAD es un término que se refiere al uso de un software especializado para analizar, crear, modificar y optimizar diseños para diferentes áreas o tipos de conocimiento como lo es la ingeniería, arquitectura, la industria de la manufactura, entre otros. Con CAD se pueden realizar planos bidimensionales (2D) o modelos tridimensionales (3D) con gran precisión lo que ayuda a interpretar y documentar grandes proyectos. Este tipo de softwares a sustituido a gran mediada dibujos hechos a mano alzada, agilizando los procesos de diseño y disminuyendo los errores (Erazo, 2022).

Por otro lado, la contaminación por plásticos es uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. Según datos de organizaciones como la ONU, cada año se generan más de 400 millones de toneladas de plástico a nivel mundial, de las cuales una gran parte termina en océanos y vertederos, tardando siglos en degradarse. Esto genera impactos negativos en la biodiversidad, los ecosistemas y la salud humana (UNEP, 2022). Sin embargo, el triunfo del uso de los plásticos en el ámbito social y económico por encima de otros materiales parecidos mecánicamente como los bioplásticos es debido a su facilidad en la producción y al bajo costo en su distribución (Delgadillo *et al*., 2024).

El bagazo de maguey es un subproducto generado durante la producción de tequila y mezcal. México, siendo el principal productor de tequila, genera anualmente miles de toneladas de este residuo. Actualmente, el bagazo de maguey tipo *Salmiana* (Delgadillo-Ruiz, *et al.,* 2023) se utiliza principalmente como fertilizante o material de compostaje, pero su potencial como materia prima para reforzar bioplásticos ha cobrado interés debido a su composición rica en fibras celulósicas y lignina, materiales idóneos para la creación de polímeros biodegradables (Gómez et al., 2020). Una de las aplicaciones principales de estos bioplásticos es en la agricultura, ya que se colocan en las parcelas de cultivos para ayudar a reducir la evaporación del agua del suelo (Arias *et al*., 2024) y con ello obtener mejores rendimientos en la producción.

El diseño de maquinaria para estirar bioplásticos reforzados con fibras de bagazo de maguey implica considerar características como la temperatura, presión y tiempo de procesamiento, las cuales son esenciales para lograr un material con propiedades mecánicas óptimas. Una de ellas es el estirado y compresión del plástico definiéndolo como un proceso que mejora la orientación molecular del material, aumentando su resistencia y flexibilidad. Por otro lado, la compresión permite consolidar el material en formas específicas, mejorando su uniformidad y densidad (Gere y Timoshenko, 1997).

De igual modo, otra característica es la eficiencia energética que, dentro del contexto de materiales biodegradables, la maquinaria debe optimizar el consumo energético para asegurar que el proceso sea ambientalmente sostenible. Esto incluye el uso de sistemas de calentamiento eficientes y mecanismos de presión controlada (Duflou et al., 2012).

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo e implementación de un prototipo de máquina de estiramiento de plástico biodegradable reforzado con fibras vegetales se propone realizar una serie de actividades en diferentes etapas de diseño y planeación con el objetivo particular de lograr el diseño final.

En la primera etapa se realiza una investigación preliminar donde se llevan a cabo estudios del material a utilizar para la creación del bioplástico, evaluando la composición fisicoquímica, las propiedades mecánicas y su potencial para sustituir plásticos convencionales. La revisión de tecnologías existentes para analizar otros métodos de producción de plásticos biodegradables y técnicas de estiramiento utilizadas en la industria para comprender los desafíos y oportunidades. Del mismo modo se considerará la investigación sobre la maquinaria de estiramiento, enfocados en la adaptabilidad de los materiales, para que esta pueda ser resistente, ya que el bioplástico puede ser más delgado que otros de su tipo y con un secado diferente el cual alteraría la consistencia y por ende se generarían fracturas. Asimismo, se investigarán los factores de rendimientos, temperatura ideal y tiempos estándares al momento de elaborar la masa de mezclado.

En la segunda etapa se obtendrán las métricas a través de la metodología DMAIC determinando el sistema de manufactura eficiente para la generación de productos empleando técnicas y herramientas de vanguarda con sus indicadores y variables críticas con la optimización del sistema de manufactura.

Luego, en la tercera etapa de la realización del proceso se desarrollan las pruebas y análisis de bioplásticos, en el cual se elaboran muestras de bioplástico reforzados con fibras de bagazo específicamente de agave *Salmiana* mediante procesos como la extrusión, para analizar las propiedades del material como la resistencia, elasticidad, tiempo de secado, entre otros, a través de pruebas de tracción, elongación y resistencia a la temperatura para asegurar que el bioplástico tenga las características deseadas para ser estirado en la máquina. Dentro de esta etapa se utilizarán materiales como metal, aluminio, acrílico, madera y cerámica para tomarlo como base al momento de ser estirado y para distribuirlo se utilizará una espátula que ayude como punto de partida para identificar el elemento para poderlo esparcir.

Finalmente, en la cuarta etapa se realiza el prototipo de acuerdo con la información obtenida en la primer y segunda etapa llevando a cabo diferentes ideas de prototipos a través de CAD (diseño asistido por computadora) como los son medidas, las piezas y ensambles para la operación de forma manual tomando en cuenta futuras automatizaciones. Se generará el diseño del prototipo de la máquina de estiramiento en un software especializado en diseño considerando las dimensiones de la máquina, las piezas móviles, los mecanismos de estiramiento, tomando en cuenta aspectos de ergonomía y facilidad de su uso asegurando que el diseño permita ser empleado de forma intuitiva y sea adecuado para las necesidades del operador, considerando aspectos como la seguridad y la facilidad de mantenimiento.

RESULTADOS

Se desarrollaron una serie de actividades, las cuales aportaron a la obtención del diseño de un prototipo que ayudará a otras investigaciones con enfoque a la creación de plásticos con fibras vegetales a través del uso de CAD, además de la obtener nuevos conocimientos.

Para el diseño para la creación de una maquina estiradora de bioplástico específicamente con un tipo de bagazo de maguey como reforzante, se tomaron en cuenta diferentes aspectos que tienen que ver con las propiedades del plástico desde su forma de masa y su misma fabricación como lo

es la temperatura, viscosidad y cantidad. Así mismo se visualizaron las formas que trabajar con el prototipo de tal manera que se adecue a la del operador al momento de ser utilizada.

La máquina cumple con la principal función de estirar una masa la cual es el pastico biodegradable desarrollada a partir de fécula de maíz, con algunos plastificantes y fibra vegetal como reforzante y con el cumplimiento de la norma que dicta máximo el de 10% de polímeros, esta máquina cumple con especificaciones claras ya que está pensada para fabricarse de metal y su principal funcionamiento es una banda trasportadora con la cual se realizó la implementación de una duya que está fabricada de acero inoxidable, esta se maneja por medio de un pistón manual, mientras que la banda transportadora funciona por medio de un motor que avanza 800 revoluciones por minuto.

El diseño se compone por una banda transportadora que al momento de girar avanzará un tramo de acrílico con dimensiones con base en las medias que se requiere el bioplástico; esta avanzará de forma manual a través de un pedal colocado en la parte inferior de la estructura que hará girar la banda a través de un sistema de poleas. A su vez, cuando este mecanismo esté en funcionamiento, se deberá accionar un pistón que se sitúa en la parte superior donde vaciará la masa de bioplástico por medio de una duya. Las medidas del prototipo de encuentran mostradas en la figura 1.

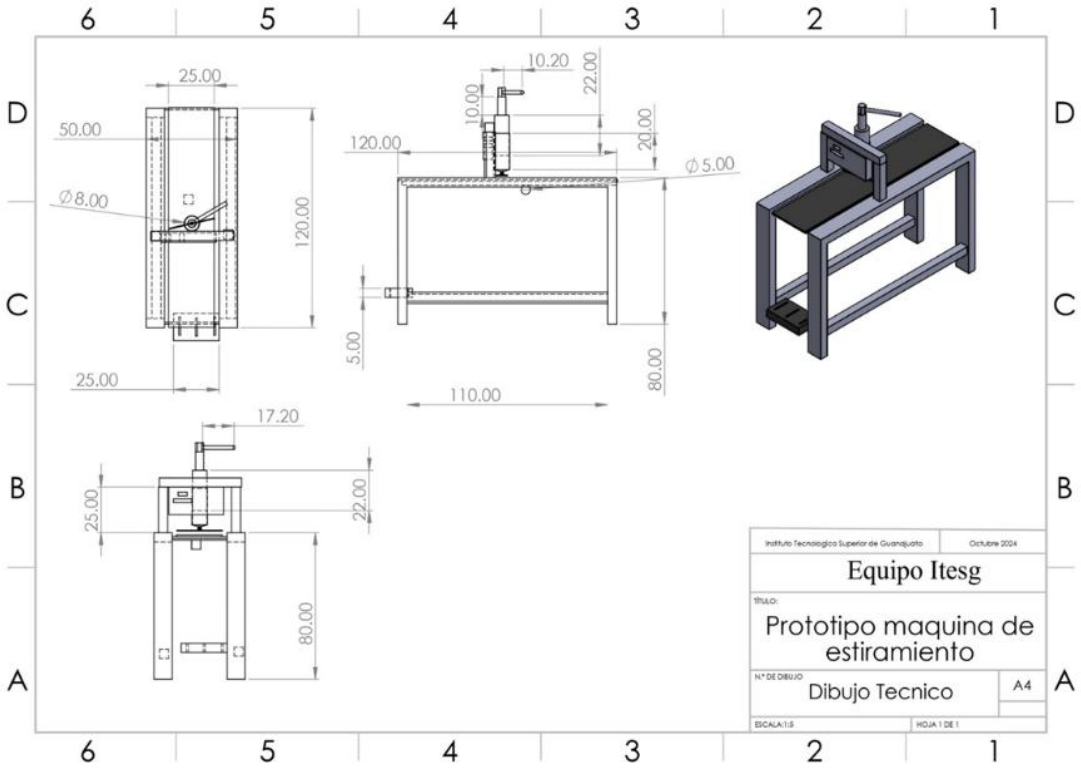


Figura 1. Representación gráfica de las medidas del prototipo (Elaboración propia)

Este mecanismo de vaciado dispersará la masa en el mismo acrílico al momento de avanzar, por lo que el pistón debe de estar lleno para que funcione de forma correcta, además de conservar su temperatura para que no se solidifique dentro del tubo, para ello se colocará resistencia con sensores para que pueda conservar la temperatura ideal.

Cabe mencionar, que este diseño se realizó pensado en que sea desmontable para su limpieza y almacenamiento ya que tomando en cuenta que se trabajará un material viscoso se debe de limpiar correctamente para que no contamine futuras mezclas de bioplásticos. El diseño final de la máquina de estiramiento de bioplástico reforzado con fibras de bagazo de maguey se muestra en la figura 2.

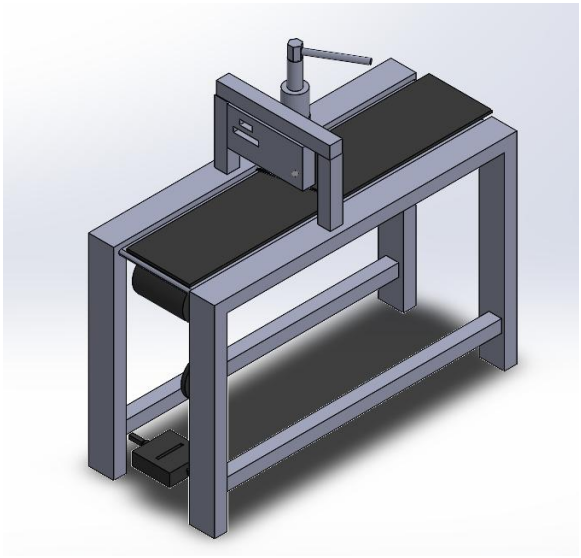


Figura 2. Diseño del prototipo de máquina de estiramiento de bioplásticos (Elaboración propia)

CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de estiradora de bioplástico representa un avance significativo en el aprovechamiento de tecnologías accesibles para mejorar procesos de transformación de materiales. Este diseño de máquina no solo permitirá optimizar la resistencia y la transparencia del bioplástico estirado, sino que también sienta las bases para futuros proyectos en el mismo ámbito.

El diseño del prototipo de la maquina ha demostrado ser técnicamente viable, debido a que la distribución y forma en la que se estructuró llega ser funcional ya que puede procesar el material biodegradable sin comprometerse con sus propiedades esenciales como la resistencia y la elasticidad. Se requiere realizar a futuro pruebas con el material de bioplástico para ajustar y optimizar los parámetros de operación, velocidad de estiramiento y presión para asegurar la calidad del producto final.

El diseño funcional y adaptable puede inspirar nuevas soluciones en la industria del reciclaje, manufactura y prototipado, promoviendo la innovación y el desarrollo sostenible en aplicaciones similares. Se recomienda llevarlo a su construcción y utilizar datos de diferentes tipos de bioplásticos con diferentes tipos de bagazos. Así mismo, el diseño es para que se trabaje de forma manual, sin embargo, dentro del mismo proceso y su misma estructura puede llegar a ser automatizable a través de sensores y su programación.

El diseño del prototipo de máquina de estiramiento de bioplástico ha sido un aporte positivo hacia las soluciones en el manejo de plásticos biodegradables y sostenibles, demostrando que la creación de diferentes tipos de prototipos y maquinarias que manipulen estos materiales ayuden a contribuir con el medio ambiente generando productos sustentables, así como a el avance en la industria en este tipo de rama.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arias Hernández, L. A., Juaristi Videgaray, E., Mares Martínez, H. E., Solís Silván, R., Maldonado Santoyo, M., Calderón Vega, F., Valdés Vázquez, J. F., & Delgadillo Ruiz, E. (2024). Valoración de acolchados ecoplásticos utilizados para reducir la evaporación en suelos agrícolas. Ciencia Nicolaita, (91), 1–9. https://doi.org/10.35830/cn.vi91.757
2. Arias Hernández, L. A., Maldonado Santoyo, M., Delgadillo Ruiz, L., Solís Silván, R., Calderón Vega, F., Aguilera, G. C., Reducindo Ruiz, S. M., González Trinidad, J., Berumen Cervantes,

A., Hernández, A. A. O., & Delgadillo Ruiz, E. (2025). The Effect of the Addition of Maguey Bagasse in the Production of Bioplastics Based on Corn and Potato Starch. *Journal of Composites Science*, *9*(5), 213. https://doi.org/10.3390/jcs9050213

3. Delgadillo Ruiz, E., Castorena Padilla, C., Peña Vázquez, F., Exiga Soria, Álvaro R., Ramírez Siorda, G. Y., Arias Hernández, L. A., & Delgadillo Ruiz, L. (2022). Clasificación de acolchados y su implementación en la retención de humedad del suelo. JÓVENES EN LA CIENCIA, 16, 1–9. Recuperado a partir de https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3838
4. Delgadillo-Ruiz, E., Tirado-Torres, D., Ramírez-García, R. A., Delgado-Escobedo, M. N., Arias-Hernández, L. A., Luna-Gutiérrez, J. F., … Barrientos-Hernández, Y. (2023). Variación de la temperatura del suelo utilizando residuos vegetales. JÓVENES EN LA CIENCIA, 21, 1–8. Recuperado a partir de https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4092
5. Delgadillo Ruiz, E., Arias Hernández, L. A., Guzmán Vega, P. P., Chavero Hernández, M., Luna Gutiérrez, J. F., Bárcenas González, F. I., … Delgadillo Ruiz, L. (2024). Análisis de propiedades físicas de plásticos desarrollados a partir de materiales biodegradables. JÓVENES EN LA CIENCIA, 28. https://doi.org/10.15174/jc.2024.4422
6. Duflou, J. R., Kellens, K., & Dewulf, W. (2012). "Environmental Assessment of Additive Manufacturing Processes". CIRP Annals - Manufacturing Technology.
7. Ellen MacArthur Foundation (2021). "The Circular Economy in Detail". Disponible en el sitio web oficial de la fundación.
8. Erazo-Arteaga, V. A. (2022). El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina. Información tecnológica, 33(2), 297-308.
9. Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). "Mechanics of Materials".
10. Gómez, J., Rodríguez, A., y Pérez, M. (2020). "Potencial del bagazo de agave como fuente de bioplásticos sostenibles". Revista Mexicana de Ciencia e Industria.
11. Narayan, R. (2019). "Bioplastics: Their Role in the Circular Economy". Journal of Polymer Science.
12. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). Informes sobre plásticos y contaminación. Consulta el documento: "Turning off the Tap: How the World Can End Plastic Pollution and Create a Circular Economy" (2022). Disponible en el sitio web oficial de UNEP.
13. Sarabia Lugo, E., Laura Jiménez Zúñiga, N. A., & Maturano Maturano, B. A. (2024). Prototipo de Destejedora para la Industria Textil. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(4), 3108-3120. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12553

ALINEACIÓN AUTOMÁTICA X-Y PARA SISTEMA DE FILTRADO ESPACIAL ÓPTICO, POR MEDIO DE CONTROLADOR NEURODIFUSO

Gregorio A. Oropeza-Gomez, J. Onofre Orozco-López, Francisco J. Casillas-Rodríguez, Francisco G. Peña-Lecona, Jesús Muñoz-Maciel y Miguel Mora-Gonzalez

Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara.
gregorio.oropeza@alumnos.udg.mx

RESUMEN

El filtrado espacial óptico, es un proceso de suma importancia para la consecución de una iluminación láser de máxima uniformidad, fundamenta su eficacia en el posicionamiento sumamente preciso de una apertura estenopeica o pinhole, situado estratégicamente en el punto focal de una lente de proyección. En el presente documento se propone la implementación de un innovador controlador neurodifuso, diseñado específicamente para optimizar la alineación automatizada del filtrado espacial óptico, esto en el plano bidimensional del pinhole (X-Y). El arreglo experimental, concebido para validar la efectividad del controlador, emplea actuadores micrométricos de alta precisión. Estos actuadores permiten un ajuste fino y controlado de la posición del pinhole, siguiendo las directrices proporcionadas por un algoritmo neurodifuso. La información de retroalimentación, esencial para el funcionamiento del algoritmo, es capturada en tiempo real por una cámara tipo CCD de alta resolución. Este sistema de retroalimentación visual posibilita un monitoreo continuo y la corrección inmediata de cualquier desviación en la posición X-Y del pinhole, asegurando una alineación y filtrado espacial óptimos para un láser a 635 nm. El sistema automatizado, fue desarrollado utilizando lenguajes y plataformas de programación como Python y LabVIEW, lo cual representa un avance significativo en la optimización del proceso de filtrado espacial óptico. El controlador resultante basado en red neuronal convolucional (CNN por sus siglas en inglés), entrenado en un conjunto de datos depurado cuidadosamente, demostró una alineación 9.43 veces más rápida que el controlador tradicional proporcional-integral-derivativo (PID). Las ganancias de rendimiento fueron impulsadas principalmente por el aumento del número de clases en los datos de entrenamiento, en lugar de cambios arquitectónicos como redes más profundas o kernels más grandes. El controlador resultante exhibió un aumento mínimo en el error de seguimiento, en la ruta de movimiento del spot láser, comparado al controlador PID. Al automatizar y alinear el spot láser, el sistema no solo agiliza significativamente el flujo de trabajo en aplicaciones de modelado de haces láser, sino que también incrementa notablemente la precisión y la calidad del perfil del haz láser resultante, un factor crítico en arreglos ópticos utilizados en interferometría y holografía, los cuales tienen numerosas aplicaciones científicas e industriales.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas interferométricos se suele utilizar un filtro espacial óptico. Estos sistemas se basan en un haz láser, el cual requiere tener un frente de onda limpio para cubrir un área de iluminación donde se encuentra el objeto bajo prueba.[1,2] Normalmente, el filtrado espacial óptico puede implementarse utilizando una lente convergente y un *pinhole* montados en dispositivos de desplazamiento manuales o motorizados con resolución micrométrica. Sin embargo, la alineación requiere la intervención humana. Con dispositivos de desplazamiento motorizados y una cámara CCD se puede llevar a cabo un algoritmo de control para mover el *pinhole* en los ejes X-Y-Z logrando la alineación del haz láser en un punto de la cámara CCD.

En 1992, Fonneland et al. patentan en EE.UU. un sistema automático de expansión del haz láser en 2D, haciendo uso de dos motores de corriente continua con sus respectivos micrómetros.[3] Sasaki et al. mejoraron el proceso de alineación automática del *pinhole*, localizando fotodiodos alrededor del mismo, para forzar a dos servomotores a llevar la luz láser a través del *pinhole*.[4] El filtrado espacial automático se ha utilizado en un dispositivo microfluídico controlado por pinzas ópticas láser,[5] para adquirir las imágenes virtuales en microscopía holográfica digital y microscopía láser,[6,7] para acoplar

diferentes órdenes de difracciones en el *pinhole*,[8] se utilizaron en la alineación de sistemas láser de alta potencia e imágenes para el modelado 3D del entorno.[9,10] En 2022 se aplicó un controlador PID para un sistema de filtrado espacial totalmente controlado X-Y.[11]

En los últimos años las redes neuronales convolucionales (CNNs) han emergido como el recurso clave en visión por computadora, normalmente se desarrollan con un presupuesto fijo de recursos y luego se escalan para obtener mayor precisión si se dispone de más recursos.[12,13] El sistema tiene como única entrada una imagen, por lo que es factible implementar una red neuronal convolucional dentro del algoritmo de control que reconozca la posición del haz láser en la cámara CCD y mueva el dispositivo de microdesplazamiento en consecuencia. Dado que sólo tiene dos salidas (incrementos y decrementos en los ejes X-Y), la salida del sistema puede definirse utilizando lógica difusa.

TEORÍA

En interferometría óptica, la obtención de un frente de onda láser con intensidad uniforme para la iluminación del objeto de prueba es crucial. No obstante, la presencia de partículas de polvo ambiental produce un haz que difiere de la distribución ideal debido a la dispersión y la difracción, lo que conlleva a interferencias y ruido manifestados como múltiples órdenes de intensidad en el haz. Para minimizar significativamente este ruido y lograr un frente de onda de alta calidad, se recurre al filtro espacial. Dicho filtro se basa en un *pinhole* estratégicamente situado en el plano focal de un lente convergente y precisamente centrado en los ejes X-Y.

El diámetro del punto del haz convergente está determinado por el diámetro del primer anillo oscuro en el disco de Airy. Este diámetro se puede calcular de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{Q = 2.44\lambda\frac{f}{D}} \tag{1}$$

donde: $\boldsymbol{\lambda}$ es la longitud de onda del láser, $\boldsymbol{f}$ corresponde a la distancia focal de la lente $\boldsymbol{L_p}$, $\boldsymbol{D}$ es el diámetro de la apertura. El diámetro óptimo del *pinhole* se considera con un factor de $\boldsymbol{1.5D}$.

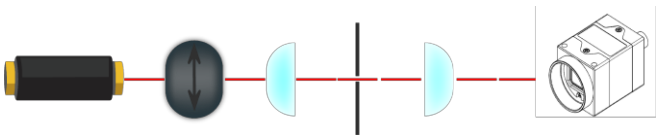


Figura 1. Filtrado espacial típico.

En los últimos años, las técnicas de aprendizaje automático como las redes neuronales han desempeñado un papel importante en el reconocimiento de patrones.[12] Las redes neuronales convolucionales se han erigido como el algoritmo líder en visión por computadora. Este tipo de red neuronal comenzó con los modelos LeNet y se refinó posteriormente en 2012 con la arquitectura AlexNet, donde las operaciones de convolución se repetían varias veces entre las operaciones de max pooling.[13] La capacidad de estas redes multicapa, entrenadas con descenso de gradiente, para aprender mapeos complejos, de alta dimensión y no lineales a partir de grandes conjuntos de ejemplos las convierte en candidatas obvias para tareas de reconocimiento de imágenes.[14] Una red neuronal convolucional, como su nombre indica, utiliza convoluciones que se aplican a un mapa de características de entrada, una matriz tridimensional que corresponde a altura, anchura y RGB. Una CNN se compone de $\mathbf{n}$ módulos, cada uno de los cuales ejecuta 3 operaciones: convolución, función de activación ReLu y pooling.

La primera de las operaciones es la convolución; esta operación toma una imagen de entrada y crea un mapa de características de salida aplicando un filtro o *kernel* para identificar las características. Después de cada operación de convolución, la red aplica una Unidad Lineal Rectificada o transformación ReLu introduciendo no linealidad en el modelo. Finalmente, el *pooling* utiliza un algoritmo de *max pooling* para reducir las dimensiones del mapa de características y ahorrar tiempo

de procesamiento. Después de cada módulo, la red tiene capas totalmente conectadas; cuando dos capas están "totalmente conectadas", cada nodo en la primera capa está conectado a cada nodo en la segunda capa; esta capa realiza una clasificación basada en el mapa de características de salida de la última capa de convolución. Las capas totalmente conectadas contienen una función de activación softmax que genera un valor entre 0 y 1 y representa la probabilidad de que pertenezca a cada una de las clases que el modelo está prediciendo.

La convolución, siendo la operación fundamental en una Red Neuronal Convolucional, opera mediante el deslizamiento de un filtro o *kernel* sobre el mapa de características de entrada, que en reconocimiento de imágenes sería una imagen por clasificar con una resolución $\boldsymbol{N\,x\,M}$ generando así un mapa de características de salida que resalta patrones específicos presentes en la imagen. Este proceso de convolución permite a la red detectar características como bordes, esquinas y texturas. Tras cada operación convolucional, se aplica una función de activación no lineal, comúnmente la Unidad Lineal Rectificada (ReLU), que introduce no linealidad en el modelo, habilitando el aprendizaje de relaciones complejas en los datos. La etapa de pooling, que sigue a la activación, tiene como objetivo reducir la dimensionalidad espacial del mapa de características, lo que disminuye la cantidad de parámetros y la carga computacional, a la vez que proporciona cierta invariancia a pequeñas traslaciones de las características detectadas. Un método común de pooling es el *max pooling*, que selecciona el valor máximo dentro de una ventana de la imagen. Después de una serie de capas convolucionales y *max pooling* , la arquitectura de una CNN típicamente incluye capas totalmente conectadas. En estas capas, cada neurona está conectada a todas las neuronas de la capa precedente. Su función principal es la de realizar la clasificación final, basándose en las características abstractas aprendidas por las capas convolucionales. La capa de salida de las capas totalmente conectadas a menudo emplea una función de activación softmax. Esta función transforma la salida de la capa en una distribución de probabilidad sobre las diferentes clases posibles, donde cada valor se encuentra entre 0 y 1, y la suma de todos los valores es igual a 1. De esta manera, la red proporciona una medida de la confianza con la que la entrada pertenece a cada una de las clases predefinidas durante el entrenamiento.

PARTE EXPERIMENTAL

Para este trabajo se implementó un arreglo experimental óptico con un *pinhole* de 10 micrómetros. El montaje experimental aplicado consta de un láser portátil (conector USB, 635nm, 0.9mW); un polarizador lineal $\boldsymbol{p}$ para atenuar la intensidad del haz láser con el fin de no saturar las imágenes de salida y para controlar los ejes de polarización; una lente positiva $\boldsymbol{L_p}$ para proyectar el haz láser sobre el plano del *pinhole*; luego la luz pasa a través del *pinhole* y es capturada por una segunda lente $\boldsymbol{L_f}$ para enfocar y registrarla con una cámara CCD monocromática con una resolución de 1024×1280 píxeles (1.3MP y 170 fps). El *pinhole* está montado sobre un arreglo móvil X-Y-Z, con una sección motorizada X-Y compuesta por 2 controladores de servomotor de CC y 2 servo-actuadores, además de un micrómetro en el eje Z; la velocidad de los servomotores está limitada a 2 mm/s y el tiempo de muestreo de la cámara CCD está determinado por el tiempo de ejecución del algoritmo lo cual a su vez depende del tiempo de inferencia de la CNN.

El equipo de cómputo con el que se realizó el trabajo tiene como especificaciones técnicas como procesador un AMD Ryzen 5 5600, 6 núcleos, 3.5 GHz,, 32 GB de RAM y una AMD RX 6500XT.
El set de datos para la CNN consta de 22500 imágenes del haz láser en diferentes posiciones a través del sensor de la cámara CCD y seccionado dependiendo de la posición. En este caso no se utiliza argumentación debido a la simetría de las imágenes. La CNN fue creada utilizando python 3.11 como lenguaje de programación y las librerías de Tensor Flow con algunas adaptaciones en cuanto a procesado de imágenes con la librería de Pillow.
En cuanto a la estructura de la red, esta tiene como optimizador en el proceso de propagación hacia atrás el optimizador ADAM y como función de error *Sparse Categorical Cross-entropy.* La red tiene como función la posición del haz láser en el sensor de la cámara CCD , cuya posición cambia

dependiendo de la posición del *pinhole.* Dependiendo de su ubicación se tiene un algoritmo difuso que determina el incremento que realizará en ambos ejes el pinhole mediante los servomotores en los ejes X-Y. El modelo resultante tiene un total de 19,583,805 parámetros. El *pinhole* se encuentra motorizado en los ejes X-Y utilizando servomotores de la marca Thorlabs que a su vez se encuentran controlados mediante un módulo diseñado en LabView y cuya conexión con el controlador neurodifuso está realizado mediante una base de datos en MySQL permitiendo así la separación de la carga de trabajo, así como aumentando la compatibilidad de los sistemas computacionales que pueden implementarse.[14] En la figura 2 se muestra una representación de la estructura del conjunto de datos, en la imagen se logran apreciar 9 de las 29 clases que conforman el conjunto de datos correspondientes a el haz láser en las posiciones arriba, abajo, derecha, izquierda, las cuatro esquinas y el centro. Las 20 clases no representadas corresponden a puntos intermedios entre estas 9 clases.

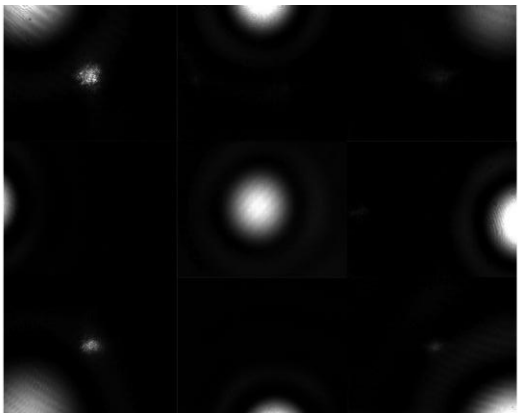


Figura 2. Representación de la clasificación de las posiciones por la red neuronal convolucional, mostrando 9 de las 29 clases correspondientes a arriba, abajo, izquierda, derecha, las cuatro esquinas del sensor y el centro.

RESULTADOS

Los resultados experimentales demostraron que el modelo de CNN diseñado tiene una alta sensibilidad al número de clases en las que clasifica las posiciones del haz láser, demostrando mejores resultados a mayor cantidad de clases sobre una mayor cantidad de parámetros.
El control basado en redes neuronales y lógica difusa demostró alcanzar niveles de error similares a un controlador PID (menor a 30 píxeles o menores al 3%) con un menor tiempo de ejecución como lo demuestra la figura 3. Es importante remarcar que el umbral de error para el PID fue seleccionado en base al error obtenido en el controlador neurodifuso que se muestra en la figura 4. En la figura 4 se muestran los errores en ambos ejes (X, Y) para el controlador neurodifuso.

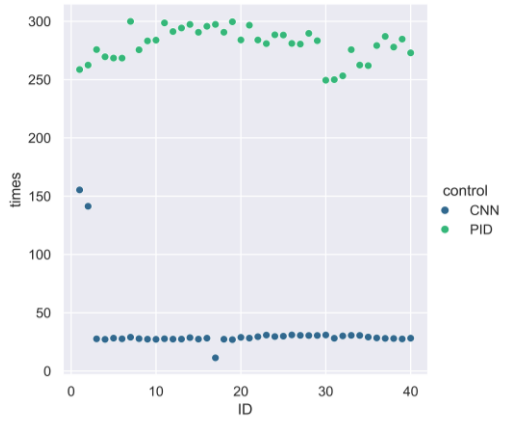


Figura 3. Tiempo de alineamiento tanto del PID [11] como del controlador neurodifuso basado en CNN.

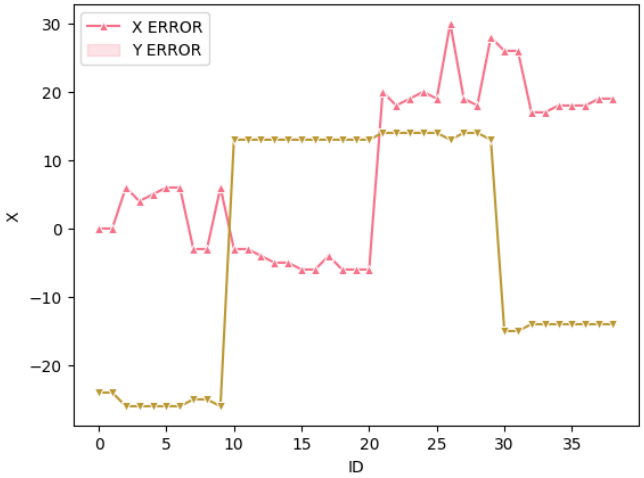


Figura 4. Error en los ejes X-Y del controlador neurodifuso.

CONCLUSIONES

La implementación de un controlador neurodifuso para la alineación automática de un sistema de filtrado espacial óptico ha demostrado ser una alternativa eficiente y precisa al controlador PID tradicional. Los resultados experimentales evidencian que el modelo de red neuronal convolucional diseñado logró un tiempo de alineación significativamente menor, aproximadamente 9.43 veces más rápido, manteniendo niveles de error comparables en el seguimiento del spot láser. La integración de lógica difusa en el algoritmo de control permitió una adaptación precisa de los incrementos en los ejes X-Y del pinhole, optimizando el proceso de alineación. La robustez del sistema se manifiesta en su capacidad para alinear el haz láser partiendo de diversas posiciones en el sensor de la cámara CCD, garantizando la eficiencia del filtrado espacial.

Este estudio resalta la viabilidad de las redes neuronales convolucionales en tareas de control y automatización de sistemas ópticos, abriendo la puerta a futuras investigaciones enfocadas en la optimización de arquitecturas de CNN y la exploración de técnicas de aprendizaje automático más avanzadas para mejorar aún más la precisión y la velocidad de alineación en sistemas de filtrado espacial y otras aplicaciones ópticas complejas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Q. Kemao, S. H. Soon, and A. Asundi, “Smoothing filters in phase-shifting interferometry,” Opt Laser Technol, vol. 35, no. 8, 2003, doi: 10.1016/S0030-3992(03)00113-0.
2. R. Jones and C. Wykes, Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge University Press, 1989. doi: 10.1017/CBO9780511622465.
3. N. J. Fonneland, J. V Fine, K. G. Leib, and B. J. Pernick, “AUTOMATIC LASER BEAM EXPANDER-PINHOLE ALIGNMENT SYSTEM,” 1992.
4. M. S. Minoru Sasaki, Y. A. Yuji Arai, W. K. Wataru Kamada, and K. H. Kazuhiro Hane, “Improved Automatic Alignment of Pinhole Integrated with Photodiode,” Jpn J Appl Phys, vol. 37, no. 12S, p. 7120, Dec. 1998, doi: 10.1143/JJAP.37.7120.
5. A. L. Birkbeck, S. Zlatanovic, and S. C. Esener, “Self-aligned spatial filtering using laser optical tweezers,” Appl Opt, vol. 45, no. 25, p. 6429, Sep. 2006, doi: 10.1364/AO.45.006429.
6. J. Weng, J. Zhong, and C. Hu, “Automatic spatial filtering to obtain the virtual image term in digital holographic microscopy,” Appl Opt, vol. 49, no. 2, 2010, doi: 10.1364/AO.49.000189.
7. R. M. Boutilier, Y. J. Ahn, J. S. Park, and H. Lee, “Development of an auto-interchangeable multi-pinhole array for confocal laser scanning microscopy systems using precision laser processing,” Opt Laser Technol, vol. 116, 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.03.004.

8. Y. Tan, Y. Yang, G. Zheng, B. Shen, H. Pan, and L. Liu, “Spatial filter with volume gratings for high-peak-power multistage laser amplifiers,” in Laser Beam Shaping XI, 2010. doi: 10.1117/12.861099.
9. A. K. Sharma, R. K. Patidar, D. Daiya, A. Joshi, P. A. Naik, and P. D. Gupta, “Simple and sensitive technique for alignment of the pinhole of a spatial filter of a high-energy, high-power laser system,” Appl Opt, vol. 52, no. 12, 2013, doi: 10.1364/AO.52.002546.
10. N. Williams, K. L. Low, C. Hantak, M. Pollefeys, and A. Lastra, “Automatic image alignment for 3D environment modeling,” in Brazilian Symposium of Computer Graphic and Image Processing, 2004. doi: 10.1109/sibgra.2004.1352985.
11. G. A. O. Gomez, J. O. Orozco-Lopez, F. J. Casillas-Rodriguez, and M. Mora-Gonzalez, “2D automatic alignment of optical spatial filtering system by PID control,” in 2022 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), IEEE, Nov. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ROPEC55836.2022.10018654.
12. Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition,” Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324, 1998, doi: 10.1109/5.726791.
13. F. Chollet, “Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions,” in Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, 2017. doi: 10.1109/CVPR.2017.195.
14. G. A. Oropeza-Gomez, J. O. Orozco-López, F. J. Casillas-Rodríguez, F. G. Peña-Lecona, J. Muñoz-Maciel, and M. Mora-Gonzalez, “High-precision spatial filtering with ai-driven control and multicolor laser testing for interferometric application,” Integration, vol. 103, p. 102406, 2025.

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA DESTILACIÓN DE ÉSTER METÍLICO A PARTIR DE ACEITE DE PIRUL UTILIZANDO DWSIM

Fidel Pescador Quintanilla[1], Yesenia Almanza Aguilar[1], A. Noelia Zamorano Zúñiga[1]
J. Merced Martínez Vázquez[1,2]

[1]Universidad Centro de Estudios Cortázar, departamento de Ingeniería Química, [2]Universidad Politécnica de Juventino Rosas, departamento de Ingeniería en Manufactura Avanzada
fidel.pescador@ucec.edu.mx

RESUMEN

La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales no convencionales, como el aceite de Schinus molle (pirul), representa una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles. Este estudio se centra en la simulación y análisis del proceso de destilación para purificar ésteres metílicos (biodiesel) obtenidos a partir de aceite de pirul, utilizando el software DWSIM. El objetivo es optimizar la pureza del producto y evaluar su viabilidad técnica. Para ello, se simuló una columna de destilación ChemSep en DWSIM, considerando una alimentación de biodiesel crudo obtenido mediante transesterificación del aceite de pirul. Se definieron los componentes principales (ésteres metílicos, metanol, glicerol y agua) y se seleccionó el método termodinámico NRTL para modelar las interacciones de fase. La columna se configuró con 15 etapas teóricas, presión de 1 atm y temperatura en el rehervidor de 200 °C. Se analizaron los perfiles de temperatura, composición y flujo a lo largo de la columna. Los resultados de la simulación indicaron que la destilación permite obtener biodiesel con una pureza del 99.5 % en ésteres etílicos, superando los estándares de calidad internacionales (ASTM D6751 y EN 14214). Además, se logró recuperar el etanol residual con una eficiencia del 95 %, lo que reduce costos y minimiza la generación de residuos. Por otro lado, el glicerol y otras impurezas se concentraron en los fondos de la columna, facilitando su separación y posterior reutilización.

En conclusión, la destilación se presenta como un método altamente efectivo para purificar biodiesel a partir de aceite de pirul, alcanzando una pureza superior al 99%. Este proceso, simulado en DWSIM, demuestra ser técnicamente viable y sostenible, ofreciendo una alternativa prometedora para la producción de combustibles renovables. Las futuras investigaciones de este proceso podrían enfocarse en su optimización económica e integración en plantas de producción a gran escala.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes y contexto

El biodiésel, un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales, ha surgido como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la diversificación de la matriz energética. Entre las materias primas no convencionales para la producción de biodiésel, el aceite de Schinus molle (pirul) destaca por su alto contenido de ácidos grasos insaturados, lo que lo hace adecuado para la transesterificación, el proceso químico clave en la producción de biodiésel. Sin embargo, para garantizar la calidad del biodiésel, es esencial implementar procesos de purificación eficientes, como la destilación, que permite eliminar impurezas como el metanol residual, el glicerol y otros subproductos.

Uno de los principales desafíos en la producción de biodiésel es la purificación del producto final. Los métodos convencionales, como el lavado con agua, aunque efectivos, presentan limitaciones en términos de pureza y generación de residuos líquidos. Además, estos métodos pueden no ser suficientes para cumplir con los estándares internacionales de calidad, como ASTM D6751 y EN 14214, que exigen una pureza superior al 96.5% en ésteres metílicos. Por otro lado, la destilación,

aunque más compleja y costosa, ofrece una alternativa prometedora para lograr una pureza superior al 99%, lo que la convierte en una opción viable para la producción a gran escala.

La simulación de procesos químicos, utilizando herramientas como DWSIM, permite optimizar las condiciones de operación y predecir el comportamiento del sistema sin la necesidad de implementar plantas piloto. Esto no solo reduce costos y riesgos, sino que también facilita la identificación de parámetros críticos que influyen en la eficiencia del proceso. En el caso de la destilación del biodiésel a partir de aceite de pirul, la simulación puede ayudar a determinar las condiciones óptimas de temperatura, presión y número de etapas, mejorando así la calidad del producto final y la viabilidad económica del proceso.

Este estudio se limita a la simulación del proceso de destilación utilizando DWSIM, sin incluir validación experimental. Aunque los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la optimización del proceso, se recomienda realizar estudios adicionales que incluyan pruebas experimentales para confirmar los hallazgos. Además, el análisis se centra en el aceite de pirul como materia prima, por lo que los resultados pueden variar al utilizar otros aceites vegetales.

TEORÍA

El biodiésel es un combustible renovable y ecológico que se obtiene a partir de materias primas naturales, como aceites vegetales, tanto nuevos como reciclados, y grasas de origen animal. Su combustión es más limpia en comparación con el diésel derivado del petróleo, lo que contribuye a reducir las emisiones contaminantes. Además, puede emplearse en motores diésel sin necesidad de modificaciones, ya que sus características físicas son muy parecidas a las del diésel convencional. Está compuesto por ésteres alquílicos de ácidos grasos, obtenidos mediante la transesterificación de triglicéridos con alcoholes de cadena corta, como metanol o etanol. Según la norma ASTM D6751, el biodiésel debe cumplir con especificaciones técnicas como viscosidad (1.9-6.0 mm^2/s a 40°C), densidad (860-900 kg/m^3) y punto de inflamación (>130°C), entre otras, para garantizar su rendimiento en motores y su estabilidad durante el almacenamiento.

El aceite extraído de *Schinus molle* se caracteriza por su alto contenido de ácidos grasos insaturados, como el ácido oleico, lo que lo convierte en una opción atractiva para la producción de biodiésel. Su baja temperatura de solidificación y su notable estabilidad frente a la oxidación favorecen su uso como materia prima en este proceso. Los aceites esenciales, que son combinaciones complejas de compuestos volátiles generados por diversas especies vegetales también forman parte de su composición. Gracias a estas características, el aceite de *S. molle* representa una alternativa viable para la producción de biodiésel mediante el proceso de transesterificación.

La transesterificación es la reacción química clave en la producción de biodiésel. Consiste en la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos (biodiésel) y glicerol en presencia de un alcohol (metanol o etanol) y un catalizador (generalmente hidróxido de sodio o metilato de sodio). Esta reacción puede ser catalizada por ácidos, bases o enzimas, dependiendo de la calidad del aceite y de las condiciones operativas óptimas.

La destilación es un proceso físico utilizado para separar los componentes de una mezcla líquida en función de sus diferentes puntos de ebullición. Consiste en calentar la mezcla hasta que uno o más de sus componentes se vaporizan, para luego enfriar y condensar estos vapores, obteniendo así sustancias más puras. Es utilizada para purificar el biodiesel, eliminando impurezas como alcohol residual, glicerol, catalizador y agua. En el caso del aceite de pirul, la destilación se enfoca en separar los ésteres metílicos de otros componentes mediante diferencias en sus puntos de ebullición.

En el proceso de destilación, existen varios parámetros críticos que deben ser cuidadosamente controlados para garantizar una separación eficiente y evitar la degradación de los compuestos. Uno

de los factores más importantes es la temperatura, la cual debe mantenerse en un rango adecuado para prevenir la descomposición térmica de los ésteres y otros componentes sensibles al calor. Otro aspecto fundamental es la presión, que puede ajustarse para operar en condiciones de vacío. Esto permite reducir la temperatura de ebullición de las sustancias, minimizando así los riesgos de degradación y mejorando la eficiencia del proceso. Además, la eficiencia de separación depende en gran medida del diseño de la columna de destilación y del modelo termodinámico empleado en la simulación del proceso. Una columna bien diseñada optimiza la transferencia de masa y energía, permitiendo una separación más efectiva de los componentes de la mezcla. En conjunto, el control adecuado de estos parámetros es esencial para lograr una destilación eficiente y obtener productos con alta pureza y calidad.

DWSIM es un simulador de procesos químicos de código abierto que permite modelar operaciones unitarias, incluyendo destilación, reacciones químicas y equilibrios de fases. Su biblioteca de componentes y modelos termodinámicos (Peng-Robinson, NRTL, UNIFAC) lo hacen ideal para simular la producción de biodiesel. La mayoría de los programas suelen tener un costo elevado y no se ajustan a los presupuestos de las pequeñas empresas. Pero, el programa DWSIM se puede descargar completamente gratis y es fácil de manejarlo.

PARTE EXPERIMENTAL

Definición del Sistema

El sistema a simular se basa en la destilación del éster etílico obtenido tras la transesterificación del aceite de pirul. La simulación se llevará a cabo en DWSIM, estableciendo los siguientes componentes principales:
i. Entrada de materia prima**:** trioleina ($C_{57}H_{104}O_6$) extraída del aceite de pirul, etanol (EtOH, C_2H_5OH), agua (H_2O), glicerina (glicerol, $C_3H_8O_3$), hidróxido de sodio (NaOH), como catalizador y etil oleato ($C_{20}H_{38}O_2$), es el producto de la reacción de transesterificación (biodiésel).
ii. Reactor CSTR.
iii. Columna de destilación (ChemSep)**:** Sistema de separación basado en diferencias de volatilidad.
iv. Corrientes de salida**:** Fracción superior con etanol recuperado y fracción inferior con etil oleato purificado.

Modelado del Proceso en DWSIM

Para la construcción del modelo en DWSIM se utilizaron las siguientes configuraciones:

- Paquete termodinámico: NRTL (Non-Random Two-Liquid).
- Condiciones de Operación:
  - Presión de operación:
  - Temperatura en la cabeza:
  - Temperatura en el fondo:
  - Número de etapas:
  - Relación de reflujo:

Preparación del modelo

- Se ingresaron los datos de entrada para las corrientes de materia prima en DWSIM.
- Se configuraron las condiciones de operación de la columna de destilación.

Simulación del Proceso

- Se analizaron los perfiles de temperatura y composición en cada etapa de la columna.

RESULTADOS

El proceso de transesterificación de la trioleina (Figura 1) ocurre dentro de un reactor de conversión (CSRT) en presencia de etanol, empleando una relación molar 6:1, la cual permite un rendimiento entre el 75 y 80%. Las condiciones operacionales de entrada al reactor que se emplearon en el modelado de la planta de producción de biodiesel, así como las fracciones másicas de las corrientes de entrada y salida para una conversión del 95% de trioleina en etil oleato (EtO) se encuentran en la

Tabla 1, el porcentaje de conversión obtenidos en la reacción y las fracciones de alimentación, en la Tabla 2.

$$\textbf{trioleina} + 3\ \textbf{etanol} \rightarrow \textbf{glicerol} + 3\ \textbf{etil oleato}$$

$$C_{57}H_{104}O_6 + 3C_2H_5OH \rightarrow C_3H_8O_3 + 3C_{20}H_{38}O_2$$

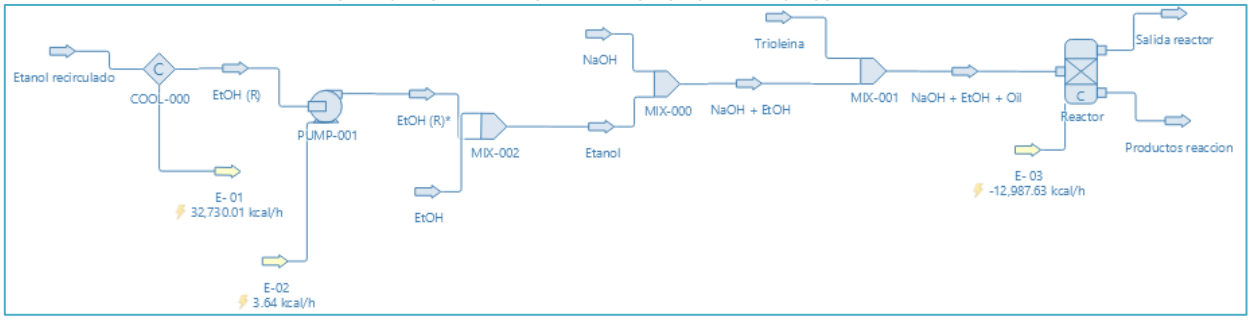


Figura 1. Simulación en DWSIM de la reacción en el reactor de conversión

Tabla 1. Parámetros de entrada y salida del reactor de conversión (CSRT)

	Entrada		Salida
	NaOH + EtOH	Trioleína	Productos
Temperatura	**25 °C**	**60 °C**	**77.38 °C**
Presión	**1.0 atm**	**1.0 atm**	**1.0 atm**
Flujo másico	**79 g/s**	**225 g/s**	**303.286 g/s**
Flujo molar	**1.723 mol/s**	**0.254 mol/s**	**1.976 mol/s**

Tabla 2. Fracciones molares de los compuestos en el reactor de conversión (CSRT)

	Entrada		Salida
	NaOH + EtOH	Trioleína	Productos
Trioleína	**0.0000**	**1.0000**	**0.0064**
Etanol	**0.9675**	**0.0000**	**0.4781**
Hidróxido de sodio	**0.0325**	**0.0000**	**0.0283**
Glicerol	**0.0000**	**0.0000**	**0.1218**
Etil oleato	**0.0000**	**0.0000**	**0.3654**

En la válvula VALV-000 se reduce su presión de la mezcla resultante de la reacción de transesterificación que sale del reactor hasta 30 PSI y luego se envía a la columna de destilación donde se recupera el alcohol no reaccionante por la cabeza, mientras que en el fondo se separan los productos obtenidos en el reactor. El diagrama completo se muestra en la Figura 2.
Una vez que la corriente de salida de la válvula ingresa a la columna de destilación ocurre la separación de etanol y productos de la reacción de transesterificación por diferencia de peso y volatilidad gracias a la presión y temperatura a la que opera la columna. La Tabla 3 muestra las condiciones operacionales y las composiciones de las corrientes de la columna de destilación, y en la Tabla 4 la composición de la corriente del condensador y fondo.

Tabla 3. Condiciones de operación de la columna de destilación

Relación de reflujo: 10

Número de etapas: 20

Etapa de la alimentación: 10

Condensador total

Rehervidor parcia

Paquete termodinámico: NRTL

Presión constante de 1.0 atm

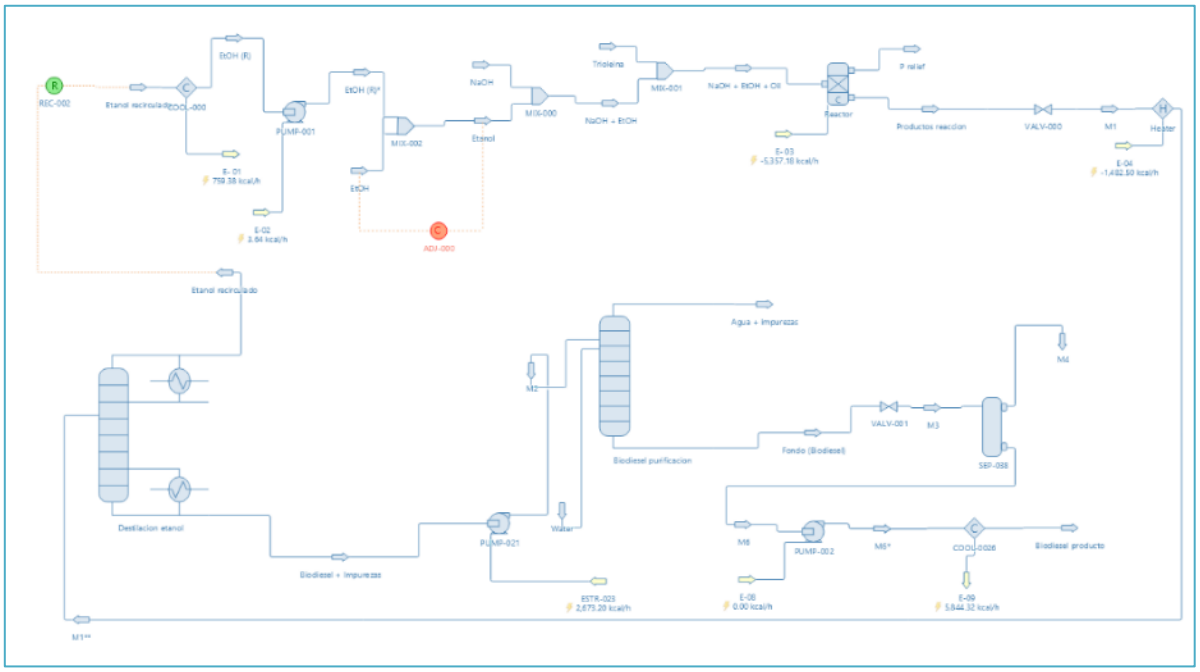


Figura 2. Proceso completo de la obtención de biodiésel en DWSIM

Tabla 4. Composiciones de las corrientes del condesado y fondo de la columna de destilación

Compuesto	Condensado	Fondo
Trioleína	**0.0000**	**0.0122**
Etanol	**1.0000**	**0.0100**
Hidróxido de sodio	**0.0000**	**0.0493**
Glicerol	**0.0000**	**0.2321**
Etil oleato	**0.0000**	**0.6963**

Tras la etapa de destilación, la corriente de destilado (EtOH reciclado) se somete a un proceso de recuperación mediante un operador de purificación, asegurando su reingreso al sistema con una pureza óptima (>99.5%). Paralelamente, la corriente de fondos de la columna (biodiesel + impurezas) se direcciona a un extractor líquido-líquido (ELL), donde se implementa una etapa de lavado con agua como fase solvente. Esta operación permite la separación eficiente del glicerol (subproducto de la reacción), trazas de catalizador alcalino residual y alcohol no convertido. El modelo termodinámico NRTL se seleccionó para simular el ELL, debido a su precisión en sistemas multicomponentes con mezclas polares y no polares (ej. biodiesel-agua-glicerol). El extractor opera en modo continuo con flujos contra-corriente, maximizando la transferencia de masa y garantizando una separación de fases efectiva. La corriente refinada del ELL (fase orgánica rica en ésteres etílicos) se somete a un separador bifásico (SEP-000) para eliminar residuos acuosos, seguido de un enfriamiento a 25–30°C para estabilizar el biodiesel antes de su almacenamiento. La corriente de fondos del extractor (fase acuosa con glicerol) presenta un contenido de alcohol residual <0.2% en

peso, cumpliendo con el estándar ASTM D6751 para biodiesel (límite máximo de 0.5% en metanol/etanol), el biodiésel tuvo una pureza de 99.05%. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de la columna de purificación, y en la tabla 6, los resultados del proceso de separación.

Tabla 5. Composiciones de las corrientes del condesado y fondo de la columna de purificación

Compuesto	Condensado	Fondo
Trioleína	**0.0006**	**0.0061**
Etanol	**0.0006**	**0.0032**
Hidróxido de sodio	**0.0037**	**0.0000**
Glicerol	**0.0174**	**0.0000**
Etil oleato (biodiésel)	**0.0011**	**0.9905**
Agua	**0.9765**	**0.0000**

Tabla 6. Composiciones de las corrientes del condesado y fondo en el separador gas - líquido

Compuesto	Condensado	Fondo
Trioleína	**0.0000**	**0.0062**
Etanol	**0.1284**	**0.0032**
Hidróxido de sodio	**0.0000**	**0.0000**
Glicerol	**0.0000**	**0.0000**
Etil oleato (biodiésel)	**0.0000**	**0.9905**
Agua	**0.8716**	**0.0062**

CONCLUSIONES

Los resultados de una simulación computacional para la producción de biodiésel a partir de aceite de pirul (Schinus molle), mediante un proceso de transesterificación catalítica seguido de etapas de purificación en columnas de destilación y extracción líquido-líquido, arrojaron las siguientes conclusiones:

- El aceite de pirul, demostró ser una materia prima viable para biodiesel, con propiedades fisicoquímicas comparables a aceites convencionales (ej. viscosidad de 3.5–5.0 mm^2/s).
- La transesterificación con etanol (relación molar 6:1 etanol:aceite y 1% p/p de catalizador alcalino) alcanzó una conversión del 87.29%, validando su eficiencia en condiciones adiabáticas.
- Aunque el etanol es renovable y reduce la huella de carbono, su uso disminuyó el rendimiento en 5–10% frente al metanol, además de incrementar la viscosidad del biodiesel por encima del límite de la norma EN 14214 (requiriendo ajustes en el proceso o mezclas con aditivos).
- La elección de etanol demanda optimizar etapas de purificación para cumplir con el estándar ASTM D6751 (contenido de alcohol residual <0.5% en peso).
- La columna de destilación (operando a 1.0 atm) recuperó el 99.5% del etanol no reaccionado, reintegrándolo al proceso mediante un circuito de reciclaje.
- El extractor líquido-líquido (con agua como solvente y modelo NRTL) redujo el contenido de glicerol a <0.2% en peso y eliminó trazas de catalizador, cumpliendo con especificaciones internacionales.
- El separador bifásico (SEP-000) aseguró una pureza final del biodiesel >98%, con un contenido de agua <500 ppm.

- El diseño mostró alta sensibilidad a variaciones en parámetros como flujos de reciclaje, relación solvente/alimentación y temperatura de operación, requiriendo un ajuste fino para garantizar estabilidad.
- La validación del modelo mediante balances de materia manuales y comparación con datos bibliográficos confirmó un margen de error <5%, respaldando su aplicabilidad en escalado industrial.
- El uso de DWSIM (software de código abierto) permitió modelar flujos complejos (ej. sistemas multicomponentes polar-no polar) con precisión, gracias a su biblioteca de propiedades termodinámicas (NRTL, UNIQUAC) y herramientas para equipos especializados (reactores, extractores).
- La flexibilidad del software facilitó la integración de equipos auxiliares (bombas, intercambiadores) y la optimización energética del proceso.
- El proceso aprovecha el pirul, un cultivo no alimentario con alta resistencia a sequías, reduciendo competencia con recursos agrícolas.
- La implementación en zonas marginales podría potenciar economías locales, aunque se requiere optimizar el rendimiento de extracción de aceite (20–30%) para competir con fuentes convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (2005). The Biodiesel Handbook. AOCS Press.
2. Ma, F., & Hanna, M.A. (1999). "Biodiesel production: A review". Bioresource Technology, 70(1), 1-15.
3. Seader, J.D., Henley, E.J., & Roper, D.K. (2016). Separation Process Principles. Wiley.
4. Demirbas, A. (2008). Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. Springer.
5. González, M., et al. (2022). "Schinus molle oil as a sustainable feedstock for biodiesel: Optimization of transesterification and distillation". Fuel, 320, 123-135.
6. Kumar, R., et al. (2023). "Advances in biodiesel purification using vacuum distillation: A techno-economic analysis". Renewable Energy, 204, 450-462.
7. Zhang, Y., et al. (2021). "UNIFAC modeling of biodiesel-methanol-glycerol systems in DWSIM". Chemical Engineering Research and Design, 175, 234-245.
8. Silva, L., et al. (2020). "Non-edible oils in Latin America: A review of Schinus molle and Jatropha curcas". Energy Reports, 6, 789-802.
9. Pérez, A. (2021). "Producción de biodiesel a partir de aceite de Schinus molle: Simulación y validación experimental". Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
10. Rodríguez, C. (2022). "Optimización de columnas de destilación para biocombustibles utilizando software open-source". Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires.
11. Fernández, E. (2020). "Análisis de ciclo de vida de biodiesel derivado de especies no convencionales". Tesis doctoral, Universidad de São Paulo.
12. ASTM International (2023). Standard Specification for Biodiesel (B100). ASTM D6751.
13. European Committee for Standardization (2022). *EN 14214: Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines*.
14. IEA (2023). World Energy Outlook 2023. Agencia Internacional de Energía.

BIODEGRADACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y AGRÍCOLAS MEDIANTE LA ACCIÓN DE PLEUROTUS OSTREATUS: EVALUACIÓN DE TRANSFORMACIÓN QUÍMICA Y BENEFICIOS AMBIENTALES

Marco Antonio Vilchis García, Diana Stephanie Ocegueda Vega, Julián López Tinoco.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
marco.vilchis@umich.mx

RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio para evaluar la capacidad de transformación química y los beneficios ambientales de la biodegradación de residuos sólidos urbanos y agrícolas mediante la acción de hongos. Los residuos analizados incluyeron materiales de difícil degradación, como los pañales desechables, así como residuos agrícolas, específicamente el rastrojo de maíz. Estos fueron sometidos a la acción de hongos celulíticos, como el *Pleurotus ostreatus*, un hongo comestible conocido por sus capacidades enzimáticas. El proceso de biodegradación se basa en la producción de enzimas fúngicas que actúan sobre polímeros complejos y compuestos sintéticos, transformándolos en compuestos orgánicos e inorgánicos de menor peso molecular. Para evaluar la eficacia del proceso, se diseñaron experimentos en los que se prepararon sustratos combinados de pañales desechables y rastrojo de maíz, los cuales fueron sometidos a tratamientos previos con el fin de optimizar las condiciones de pH, temperatura y nutrientes, promoviendo así la actividad enzimática del hongo. Los cambios estructurales y químicos en los sustratos fueron monitoreados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), lo que permitió detectar la descomposición de compuestos sintéticos y la generación de lípidos, proteínas, quitina y polisacáridos, componentes característicos de la biomasa fúngica. Los resultados indicaron que la biodegradación fúngica puede reducir el volumen de residuos persistentes entre un 50% y un 80% en períodos cortos de incubación, logrando no solo la degradación de materiales difíciles de procesar, sino también la generación de subproductos ricos en nutrientes, los cuales pueden ser aprovechados como compost. Este enfoque ofrece una solución viable para la gestión de residuos, promoviendo el reciclaje biológico de materia orgánica, mejorando la calidad del suelo y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos, lo que, a su vez, contribuye a mitigar los efectos negativos de los residuos en el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

En México se generan 102 895 ton/día de residuos sólidos urbanos, esto de acuerdo a cifras de la SEMARNAT, de las cuales los pañales desechables representan el 6.52 % lo que representa aproximadamente 6709 ton/día (1).

Dado que el uso del pañal desechable es muy común en todo el mundo y el aumento de la población está en aumento, también la generación de este residuo sólido urbano, es por esto que se deben de buscar nuevas técnicas de tratamiento de estos residuos. El pañal desechable contiene alrededor de 70% de fibras de celulosa y el resto se compone de materiales inertes, inocuos que no son biodegradables (2).

La creciente generación de residuos sólidos urbanos y agrícolas plantea un desafío ambiental de gran relevancia a nivel global. Estos desechos, mayoritariamente lignocelulósicos, pueden acumularse en vertederos, ocasionar emisiones de gases de efecto invernadero y provocar la degradación de suelos si no se manejan adecuadamente (3). Frente a esta problemática, la aplicación de hongos lignoliticos como *P. ostreatus* se presenta como una estrategia biotecnológica eficiente para la transformación de sustratos lignocelulósicos en biomasa fúngica y en productos de valor agregado, tales como biofertilizantes y compuestos bioactivados (4). Recientemente, se ha

documentado el uso de este hongo no solo sobre residuos organicos como el rastrojo de maíz, sino también sobre materiales urbanos complejos como los pañales desechables, que contienen celulosa absorbente y polímeros sintéticos (3).

El objetivo de esta investigación es analizar los mecanismos de biodegradación y las transformaciones químicas efectuadas por *P. ostreatus* sobre residuos sólidos urbanos y agrícolas, así como evaluar los beneficios ambientales derivados de su uso. Para ello, se revisarán los principios de la degradación ligninolítica, y la caracterización química.

TEORÍA

Residuos sólidos lignocelulósicos y urbanos

Los residuos sólidos representan uno de los principales problemas ambientales en la actualidad, tanto en entornos urbanos como rurales. En el caso de los residuos agrícolas, una gran proporción está compuesta por biomasa vegetal, rica en compuestos lignocelulósicos como la celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos polímeros estructurales forman la matriz de la pared celular vegetal, y aunque son abundantes y renovables, su degradación natural es lenta y limitada debido a la resistencia química de la lignina (9). Entre los residuos agrícolas más representativos destaca el rastrojo de maíz, el cual, tras la cosecha, se acumula en grandes cantidades sin un aprovechamiento adecuado, generando problemas como quema a cielo abierto, erosión del suelo y pérdida de nutrientes. La lignina es un polímero complejo y amorfo que impide el acceso de enzimas hidrolíticas a los polisacáridos como la celulosa, lo cual complica la conversión de estos residuos en materia útil para el suelo o para procesos industriales. Además, aunque la celulosa y la hemicelulosa pueden ser degradadas por una gran variedad de microorganismos, su disponibilidad depende en gran medida del grado de lignificación del sustrato. En este sentido, la lignocelulosa constituye un sustrato abundante, pero de difícil degradación, a menos que se utilicen métodos físicos, químicos o biológicos para su transformación (6). Por otra parte, los residuos sólidos urbanos también contienen fracciones lignocelulósicas, especialmente aquellos productos derivados del papel, cartón y productos higiénicos como los pañales desechables. Este último tipo de residuo ha cobrado especial interés debido a su uso masivo y su dificultad para ser degradado, ya que combina materiales orgánicos (celulosa absorbente) con polímeros plásticos y compuestos sintéticos. En promedio, un pañal puede tardar entre 200 y 500 años en degradarse en condiciones ambientales normales (3), lo que representa un serio problema para los sistemas de gestión de residuos municipales. No obstante, al separar la fracción orgánica (celulosa) del pañal y aplicarla a procesos biotecnológicos, se ha demostrado que puede servir como sustrato para hongos ligninolíticos como *P. ostreatus*.

La valorización de estos residuos mediante biodegradación fúngica representa una alternativa sostenible a las prácticas tradicionales como la incineración o el enterramiento. Esta vía permite no solo la reducción del volumen del residuo, sino también su transformación en compuestos útiles como abonos orgánicos, biofertilizantes o incluso biomasa fúngica comestible o con propiedades bioactivas. La aplicación de biotecnologías fúngicas para la transformación de residuos lignocelulósicos, tanto agrícolas como urbanos, permite cerrar ciclos de nutrientes y avanzar hacia modelos de economía circular.

Biología y metabolismo de Pleurotus ostreatus

El *P. ostreatus* es un hongo basidiomiceto de la pudrición blanca, capaz de secretar un conjunto de enzimas extracelulares con alta actividad ligninolítica: lacasas, manganeso peroxidasas y lignina peroxidasas (10). Estas enzimas generan radicales libres y especies reactivas de oxígeno que rompen los enlaces C–C y C–O de la lignina, despolimerizándola en compuestos fenólicos de bajo peso molecular. Simultáneamente, las celulasas y xilanasas degradan la celulosa y hemicelulosa, liberando glucosa y xilosa que sirven de fuente de carbono para el desarrollo micelial (4). Esta versatilidad metabólica le permite colonizar una amplia variedad de sustratos, desde residuos vegetales como la paja y el bagazo de caña, hasta residuos urbanos como pañales previamente esterilizados y fragmentados (3).

Transformación química de residuos
Durante el proceso de cultivo en estado sólido, *P. ostreatus* coloniza el sustrato y produce una reducción de masa de hasta un 80 % en residuos lignocelulósicos tras 30 días de incubación. En el caso del rastrojo de maíz, se han reportado disminuciones de lignina del 65 % y de celulosa del 40 %, lo cual mejora su degradabilidad (6). Por otro lado, en residuos urbanos como pañales, tras la remoción de componentes sintéticos, el hongo es capaz de degradar la fracción celulósica absorbente, generando una biomasa fúngica rica en proteínas y compuestos fenólicos solubles (3). Estos cambios químicos aumentan el valor agronómico del residuo tratado y reducen su impacto contaminante. Asimismo, la producción de compuestos antioxidantes y de interés farmacológico a partir de residuos complejos abre nuevas líneas de valorización industrial (8).

Beneficios ambientales y aplicación en suelos
El uso de residuos tratados con *P. ostreatus* como biofertilizante ha demostrado incrementar el contenido de nitrógeno total en el suelo en un 15 % y el fósforo disponible en un 20 % respecto al suelo sin enmienda (4). En el caso del rastrojo de maíz tratado, se ha observado un aumento en la actividad microbiana del suelo y una mejora significativa en su retención de humedad (5). La aplicación de residuos celulósicos urbanos tratados, como pañales desechables, también contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, al evitar su acumulación en vertederos y facilitar su transformación en biomasa fúngica inocua (7). Estas prácticas favorecen una agricultura circular y sostenible, donde los desechos se convierten en recursos valiosos para la restauración y fertilización de suelos.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales prima

Residuos urbanos y agrícolas: Pañal desechable y rastrojo de maíz
Hongo: micelio de *P. ostreatus*

Proceso de biodegradación

Para iniciar el proceso, se realizó la separación del pañal desechable, retirando la capa externa plástica (envoltorio), la cual fue descartada, y conservando únicamente la parte interna absorbente para su uso como sustrato. Paralelamente, se preparó el rastrojo de maíz, el cual fue hidratado con una solución de hidróxido de sodio (NaOH). Posteriormente, este material fue sometido a un proceso de pasteurización. Una vez listos los materiales, se conformaron cuatro tipos de sustratos: S1 (100% pañal), S2 (70% rastrojo - 30% pañal), S3 (50% rastrojo - 50% pañal) y S4 (30% rastrojo - 70% pañal). La siembra del hongo *P. ostreatus* se llevó a cabo bajo condiciones asépticas. Para cada tratamiento se prepararon tres réplicas en moldes plásticos transparentes, alternando capas de sustrato y micelio. Los tratamientos se incubaron en oscuridad, a temperatura ambiente y bajo condiciones estériles durante 20 días. Al término del periodo de incubación, los sustratos fueron pesados nuevamente para su análisis.

Análisis

Biodegradación

Se analizo la biodegradación de materia orgánica, en cada uno de los tratamientos por diferencia de pesos de acuerdo a la siguiente formula:

EB= (Peso de micelio fresco/peso de sustrato húmedo) x 100 ----------EC. 1

Cambio estructural químico por espectroscopia infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Se llevó a cabo el análisis FTIR en los tratamientos utilizando un espectrómetro infrarrojo Perkin Elmer Spectrum 400, equipado con un accesorio de Reflectancia Total Atenuada (ATR). Este análisis abarcó un rango de 4000 a 650 cm^{-1}.

RESULTADOS

Biodegradación

La Fig. 1 presentada muestra los niveles de biodegradación alcanzados en tres tratamientos diferentes utilizando el hongo *P. ostreatus*, con distintas proporciones de pañal usado y rastrojo. El tratamiento S1, compuesto por un 100% de pañal, alcanzó un 57% de biodegradación, siendo el valor más bajo. Esto puede deberse a la complejidad y resistencia de los materiales sintéticos presentes en los pañales, como polímeros superabsorbentes y plásticos, que dificultan la acción degradativa del hongo. En contraste, el tratamiento S2, con una mezcla equitativa de pañal (50%) y rastrojo (50%), mostró una mejora significativa, alcanzando un 70% de biodegradación. La presencia del rastrojo, material lignocelulósico, favoreció el crecimiento del hongo al proporcionar una fuente de carbono más accesible y mejorar las condiciones del sustrato para la producción de enzimas degradativas. Finalmente, el tratamiento S3, con 30% de pañal y 70% de rastrojo, obtuvo el mayor porcentaje de biodegradación (77%). Este resultado indica que una mayor proporción de residuos vegetales incrementa la eficiencia del proceso, probablemente por estimular más intensamente la actividad enzimática de *P. ostreatus* y reducir la carga de polímeros difíciles de degradar. Estos resultados evidencian que la combinación de pañales con residuos lignocelulósicos mejora la biodegradación, y que *P. ostreatus* representa una herramienta biotecnológica prometedora para el tratamiento sostenible de residuos sólidos urbanos.

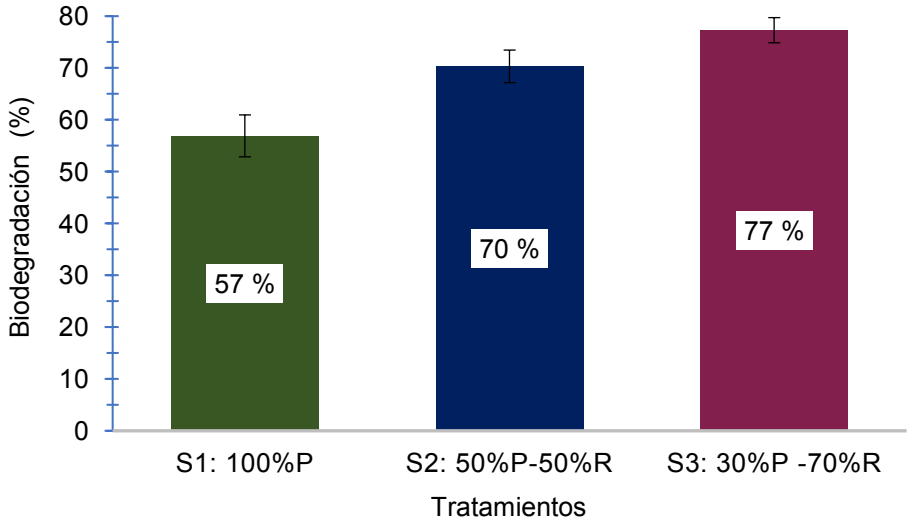


Figura 1. Análisis de biodegradación de los tratamientos de S1 (100% pañal), S2 (50% pañal- 50% rastrojo), S3 (30% pañal- 70% rastrojo).

Cambio estructural químico por FTIR

E la Fig. 2 se presenta el análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para los tratamientos S1 (100% pañal), S2 (50% pañal - 50% rastrojo) y S3 (30% pañal - 70% rastrojo), todos degradados mediante la acción del hongo *P. ostreatus*. En este análisis se observa la intensidad de absorción de diferentes grupos funcionales, permitiendo identificar compuestos clave como proteínas, quitina y polisacáridos. La señal más intensa en el espectro corresponde al tratamiento S3 (línea rosa), seguido de S2 (línea azul) y finalmente S1 (línea verde), lo que guarda una correlación directa con los resultados de biodegradación observados anteriormente. En la región

de 1000 a 1200 cm^{-1}, correspondiente a polisacáridos, S3 muestra las señales más intensas, lo que indica una mayor actividad metabólica del hongo y una posible acumulación de productos derivados de la descomposición de lignocelulosa del rastrojo. Esta acumulación también sugiere una mayor biomasa fúngica, consistente con un entorno más favorable para el crecimiento del hongo en este tratamiento. En la zona de 1500 a 1650 cm^{-1}, se identifican bandas asociadas a proteínas (principalmente enlaces amida I y II), que también son más prominentes en S3, lo cual respalda una mayor actividad enzimática en este tratamiento. La región alrededor de 1370-1420 cm^{-1}, correspondiente a quitina, también muestra señales más marcadas en S3 y S2 en comparación con S1. Dado que la quitina es un componente estructural de la pared celular de los hongos, esta mayor intensidad refuerza la idea de que *P. ostreatus* tuvo un desarrollo más activo en los tratamientos con mayor proporción de rastrojo. Esto es coherente con los porcentajes de biodegradación observados: 57% para S1, 70% para S2 y 77% para S3, lo que sugiere que el ambiente con más lignocelulosa no solo favoreció la descomposición del sustrato, sino también la proliferación del hongo y la síntesis de compuestos metabólicos.

El análisis FTIR complementa y refuerza los resultados de biodegradación, mostrando que una mayor proporción de rastrojo promueve la actividad fúngica y la transformación estructural de los materiales. Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar la composición del sustrato para potenciar los procesos de biorremediación con *P. ostreatus*.

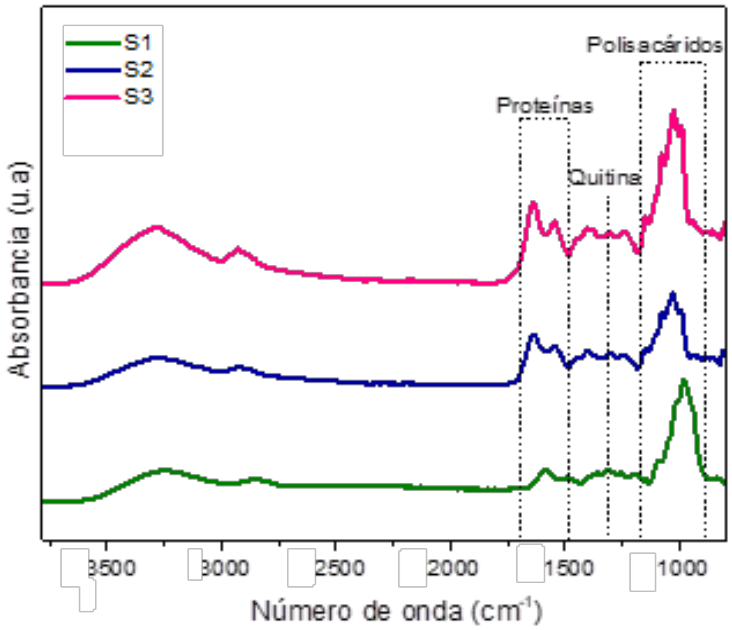


Figura 2. Análisis de composición química por FTIR de los tratamientos de S1 (100% pañal), S2 (50% pañal- 50% rastrojo), S3 (30% pañal- 70% rastrojo).

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en los análisis de biodegradación y espectroscopía FTIR demuestran que la combinación de pañal usado con residuos lignocelulósicos, como el rastrojo, mejora significativamente la eficiencia del proceso de degradación mediado por *P. ostreatus*. El tratamiento con mayor proporción de rastrojo (S3: 30% pañal - 70% rastrojo) presentó el mayor porcentaje de biodegradación (77%) y una mayor intensidad en las señales FTIR asociadas a proteínas, quitina y polisacáridos, lo cual indica una mayor actividad enzimática y un crecimiento fúngico más desarrollado. Estos hallazgos confirman que un sustrato equilibrado, con nutrientes accesibles y

componentes estructurales adecuados, favorece tanto la degradación del material como la proliferación del hongo. En consecuencia, el uso de co-sustratos agrícolas representa una estrategia eficaz y sustentable para el tratamiento biológico de residuos urbanos complejos, como los pañales desechables, promoviendo alternativas de manejo más amigables con el ambiente. Este enfoque no solo ofrece una solución viable para la gestión de residuos sólidos, sino que también impulsa el reciclaje biológico de materia orgánica, mejora la calidad del suelo y reduce la dependencia de fertilizantes químicos, contribuyendo así a mitigar los efectos negativos de los residuos en el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Colón, “Possibilities of composting disposable diapers with municipal solid wastes”, Waste Management & Research.
2. V. Gutiérrez, “Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos”, SEMARNAT.
3. I. Delfín, “Biodegradación de residuos urbanos lignocelulósicos por (*Pleurotus)”*, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 37, PP. 1–10.
4. H. M. Castro**, “**Biodegradación de residuos agroforestales por hongos de la pudrición blanca (*Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum*) y su aprovechamiento como biofertilizantes de suelo” Tesis de grado, Universidad del Magdalena.
5. L. Maccapa. “Producción de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) sobre residuos lignocelulósicos en la provincia de Puno”, *Revista de Ciencias Agrarias*, Vol. 1, PP. 1–10.
6. K. P. Pinos, **“**Aprovechamiento de hongos (*Pleurotus ostreatus*) en la degradación lignocelulósica de residuos de cosecha para la obtención de abono orgánico en la zona de Mocache”, Tesis de grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
7. P. G. García, “Producción de orellanas (*Pleurotus ostreatus*) como alternativa para el tratamiento de residuos sólidos de origen vegetal en Bogotá D.C”, *Redes de Ingeniería*. Vol. 1, PP. 1–10.
8. N. Rocha, “Biodegradación de aceites lubricantes en residuos lignocelulósicos por (*Pleurotus ostreatus*)”, Universidad del Quindío.
9. A. B. Piña, “Utilización de residuos agrícolas y agroindustriales en el cultivo y producción del hongo comestible seta (*Pleurotus spp.*)”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 32, PP. 141–151.
10. J. Sánchez, “La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas (*Pleurotus spp.*) Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur”

DISEÑO DE PROTOTIPO PARA ASISTENCIA PARA LA CONDUCCION INTELIGENTE PARA PERSONAS CON DEBILIDAD MOTRIZ EN EL TREN INFERIOR

Christian Leonel Pérez Reyes, Sergio Rodríguez Miranda, Giovanna Rossi Márquez, Cristian Aarón Dávalos Saucedo

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Lagos de Moreno, Jalisco.
sergio.rodriguez@lagos.tecmm.edu.mx

RESUMEN

Actualmente, la movilidad de personas es un factor importante para la autonomía e independencia de las personas, ya que gracias a esto se pueden acceder a mejores oportunidades y mayor desarrollo social1. Sin embargo, aquellas personas que tienen limitaciones motrices principalmente en las extremidades inferiores se enfrentan a complicaciones significativas para operar vehículos principalmente que tienen transmisión manual2. Por complejidad, existen reportadas una serie de adaptaciones para vehículos con transmisión automática pero debido a las características mecánicas que estos presentan resultan ser más costosos de adquirir y de conservar para ciertos sectores de la población. El presente trabajo propone el diseño de un prototipo de un sistema de asistencia a la conducción dirigido a personas con poca movilidad motriz en piernas, con el fin de facilitar la operación de un vehículo de transmisión manual. El prototipo integró la etapa de diseño conceptual, usando software de diseño asistido por computadora. Se especificaron los parámetros de diseño haciendo un estudio de los automóviles más comunes en territorio nacional que existen circulando al 2024 y que tienen un precio de mercado por debajo de los 100 mil pesos mexicanos, determinando el modelo particular sobre el cual se hicieron las mediciones antropométricas correspondientes para establecer el mecanismo de accionamiento de los pedales de clutch, freno y acelerador. Una vez determinados los valores antropométricos promedio de utilización, se definió el mecanismo de accionamiento y se utilizó como complemento de seguridad un sistema inteligente basado en redes neuronales, la cual fue previamente entrenada con valores obtenidos en un recorrido de 30 segundos en una pista de prueba. Este sistema indica por medio de una alerta sobre posible riesgo de conducción al no detectar un manejo seguro por medio del uso de sensores inerciales montados en el prototipo. Se realizaron pruebas con tres sujetos de diferentes complexiones, en 5 situaciones diferentes, donde se tomó en cuenta aspectos como aceleración y frenado. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema sigue siendo robusto para su uso a pesar de existir variación en el tipo de usuario y que en el 94% de las interacciones con la alerta del sistema de conducción segura el usuario es capaz de tomar una decisión anticipada para evitar un posible accidente. El sistema en su fase actual representa una opción accesible a ciertos mercados de bajos recursos económicos donde por lo inaccesible que pueden ser otros sistemas representa una opción asequible.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la movilidad de personas es un factor importante para la autonomía e independencia de las personas, ya que gracias a esto se pueden acceder a mejores oportunidades y mayor desarrollo social de acuerdo a lo que propone Pérez et al. (2018). Sin embargo, aquellas personas que tienen limitaciones motrices principalmente en las extremidades inferiores se enfrentan a complicaciones significativas para operar vehículos principalmente que tienen transmisión manual como lo menciona Elvin et al. (2002). Por complejidad, existen reportadas una serie de adaptaciones para vehículos con transmisión automática pero debido a las características mecánicas que estos presentan resultan ser más costosos de adquirir y de conservar para ciertos sectores de la población.

La movilidad es un tema que actualmente afecta la calidad de vida de los seres humanos, ya que esta es capaz de permitir el tener acceso a oportunidades laborales, educativas y cuestiones de desarrollo social. Miles de personas enfrentan el reto de tener un cierto nivel de incapacidad para

desplazarse de manera independiente, afectando asi su autonomía y en algunos casos hasta su dignidad. Dentro de este contexto, es importante que existan opciones dentro del uso de vehículos particulares que permitan lograr esa independencia, especialmente en ambientes o zonas urbanas donde el transporte publico puede ser insuficiente o en algunos casos inaccesible.

Sin embargo, las personas con discapacidad motriz, particularmente aquellas con movilidad reducida en las extremidades inferiores, enfrentan barreras significativas para operar vehículos convencionales. Aunque existen soluciones comerciales para vehículos con transmisión automática, estas suelen ser económicamente inaccesibles para sectores vulnerables. Además, la mayoría de las adaptaciones vehiculares disponibles en el mercado están orientadas a contextos con mayor poder adquisitivo y no contemplan las condiciones particulares de países en desarrollo.

Para ciertos sectores de la población el costo de adquirir y mantener un vehículo adaptado con transmisión automática sigue siendo una limitante, ya que en ocasiones estos necesitan de mantenimiento mas especializado o mas costo, lo cual se vuelve difícil para ciertos sectores de la población en países como México. Esta situación propicia una mayor desigualdad en el acceso a la movilidad personal, particularmente en comunidades rurales o de bajos ingresos. Es por ello fundamental proponer alternativas que consideren la reutilización de vehículos existentes con transmisión manual, reduciendo los costos de adaptación mediante soluciones tecnológicas accesibles para estos sectores de la población.

El presente trabajo propone el desarrollo de un prototipo de asistencia a la conducción diseñado específicamente para personas con limitaciones motrices en las piernas, enfocado en vehículos con transmisión manual. A través del uso de diseño asistido por computadora (CAD), análisis antropométricos y tecnologías de automatización, se diseñó un sistema capaz de accionar los pedales principales del vehículo. Este enfoque permite adaptar vehículos económicos de uso común, promoviendo así la inclusión social y la movilidad autónoma para personas con discapacidad.

Además de facilitar la conducción, el sistema incorpora una capa de seguridad basada en inteligencia artificial, mediante el uso de sensores inerciales y una red neuronal entrenada para detectar patrones inseguros de manejo. Esta integración permite emitir alertas preventivas ante posibles riesgos, incrementando así la seguridad del usuario y del entorno. La propuesta no solo apunta a la accesibilidad económica, sino también a la confiabilidad y funcionalidad del sistema bajo diferentes condiciones de uso y contextos antropométricos.

TEORÍA

La movilidad es reconocida como un componente clave del desarrollo humano, al facilitar el acceso a oportunidades económicas, educativas y sociales. Según la Organización Mundial de la Salud (2011), las limitaciones en el acceso a medios de transporte reducen significativamente la participación activa de las personas en la sociedad, en especial de aquellas con alguna discapacidad física. Por tanto, promover tecnologías que favorezcan la movilidad autónoma es una necesidad urgente desde el enfoque de los derechos humanos y la inclusión social.

En países en vías de desarrollo, las soluciones tecnológicas deben considerar los contextos económicos y de infraestructura locales. De acuerdo con Briede et al. (2016), un diseño tecnológico apropiado para contextos de bajos recursos debe centrarse en la simplicidad, el uso de materiales disponibles y la adaptabilidad a productos existentes, como vehículos usados. El desarrollo de soluciones que se integren a automóviles con transmisión manual, ampliamente disponibles y más económicos, representa un avance hacia la democratización de la tecnología para la movilidad asistida.

Las personas con discapacidad motriz en las extremidades inferiores enfrentan barreras importantes al momento de operar vehículos convencionales. En particular, la necesidad de accionar pedales en vehículos de transmisión manual supone una limitación significativa. Estudios como los de Bezyak

et al. (2020) demuestran que las barreras físicas y la falta de adaptaciones accesibles en el entorno automotriz limitan la autonomía de este grupo poblacional, afectando su inclusión económica y social.

La tecnología ha permitido el desarrollo de dispositivos de asistencia para la conducción dirigidos a personas con discapacidades, especialmente en países industrializados. Entre estos se incluyen palancas manuales para controlar acelerador y freno, y sistemas electrónicos integrados para asistencia al volante. Sin embargo, como destaca Dahuri (2018), muchas de estas soluciones se orientan a vehículos automáticos y presentan altos costos de adquisición y mantenimiento, lo cual limita su implementación en contextos de bajos ingresos.

El diseño de sistemas adaptativos debe considerar las dimensiones antropométricas del usuario para garantizar comodidad, eficiencia y seguridad. Según Stanton et al. (2017), la integración de datos antropométricos en el diseño industrial es esencial para lograr una interacción efectiva entre el ser humano y las máquinas. En este sentido, medir las dimensiones corporales promedio de los usuarios objetivo permite construir soluciones accesibles y ergonómicas, minimizando el riesgo de lesiones y mejorando el rendimiento del sistema.

El uso de inteligencia artificial, particularmente redes neuronales, ha ganado terreno en los sistemas de asistencia a la conducción. Estas tecnologías permiten reconocer patrones de comportamiento del usuario, emitir alertas, e incluso tomar decisiones autónomas. Chen et al. (2015) señalan que los sistemas inteligentes basados en sensores inerciales y aprendizaje profundo son capaces de detectar maniobras inseguras o anomalías en la conducción con alta precisión, lo que contribuye significativamente a la prevención de accidentes.

Los sensores inerciales (IMU) permiten capturar en tiempo real variables como aceleración, orientación y velocidad angular, siendo herramientas clave en sistemas de seguridad vehicular. De acuerdo con Azadani et al. (2021), su implementación ha sido útil para detectar comportamientos de riesgo como frenado brusco, giros repentinos o pérdida de control. Su integración en prototipos de bajo costo permite generar retroalimentación al conductor y tomar decisiones preventivas sin requerir infraestructuras complejas.

PARTE EXPERIMENTAL

El prototipo integró la etapa de diseño conceptual, usando software de diseño asistido por computadora. Se especificaron los parámetros de diseño haciendo un estudio de los automóviles más comunes en territorio nacional que existen circulando al 2024 y que tienen un precio de mercado por debajo de los 100 mil pesos mexicanos, determinando el modelo particular sobre el cual se hicieron las mediciones antropométricas correspondientes para establecer el mecanismo de accionamiento de los pedales de clutch, freno y acelerador, como se muestra en la figura 1 y en la figura 2.

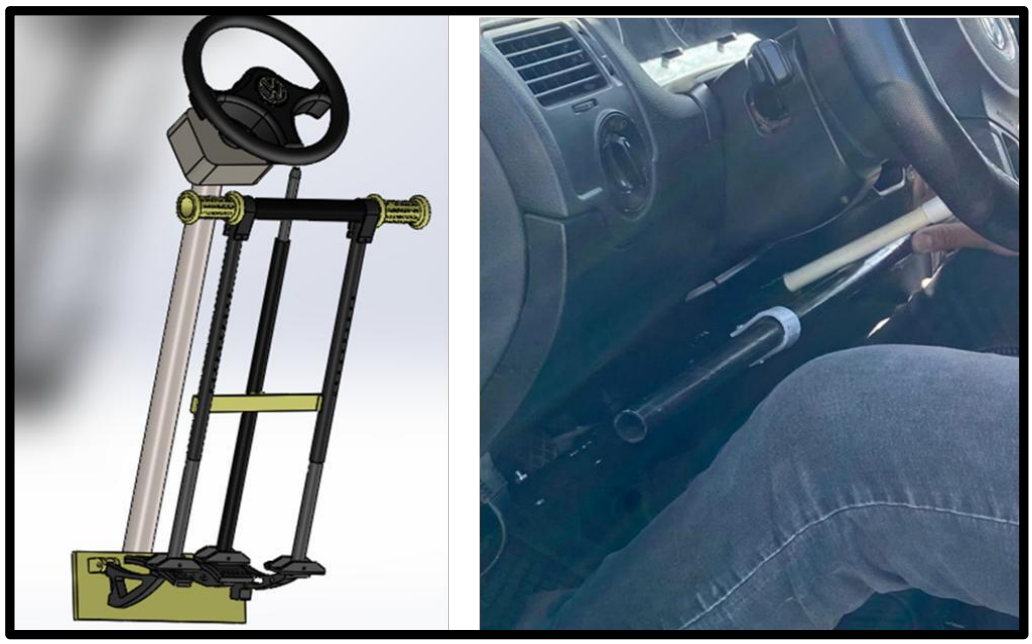


Fig. 1. Propuesta CAD del Prototipo de asistencia.



Fig. 2. Prototipo de asistencia elaborado en aluminio y PVC.

Las redes neuronales artificiales imitan el funcionamiento del cerebro humano y se usan en múltiples aplicaciones. El perceptrón es un modelo básico de neurona que procesa entradas con pesos y produce una salida según un umbral. A través del entrenamiento supervisado, se ajustan los pesos para mejorar su precisión, esta fue implementada en una tarjeta Arduino con previo entrenamiento y ajuste en una pc, la implementación se muestra en la figura 3.

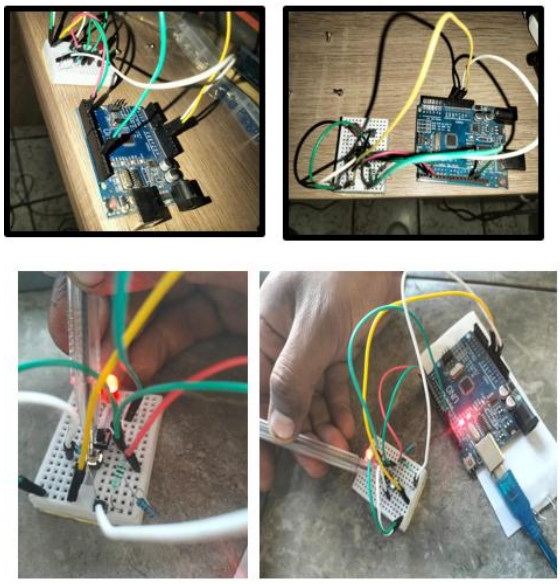


Fig.3. Implementación de la red neuronal en tarjeta Arduino, complementando la capa de seguridad del prototipo.

Una vez determinados los valores antropométricos promedio de utilización, se definió el mecanismo de accionamiento y se utilizó como complemento de seguridad un sistema inteligente basado en redes neuronales, la cual fue previamente entrenada con valores obtenidos en un recorrido de 30 segundos en una pista de prueba. Este sistema indica por medio de una alerta sobre posible riesgo de conducción al no detectar un manejo seguro por medio del uso de sensores inerciales montados en el prototipo. Se realizaron pruebas con tres sujetos de diferentes complexiones, en 5 situaciones diferentes, donde se tomó en cuenta aspectos como aceleración y frenado.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema sigue siendo robusto para su uso a pesar de existir variación en el tipo de usuario y que en el 94% de las interacciones con la alerta del sistema de conducción segura el usuario es capaz de tomar una decisión anticipada para evitar un posible accidente. El sistema en su fase actual representa una opción accesible a ciertos mercados de bajos recursos económicos donde por lo inaccesible que pueden ser otros sistemas representa una opción asequible. También resulta ser fiable ya que como se muestra en la figura 4, se puede observar que la respuesta es similar con el uso del dispositivo en una persona inhabilitada con respecto a una persona con plena capacidad física en pruebas de aceleración.

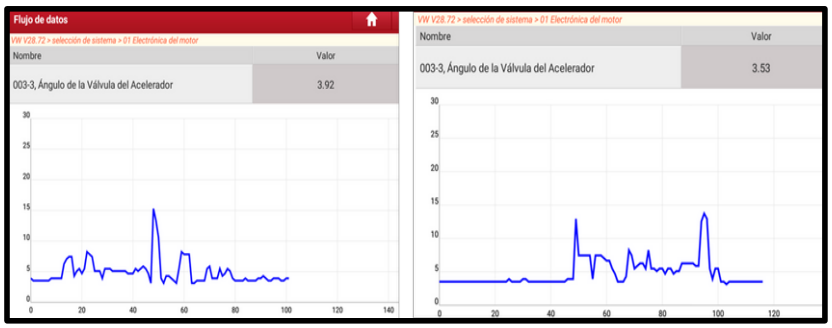


Fig. 4 Grafica comparativa del uso del prototipo con respecto al uso de forma tradicional, en prueba de aceleración.

El mecanismo de manejo asistido para personas con discapacidad motriz proporciona una conducción más uniforme y controlada. La estabilización de la velocidad y la reducción de fluctuaciones sugieren que el sistema de asistencia optimiza la aceleración y desaceleración, mejorando la eficiencia del manejo y reduciendo la carga de trabajo del conductor.

CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto aún se podría considerar un prototipo debido a que no se a establecido algún material e innovaciones necesarias para ya considerarlo un mecanismo 100% funcional, ya que requiere de implementaciones como la asistencia para seguridad en la conducción y la mejorar para la adaptación en otros vehículos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pérez López, Ruth, Guénola Caprón. "Movilidad cotidiana, dinámicas familiares y roles de género: análisis del uso del automóvil en una metrópoli latinoamericana." Quid 16 10 (2018): 102-128.
2. Elvin, D., y Gambrell, P, “Adapting Vehicles for the Disabled Driver”, (2002-01-2082), SAE Technical Paper., 2002.
3. Organización Mundial de la Salud, World report on disability, WHO, 2011.
4. Bezyak, J. L., Sabella, S., Hammel, J., McDonald, K., Jones, R. A., & Barton, D. (2020). Community participation and public transportation barriers experienced by people with disabilities. Disability and rehabilitation, 42(23), 3275-3283.K. Pritchard, “Adaptive driving equipment for people with disabilities: A review,” Assistive Technology, Vol. 29, No. 2, 2017, pp. 65-72.
5. Dahuri, M. K. M., & Hussain, M. N. (2018). The development of adaptive driving modifications for the disabled vehicle: A review. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 10(3S), 754-764.
6. Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). Human factors methods: a practical guide for engineering and design. CRC Press.
7. Chen, C., Seff, A., Kornhauser, A., & Xiao, J. (2015). Deepdriving: Learning affordance for direct perception in autonomous driving. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2722-2730).
8. Azadani, M. N., & Boukerche, A. (2021). Driving behavior analysis guidelines for intelligent transportation systems. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 23(7), 6027-6045.
9. Briede, J. C., & Mora, M. L. (2016). Diseño y co-creación mediante aprendizaje y servicio en contexto vulnerable: análisis de percepción de la experiencia. Formación universitaria, 9(1), 57-70.

EVALUCIÓN DEL PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO CON PILAS DE UNA COLUMNA

Alma Rosa Sánchez Ibarra, Edgar Alan Camacho Pantoja, José Manuel Jara Guerrero

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
alma.sanchez@umich.mx

RESUMEN

La incertidumbre asociada a la frecuencia e intensidad de los sismos, así como los daños observados en puentes en las últimas décadas, ha incrementado el interés por mitigar el riesgo sísmico. No obstante, la eliminación total de daños implica costos elevados, por lo que los reglamentos permiten cierto nivel de daño estructural a cambio de una mayor eficiencia en la disipación de energía. Este estudio analiza el diseño y comportamiento sísmico de puentes de concreto armado, considerando el efecto del amortiguamiento crítico en la disipación de energía bajo cargas dinámicas. Para ello, se integran normativas nacionales e internacionales, como la AASHTO LRFD (2020), con el fin de evaluar la respuesta estructural en zonas con distintos niveles de sismicidad.

Se desarrollaron modelos estructurales de puentes con claros de 30 metros y pilas de 5, 10, 15 y 20 metros de altura. Los análisis se realizaron en el software SAP2000, utilizando registros sísmicos seleccionados según su magnitud, tipo de suelo y distancia epicentral. Para garantizar la estabilidad estructural se emplearon vigas tipo AASHTO IV, diafragmas y apoyos elastoméricos. Se llevaron a cabo análisis no lineales para comparar el comportamiento estructural con valores de amortiguamiento crítico del 1% y 5%, evaluando desplazamientos, oscilaciones y fuerzas cortantes basales.

Los resultados muestran que aumentar el amortiguamiento crítico del 1% al 5% no produce cambios significativos en el comportamiento estructural de los puentes analizados. Asimismo, se comprobó que la respuesta estructural depende en gran medida de las demandas sísmicas específicas consideradas en los análisis no lineales.

INTRODUCCIÓN

El amortiguamiento en las estructuras reduce la respuesta sísmica, las fuerzas internas, y los desplazamientos en una estructura. Contribuye también a reducir las amplificaciones del movimiento de una estructura cuando se encuentra en resonancia.

Existen distintos tipos de amortiguamiento, los cuales pueden ser inherentes a la estructura misma o incorporados mediante dispositivos auxiliares. El amortiguamiento natural o estructural proviene de las propiedades de los materiales y del sistema constructivo. Los materiales disipan energía a través de deformaciones internas, mientras que la estructura lo hace mediante la fricción en las uniones o en los elementos constructivos, contribuyendo así a la disipación de energía.

Por otro lado, el amortiguamiento inducido se logra mediante el uso de dispositivos específicos, como amortiguadores viscosos o disipadores de energía, los cuales están diseñados para absorber y reducir las vibraciones que experimenta la estructura durante un evento sísmico.

El objetivo principal del amortiguamiento es disminuir la respuesta sísmica de una estructura, atenuando tanto las fuerzas internas como los desplazamientos inducidos. Asimismo, contribuye a limitar la máxima amplificación cuando una estructura entre en resonancia con las frecuencias del sismo, condición que puede amplificar las vibraciones y aumenta significativamente el riesgo de colapso. Adicionalmente, el amortiguamiento mejora el confort de los usuarios, ya que las vibraciones provocadas por el viento o el tráfico, las cuales pueden generar una sensación de inseguridad que afecte el uso óptimo de la estructura.

TEORÍA

Demandas Sísmicas

Para seleccionar adecuadamente las demandas sísmicas, es necesario realizar una depuración de los catálogos disponibles en México. Este proceso tiene como objetivo conformar un grupo de registros sísmicos representativos, con características relevantes que permitan obtener resultados confiables y aplicables al contexto de estudio.
Las fuentes utilizadas para la obtención de los registros fueron:

- La Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes, elaborada por el SMIS (1992).
- La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM, 2016).

A partir de estas bases de datos, se aplicaron los siguientes filtros de selección:

- Periodo de análisis: 1985-2014.
- Tipo de suelo: Roca
- Tipo de falla: Subducción.
- Magnitud mínima: 6.

Estos criterios aseguran que las demandas sísmicas seleccionadas corresponden a sismos fuertes ocurridos en la costa del océano Pacifico, una región caracterizada por la presencia de una falla de subducción activa. Además, todos los registros pertenecen a la Zona Sísmica D, considerada como la de mayor peligrosidad sísmica en el país.

Posteriormente, las demandas seleccionadas fueron clasificadas en tres grupos con base en la distancia epicentral:

- Alta sismicidad: Distancias epicentrales menores a 50 km.
- Sismicidad media: Distancias epicentrales entre 50 y 150 km.
- Baja sismicidad: Distancias epicentrales mayores a 150 km.



Figura 1. Epicentros de temblores de sismicidad baja.



Figura 2. Epicentros de registros de sismicidad media.

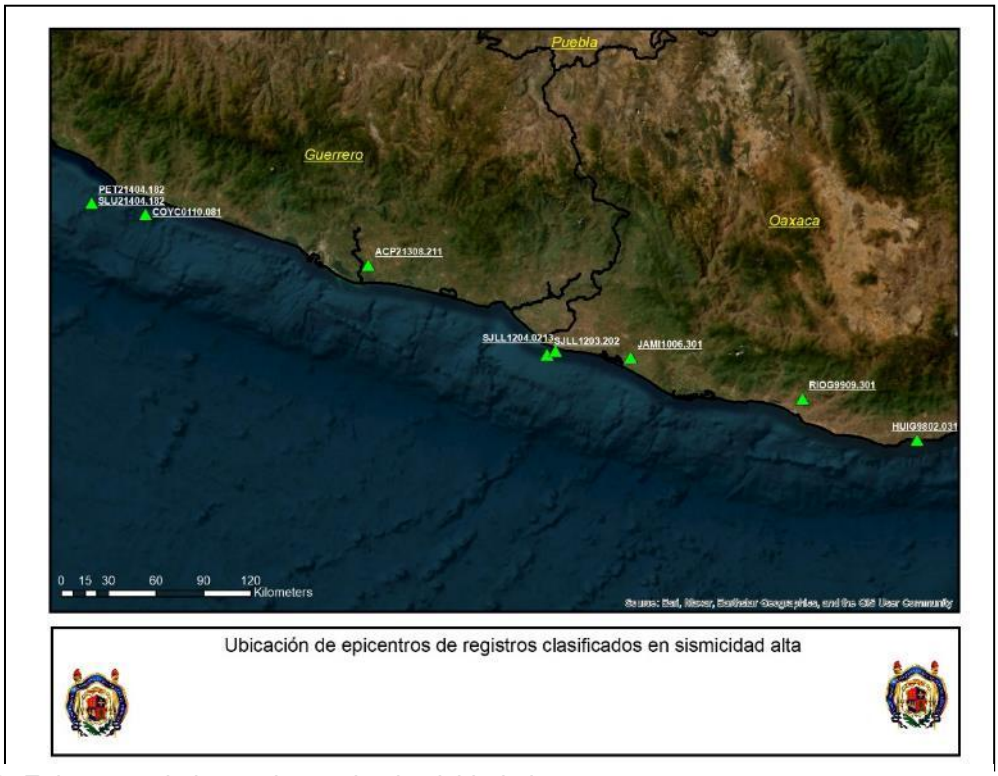


Figura 3. Epicentros de los registros de sismicidad alta.

Modelos Estructurales

La clasificación de los puentes es amplia y puede basarse en diversos criterios, como su uso, los materiales de construcción, la configuración estructura o características especiales. Los tipos de uso más comunes incluyen puentes ferroviarios, vehiculares y peatonales. Desde el punto de vista estructural, se pueden encontrar puentes de arco, colgantes, atirantados, de viga simple o continua, en voladizo y de armadura, Construidos con materiales como piedra, concreto armado o acero. También existen casos especiales, como los puentes móviles o elevables.

En esta investigación, el modelo estructural corresponde a un puente de viga simplemente apoyada de concreto armado, diseñado para uso vehicular.

El modelo fue desarrollado en el software SAP2000, donde se definieron y modelaron todas las partes que conforman tanto la superestructura como la subestructura, incluyendo: columnas, cabezal, trabes, apoyos, estribos, calzada, diafragmas y guarniciones.

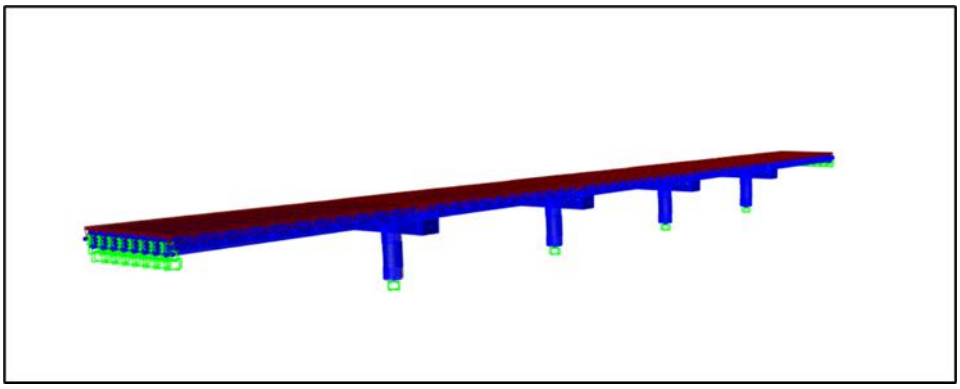


Figura 4. Modelo propuesto.

Diseño

El diseño estructural se realizó con base en una combinación de normas y manuales técnicos, entre los cuales se encuentran:

- Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (NTC-CDMX, 2017)
- Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC, 2015)
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2017)
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9a edición, 2020)

Para los aspectos relacionados con el concreto armado, se utilizaron las NTC-CDMX y el RCDF. Para definir las combinaciones de carga y estados límite, se emplearon las especificaciones del AASHTO LRFD, mientras que el Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC) proporciona los espectros para el diseño sísmico.

Como resultado, se establecieron las siguientes combinaciones de carga, considerando únicamente los estados límite de Resistencia I y Evento extremo I, donde intervienen cargas muertas estructurales (DC), cargas muertas no estructurales (DW), cargas vivas (LL) y cargas sísmicas (EQ).

$$\boldsymbol{Q_{Resistencia\ I} = 1.1025[1.25(DC + DW) + 1.75(1.33LL)]} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{Q_{Evento\ extremo\ I\ x} = 1.1025[(DC + DW) + 0.50(1.33LL) + EQ_x + 0.30EQ_y]} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{Q_{Evento\ extremo\ I\ y} = 1.1025[(DC + DW) + 0.50(1.33LL) + 0.30EQ_x + EQ_y]} \quad (3)$$

El estado límite de Evento extremo I contempla dos combinaciones debido a las recomendaciones del AASHTO LRFD, que sugieren considerar el 100% del sismo en una dirección y el 30% en la otra.

Análisis No Lineales
El análisis no lineal es una metodología refinada para evaluar las demandas de una estructura bajo diferentes condiciones de carga. A diferencia del análisis lineal, que asume una respuesta directamente proporcional a las cargas aplicadas, el análisis no lineal incorpora las no linealidades materiales y geométricas, lo cual es fundamental para estructuras sometidas a cargas extremas o eventos sísmicos severos.

Modelación por fibras
La modelación por fibras es una técnica común en análisis no lineales, especialmente útil para cargas cíclicas como las inducidas por sismos. Este método divide una sección estructural en múltiples fibras, cada una con propiedades, lo que permite modelar con gran detalle el comportamiento no lineal del concreto y del acero.

Ventajas:

- Representación precisa de fenómenos como fisuración, plastificación, ablandamiento y endurecimiento.
- Permite obtener la distribución del daño a nivel local dentro del elemento estructural.

Desventajas:

- Alto costo computacional por su nivel de detalle.
- Puede no capturar ciertos efectos tridimensionales.
- La precisión del análisis depende en gran medida de la calibración adecuada de los modelos de comportamiento de los materiales.

Modelos Constitutivos de los Materiales
Un modelo constitutivo describe el comportamiento esfuerzo-deformación de un material, ya sea en el intervalo elástico (reversible) o inelástico (permanente). Gracias a estos modelos, es posible predecir fenómenos como fluencia, fractura, endurecimiento o plastificación, lo que es esencial para realizar simulaciones realistas del comportamiento estructural bajo cargas extremas.

Rótula Plástica
La rótula plástica representa una región de la estructura donde se concentran las deformaciones inelásticas, permitiendo disipar energía durante un evento sísmico. La longitud de esta rótula de acuerdo con Paulay y Priestley (1992) es:

$Lp = 0.08L_c + 0.022f_y d_b$

donde:
L_p = Longitud de la rótula plástica
L_c = Longitud del elemento desde la base hasta el punto de inflexión (m)
f_y = Esfuerzo de fluencia del acero (MPa)
d_b = Diámetro de la varilla longitudinal más delgada (m)

Estas rótulas suelen ubicarse en los extremos de las columnas, donde se presentan las mayores demandas de rotación de los elementos.

Propiedades de la sección agrietada

Una de las consecuencias más relevantes del agrietamiento en el concreto es la pérdida de rigidez. Aunque el concreto continúa resistiendo esfuerzos de compresión, su capacidad para resistir tracción disminuye notablemente. Esto reduce el momento de inercia efectivo, aumentando la flexibilidad de la estructura y, en consecuencia, sus deformaciones.
El agrietamiento provoca una redistribución de los esfuerzos y genera un diagrama de tensiones distinto al de una sección sin grietas. Bajo cargas dinámicas, estas condiciones se agravan, afectando la durabilidad y la capacidad estructural, ya que los materiales comienzan a sufrir degradación adicional.

Descripción del modelo no lineal
La tabla 1 muestra los criterios recomendados para el modelado inelástico de los principales elementos que conforman una estructura típica de puente convencional (Aviram, 2002).

Comportamiento no lineal de las pilas
La representación del comportamiento no lineal e histerético de las columnas se realizan mediante

Componente	Lineal-elástico	No lineal
Superestructura	X	
Columna-zona de rótula plástica		X
Columna-fuera de la zona de rótula plástica *	X	
Cabezal	X	
Estribo-transversal	X	
Estribo-longitudinal		X
Juntas de expansión		X

Tabla 1. Criterios para modelados de componentes.

modelos de rótulas plásticas discretas, ubicadas en puntos predeterminados a lo largo del elemento. Estos modelos son fundamentales para simular con precisión las deformaciones y el desempeño estructural bajo cargas extremas, ya que permiten aproximar la respuesta no lineal de la columna.

El software de análisis estructural SAP2000, dispone de diversas opciones para modelar este comportamiento, permitiendo representar de manera más realista tanto la respuesta no lineal como los procesos de degradación de los elementos estructurales sometidos a grandes deformaciones. La selección del tipo de modelado dependerá de los objetivos del análisis y de las características particulares del proyecto.

Opción no lineal	Análisis Pushover 2D (direcciones L o T)	Análisis Pushover 3D (direcciones simultáneas L y T)	Dinámico 2D (THA con componentes L, V o T, V)	Dinámico 3D (THA - Componentes simultáneos L, T y V)
Rótula desacoplada M2, M3	X			
Rótula PMM de interacción	X	X		
Rotula PMM de fibra	X	X	X	X
Enlace NL - Plástico Wen	X		X	
NL-link - Plástico Multilineal	X		X	

Tabla 2. Capacidades y limitaciones de los modelos no lineales para rótulas plásticas de columnas en SAP2000.

Modelado de Rótula Plástica en SAP2000

Este método discretiza la sección transversal de la columna en pequeñas fibras, donde cada una se describe con su propia relación esfuerzo-deformación. Este enfoque permite una representación con mayor precisión de la interacción entre el concreto y el acero de refuerzo dentro de la sección.

Para realizar un análisis basado en fibras, es necesario definir una sección transversal detallada, identificando las regiones correspondientes al concreto y al acero de refuerzo. Estas áreas se subdividen en fibras individuales, a las cuales se asignan modelos de comportamiento no lineal que captura la relación esfuerzo-deformación de cada material. SAP2000 permite incorporar estos comportamientos mediante relaciones constitutivas específicas.

En este caso, se modelaron tres materiales por separado: concreto confinado, concreto no confinado y acero de refuerzo. El número de fibras utilizadas depende del nivel de precisión requerido. Un mayor número de fibras proporciona resultados más detallados, aunque incrementa el costo computacional. En este caso, se procuró que tanto el área como los momentos de inercia en ambas direcciones de la sección modelada por fibras se mantuvieran dentro de un margen del ±5% respecto a los valores correspondientes de la sección transversal bruta.

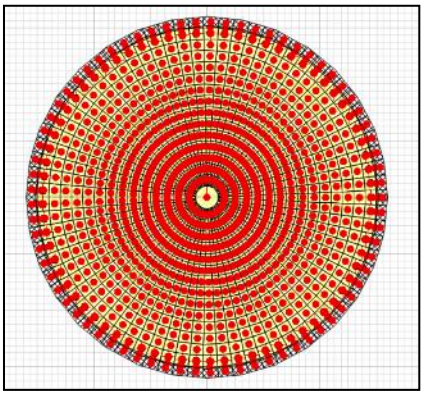


Figura 5. Modelado de fibras de rótula plástica en SAP2000.

MODELADO NO LINEAL

Para realizar los análisis, se desarrollaron cuatro modelos numéricos cuya única diferencia radicó en la altura de las pilas: 5, 10, 15 y 20 metros. Estos modelos fueron generados mediante el software SAP2000. Se consideraron también todos los componentes relevantes: calzada, carpeta asfáltica, condiciones de apoyo y trabes longitudinales.

El escalamiento de los registros sísmicos seleccionados se realizó con el objetivo de llevar los modelos a condiciones de falla, utilizando también SAP2000. Este proceso implicó una serie de iteraciones combinadas con el análisis de los gráficos esfuerzo-deformación de las rótulas plásticas. El propósito era observar el comportamiento del acero conforme se aproximaba a su zona de ruptura o esfuerzo último.

El proceso se ejecutó con la mayor precisión posible de las capacidades del software, utilizando factores de escala. No obstante, en algunos casos no fue posible alcanzar la zona de ruptura con exactitud, ya que existía el riesgo de sobrepasarla, lo que obligó a detener el análisis antes de llegar a ese punto. Además, se observó que el comportamiento de las iteraciones varió significativamente entre los diferentes modelos.

Una vez alcanzados los resultados deseados, se procedió a la extracción, organización y procesamiento de la información, con el fin de presentar y analizar adecuadamente los datos obtenidos.

RESULTADOS

Tabla 3. Comparación de cortantes basales.

Modelo	Acelerograma	ζ = 1%	ζ = 5%	% CONTRIBUCIÓN
		Vx (ton)	Vx (ton)	
C30P05-1	AZIH191	1500	1315.91	12%
C30P05-2	TAMA301	1874	1635.92	13%
	COYC211	2290	2261.34	1%
C30P05-3	HUIG031	3342	2873.87	14%
	COYC081	2564	1806.31	30%
	PET182	2420	2358.76	3%
C30P10-1	PAPN191	1762	1707.86	3%
	PARS211	1022	1008.7	1%
C30P10-2	JAMI202	2069	1742.32	16%
C30P10-3	HUIG031	3444	2898.82	16%
	COYC081	2330	1702.64	27%
	SJLL204	3779	3682.36	3%
	ACP211	4048	3797.15	6%
	PET182	3233	3165.24	2%
C30P15-1	AZIH191	1441	1266.37	12%
	PARS211	1631	1593.64	2%
C30P15-2	TAMA301	1993	1905.19	4%
	SJLL301	3576	2960.52	17%
	JAMI202	2305	2186.32	5%
C30P15-3	HUIG031	3976	3772.85	5%
	COYC081	1944	1577.94	19%
	JAMI301	7870	7128.06	9%
	ACP211	3755	3416.32	9%
	PET182	3282	3033.04	8%
C30P20-1	PARS211	2087	1874.94	10%
C30P20-2	TAMA301	2657	2594.7	2%
	JAMI202	2901	2558.32	12%
	COYC211	3864	3623.3	6%
C30P20-3	HUIG031	7157	4973.51	31%
	COYC081	2691	2284.19	15%
	JAMI301	10760	7545.24	30%
	SLU182	7568	6662.68	12%
	PET182	4627	3456.84	25%
			Promedio	11.53%

Modelo	Acelerograma	ζ = 1%	ζ = 5%	% CONTRIBUCIÓN
		Vy (ton)	Vy (ton)	
C30P05-1	PAPN191	1115	1112.34	0.24%
C30P05-2	TAMA301	1825	1430.04	21.64%
	COYQ131	2892	2321.22	19.74%
C30P05-3	HUIG031	4868	3759.63	22.77%
	RIOG301	3247	3153.01	2.89%
	COYC081	3595	1990.67	44.63%
	SJLL204	2824	2747.5	2.71%
	SLU182	2792	2657.05	4.83%
C30P10-1	PAPN191	971.6	621.53	36.03%
	AZIH191	1047	853.12	18.52%
	PARS211	1822	1703.48	6.50%
C30P10-2	SJLL301	2470	2153.85	12.80%
	JAMI202	1278	1137.7	10.98%
C30P10-3	COYC081	3003	2752.44	8.34%
	JAMI301	3114	2893.85	7.07%
	SJLL204	2574	2285.5	11.21%
	SLU182	3615	3348.07	7.38%
C30P15-1	PAPN191	886.4	803.05	9.40%
	AZIH191	792.8	668.88	15.63%
C30P15-2	COYQ131	3921	3661.88	6.61%
	SJLL301	2377	1968.57	17.18%
	JAMI202	1137	1054.05	7.30%
C30P15-3	JAMI301	3400	3020.19	11.17%
	SJLL204	3910	3230.28	17.38%
	SLU182	2969	2600.59	12.41%
	PET182	3102	2946.25	5.02%
C30P20-1	PAPN191	706.2	583.28	17.41%
	AZIH191	758.2	609.22	19.65%
C30P20-2	JAMI202	1135	976.64	13.95%
C30P20-3	HUIG031	4002	3982.19	0.50%
	COYC081	3572	3534.45	1.05%
			Promedio	12.68%

CONCLUSIONES

El incremento del amortiguamiento crítico del 1% al 5% no mostró una contribución significativa en la reducción de los cortantes basales en las pilas. Además, el comportamiento estructural frente a las distintas demandas sísmicas presentó, en algunos casos, resultados atípicos que podrían considerarse casos aislados, por lo que no pueden generalizarse.

Las demandas sísmicas correspondientes a zonas de alta sismicidad generaron cortantes basales que llegaron a duplicarse con relación al peso total del puente. Por otro lado, para demandas de sismicidad media y baja, se obtuvieron coeficientes basales inferiores al 100% y 60%, respectivamente. En el caso de sismicidad media, podrían considerarse estrategias de mitigación adicionales para reducir los niveles de demanda sísmica y mejorar la seguridad estructural del puente.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *LRFD bridge design specifications* (9th ed.). Washington, DC: AASHTO.
2. Autodesk. (2021). *AutoCAD (versión 2021)* [Software de computadora]. Autodesk.
3. Aviram, A., Mackie, K. R., & Stojadinović, B. (2008). *Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California*. Sacramento, CA: California Department of Transportation.

4. Bazán, E., & Meli, R. (2008). *Diseño sísmico de edificios*. México, D.F.: Limusa Noriega Editores.
5. Cahís Carola, F. X. (2001). *Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente: Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Departament d'Enginyeria de la Construcció.
6. Camacho Pantoja, E. A. (2025). *Influencia del porcentaje de amortiguamiento crítico en la capacidad última de puentes de concreto reforzado con pilas de una columna sometidos a eventos sísmicos de subducción*.
7. Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
8. Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2015). *Manual de diseño de obras civiles. Sección C: Estructuras. Tema 1: Criterios generales de análisis y diseño. Capítulo c.1.3 diseño por sismo*. Ciudad de México: CFE.
9. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024). *Portal de información geoespacial*. Recuperado de https://www.conabio.gob.mx
10. Computers and Structures, Inc. (CSI). (2021). *SAP2000 (versión 23.3.1 Ultimate)* [Software de computadora]. Berkeley, CA: CSI.
11. Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2016). *ArcGIS 10.5* [Computer Software]. Redlands, CA: ESRI.
12. Farhan, N., Lu, J., Altabey, W., Silik, A., Ghiasi, R., Wang, T., Wu, Z., & Noori, M. (2023). A combined wavelet analysis Bouc-Wen model for damage detection. En *SHMII-12: 12th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Hangzhou, Zhejiang, China. Paper ID# TS-SIM-P015.
13. García, M., Bazán, J., & Fernández-Dávila, V. (2023). Efecto del modelo de histéresis en la evaluación del factor R en sistemas estructurales de periodos cortos. En *XIII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2023*. Viña del Mar, Chile, 24–26 de octubre de 2023.
14. Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto*. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
15. Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
16. Gobierno de México. (s/f). *Sismología de México*. Recuperado el 17 de septiembre de 2024, de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html
17. Hong, G., & Meng, G. (2007). Nonlinear dynamics of a SDOF oscillator with Bouc-Wen hysteresis. *Chaos, Solitons & Fractals, 34*(2), 422–431.
18. Instituto de Ingeniería de la UNAM. (2016). *Base de datos de registros acelerográficos de la red sísmica mexicana*. Ciudad de México: UNAM.
19. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005). *Servicios de información geoespacial: Zonas sísmicas de México*. Aguascalientes, México: INEGI.
20. Jara Guerrero, J. M. (2007). *Peligro sísmico*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
21. Kappos, A. J., Gidaris, I. G., & Gkatzogias, K. I. (2012). Problems associated with direct displacement-based design of concrete bridges with single-column piers, and some suggested improvements. *Bulletin of Earthquake Engineering, 10*(4), 1237–1266. https://doi.org/10.1007/s10518-012-9354-y
22. López, N., Ugel, R., & Herrera, R. I. (2017). Análisis no lineal de una junta experimental de columna y vigas de concreto armado-columna de acero para pórticos. *Revista Gaceta Técnica, 18*(1), 35–52. https://doi.org/10.47289/gaceta.v18i1.24
23. Mexpresa. (s/f). *Vigas prefabricadas presforzadas*. Recuperado de https://www.mexpresa.com/productos/vigas_p.php
24. Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York, NY: Wiley.
25. Sánchez Ibarra, A. R. (2019). *La sobrerresistencia en puentes mexicanos de concreto reforzado*. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto.
26. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2001). *Proyectos de nuevos puentes y estructuras similares (N-PRY-CAR-6-01-001/01)*. Ciudad de México: SCT.

27. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2015). *Los puentes de México, 1985–2014*. Ciudad de México: SCT.
28. Vielma P., J. C., Lobo Q., W., & Rivero R., P. (2005). Factores de reducción de respuesta por ductilidad de estructuras con comportamiento no lineal. *Revista Ingeniería UC, 12*(2), 14–22.
29. Vielma Pérez, J. C. (2008). *Caracterización del comportamiento sísmico de edificios de hormigón armado mediante la respuesta no lineal*.

SISTEMA INTELIGENTE DE CONTROL TÉRMICO PARA EL TRANSPORTE DE ASFALTO

Osvaldo Frías Rocha, María Fernanda Meza Vallejo, Tania del Rosario Moreno Aldaco, José Juan Vázquez Martínez

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato Gto.
jose.vm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

El presente trabajo aborda el desarrollo de un sistema de control de temperatura para el transporte de asfalto mediante sensores y termostatos, con el objetivo de mantener la temperatura dentro de un rango óptimo de 140 °C a 170 °C. Esto permite preservar sus propiedades reológicas y garantizar su adecuada aplicación en la pavimentación, reduciendo el riesgo de endurecimiento prematuro o deterioro del material.

El sistema se diseñó mediante una metodología de automatización integrada, empleando sensores de alta precisión, que ofrecen una respuesta rápida y confiable en condiciones variables. Estos sensores están conectados a un microcontrolador, encargado de procesar las lecturas de temperatura. Además, se incorporó un módulo de comunicación IoT que permite el monitoreo en tiempo real a través de una interfaz web o aplicación móvil. Esto facilita el seguimiento de la temperatura en cada etapa del transporte, enviando alertas en caso de desviaciones críticas.

El diseño del sistema es modular y adaptable a distintos tipos de vehículos de transporte, permitiendo su implementación en camiones térmicos, remolques especializados e incluso en plantas móviles de asfalto. Además, cumple con las normativas vigentes de la SCT y otras regulaciones internacionales sobre conservación de materiales bituminosos.

En conclusión, la implementación de este sistema de control de temperatura no solo mejora la calidad del asfalto aplicado en obra, sino que también reduce el desperdicio de material, optimiza la logística del transporte y contribuye a la sostenibilidad en la industria de la construcción vial y las emisiones asociadas al sobrecalentamiento innecesario.

INTRODUCCIÓN

El transporte de asfalto caliente representa un desafío técnico crítico en la industria de la construcción de carreteras, ya que su temperatura debe mantenerse dentro de un rango óptimo para preservar su trabajabilidad y garantizar la calidad del pavimento. Las pérdidas térmicas durante el traslado desde la planta de producción hasta el sitio de aplicación pueden comprometer significativamente las propiedades del material, generando problemas como compactación deficiente, agrietamiento prematuro y disminución en la vida útil del pavimento.

Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan monitorear y controlar en tiempo real la temperatura del asfalto durante su transporte. Este proyecto propone el desarrollo de un sistema inteligente de control térmico, basado en sensores de temperatura, microcontroladores y elementos calefactores automatizados, con el objetivo de mantener las condiciones térmicas adecuadas del asfalto durante su traslado.

El sistema busca no solo optimizar la eficiencia operativa y reducir pérdidas materiales, sino también contribuir a la sostenibilidad del proceso constructivo mediante un uso más racional de la energía. Asimismo, se plantea su integración con tecnologías de comunicación inalámbrica para la supervisión remota del estado térmico del material, lo que representa un avance significativo en la digitalización de los procesos en el sector de la infraestructura vial.

Además, el sistema podrá registrar datos históricos de temperatura para análisis posteriores, facilitando la identificación de patrones y posibles mejoras en la logística de transporte. La modularidad del diseño permitirá su adaptación a diferentes tipos y volúmenes de camiones asegurando versatilidad en su aplicación. En conjunto, esta innovación fortalecerá la calidad del asfalto y la eficiencia de los procesos constructivos.

TEORÍA

El asfalto en caliente es un material ampliamente utilizado en la construcción de carreteras por su resistencia y durabilidad. Está compuesto por agregados minerales y un ligaste bituminoso qué requiere mantenerse dentro de un rango de temperatura específico (entre 140°C y 170°C) para conservar sus propiedades durante el transporte, extendido y compactación. Si el asfalto baja de los 120°C, pierde su trabajabilidad, lo cual afecta la calidad del pavimento y reduce su vida útil.

Uno de los principales problemas en obras de infraestructura es la pérdida de temperatura de asfalto durante el traslado desde la planta hasta la zona de aplicación. Factores como la distancia, el tiempo, el clima y la falta de aislamiento térmico en los vehículos de transporte contribuyen a esta pérdida. Para evitar fallas prematuras, es necesario asegurar que la mezcla llegue al sitio con la temperatura adecuada.

Las normas como la N-CMT-4-05-002 de la SICT, la ASTM D6925 y la AASHTO T312 establecen los criterios de temperatura qué deben cumplirse en cada etapa del proceso constructivo. Estas regulaciones buscan garantizar la calidad del pavimento y la durabilidad de la obra, exigiendo un control preciso de las condiciones térmicas.

En la actualidad, gracias a la tecnología, es posible implementar sistemas de monitoreo en tiempo real basado en microcontroladores como el ESP32. Estos sistemas pueden utilizar sensores como el DS18B20 o termopares tipo K para medir la temperatura interna del asfalto dentro del camión. La información puede registrarse en una tarjeta microSD, enviarse a la nube o visualizarse en una aplicación móvil.

El uso de una interfaz permite a los encargados de obra visualizar alertas cuando la temperatura baja de los rangos seguros, consultar historiales, y tomar decisiones oportunas para evitar pérdidas de material. Comparando con métodos manuales, este sistema ofrece mayor precisión, continuidad y trazabilidad.

Este tipo de solución no solo mejora la eficiencia y el control de calidad, sino que también representa un avance hacia la digitalización del sector de la construcción. Además, permite cumplir con las normativas, reducir errores humanos, prevenir pérdidas económicas y garantizar pavimentos más duraderos.

El sistema de monitoreo de temperatura fue desarrollado utilizando una arquitectura de bajo costo y bajo costo y bajo consumo energético. Los principales componentes electrónicos seleccionados para este proyecto fueron:

- Microcontrolador ESP32: El ESP32 fue elegido como la unidad central de procesamiento de doble núcleo, conectividad, Wifi integrada, y múltiples entradas/salidas digitales. La capacidad de comunicación inalámbrica permite enviar los datos de temperatura a una interfaz, además de registrar la información localmente.
- Sensor de temperatura DHT11: Este sensor fue utilizado para la medición de la temperatura, es un sensor digital de fácil uso y adecuado para este tipo de aplicación donde este monitoreo se maneja, tiene un rango limitado, pero al ser prototipo no tenemos problemas (rango de 0°C a 60°C) y con una precisión bastante buena, es útil como fase inicial del sistema.

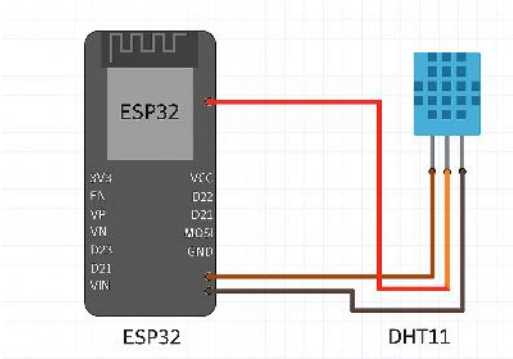


Figura 1. Esquema de conexión entre el ESP32 y el sensor DHT11, para la lectura de temperatura y humedad.

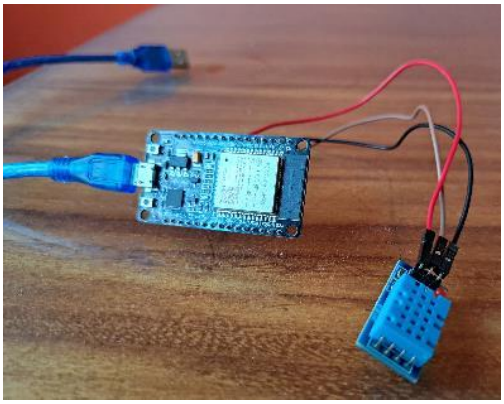


Figura 2. Lectura de temperatura y humedad con un sensor DHT11 conectado a una placa ESP32.

En una implementación real con mezclas de asfalto, se recomienda usar sensores con mayor rango y precisión como los tipos K o sensores DS18B20 ya que este tiene como rango máximo los 180°C. El sistema puede ser alimentado mediante baterías recargables de 5V o una fuente regulada. Ya que los sensores se conectan directo al ESP32 para tener sus lecturas.

Funcionamiento general:

El sistema está basado en una placa ESP32, la cual es la responsable de gestionar la lectura de temperatura que se detecta, el almacenamiento de datos y la que nos permite tener la comunicación inalámbrica con nuestra base de datos. El funcionamiento general de nuestro sistema se resume en los siguientes pasos:

- El ESP32 inicia la lectura del DHT11 en intervalos definidos de tiempo (Programables).
- La temperatura es almacenada de manera local en nuestra interfaz y enviada vía Wifi a una base de datos en la nube.
- La interfaz accede a los datos, mostrando los datos en pantalla y generando alertas en caso de un descenso o ascenso crítico.
- Todo el sistema es portátil, económico y fácilmente replicable, lo que convierte en una herramienta accesible para empresas que buscan un mejor control de calidad del asfalto durante su transporte o aplicación.

El diseño presentado para la implementación del sistema es el siguiente:

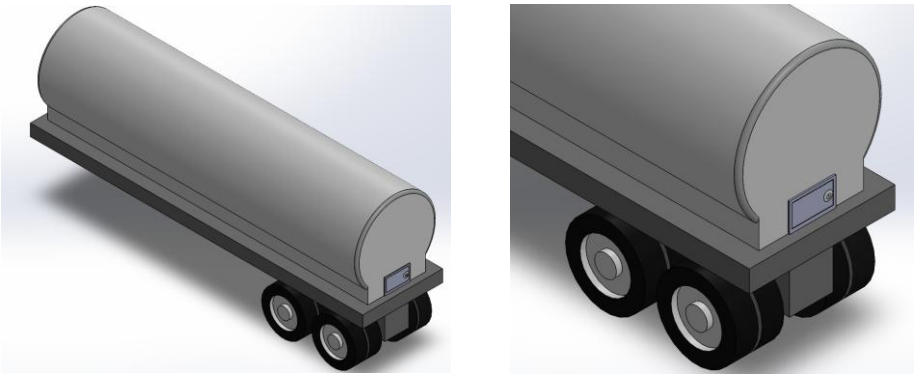


Figura 3. Visualización del sistema: Prototipo instalado en la unidad de transporte.

La imagen muestra la disposición interna del sistema electrónico dentro de la caja del camión, la cual ha sido seleccionada como una ubicación estratégica por las siguientes razones:

- Protección ambiental y mecánica: La caja proporciona un entorno controlado que resguarda los componentes electrónicos (sensor de temperatura, microcontrolador, y módulos asociados) frente a agentes externos como polvo, humedad, vibraciones mecánicas y temperaturas extremas. Esto contribuye significativamente a la prolongación de la vida útil y rendimiento confiable del sistema.
- Accesibilidad para mantenimiento: La ubicación facilita las labores de inspección, diagnóstico y mantenimiento preventivo o correctivo por parte del operador o personal técnico, optimizando la disponibilidad operativa del sistema.
- Optimización de la señal térmica: El posicionamiento interno del sensor, en proximidad al material transportado, permite una medición térmica más precisa. Esta disposición garantiza que el sensor este lo suficientemente cercano para captar con fidelidad la temperatura del asfalto, sin estar en contacto directo con el mismo, evitando así posibles daños por exposición prolongada al calor.

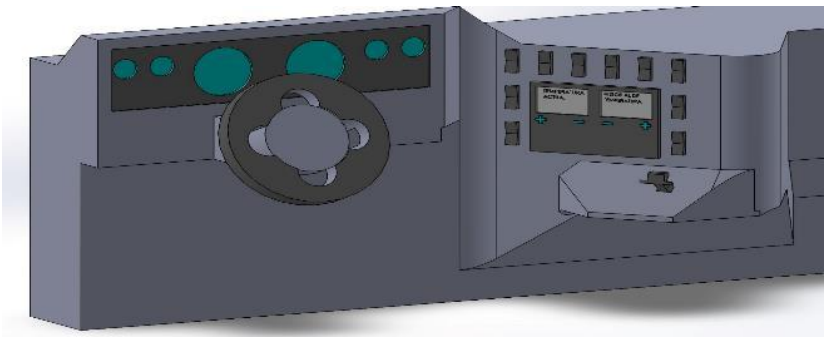


Figura 4. Diseño del panel de control para monitoreo y ajuste de temperatura en el vehículo.

En esta imagen mostramos como se implementaría en el tablero del conductor, donde se mostraría una pantalla de aviso. La pantalla puede mostrar valores numéricos de temperatura, así como mensajes de alerta visuales y auditivos. Cumpliendo con las siguientes funciones críticas:

- Visualización inmediata de la temperatura del asfalto en tiempo real, lo cual permite que el operador este constantemente informado sobre el estado del material.
- Alerta temprana ante temperaturas fuera del rango óptimo, previniendo el endurecimiento o la perdida de propiedades del asfalto antes de su aplicación.
- Integración con el sistema de notificación del vehículo, lo cual nos permite la activación de sistema de enfriamiento, aislamiento o decisiones operativas según la lectura de temperatura.

Este diseño mejora la seguridad y la eficiencia del transporte del asfalto, ya que:

- Disminuye el riesgo de desperdicio de material por degradación térmica.
- Optimiza los tiempos de entrega y de aplicación, al asegurar que el asfalto se mantenga en sus condiciones ideales hasta el momento de uso.
- Contribuye a la sostenibilidad, al reducir el retrabajo y el impacto ambiental por material no aprovechado.

Este modelo puede escalarse fácilmente a más unidades de transporte y vincularse a plataformas en la nube para un control remoto y registro histórico de datos

PARTE EXPERIMENTAL

Durante la etapa experimental del proyecto, se llevó a cabo la validación inicial del sistema de monitoreo de temperatura utilizando condiciones controladas que simulan el comportamiento térmico del asfalto durante su transporte. El objetivo principal de esta fase fue comprobar el correcto comportamiento y funcionamiento de los componentes electrónicos, la integración de hardware y software, así como la eficiencia de recolección, registro y transmisión de los datos. Dado que el proyecto aún se encuentra en fase de prototipo, se utilizaron rangos de temperatura seguros y accesibles en laboratorio, alcanzando una temperatura máxima de 60°C y una mínima de 26°C.

El prototipo incluyó un sensor DH11 conocido por su precisión y facilidad de calibración, conectado a un ESP32, el cual se encargó de procesar las lecturas y transmisión de datos por Wifi. Además, se integraron a una interfaz la cual se realizó en HTML para visualizar en tiempo real nuestras lecturas y la vez hacer el registro en tiempo real de nuestros datos, a futuro se piensa agregar una tarjeta microSD donde se guardará a la par de mostrar y guardar en nuestra interfaz y se tiene pensado agregar o incluir una aplicación de Android para mejorar la interfaz y poder tenerla de manera más controlada en especial para este proyecto.

RESULTADOS

Durante las pruebas realizadas a lo largo de una sesión de una hora, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La temperatura inicial fue de 26°C, correspondiente a la temperatura ambiente del entorno en el que se encontraba el prototipo. Conforme se activó la fuente de calor, la temperatura fue incrementándose gradualmente hasta alcanzar un máximo de 60°C, lo cual permitió comprobar la capacidad del sensor para detectar incrementos térmicos de forma progresiva.
- La frecuencia de muestreo configurada fue de una lectura cada 15 segundos, lo cual permitió obtener un conjunto amplio de datos para graficar la evolución térmica del sistema. En total, se registraron más de 240 muestras en una sola sesión, todas almacenadas en la tarjeta microSD y sincronizadas con la nube.
- Las lecturas de temperatura se mantuvieron dentro de nuestro rango estable para nuestras condicones controladas.
- Nuestro sensor tuvo una buena constancia trabajando durante todo el tiempo que se realizaron las pruebas, solamente teniendo variación promedio a 1.5°C, lo que nos muestra una buena constancia de trabajo.

Esta fase de pruebas nos perimitio evaluar de una buena manera nuestra conectividad con nuestra tarjeta ESP32 a nuestra conexión Wi-Fi, la autonomía de nuestra bateria y la capacidad que tiene nuestro sistema en tiempo real, nuestro envio de datos fue el adecuado, mostrando de manera adecuada cada valor en nuestra pantalla, logrando este envio a la par a nuestro dispositivo movil como a nuestra interfaz en nuestra computadora, la pantalla genero las alertas de manera adecuada en los momentos criticos de nuestro sistema.

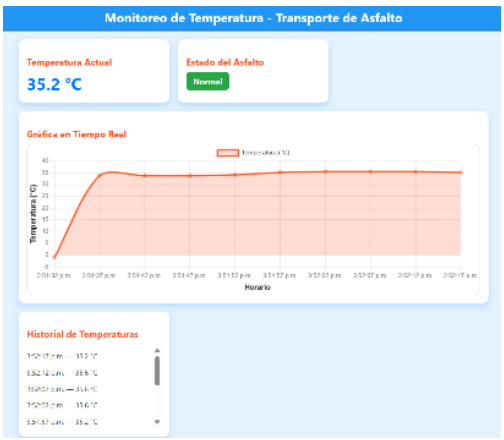


Figura 5. Interfaz en funcionamiento.

El sistema de alertas en la aplicación móvil fue programado para enviar una notificación cuando la temperatura superara los 45°C, actuando como un simulacro de riesgo térmico en el contexto del transporte real. Las alertas se recibieron correctamente en el dispositivo móvil en un tiempo promedio de menos de 3 segundos desde la detección.

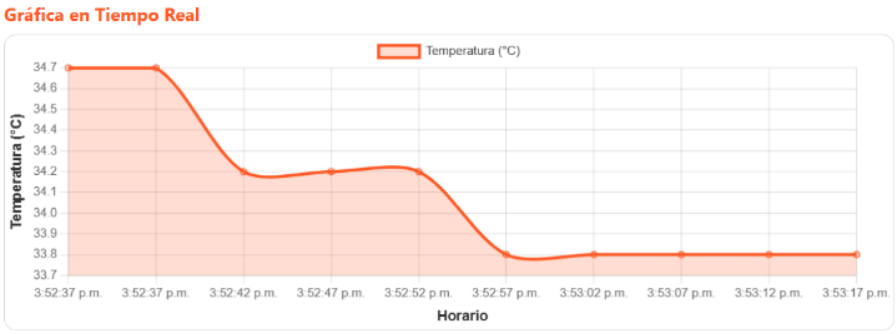


Figura 6. Muestra en interfaz gráfica de temperatura y horario.

La precisión del sensor fue consistente a lo largo de la prueba, con fluctuaciones mínimas entre muestras sucesivas, lo que refleja estabilidad del sistema. La visualización en pantalla OLED también se mantuvo estable, brindando al operador información clara y directa en tiempo real.

La integración con Firebase funcionó sin interrupciones. Todos los datos se almacenaron con sus respectivas marcas de tiempo, lo que permite generar un historial térmico completo para su análisis posterior. Esto es de gran utilidad para trazar curvas térmicas, identificar anomalías y tomar decisiones preventivas en futuras pruebas de campo.

Es importante resaltar que, aunque las temperaturas utilizadas en esta etapa no representan las condiciones reales del asfalto durante su transporte (que superan los 140°C), los resultados obtenidos confirman que el sistema responde adecuadamente a los cambios térmicos y es capaz de cumplir con los objetivos principales del proyecto: medir, registrar, alertar y visualizar.



Figura 7. Muestra de interfaz de temperatura actual.

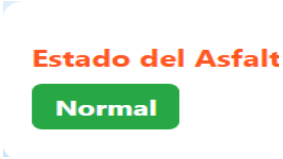


Figura 8. Muestra de interfaz del estado del asfalto.

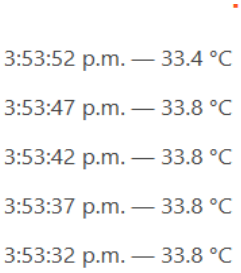


Figura 15. Historial detallado de los valores registrados.

Como parte de futuras pruebas, se contempla incorporar una fuente de calor más potente y simular un entorno cerrado con aislamiento térmico, lo cual permitiría alcanzar temperaturas más cercanas a las reales. También se proyecta validar el comportamiento del sistema en un vehículo en movimiento , simulando vibraciones y variaciones ambientales. No obstante, los resultados actuales brindan una base sólida para avanzar hacia la fase de pruebas reales en campo.

CONCLUSIONES

El proyecto de monitoreo de temperatura en el transporte del asfalto permitió desarrollar un sistema eficiente y confiable para prevenir la pérdida de propiedades del material durante su traslado. A través del uso de sensores, una ESP32 y conectividad con una app móvil, se logró registrar, alertar y controlar en tiempo real la temperatura, asegurando así la calidad del asfalto y optimizando los procesos en obra. Este prototipo demuestra cómo la tecnología puede aplicarse con éxito en el sector de la construcción para mejorar la eficiencia, reducir costos operativos y garantizar un uso más sostenible de los recursos. Además, el control térmico adecuado impacta directamente en la durabilidad del pavimento, resultando en obras de mayor calidad y menor mantenimiento a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asfalto Farvias. (s.f.). ¿Cuántos grados tiene el asfalto? Recuperado el 12 de mayo de 2025, de https://asfaltofarvias.com/cuantos-grados-tiene-el-asfalto/
2. Programar Fácil. (s.f.). Sensor DHT11 con Arduino: mide temperatura y humedad fácilmente. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/
3. Programar Fácil. (s.f.). ESP32: qué es y cómo funciona este microcontrolador Wifi + Bluetooth. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de https://programarfacil.com/esp8266/esp32/
4. Reddit. (2020, 15 de noviembre). Designing a HTML web page using an ESP32 with Arduino IDE [Publicación en foro en línea]. Reddit. https://www.reddit.com/r/esp32/comments/jre4ru/designing_a_html_web_page_using_an_esp32_with/?tl=es-419
5. Solucionex. (s.f.). Librería para hacer gráficas web espectaculares en HTML5. Recuperado el 12 de mayo de 2025, de https://www.solucionex.com/blog/libreria-para-hacer-graficas-web-espectaculares-en-html-

ANÁLISIS COMPARATIVO DE REGULADORES DE VOLTAJE EN CA CON INTERRUPTORESBIDIRECCIONALES: CATODO COMÚN VS. PUENTE H

Sergio Constantino Yáñez Campos, Kassandra Gutiérrez Caudillo, Jacqueline Arredondo Alvarado, Irvin Eli Moreno Corona, Perla Ximena Reyes Medina

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato.
sergio.yc@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Los reguladores de voltaje de corriente alterna (CA) son dispositivos fundamentales en la gestión de la energía eléctrica, ya que permiten mantener el voltaje en niveles constantes, a pesar de las fluctuaciones en la carga o en la fuente de alimentación. Estos reguladores se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas de energía renovable hasta equipos electrónicos de precisión. Los interruptores bidireccionales son componentes clave en la implementación de estos reguladores, permitiendo la correcta dirección del flujo de energía. Además de facilitar el esquema de control del sistema completo. En este estudio, se analizan dos configuraciones de reguladores de voltaje basados en interruptores bidireccionales: una utilizando un interruptor bidireccional en configuración de cátodo común y otra utilizando un interruptor bidireccional en un puente H.

Para realizar la comparación, se diseñaron modelos de ambos reguladores utilizando Simulink, una plataforma de simulación y modelado ampliamente utilizada en ingeniería eléctrica. Los modelos fueron evaluados en términos de la calidad del voltaje de salida, el rendimiento de los esquemas de control y la cantidad de elementos utilizados en cada configuración. En cuanto al voltaje de salida, se compararon los niveles de voltaje en diferentes condiciones de carga. Los esquemas de control fueron analizados en términos de complejidad y facilidad de implementación, mientras que el número de elementos se consideró desde el punto de vista de eficiencia y costo de implementación.

Los resultados cualitativos muestran que ambos reguladores ofrecen un desempeño aceptable en cuanto a la estabilidad del voltaje de salida. Sin embargo, se observó que el regulador basado en la configuración de puente H presenta una mayor caída de tensión en la salida, lo que puede afectar el rendimiento en aplicaciones sensibles. A pesar de esto, su control es más sencillo, ya que requiere solo una señal de disparo para su funcionamiento. En cambio, el regulador basado en el cátodo común, aunque ofrece una caída de tensión más baja, presenta un control más complejo debido a la necesidad de gestionar múltiples señales de disparo. En conclusión, ambos reguladores presentan ventajas y desventajas dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación. El regulador basado en el puente H es más sencillo en términos de control y diseño, pero su mayor caída de tensión podría ser un factor limitante en algunos casos. Por otro lado, el regulador basado en cátodo común ofrece una mejor eficiencia en términos de caída de tensión, pero con una mayor complejidad en el diseño y control. La elección entre ambos dependerá de los requisitos específicos de rendimiento y costo en cada aplicación particular.

INTRODUCCIÓN

Los reguladores de voltaje en corriente alterna (CA) desempeñan un papel fundamental en el manejo eficiente de la energía eléctrica, al mantener el voltaje de salida dentro de un rango deseado, independientemente de variaciones en la carga o la fuente de alimentación. Estos dispositivos son esenciales en aplicaciones como sistemas de energía renovable, electrónica de potencia, fuentes de alimentación industriales, y equipos médicos de alta precisión.

En los últimos años, el desarrollo de topologías de regulación más eficientes ha sido un área activa de investigación. Entre las distintas alternativas tecnológicas, los interruptores bidireccionales se han posicionado como elementos clave, ya que permiten el control del flujo de energía en ambas

direcciones, facilitando la regulación en sistemas con carga alterna sin necesidad de transformar la señal a corriente directa (CD).

Dos configuraciones típicas en las que se emplean interruptores bidireccionales son: la configuración de cátodo común y la configuración tipo puente H. Ambas permiten la regulación de voltaje en CA, pero presentan diferencias importantes en términos de eficiencia, complejidad de control, y número de componentes utilizados. El análisis de estas características es esencial para seleccionar la configuración más adecuada para una aplicación específica, sobre todo en un contexto donde la eficiencia energética, la reducción de componentes y la facilidad de implementación son factores prioritarios.

El presente trabajo compara el comportamiento de dos reguladores de voltaje en CA implementados con interruptores bidireccionales: uno en configuración de cátodo común y otro en configuración puente H. Para ello, se desarrollaron modelos en Simulink, considerando condiciones típicas de uso doméstico en México (127 V RMS a 60 Hz) y simulaciones con distintos ángulos de disparo.
Se analizan variables como el voltaje de salida RMS, la distorsión armónica total (THD), la caída de tensión por componente, y la cantidad de señales de disparo requeridas, con el fin de evaluar tanto la eficiencia como la simplicidad de cada alternativa. Los resultados obtenidos permiten establecer ventajas y limitaciones de ambas configuraciones desde una perspectiva práctica.

INTERRUPTORES BIDIRECCIONALES

Los reguladores de voltaje en corriente alterna (CA) son circuitos electrónicos cuya función es mantener constante el valor eficaz del voltaje suministrado a una carga, pese a variaciones en la fuente o en las características de la carga. A diferencia de los reguladores en corriente directa (CD), los reguladores en CA deben operar directamente con señales alternas, lo que implica desafíos adicionales en términos de control y diseño de los componentes de conmutación.

Una solución eficiente para la implementación de estos reguladores es el uso de interruptores bidireccionales, dispositivos capaces de conducir corriente en ambas direcciones y bloquear tensión en ambos sentidos. Estos interruptores permiten manipular el paso de la señal alterna sin necesidad de convertirla a CD, reduciendo así pérdidas por conversión y simplificando el diseño en algunas aplicaciones.

Interruptores bidireccionales
Un interruptor bidireccional ideal debe ser capaz de:

- Conducir corriente en ambos sentidos (bidireccionalidad en corriente).
- Bloquear tensión en ambos sentidos cuando está abierto (bidireccionalidad en tensión).

En la práctica, estos interruptores se implementan mediante combinaciones de dispositivos semiconductores de potencia, como IGBTs (Transistores Bipolares de Puerta Aislada) y diodos. Existen múltiples formas de construir un interruptor bidireccional. Las dos configuraciones más estudiadas en este trabajo son:

- Cátodo común: combina dos IGBTs con sus respectivos diodos conectados en antiparalelo, compartiendo el cátodo.
- Puente H: utiliza una topología de 4 diodos y un IGBT para conmutar la señal alterna en ambas mitades del ciclo.

Configuración de cátodo común
En esta topología, se utilizan dos interruptores unidireccionales (por ejemplo, IGBTs) con sus diodos de protección, conectados de forma tal que sus terminales de cátodo están unidos. Esta configuración permite conducir en ambas direcciones durante un ciclo completo de la señal CA, y el control se realiza mediante dos señales de disparo independientes.

Ventajas:

- Menor caída de tensión en comparación con otras topologías.
- Alta eficiencia en aplicaciones donde se prioriza la reducción de pérdidas.

Desventajas:

- Requiere dos señales de disparo sincronizadas.
- Mayor complejidad en el diseño del sistema de control.

Configuración tipo puente H

La configuración en puente H es una topología clásica en electrónica de potencia, ampliamente utilizada tanto en reguladores como en inversores. Consiste en cuatro elementos de conmutación dispuestos en forma de puente. En este trabajo se implementa una versión simplificada, utilizando un IGBT y cuatro diodos, permitiendo el control del flujo de corriente durante todo el ciclo.

Ventajas:

- Requiere solo una señal de disparo para operar.
- Simplifica el esquema de control, especialmente en aplicaciones donde la precisión no es crítica.

Desventajas:

- Mayor número de componentes pasivos (diodos).
- Caída de tensión más elevada debido al número de dispositivos en conducción por ciclo.

Ambas configuraciones son funcionales para regular voltaje en CA, y su elección depende de las prioridades del diseño: eficiencia energética, simplicidad del control, o disponibilidad de componentes.

IMPLEMENTACION EN SIMULINK

Para comparar el desempeño de los reguladores de voltaje en CA implementados con interruptores bidireccionales, se realizaron simulaciones en el entorno Simulink de MATLAB. Se modelaron dos configuraciones distintas: una utilizando un interruptor bidireccional en configuración de cátodo común, y otra con una estructura de puente H.

Interruptor bidireccional en cátodo común

El sistema está compuesto por una fuente de CA, una carga resistiva de 100 Ω y el interruptor bidireccional. Este interruptor se forma con dos tiristores cuyos cátodos están conectados entre sí, y cada uno lleva un diodo en antiparalelo (ver figura 1). Cada tiristor conduce durante un semiciclo de la señal (positivo o negativo), por lo cual se requieren dos señales de disparo independientes para su operación. Se considera una caída de tensión de 0.8 V por cada elemento de conmutación, lo que suma 1.6 V en conducción.

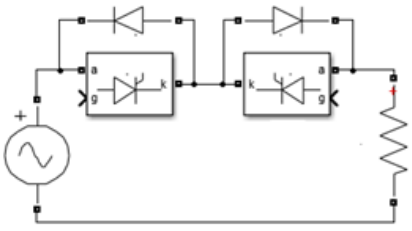


Figura 1. Interruptor bidireccional en cátodo común.

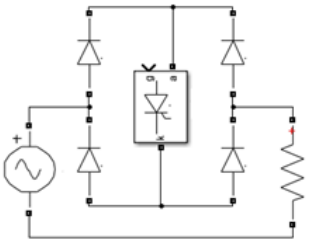


Figura 2. Interruptor bidireccional tipo puente H.

Interruptor bidireccional tipo puente H
Esta configuración también incluye una fuente de CA y una carga resistiva de 100 Ω. El interruptor se implementa mediante cuatro diodos en puente H y un solo tiristor que cierra el lazo de conducción (ver figura 2). Esta topología permite que el tiristor conduzca en ambos semiciclos, por lo que solo se requiere una señal de disparo. En este caso, se consideran tres elementos activos en el lazo de conducción, lo que genera una caída total estimada de 2.4 V.

Condiciones de simulación
Las simulaciones se realizaron bajo los siguientes parámetros:

- Voltaje de entrada (RMS): 127 V (179.6 V pico)
- Frecuencia: 60 Hz
- Carga: Resistencia pura de 100 Ω
- Ángulos de disparo analizados: 90° y 45°
- Caída de tensión estimada por dispositivo de potencia: 0.8 V

RESULTADOS

Se evaluaron las siguientes variables: el voltaje RMS de salida, el porcentaje de distorsión armónica total (THD), la caída de tensión total, y el número de señales de disparo requeridas para cada configuración. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Característica	Cátodo Común	Puente H con Tiristor
Elementos de potencia	2 tiristores + 2 diodos	1 tiristor + 4 diodos
Elementos activos en lazo de conducción	2	3
Caída total de tensión	1.6 V	2.4 V
Señales de disparo requeridas	2	1
Voltaje de salida RMS (disparo a 90°)	88.78 V	88.27 V
THD (%) con disparo a 90°	65.46 %	65.67 %
Voltaje de salida RMS (disparo a 45°)	119.80 V	119.20 V
THD (%) con disparo a 45°	26.11 %	26.20 %

Las formas de onda obtenidas muestran una clara mejora en la forma del voltaje de salida cuando se reduce el ángulo de disparo de 90° (ver figuras 3 y 4) a 45° (ver figuras 5 y 6), reflejado tanto en un mayor voltaje eficaz como en una menor distorsión armónica.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones en Simulink permiten comparar el comportamiento de los reguladores de voltaje en corriente alterna (CA) implementados con interruptores bidireccionales, tanto en configuración de cátodo común como en configuración tipo puente H. Se evaluaron dos condiciones de operación distintas, con ángulos de disparo de 90° (ver figuras 3 y 4) a 45° (ver figuras 5 y 6).

En ambos casos, se analizaron las siguientes variables:

- Voltaje RMS de salida
- Distorsión armónica total (THD)
- Caída de tensión estimada
- Número de señales de disparo necesarias

Los resultados muestran que, en términos de voltaje de salida, la configuración de cátodo común presenta ligeramente mayor eficiencia que el puente H, tanto a 90° como a 45°, debido a una menor caída de tensión asociada a un menor número de elementos activos en el lazo de conducción. En cuanto a la THD, ambas configuraciones presentan valores elevados para el ángulo de disparo de 90°, lo cual es característico de una conducción tardía en la onda senoidal. Al reducir el ángulo de

disparo a 45°, la distorsión armónica disminuye considerablemente, alcanzando niveles cercanos al 26 % en ambos casos, lo cual representa una mejora significativa en la calidad del voltaje.

La siguiente tabla resume los resultados más relevantes:

Característica	Cátodo Común	Puente H con Tiristor
Voltaje de salida RMS (disparo a 90°)	88.78 V	88.27 V
THD (%) con disparo a 90°	65.46 %	65.67 %
Voltaje de salida RMS (disparo a 45°)	119.80 V	119.20 V
THD (%) con disparo a 45°	26.11 %	26.20 %
Caída total de tensión	1.6 V	2.4 V
Señales de disparo requeridas	2	1

Análisis comparativo visual

Las formas de onda obtenidas en Simulink muestran el comportamiento dinámico del voltaje de salida frente al voltaje de entrada y las señales de disparo (ver figuras 3 a 6). En el caso del regulador con cátodo común, se observa una conducción alternada entre los dos tiristores, mientras que en el puente H el tiristor único permite una conducción simétrica a través del puente, aunque con una caída de tensión mayor por el número de dispositivos involucrados.

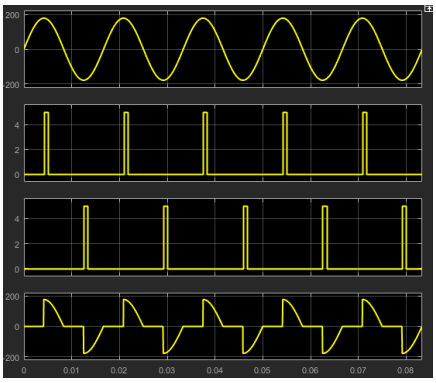


Figura 3. Formas de onda con interruptor bidireccional en cátodo común 90°.

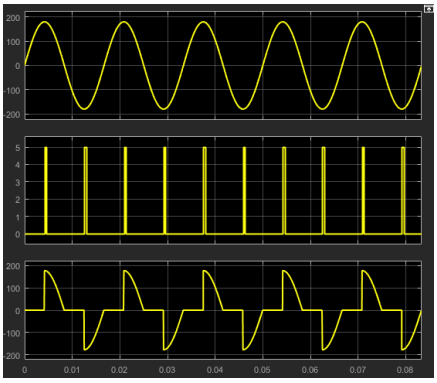


Figura 4. Formas de onda con interruptor bidireccional tipo puente H con 90°.

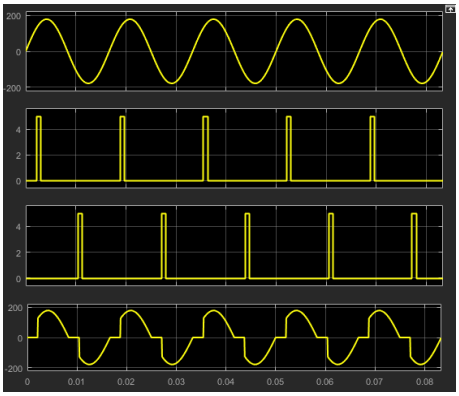


Figura 5. Formas de onda con interruptor bidireccional en cátodo común con 45°.

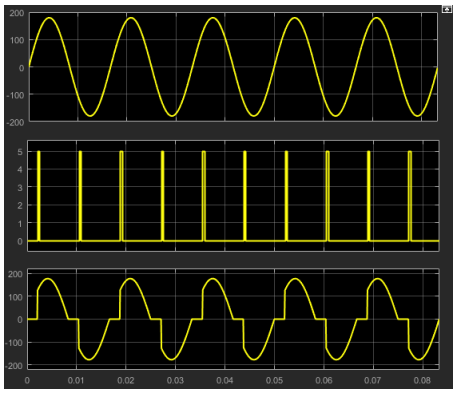


Figura 6. Formas de onda con interruptor bidireccional tipo puente H con 45°.

Estas diferencias permiten concluir que cada topología presenta ventajas específicas dependiendo de los requerimientos de la aplicación: mayor eficiencia eléctrica con cátodo común y menor complejidad de control con el puente H.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis comparativo entre dos configuraciones de reguladores de voltaje en corriente alterna (CA) que emplean interruptores bidireccionales: una en configuración de cátodo común y otra en configuración tipo puente H. Ambas fueron evaluadas mediante simulaciones en Simulink considerando dos ángulos de disparo (90° y 45°), una carga resistiva pura y condiciones típicas de operación para aplicaciones domésticas.

Los resultados permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Desempeño eléctrico: La configuración de cátodo común presenta menor caída de tensión (1.6 V frente a 2.4 V en el puente H), lo cual la hace más eficiente en términos de aprovechamiento del voltaje de entrada. Esto se refleja también en un voltaje de salida RMS ligeramente superior en ambas condiciones de disparo.
- Calidad de la señal: En cuanto a la distorsión armónica total (THD), ambas configuraciones presentan comportamientos similares. A ángulos de disparo elevados (90°), la THD es alta (alrededor del 65 %), pero mejora considerablemente al disminuir el ángulo de disparo a 45°, alcanzando valores en torno al 26 %.
- Complejidad de control: La topología de puente H requiere solo una señal de disparo, lo cual puede simplificar la implementación del sistema de control. En cambio, la configuración de cátodo común necesita dos señales de disparo sincronizadas, lo cual implica mayor complejidad en el diseño del disparador.
- Elección según la aplicación: Ambas configuraciones son viables para el diseño de reguladores de voltaje en CA, y la elección de una u otra dependerá de los requerimientos específicos del sistema: si se prioriza la eficiencia eléctrica, la topología de cátodo común es preferible; si se busca simplicidad en el control, la topología de puente H puede ser más adecuada.

Finalmente, este análisis demuestra que es posible adaptar el diseño de reguladores de voltaje utilizando elementos de conmutación disponibles comercialmente, considerando un equilibrio entre eficiencia, costo y complejidad de implementación.

BIBLIOGRAFÍA

1. P. Nugroho, et al. “Dynamic Voltage Restorer With Direct AC-AC Controller Using H-Bridge Bidirectional Switch Topology to Mitigate Voltage Sag and Swell”. 2024 International Electronics Symposium (IES). IEEE, 2024. p. 7-12.
2. F. B. Silva, et al. “Application of bidirectional switches in the development of a voltage regulator for self-excited induction generators”. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 98, 2018, p. 419-429.
3. J. Deng, H. Cheng, C. Wang y S. Wu, "Evaluation and Comprehensive Comparison of H-Bridge-Based Bidirectional Rectifier and Unidirectional Rectifiers," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 309, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/309
4. S. Vavilapalli, U. Subramaniam, S. Padmanaban y V. K. Ramachandaramurthy, "Design and Real-Time Simulation of an AC Voltage Regulator Based Battery Charger for Large-Scale PV-Grid Energy Storage Systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25158–25170, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320297995_Design_and_Real-Time_Simulation_of_an_AC_Voltage_Regulator_Based_Battery_Charger_for_Large-Scale_PV-Grid_Energy_Storage_Systemsgrowkudos.com+1MDPI+1
5. R. Wang, H. Huisman y M. G. L. Roes, "Direct AC/AC Voltage Regulator Using a 2-Level Modulated Cascaded H-Bridge Converter," *Electronics*, vol. 12, no. 7, p. 1637, 2023. [En línea]. Disponible en: https://research.tue.nl/files/334016460/Direct_AC_AC_voltage_regulator_using_a_2-level_modulated_cascaded_H-bridge_converter.pdfPortal de Investigación TU Eindhoven

6. Monolithic Power Systems, "Single-Phase AC/AC Converters," [En línea]. Disponible en: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/ac-ac-converters/single-phase-ac-ac-converters
7. C. Mallikarjun, N. S. Shanbog y S. Modi, "Comparative Analysis of Conventional and Modified H-Bridge Inverter Configuration," *arXiv preprint*, arXiv:1908.10032, 2019. [En línea]. Disponible en: https://arxiv.org/abs/1908.10032arXiv
8. SlideShare, "AC Voltage Controller.pptx," [En línea]. Disponible en: https://www.slideshare.net/slideshow/ac-voltage-controllerpptx-255764151/255764151

LA LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON: EL CASO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO DE UN AUTOMÓVIL

Manuel Arciga Vargas, María Fernanda Otero Solís, Mirza Anahí Sánchez Hernández, Adelfo Ponce Castro, Omar Izazaga Cabrera, Edgar Alonso Sánchez Ibarra y Elder Jonas López Oregón

Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero
manuel.arciga7@gmail.com

RESUMEN

La propuesta consistió en relacionar la comprensión matemática del empleo de los acercamientos numérico, gráfico y analítico con el sistema de enfriamiento del motor, a partir de los datos numéricos obtenidos con Scanner Automotriz MAXIDAS DS808, tecnología automotriz que se conecta al motor del automóvil para monitorear la temperatura del anticongelante durante cada una de sus fases: calentamiento, activación del motoventilador y enfriamiento; los datos obtenidos se exportaron al software GeoGebra para el tratamiento gráfico y analítico del ajuste de la función matemática en cada fase de operabilidad.

El estudio se realizó con alumnos que cursan el octavo cuatrimestre de la licenciatura en Ingeniería Metal Mecánica de la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero. La investigación se enmarca en la asignatura de Matemáticas para Ingeniería II, específicamente la unidad temática Ecuaciones Diferenciales Ordinarias, incluye la ley de enfriamiento de Newton, área en la que se ubica la situación problema tratada en la investigación.

El Enfoque Ontosemiótico del Conocimiento y la Instrucción Matemática (EOS) fue el sustento teórico de la investigación, relacionando la situación problema con los seis objetos matemáticos primarios presentes en la actividad matemática: la situación problema, el lenguaje, los conceptos, sus propiedades, los procedimientos y argumentos. Cada uno de estos objetos se identificaron durante la fase experimental y se discutieron en el análisis de los resultados del estudio, por ejemplo, en cuanto al lenguaje empleado es de los objetos primarios más importantes, en el que se distinguen el algebraico para la manipulación de expresiones simbólicas, el gráfico para representaciones geométricas, numérico para el tratamiento de los datos, verbal con el cual el alumno describe en términos propios el trabajo matemático que lleva a cabo y el escrito referenciado en los reportes.

Se realizó una investigación cualitativa, centrada en la interacción y experiencia de los alumnos durante el desarrollo de las actividades propuestas, la motivación al trabajar con una situación problema de la vida cotidiana, en el que lograron identificar la relación existente entre los datos recopilados con el MaxiDAS DS808 y el tratamiento numérico, gráfico y analítico en GeoGebra.

La propuesta favoreció la comprensión de los alumnos al vincular objetos matemáticos con el sistema de enfriamiento, permitiéndoles describirlo numérica, gráfica y analíticamente. Además, promovió el debate y la argumentación sobre los procedimientos utilizados durante su aprendizaje, reforzando la conexión entre la matemática escolar y un problema de su contexto.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las ecuaciones diferenciales ordinarias en la ingeniería suele centrarse en la resolución analítica, lo que limita la comprensión profunda y la conexión con fenómenos reales. Investigaciones previas (Artigue, 1989; Blanchard, 1994; Arslan, Chaachoua y Laborde, 2004) han señalado que la predominancia del enfoque analítico limita la integración de representaciones gráficas y numéricas, lo que afecta la interpretación y el aprendizaje significativo de las soluciones.

Ante esta situación, se propone una estrategia didáctica que integra el análisis numérico, gráfico y analítico mediante el uso de tecnologías digitales, tomando como base el Sistema de Enfriamiento y Calentamiento del Motor un Vehículo (SECMV). Esta propuesta busca fomentar en los estudiantes una comprensión significativa de la ley de enfriamiento de Newton, a través de datos reales obtenidos con el escáner automotriz MaxiDAS DS808 y procesados en GeoGebra. La actividad está diseñada desde el Enfoque Ontosemiótico del Conocimiento y la Instrucción Matemática de Godino (2002), con el propósito de articular diversos objetos matemáticos en una situación contextualizada, pertinente al perfil profesional del alumnado. Esta estrategia representa una alternativa pedagógica viable y pertinente para enriquecer la enseñanza de matemáticas aplicadas en contextos de formación técnica e ingeniería.

TEORÍA

La ley de enfriamiento de Newton y su aplicación al SECMV

La ley de enfriamiento de Newton establece que la velocidad con la que un cuerpo se enfría es proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del medio ambiente. Esta ley puede expresarse mediante una ecuación diferencial ordinaria de primer orden con variables separables, la cual permite describir matemáticamente el cambio de temperatura de un objeto a lo largo del tiempo. En esta investigación, dicha ley se aplica al análisis del Sistema de Enfriamiento y Calentamiento del Motor un Vehículo (SECMV), un fenómeno físico real que permite contextualizar el estudio de las ecuaciones diferenciales.

Aunque el comportamiento térmico del motor en funcionamiento no es completamente ideal, se puede modelar por tramos utilizando ajustes de funciones a los datos recolectados en cada fase del proceso: calentamiento inicial, regulación por motoventilador y enfriamiento tras el apagado del motor. Esto ofrece al estudiante un punto de partida cercano a su realidad profesional para interpretar y validar el modelo matemático con datos obtenidos experimentalmente.

El Enfoque Ontosemiótico del conocimiento y la instrucción matemática

De acuerdo con Godino (2002), en el Enfoque Ontosemiótico del conocimiento y la instrucción matemática (EOS), se define un objeto matemático: como todo aquello que puede ser indicado, todo lo que puede señalarse o a lo cual puede hacerse referencia, cuando se hace, comunica o se aprende matemáticas (p. 434).

Por lo tanto, al hacer referencia al objeto matemático en este trabajo, se entenderá como el acercamiento numérico, gráfico y analítico al SECMV y su relación con la aplicación de la ley de enfriamiento de Newton. También se toma en consideración que la ley de enfriamiento de Newton se aplica al SECMV en su forma ideal, pues tal sistema es complejo para describirla con la modelación de una ecuación diferencial de variables separables.

La situación problema, se refiere a aquellas tareas que inducen la actividad matemática, como esta propuesta, en la que se analizan aspectos relacionados con la SECMV. Una situación problema tiende a promover una apertura de pensamiento, para que emerjan representaciones funcionales que guíen a los estudiantes a lograr la comprensión matemática del objeto
matemático en cuestión (Hitt, 2013; Hitt y Quiroz, 2017).

En la EOS para propiciar la interpretación de los parámetros de la situación problema, se propusieron seis entidades matemáticas básicas o primarias, que se desarrollan en función de la solución al SECMV a saber: situación problema, lenguaje, conceptos, propiedades, procedimiento y argumento. Los objetos primarios que intervienen en las prácticas matemáticas se muestran en la figura 2 (Godino y Batanero, 1994; Godino, 2002).

Estos objetos primarios no son independientes, sino que se relacionan entre sí, de modo que forman configuraciones, las cuales pueden ser vistas como redes de objetos en las cuales unos intervienen y otros emergen de los sistemas de prácticas.



Figura 1. Objetos intervinientes en las prácticas de las cuales emerge el objeto matemático

PARTE EXPERIMENTAL

La fase de experimentación se llevó a cabo en tres sesiones con un grupo de 21 alumnos de octavo cuatrimestre enero – abril del 2025. En la primera sesión se registraron los datos de las tres etapas del comportamiento térmico del sistema de enfriamiento y calentamiento del motor de un vehículo: el calentamiento inicial, la activación del motoventilador y el proceso de enfriamiento posterior al apagado del motor. Estos fueron obtenidos mediante la medición de su temperatura en función del tiempo, utilizando el escáner automotriz MaxiDAS DS808. Durante la segunda sesión se llevó a cabo el análisis gráfico, que consistió en graficar la temperatura en función del tiempo y analizar la curva de calentamiento obtenida en cada uno de los procesos, con apoyo del software matemático GeoGebra. Por último, en la tercera sesión se realizaron los cálculos correspondientes a la Ley de Enfriamiento de Newton, para posteriormente comparar los datos obtenidos a través del modelo teórico con los datos registrados durante la primera sesión.



Figura 3. Fases del comportamiento térmico del SECMV

Se consideraron tanto los conceptos que intervienen durante el proceso de solución de la situación problema, como aquellos que surgen como resultado (Tabla 1).

Tabla 1. Conceptos intervinientes y emergentes del sistema de práctica institucional

Conceptos intervinientes	● El funcionamiento del SECMV y las variables que intervienen en el fenómeno. ● El ajuste de funciones para un conjunto de datos de la temperatura en función del tiempo del SECMV. ● Análisis de gráficas de cada una de las fases del SECMV

Conceptos emergentes	● Análisis de la gráfica de los datos y búsqueda de la relación con el funcionamiento del SECMV. ● Determinación de las funciones ajustadas al ciclo del SECMV. ● La comprensión de los acercamientos numérico, gráfico y analítico como solución de la ecuación diferencial del SECMV.

RESULTADOS

Enfoque desde la Ley de Enfriamiento de Newton

Durante la práctica, se analizaron tres momentos clave del comportamiento térmico del motor de un vehículo: el calentamiento inicial, la activación del motoventilador y el enfriamiento posterior al apagado. En cada fase se compararon los datos registrados por los estudiantes con el modelo propuesto por la Ley de Enfriamiento de Newton, a fin de evaluar su aplicabilidad frente a un sistema real.



Figura 4. Escáner Osciloscopio MaxiDAS DS808 conectado al automóvil

Calentamiento del motor

En la primera etapa, los estudiantes midieron la temperatura del motor desde el encendido hasta alcanzar una condición térmica estable. Al contrastar los datos experimentales con el modelo teórico, se observó una concordancia aceptable durante los primeros dos minutos del proceso, con una diferencia entre 1.2 °C y 2 °C. Sin embargo, a partir del tercer minuto, las discrepancias aumentaron significativamente, lo que indicó que el modelo dejaba de ajustarse adecuadamente al comportamiento del sistema.

Esto les permitió concluir que la Ley de Enfriamiento de Newton resulta válida solo en las primeras fases del calentamiento, cuando el sistema aún no ha generado una cantidad considerable de energía interna. Conforme avanza el proceso, el calor producido por el propio funcionamiento del motor hace que la temperatura del ambiente deje de ser el factor principal en el cambio térmico, lo que limita la validez del modelo en contextos de calentamiento activo.

Activación del motoventilador

Durante esta fase, los estudiantes analizaron los cambios térmicos producidos por los ciclos de encendido y apagado del motoventilador. Identificaron un patrón oscilante caracterizado por el aumento de la temperatura hasta cierto umbral, seguido de una disminución provocada por la activación del ventilador. Se distinguieron así dos momentos térmicos bien definidos: calentamiento y enfriamiento

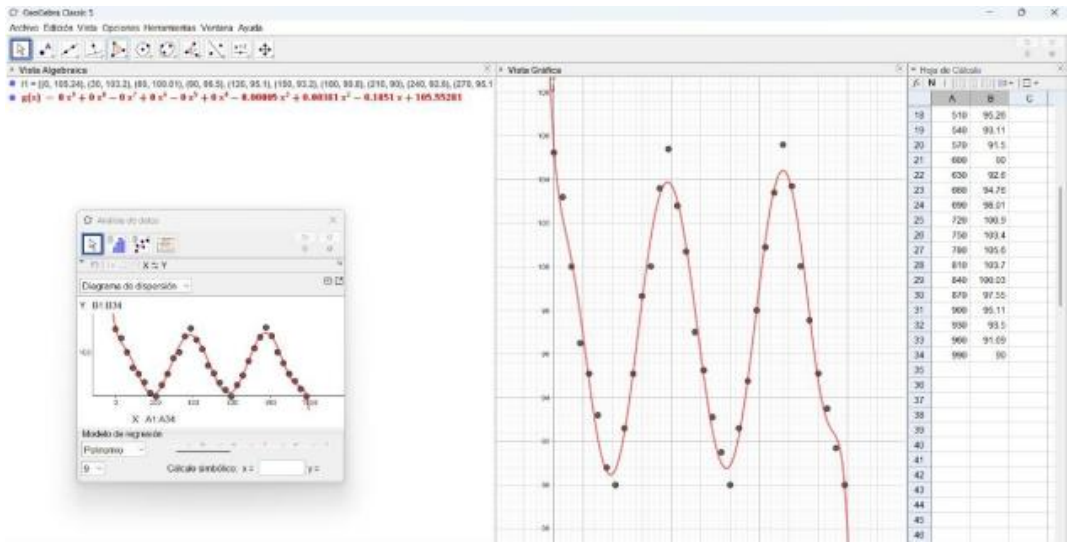


Figura 5. Análisis gráfico de los datos obtenidos por los alumnos en la fase de activación del motoventilador

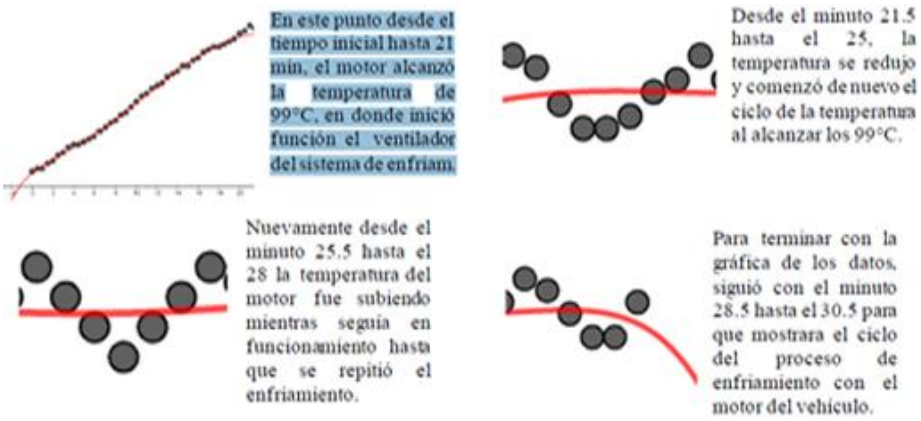


Figura 5. Descripción de puntos donde se activa el motoventilador y la temperatura comienza a incrementar.

En este análisis, los estudiantes identificaron que el modelo de Newton no es aplicable durante el calentamiento, debido a que el calor proviene de fuentes internas como fricción o resistencia eléctrica. En contraste, en la etapa de enfriamiento, cuando el sistema deja de recibir energía y comienza a perder calor hacia el entorno, el modelo sí refleja adecuadamente el comportamiento observado, cumpliendo con las condiciones teóricas del mismo.

Enfriamiento del motor

En la etapa final, se registró el descenso de la temperatura del motor una vez que fue apagado. A lo largo de esta fase, la temperatura disminuyó progresivamente hasta acercarse a la del entorno, en un comportamiento coherente con la Ley de Enfriamiento de Newton. El análisis numérico permitió estimar con buena aproximación el cambio térmico durante los primeros minutos del proceso.

Los estudiantes observaron que, a medida que la diferencia entre la temperatura del motor y la del ambiente disminuía, la velocidad de enfriamiento también lo hacía, lo que fue representado gráficamente en GeoGebra y comparado con los resultados teóricos. Esta etapa sirvió como

validación del modelo, al cumplirse sus condiciones: ausencia de fuentes internas de calor y transferencia térmica unidireccional hacia un medio más frío.

Enfoque pedagógico

Desde la perspectiva pedagógica, la implementación de esta propuesta permitió observar diversos procesos de aprendizaje en los estudiantes al trabajar con un fenómeno contextualizado y tecnológicamente instrumentado. La actividad fue diseñada con base en el Enfoque Ontosemiótico del Conocimiento y la Instrucción Matemática (EOS), permitiendo identificar y analizar cómo los estudiantes interactuaban con los distintos objetos primarios: situación problema, lenguaje, conceptos, propiedades, procedimientos y argumentos.

Durante el desarrollo de las sesiones, los estudiantes mostraron una disposición activa hacia el análisis del sistema de enfriamiento y calentamiento del motor (SECMV), al estar relacionado directamente con su formación profesional. La interpretación de datos reales obtenidos mediante el escáner automotriz MaxiDAS DS808, y su posterior representación gráfica y numérica en GeoGebra, sirvieron como detonantes para que los alumnos construyeran significados a través de distintas formas de representación matemática.

Uno de los aspectos más destacables fue la argumentación que surgió durante las sesiones prácticas. Los equipos discutieron y explicaron los puntos críticos del comportamiento térmico, interpretaron gráficas, justificaron el uso de funciones de ajuste y compararon sus modelos con la solución ideal de la ecuación diferencial. Estos intercambios favorecieron el desarrollo de conceptos emergentes, tales como la comprensión del ajuste funcional por tramos, la interpretación de funciones polinómicas y periódicas, y la distinción entre modelos teóricos y experimentales. Además, identificaron con claridad las tres fases térmicas del SECMV y fueron capaces de argumentar por qué ciertos modelos eran más adecuados en cada tramo.

La secuencia didáctica diseñada propició la emergencia de conexiones entre el lenguaje algebraico, gráfico, numérico y verbal, permitiendo a los alumnos interpretar el fenómeno desde una mirada más amplia y fundamentada. Este trabajo colaborativo también estimuló la autoexplicación, la toma de decisiones sobre la elección de modelos y el uso de herramientas tecnológicas en un contexto aplicado.

En términos generales, se observó que el enfoque propuesto no solo fortaleció la comprensión de la ley de enfriamiento de Newton y su aplicación, sino que también permitió articular los conocimientos matemáticos con una situación problema auténtica, promoviendo una experiencia de aprendizaje significativa y alineada con las competencias de su formación profesional.

CONCLUSIONES

La propuesta didáctica para aprender el objeto matemático mediante el acercamiento gráfico, numérico y analítico del SECMV con el apoyo del programa GeoGebra y equipo de diagnóstico automotriz MaxisDAS DS808, fue positivo para los participantes de las pruebas piloto y fase experimental, quienes expresaron que el trabajo bajo esta propuesta didáctica resultó ser una buena alternativa para lograr conocimiento y propiciar motivación hacia las matemáticas que permitan resolver un problema de contexto. Los conocimientos matemáticos previos y el manejo de herramientas tecnológicas son muy importantes en esta propuesta didáctica, pues permitieron relacionar los diferentes objetos matemáticos intervinientes en la práctica con una situación problema de su contexto. Durante el diseño la propuesta se deben considerar diferentes perspectivas y no limitar la enseñanza y aprendizaje únicamente a los métodos algorítmicos, pues se desprovee al estudiante otros acercamientos que le permitirían incentivar la motivación por la aplicación de la matemática escolar a la vida cotidiana, pues en este caso, resultó relevante el trabajo realizado para guiar el aprendizaje del alumno sobre la comprensión del objeto matemático. Los acercamientos numérico, gráfico y analítico del SECMV fue de ayuda para las actividades propuestas para el alumno partiera de un evento conocido, con el cual se influyó directamente en su motivación e interés por el estudio del objeto matemático.

BIBLIOGRAFÍA

1. Artigue, M. (1989). Ingénierie didactique. *Publications mathématiques et informatique de Rennes,* 1989(S6), 124-128.
2. Arslan, S., Chaachoua, H., y Laborde, C. (2004). Reflections on the teaching of differential equations. What effects of the teaching of algebraic dominance? In Niss, M. A. (Ed.), Proceedings of the 10th International Conference in Mathematics Education 10, 54-69.
3. Blumer, H. (1982). El Interaccionismo Simbólico: Perspectiva y Método. Barcelona: HORA, S.A
4. Blanchard, P. (1994). Teaching differential equations with a dynamical systems viewpoint. *College Mathematics Journal,* 25(5), 385-393. doi: 10.2307/2687503
5. Buchanan, J. L., Manar, T. J. y Lewis, H. (1991), Visualization in diferrential equiations, Visualization in Teaching and Learning Mathematics, USA, 139-146.
6. Godino, J. (2002). Un Enfoque Ontológico y Semiótico de la Cognición Matemática. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 22. Recuperado de: http://www.ugr.es/~jgodino /funciones-semioticas/04_enfoque_ontosemiotico.pdf
7. Godino, J., Batanero, C. (1994). Significado institucional y personal de los objetos matemáticos. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. Recuperado de: http://www.ugr.es/~jgodino/funciones-semioticas/03_SignificadosIP_RDM94.pdf
8. Hitt, F. (2013). Aprendizaje de las matemáticas en ambientes de colaboración y resolución de problemas y de situaciones problemas. Quebeq, Cánada: UQAM, Départementde Mathématiques.
9. Hitt, F., y Quiroz, S. (2017). Aprendizaje de las matemáticas a través de la modelación matemática en un medio sociocultural ligado a la teoría de la actividad. *Revista Colombiana de Educación*, (73), 151-175.
10. de représentation des équations différentielles dans un environnement de géométrie dynamique*. Actes du Colloque Intégration des Technologies dansl'Enseignement des Mathématiques* (1), 1-11.
11. Pantoja, R. Guerrero, L., Ulloa, R. Nesterova, E. (2016). Modeling in problem situations of daily life. *Journal of Education and Human Development*, 5(1), 62-76.
12. Pantoja, R., Sánchez, M. T., López, M. E., Pantoja-G, R. (2021). Examples to relate school mathematics to everyday life mediated by video, Tracker and GeoGebra. *South Florida Journal of Development,* 2 (3), 4417-4434. DOI: 10.46932/sfjdv2n3-046.

FERRITAS MIXTAS DE Cu2+/Zn2+ DEPOSITADAS EN PET, PARA LA DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO EN AGUA

Mónica Araceli Camacho González[1], María Fernanda Ramírez Ayala[2], Carlos Alfredo Zamora Valencia[1], Fernando Castro Canseco[1] y Diana Estefanía Rangel Ramírez[1]

[1]División de Procesos Industriales, Universidad Tecnológica de Tecámac,55749, México, MÉXICO;
[2] Facultad de Ciencias, UNAM, 04510, Ciudad de México, MÉXICO. .
acamachog@uttecamac.edu.mx

RESUMEN

La contaminación del agua es un problema creciente en el mundo, las actividades industriales y domésticas descargan en dosis bajas una amplia lista de contaminantes orgánicos denominados contaminantes emergentes (CE) o recalcitrantes (CR), caracterizados por una elevada estabilidad química cuya degradación es muy limitada por los consorcios microbianos empleados en los tratamientos biológicos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's) reduciendo la efectividad de depuración del agua tratada. En respuesta a esta problemática, los procesos de oxidación avanzada como la fotocatálisis heterogénea son la alternativa inmediata para transformar estos contaminantes recalcitrantes en sustancias menos tóxicas. En el presente trabajo se realizó la síntesis in situ de ferritas mixtas de Cu^{2+}/Zn^{2+} ($Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$) por el método hidrotermal en condiciones alcalinas para su empleo como fotocatalizador en la degradación de azul de metileno (AM); las ferritas sintetizadas se depositaron en la superficie modificada de fibras de PET por hidrólisis alcalina a 170°C durante 5 h, formando el nanocompuesto $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$/PET, el cual podrá ser recuperado fácilmente al final del proceso fotocatalítico. Los datos espectrales UV-vis de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ se transformaron de acuerdo a la ecuación de Tauc en el gráfico $(\alpha h\nu)^2$ vs. $(h\nu)$, el intercepto de la línea tangente a la curva con el eje y = 0 corresponde a 2.17 eV (570 nm) que es el valor estimado de su bandGap lo que indica que las ferritas mixtas presentan una fotoactividad a la luz visible. Por otro lado, por espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier se observó una banda a 546 cm^{-1} correspondiente a la vibración del enlace M-O relacionada a la formación de óxidos metálicos de Fe, Cu y Zn. En 400 mL de una solución de 5 ppm de AM y H_2O_2 en una proporción 1:32, se colocaron 0.25 ppm de ferritas, el sistema en agitación constante se mantuvo bajo la irradiación de 3 lámparas de LED's de luz visible (7W, 600 lúmenes, espectro de emisión de 410 a 750 nm) durante 24 h, La degradación del AM se realizó por triplicado midiendo la concentración residual a partir de los valores de absorbancia a 664 nm, el porcentaje medio de degradación fue de 83.28% con una desviación estándar de 3.625%.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las aguas residuales y efluentes presentan contaminantes de tipo emergente en pequeñas trazas (colorantes, pigmentos, medicamentos, plaguicidas, etc.), que no son eficientemente removidos por procesos convencionales como el biológico (aerobio y/o anaerobio), oxidación térmica, cloración, ozonización, lo que hace que estos procedimientos resulten inadecuados [1].

A lo largo de los últimos años, la remoción de este tipo de contaminantes se realiza aplicando procesos avanzados de oxidación [2]. En este campo, la fotocatálisis heterogénea, ha destacado en la comunidad científica como una tecnología verde y sustentable, atractiva para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias orgánicas tóxicas. La técnica se basa principalmente en el uso de materiales semiconductores, entre los cuales se puede mencionar al TiO_2, WO_3, Bi_2O_3, ZnO, Fe_2O_3, así como óxidos bimetálicos [3]. Estos materiales absorben fotones de luz con energía equivalente a su energía de banda prohibida, promoviendo la formación de pares hueco-electrón que desencadena la formación de radicales hidroxilos reactivos (•OH) con elevado poder oxidativo que favorecen reacciones sucesivas de óxido-reducción para degradar moléculas orgánicas complejas en compuestos de menor peso molecular y toxicidad o, en casos ideales, hasta CO_2 y H_2O.

Los óxidos de hierro a escala nanométrica se han empleado eficientemente para la degradación de contaminantes emergentes por fotocatálisis, entre ellos, las ferritas han probado su efectividad para degradar pigmentos como el azul de metileno en solución mediante la reacción Fenton [2]. En este trabajo se presenta la síntesis controlada de ferritas mixtas de Zn^{2+}/Cu^{2+} ($Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$) depositadas in situ sobre fibras de PET por el método hidrotermal para su fácil recuperación posterior a la degradación fotocatalítica Fenton de azul de metileno en medio acuoso [4].

TEORÍA

La contaminación del agua es un problema creciente en el mundo, con graves consecuencias para la salud humana y el medio ambiente debido al carácter vital que representa el agua para todos los seres vivos [5]. Las actividades industriales y domésticas envían a los cuerpos de agua una amplia lista de productos denominados contaminantes emergentes (CE) o recalcitrantes (CR), los cuales generalmente son metales pesados y compuestos orgánicos de elevada estabilidad química como los fármacos, herbicidas, pesticidas, detergentes, combustibles, aditivos, plastificantes, tensoactivos, colorantes, tintes textiles, por citar algunos [6]. Sus efectos pasan desapercibidos porque carecen de regulación y monitoreo, lo que suscita una considerable preocupación ya que a pesar de que su concentración es sumamente inferior a la de otros contaminantes, representan un gran riesgo a la salud global [7].

Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes se caracterizan por tener una estructura muy estable químicamente, no pueden ser degradados por los métodos de depuración convencionales ni por procesos naturales o biológicos. Estos se resisten al ataque de los microorganismos o de cualquier tipo de mecanismo de degradación sea biológico o químico, tales como los compuestos de hidrocarburos, fenoles, disolventes halogenados, colorantes y compuestos aromáticos. Estos comprenden una amplia lista de productos de aplicación cotidiana, doméstica e industrial; son ingredientes de productos farmacéuticos (hormonas, antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, entre otros), de cuidado personal (shampoo, pasta de dientes, cosméticos), herbicidas, pesticidas, detergentes, combustibles, aditivos, plastificantes, tensoactivos, colorantes, tintes textiles, nutracéuticos, entre otros [8].

Los CE generan una elevada incertidumbre debido a que no se conocen del todo sus posibles efectos adversos en el ambiente y en los organismos, y su posible transformación en muchos otros productos secundarios cuyo impacto y persistencia puede ser aún más nocivo y alarmante [9]. En este contexto, el desarrollo de tecnologías sustentables para contrarrestar el impacto que estos CE representan para el planeta y la vida que habita en él [8], su degradación incluso con tecnologías avanzadas como la ultrafiltración y la osmosis inversa resultan inefectivos por lo que su degradación es un desafío importante en el tratamiento de aguas residuales por su complejidad y costo [10, 11].

Actualmente, gracias al auge del área nanotecnológica, se han propuesto diversas alternativas para tratar estos contaminantes, al implementarse oportunamente procesos de oxidación avanzada (POA) como la fotocatálisis heterogénea [12] como un método complementario en las estaciones de tratamiento de aguas residuales (EDAR) mediante sistemas de columnas de flujo continuo para degradar estos contaminantes nocivos y disminuir significativamente su concentración [13].

Procesos de Oxidación Avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son métodos altamente estudiados debido a su excelente capacidad para eliminar contaminantes no biodegradables y microorganismos patógenos. Estos procesos son muy útiles como complemento a tratamientos físicos, químicos y biológicos convencionales en EDAR, con el fin de degradar en su totalidad contaminantes altamente estables [14] y han demostrado ser efectivos en la eliminación de fármacos, pesticidas o productos de cuidado personal, entre otros [15]. Los POA's se dividen en dos grandes grupos: Procesos NO fotoquímicos y Procesos fotoquímicos, éstos últimos como su nombre lo indica, requieren presencia de luz para ser activados; esta característica permite optimizar los tiempos de aplicación al aumentar su velocidad de reacción, disponibilidad para el uso de una amplia gama de oxidantes, condiciones de

reacción más amigables, ya que se evitan cambios bruscos de pH y finalmente, la disminución de costos.

La amplia gama de tecnologías fotoquímicas, están basadas en la generación de especies radicales altamente oxidantes y de baja selectividad, como son los radicales hidroxilos (OH•) y superóxido (•OO•), entre otros [16]. Estas especies permiten degradar los contaminantes hasta CO_2 y H_2O, aunque habitualmente se generan subproductos orgánicos biodegradables y no tóxicos, como son los ácidos orgánicos de cadena corta. La fotocatálisis ha destacado por ser un proceso avanzado de oxidación fotoquímica sustentable para la remediación de aguas contaminadas. Se basa en la absorción de fotones de luz (visible o UV) con energía suficiente, igual o superior a la energía de banda prohibida de un material fotocatalizador (receptor de energía), que promueve la excitación de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, desencadenando con ello la formación de pares hueco-electrón (h^+- e^-) responsables del fenómeno de fotocatálisis [17] debido al proceso de generación de radicales hidroxilos (OH•), Figura 1. Se ha demostrado que el ataque repetido de los contaminantes orgánicos por el OH• conduce finalmente a la oxidación completa [18]. Algunos materiales que pueden ser utilizados como fotocatalizadores son semiconductores como: TiO_2, ZnO, WO_3, Fe_2O_3 y Fe_2O_4 (óxidos sencillos), CdS, ZnS (sulfuros) y hasta mezclas de óxidos como $BiVO_4$, Bi_2WO_6, $BiTaO_4$, $AgVO_3$ [19].

$$Fotocatalizador + hv \longrightarrow fotocatalizador + e^-_{BC} + h^+_{BV}$$

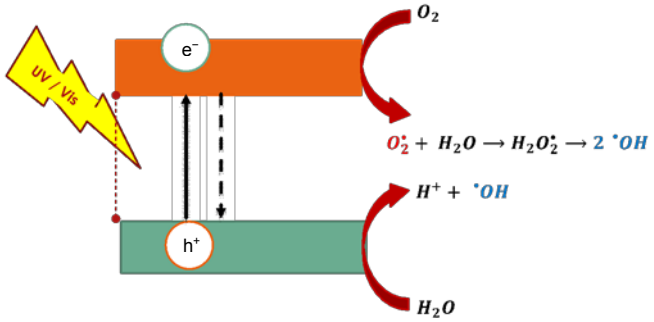


Figura 6. Proceso de generación de radicales hidroxilos (OH•) en la superficie de un material fotocatalizador.

Compuestos de óxidos de hierro.

Los nanocompuestos de Fe han demostrado ser materiales prometedores para la degradación de contaminantes recalcitrantes, gracias a sus propiedades fotocatalíticas y adsorbentes. Las ferritas son compuestos químicos con propiedades ferromagnéticas, formados por óxidos de hierro, siendo sus principales componentes el Fe_2O_3 y el FeO. Estos compuestos pueden estar químicamente unidos a través de un elemento metálico, como Mn, Fe, Co, Ni, Cu o Zn [20]. Su fórmula general es $(A)[B]_2O_4$, donde (A) representa cationes divalentes de metales de transición (como Fe^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Mg^{2+} y Ni^{2+}), y [B] corresponde a cationes trivalentes de hierro (Fe^{3+}), los cuales ocupan intersticios con coordinaciones tetraédrica y octaédrica [21, 22]. Para propósitos catalíticos las ferritas a escala nanométrica son generalmente magnéticas, lo que facilita su recuperación usando un imán. Para el caso de la nanoferrita, sólo el cobre, cobalto, níquel y zinc se están aplicando en las reacciones catalíticas, principalmente los procesos de la síntesis y destrucción de compuestos orgánicos [23, 24].

Las ferritas han demostrado ser eficientes en la eliminación de fosfatos y otros contaminantes del agua debido a su alta área superficial además de presentar una buena estabilidad química, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en ambientes acuosos y en procesos de remediación ambiental. El efecto conjugado los iones metálicos Cu^{2+} y Zn^{2+} a escala nanométrica en la ferrita, potencializa la degradación de compuestos orgánicos debido a los anchos de banda prohibida de ambos iones, [25, 26]. Adicionalmente se debe mencionar la actividad bactericida de estas NP´s para reducir la carga bacteriana presente en aguas residuales. Se sabe que tanto el Zn^{2+} como el Cu^{2+} reaccionan con las proteínas que contienen azufre, esto conduce a la inhibición de las funciones

enzimáticas de bacterias como *E. coli, B. subtilis, Pseudomonas fluorescens, L. monocytogenes, Salmonella enteritidis, S. aureus, S. typhimurium* [27, 28]; a escala nanométrica, éstas NP´s atraviesan fácilmente la membrana celular de éstos microorganismos.

Inmovilización de fotocatalizadores

Se ha demostrado que la eficiencia fotocatalítica de los polvos y las películas es comparable, pero derivado de la pérdida de área superficial efectiva durante la inmovilización del fotocatalizador por deposición sobre la superficie de un sustrato, las reacciones redox para la degradación de contaminantes orgánicos toman más tiempo [29]. La depositación del catalizador en un sustrato, supera los inconvenientes de emplear polvos y la velocidad es más rápida si la relación superficie/volumen se incrementa [30]. Las ventajas de trabajar con el catalizador inmovilizado en vez de en suspensión son claras: se evita la separación posterior al tratamiento, su recuperación en unas condiciones óptimas que permitan su reutilización y la re-suspensión del sólido como paso previo del proceso.

La composición del material a depositar, la naturaleza química de la superficie del soporte y, las fases presentes de ambos, tendrán gran influencia en la selección de la técnica de síntesis del material fotocatalizador. Los materiales plásticos como material de soporte para diferentes fotocatalizadores son ampliamente usados, debido a su elevada relación superficie/volumen, adicionalmente, debe considerarse su bajo coste, buenas propiedades mecánicas, flexibilidad para la fabricación, transparencia y alta resistencia a la biodegradabilidad. En este sentido, el uso de fibras de PET como soporte, ofrece una solución innovadora y eficiente para los procesos de remediación de aguas residuales [31], promoviendo la reutilización de este polímero y resultando en un proceso más amigable con el ambiente [32, 33].

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de ferritas mixtas $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ in situ sobre fibras de PET

La síntesis de ferritas de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ por la técnica hidrotermal propuesta por Camacho-González et al. [34] consiste en el uso de cloruro de hierro (III), cloruro de cobre (II) y cloruro de zinc como precursores. Se utilizó hidróxido de sodio como agente mineralizador y agua desionizada como solvente. Primero, se prepararon soluciones acuosas (0.5 M) que contenían Fe^{+3}, Cu^{+2} y Zn^{+2}. Las soluciones se mezclaron en cantidades estequiométricas de acuerdo a la proporción molar de la fórmula de ferritas ($Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$). Las soluciones se mantuvieron en agitación durante 30 min. Luego, el pH se ajustó a 11 utilizando solución de hidróxido de sodio (2 M). El precipitado se lavó con agua destilada tres veces empleando agua destilada y la separación del agua de lavado por centrifugación a 4000 rpm por 15 minutos. El precipitado se re-disolvió en 35 mL de solución de NaOH (2 M), esta solución se vertió en una autoclave revestido con teflón® y se colocó un gramo de fibras de PET previamente lavadas con agua desionizada en un baño ultrasónico por 15 min a 40 kHz para eliminar la suciedad y se secaron a 80 °C durante 90 min para secarlas. La autoclave hidrotermal se sometió a tratamiento térmico en un horno a 170 °C durante 15 h. Finalmente, el producto resultante se lavó por triplicado con agua destilada y se separó por centrifugación (4000 rpm durante 15 min). Finalmente, el producto obtenido se secó a 120 °C durante 8 h. Figura 2. Las muestras de ferrita en polvo y las fibras de PET con ferritas depositadas en la superficie se someten a pruebas de caracterización.

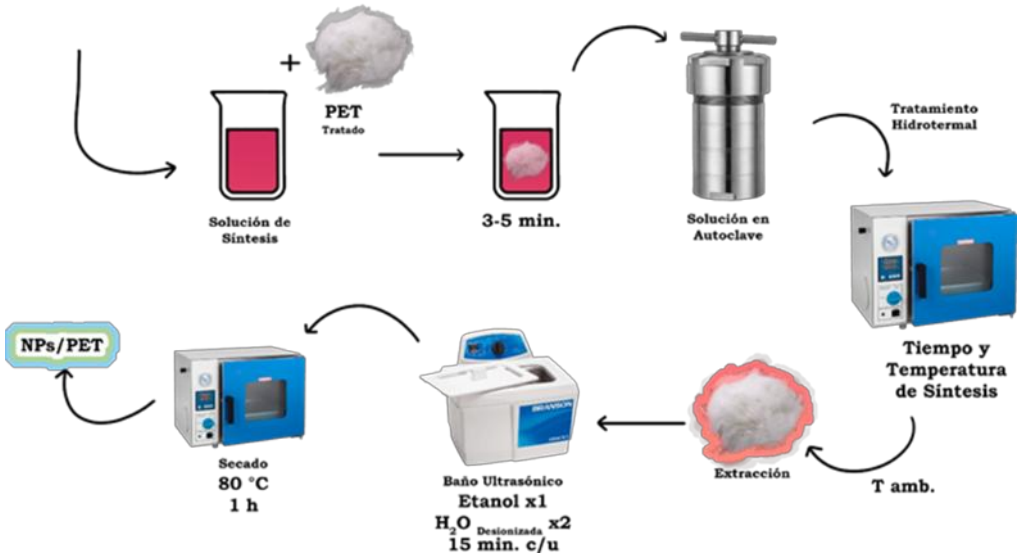


Figura 2. Metodología para la síntesis in situ de ferritas de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ por la técnica hidrotermal sobre fibras de PET.

Caracterización de ferritas mixtas ($Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$) y el compuesto $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$/PET

La caracterización es el estudio de cómo un material responde a diversas perturbaciones o interferencias (eléctricas, luminosas, térmicas, magnéticas, etc.), con el fin de obtener información sobre su composición, propiedades estructurales, topología, topografía y morfología. A continuación, en la Tabla 1, se detallan las técnicas y el equipo de caracterización utilizado.

Tabla 3. Técnicas de caracterización e información proporcionada.

Técnica	Acrónimos en inglés	Información de Interés
Espectroscopía UV-Visible (UV-Vis)	**UV-Vis**	Límite de absorbancia y tamaño de ancho de banda (band gap).
Difracción de Rayos X, en polvo (DRX)	**XRD**	Identificación de fases presentes, estructura cristalina y tamaño de partícula.
Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	**SEM**	Morfología de la superficie y mapeo de elementos por EDS.
Análisis de tamaño de partícula (ATP)	**PSA**	Distribuciones de tamaño de partícula.
Espectroscopía Infrarroja por la Transformada de Fourier (IRTF)	**FT-IR**	Identificación de enlaces átomo-átomo, grupos funcionales y estructuras moleculares.
Magnetometría de Muestra Vibrante (MMV)	**VSM**	Comportamiento combinado: ferromagnético y superparamagnético, en consecuencia, del tamaño nanométrico.

Degradación de azul de metileno.

En un vaso de precipitados de 400 mL se colocaron 250 mL de una solución de azul de metileno (AM) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) cuyas concentraciones fueron 5 mg/L y 160 mg/L respectivamente (1:32), en ella se colocó 1 g de las fibras de PET con ferritas ($Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$/PET). La solución se agito con una propela tipo hélice a 45 rpm durante 30 minutos en una cámara negra (ausencia de luz), para lograr el equilibrio adsorción-desorción, transcurrido éste tiempo, se tomó una alícuota de 5 mL (por succión con una jeringa) y se encendieron 3 lámparas Phillips MR-16 de 6 W cada una, este instante se considera como t=0. Cada dos horas q partir de este instante se tomaron alícuotas de 5 mL para medir la concentración residual de AM por la medida de absorbancia a 664 nm (longitud de onda de máxima absorción del AM), previa preparación de

una curva tipo de [AM] vs. Absorbancia desde 0 a 7 mg/L de AM. Este experimento se realizó por triplicado.

RESULTADOS

Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier.

En el espectro mostrado en la Figura 3 se observa una banda en el rango comprendido entre los 3434 y 1631cm^{-1} relacionada con la vibración de los enlaces OH^-, atribuido a los grupos hidroxilo, indicando la presencia de agua en la estructura. De acuerdo con reportes previos, se ha demostrado que la presencia de este pico es común entre las síntesis por la vía hidrotermal. Las bandas que aparecen entre los 1552 y 1340 cm^{-1} aproximadamente pertenecen a enlaces con el ion Cl^- derivado del empleo de cloruros como precursores para ambos materiales. Finalmente, de acuerdo con la literatura y a espectros en bases de datos, se establece que el rango entre los 1200 y 200 cm^{-1} representa la huella dactilar de los compuestos de hierro, esto debido a que en los picos de 750 a 400 cm^{-1} se manifiestan las vibraciones relacionadas con los sitios octaédricos y tetraédricos característicos de las estructuras espinela inversa y espinela normal de los enlaces Fe-O, que en el caso de la ferrita comprenden los enlaces Fe-O y M-O (Zn-O y Cu-O), ubicados en la banda 546 cm^{-1}. [35, 36].

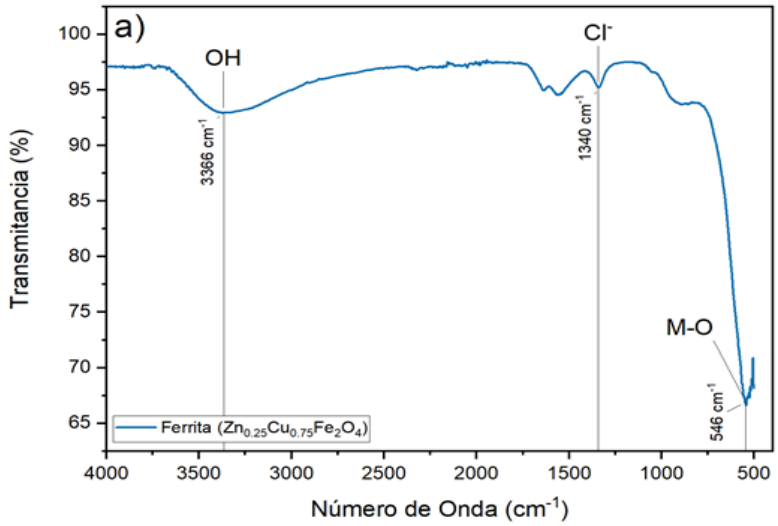


Figura 3. Espectros FT-IR de las muestras de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$.

Difracción de rayos X.

Los polvos de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$, los polvos fueron evaluados usando el método de Difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés). En la figura 4 se muestran el difractrograma obtenido a temperatura ambiente, de las ferritas obtenida por el método hidrotermal. En general, para esta muestra, se observan patrones bien definidos y de mediana intensidad, indicando cristalinidad evidente con respecto al patrón reportado (carta 01-077-0013) [37]. La reflexión más fuerte se presenta en el plano (311), lo que denota la fase espinela. Los picos indexados a (220), (400), (422), (511) y (440) son planos característicos de una celda unitaria cúbica, lo cual corresponde a una estructura cúbica de tipo espinela [38].

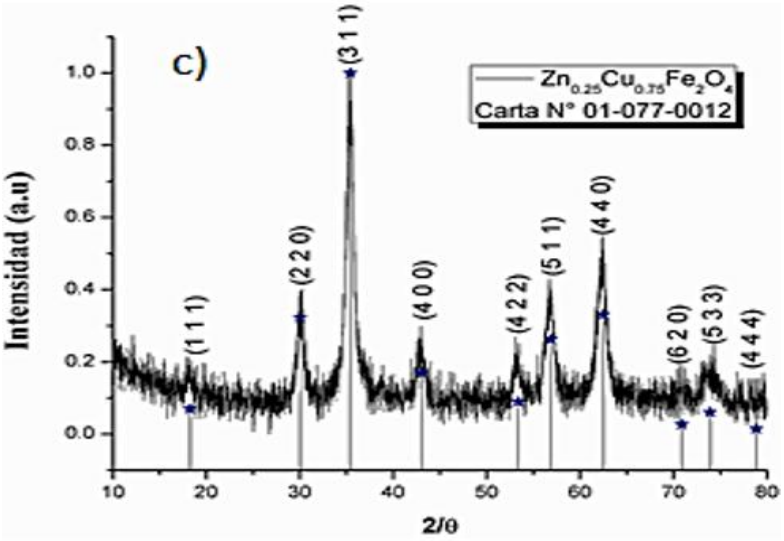


Figura 4. Difractograma de ferrita $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$.

Microscopia electrónica de barrido.

En la Figura 5 podemos observar qué tenemos partículas con elevada aglomeración con una morfología irregular derivada de las interacciones electrostáticas que surgen dentro de la ferrita mixta $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ lo cual hace que nuestro nanocompuesto sea magnético. La forma irregular sugiere un cambio en las propiedades físicas del nanocompuesto como lo puede ser la magnetización, el área disponible para fotocatálisis y su energía de banda prohibida. La distribución de tamaño fue de 290 ± 60 nm, este símbolo, lo que sugiere que hubo un proceso de síntesis relativamente controlado.

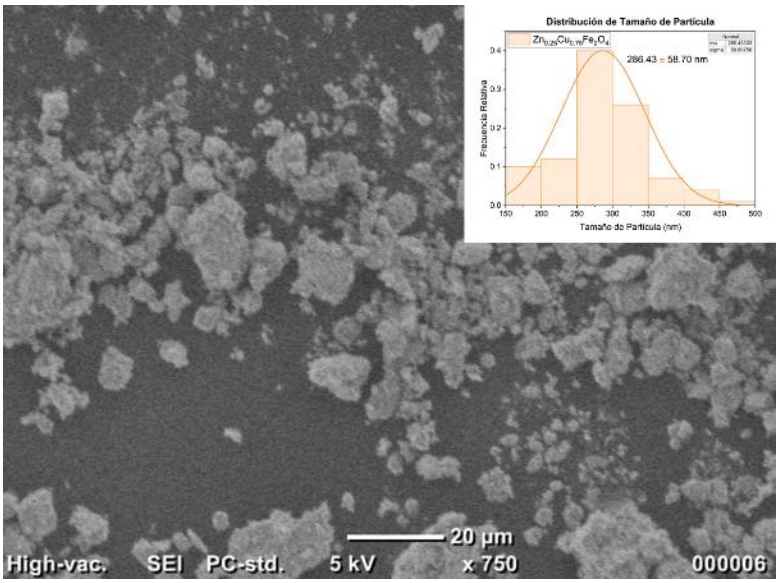


Figura 7. Micrografía Electrónica de Barrido (MEB) de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$, dentro de la imagen el Histograma de la distribución del tamaño de partícula.

Espectroscopia UV-vis.

En la Figura 6, se observa el espectro de absorbancia de la ferrita. Hay una alta absorbancia inicial cerca de 200 nm, seguida de una disminución hasta estabilizarse alrededor de los 250 nm. A partir de este punto, la absorbancia se mantiene relativamente constante con valores bajos, mostrando ligeras fluctuaciones en el rango de 300 a 800 nm. Este comportamiento indica que la ferrita absorbe fuertemente en la región ultravioleta (UV), pero presenta baja absorbancia en la región visible, lo que sugiere que su absorción de luz visible es estable.

El análisis de la energía de banda prohibida (Eg) mediante el método de Tauc indicó un valor de 2.19 eV para la transición indirecta, lo que sugiere que la absorción del material ocurre predominantemente en la región ultravioleta, con una contribución menor en el espectro visible. En comparación con el valor reportado en la literatura de 2.68 eV [39], la ferrita de Cu/Zn sintetizada exhibe una menor Eg, siendo la mejor opción para fotocatálisis el valor de transición indrecta, ya que este evita la recombinación electrónica y a su vez presenta absorción en el espectro visible.

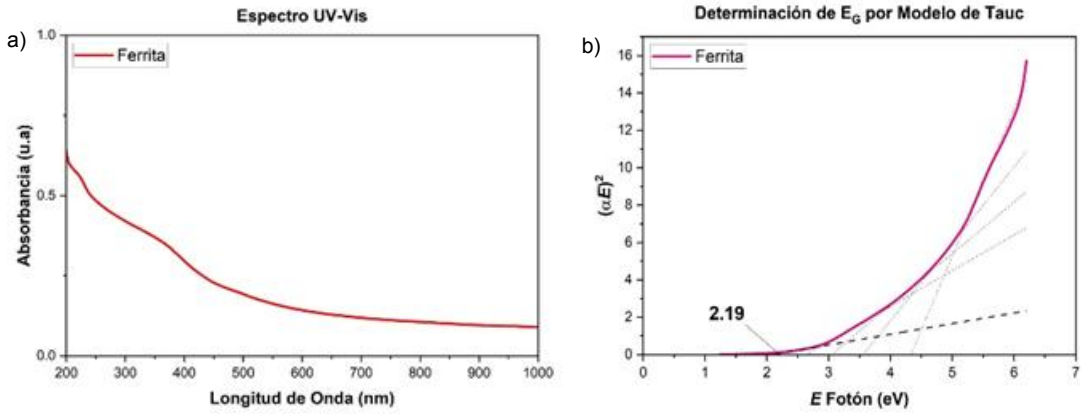


Figura 6. a) Espectro UV-Visible de la ferrita, b) Diagrama Tauc para la determinación del band gap.

Eficiencia de degradación del azul de metileno.

En la Figura 7 se analizan los porcentajes de degradación obtenidos realizando cuatro experimentos, en la cual podemos observar que los mejores en cuanto al porcentaje de degradación fueron los experimentos 2 y 4 que obtuvieron 86.91% y 87.48% respectivamente, aunque los otros dos experimentos tuvieron de igual forma un buen porcentaje de degradación en un periodo de 20 horas con 73.99% en el experimento 3 y 79.65 en el experimento 1. La degradación del AM empleando el sistema $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$/PET es eficiente con un promedio de 83% en 20 h, comparado con los resultados de Camacho-González et al. [34], que empleo polvos de la ferrita y aireación para agitar el sistema de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ degradando arriba del 90% de AM en solo 5 h, lo que indica que la pérdida de área superficial se traduce en pérdida de sitios activos para la fotocatálisis.

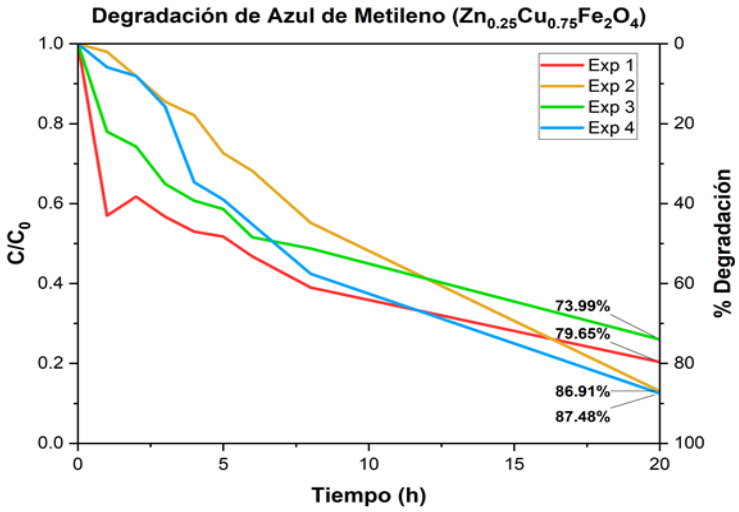


Figura 8. Degradación de AM utilizando el sistema $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$/PET y agitación mecánica.

CONCLUSIONES

La obtención de ferritas mixtas de Zn/Cu $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ una vez establecidas las condiciones de síntesis por la técnica hidrotermal, confirmó la obtención de $Zn_{0.25}Cu_{0.75}Fe_2O_4$ en su fase cubica, espinela inversa por difracción de rayos X, adicionalmente la banda característica observada en 546 cm^{-1} confirma la presencia de los enlaces M-O, esto es Fe−O, Zn−O y Cu−O. La caracterización por microscopía electrónica de barrido, muestra partículas altamente aglomeradas derivado de naturaleza magnética en el orden de 290 ± 60 nm.

La energía de banda prohibida calculada de 2.19 eV ubicó a las ferritas como un fotocatalizador capaz de degradar contaminantes orgánicos cuando absorbe luz del espectro visible, lo que quedó demostrado al degradar en promedio el 83% del AM inicial en 20 h. La perdida de ferritas adsorbidas en la superficie del PET fue despreciable.

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. A. Rios González, “Fotocatálisis: Un Tratamiento Avanzado De Agua Para La Eliminación De Contaminantes Emergentes,” *Impluvium*, vol. .17, 2021.

[2] A. Torres, H. A. Rodríguez, and M. Ayala, “Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica,” *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 26, Oct. 2023, doi: 10.22201/fesz.23958723e.2023.590.

[3] J. A. Rivera-Jaimes, C. Postigo, R. M. Melgoza-Alemán, J. Aceña, D. Barceló, and M. López de Alda, “Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment,” *Science of The Total Environment*, vol. 613–614, pp. 1263–1274, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.09.134.

[4] T. E. Félix-Cañedo, J. C. Durán-Álvarez, and B. Jiménez-Cisneros, “The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City’s water sources,” *Science of The Total Environment*, vol. 454–455, pp. 109–118, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2013.02.088.

[5] C. Arnáiz, L. Isac, and J. Lebrato, “Tratamiento biológico de aguas residuales,” *Revista Tecnología del Agua*, Mar. 2000.

[6] M. R. Garza Román, F. R. Carrillo Pedroza, Ma. D. J. Soria Aguilar, and N. G. Picazo Rodríguez, “Oxidación avanzada: generando radicales oxidantes para la remoción de contaminantes recalcitrantes,” *CienciAcierta*, vol. 16, no. 66, 2021.

[7] L. G. Centeno Calderón, “Efecto de un consorcio microbiano en la eficacia del tratamiento de aguas residuales, Trujillo, Perú,” *Arnaldoa*, vol. 26, no. 1, Apr. 2019, doi: 10.22497/arnaldoa.261.26123.

[8] M. F. R. Ayala, M. A. Camacho González, L. E. Hernández Cruz, A. M. Bolarín Miró, and F. Sánchez De Jesús, “Fotocatálisis Heterogénea Con Ferritas Mixtas Para Remediación De Aguas Residuales,” *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra Y Materiales*, Vol. 5, 2018.

[9] L. P. Espinosa Suárez And J. F. Mendoza Vergara, “Evaluación De La Actividad Fotocatalítica De Manganita De Lantano Dopada Con Lantánidos (Holmio, Samario) En La Eliminación De Contaminantes Recalcitrantes En Agua,” 2020.

[10] M. V. Gerbaldo, M. E. Crivello, S. N. Mendieta, and V. R. Elías, “Degradación de Contaminantes Emergentes Presentes en Efluentes Acuosos, Empleando Catalizadores tipo Ferritas,” *AJEA*, no. 4, Oct. 2019, doi: 10.33414/ajea.4.383.2019.

[11] R. G. Vázquez Velázquez, “Degradación de contaminantes emergentes, empleando materiales semiconductores del tipo MFeO3 (M=La, Bi): evaluación de la actividad fotocatalítica y estudio de secuestradores de especies.,” Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2016.

[12] M. A. PÉREZ LOREDO, “Evaluación de las propiedades ópticas y magnéticas de nanopartículas C-Fe3O4 sintetizadas por el método hidrotermal,” REPORTE TÉCNICO, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TECÁMAC, 2020.

[13] C. REYES CARRILLO, “EMPLEO DE FIBRAS DE PET COMO SUBSTRATO DE FOTOCATALIZADORES,” Reporte Técnico, Universidad Tecnológica de Tecámac, 2023.

[14] G. García, F. Prieto, J. A. Rodríguez, and M. González, “FORMACIÓN DE FERRITAS MAGNÉTICAS MEDIANTE COPRECIPITACIÓN PARA ELIMINAR METALES DE SISTEMAS ACUOSOS,” *ACI*, vol. 1, no. 4, pp. 33–40, 2010.

[15] M. Baselga, S. Jiménez, M. Arruebo, C. Yus, V. Sebastián, and S. Irusta, “Mascarilla quirúrgica desarrollada a partir de micro y nanofibras de PET obtenido de botellas y otros productos desechados,” 2020.

[16] I. N. Strain, Q. Wu, A. M. Pourrahimi, M. S. Hedenqvist, R. T. Olsson, and R. L. Andersson, “Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 3, no. 4, pp. 1632–1640, Jan. 2015, doi: 10.1039/c4ta06191h.

[17] F. J. Esparza-García, S. L. Vera-García, and A. Vázquez-Martínez, “Contaminantes emergentes,” *Cinvestav*, vol. 6, no. 3, 2020.

[18] C. Boelens, B. Rutgerd, L. Cremers, and M. Zwarteveen, *Justicia Hídrica. Acumulación, conflicto y acción social.* Lima: Instituto de Estudios Peruanos, 2011.

[19] A. C. Castañeda Jiménez, “Procesos De Oxidación Avanzada Aplicados En El Tratamiento De Aguas De La Industria Del Petróleo.,” Tesis, Escuela Colombiana De Ingeniería “Julio Garavito,” 2014.

[20] United States Environmental Protection Agency, “Folleto Informativo De Tecnología De Aguas Residuales - Desinfección Con Ozono,” *United States Environmental Protection Agency*, 1999.

[21] R. I. Méndez Novelo, J. A. Pietrogiovanna Bronca, B. Santos Ocampo, And M. R. Sauri Riancho, “Determinación De La Dosis Óptima De Reactivo Fenton En Un Tratamiento De Lixiviados Por Fenton-Adsorción,” *Rev. Int. Contam. Ambie*, vol. 26, no. 3, 2010.

[22] F. J. Sanabria Pérez, J. L. Alanís Méndez, J. M. Pech-Canché, and C. Solis Maldonado, “Principales residuos de medicamentos generados en los hogares y su potencial ecotóxico en Tuxpan, Veracruz,” *Acta Univ*, vol. 29, pp. 1–12, Oct. 2019, doi: 10.15174/au.2019.2398.

[23] M. D. Elizondo Alvarado, “Universitarios evalúan calidad de aguas residuales industriales para su descontaminación,” *Gaceta UNAM*, vol. 16, 2022. Accessed: Sep. 28, 2024. [Online]. Available: https://gacetacomunidad.cuautitlan.unam.mx/2022/04/universitarios-evaluan-calidad-de-aguas-residuales-industriales-para-su-descontaminacion/

[24] L. F. Moretti-Villegas and Y. M. Valiente-Saldaña, “Contaminación Ambiental y sus Efectos en la Salud Publica,” *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 8, no. 1, pp. 257–268, Aug. 2023, doi: 10.35381/r.k.v8i1.2784.

[25] G. Olaiz Fernández, *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".* Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud., 1995.
[26] A. E. Svarch Pérez, *NOM-127-SSA1-2021*. Estados Unidos Mexicanos.- SALUD.- Secretaría de Salud., 2023.
[27] E. Díaz-Cuenca, A. R. Alavarado-Granados, and K. E. Camacho-Calzada, "El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México," *Quivera*, vol. 14, no. 1, pp. 78–97, 2012.
[28] L. D. J. Velázquez-Chávez, I. A. Ortiz-Sánchez, J. A. Chávez-Simental, G. A. Pámanes-Carrasco, A. Carrillo-Parra, and M. E. Pereda-Solís, "Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional," *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 25, Sep. 2022, doi: 10.22201/fesz.23958723e.2022.482.
[29] M. A. Osorio Rivera, "La calidad de las aguas residuales domésticas.," *Polo del Conocimiento*, vol. 6, no. 3, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i3.2360.
[30] A. Pedrozo Acuña, "En la regulación de descargas de aguas residuales ¿quo vadis?," *Perspectivas IMTA*, vol. 2, no. 23, Jun. 2021, doi: 10.24850/b-imta-perspectivas-2021-23.
[31] A. Aguilar barra and R. H. Pérez Espejo, "La contaminación agrícola del agua en México: retos y perspectivas," *Comentarios y Debates*, vol. 39, Apr. 2008.
[32] E. D. Ongley, *Lucha contra la contaminacion agricola de los recursos hidricos*. Roma: Food And Agriculture Organization Of The United Nations, 1997.
[33] J. De Anda Sánchez, "Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México," *Sociedad y Ambiente*, vol. 5, pp. 119–143, 2017.
[34] M. A. Camacho-González, M. Quezada-Cruz, G. I. Cerón-Montes, M. F. Ramírez-Ayala, L. E. Hernández-Cruz, and A. Garrido-Hernández, "Synthesis and characterization of magnetic zinc-copper ferrites: Antibacterial activity, photodegradation study and heavy metals removal evaluation," *Mater Chem Phys*, vol. 236, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.121808.
[35] C. J. Cartagena, "Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmaceuticos," *Rev Lasallista Investig*, vol. 8, no. 2, 2011.
[36] M. Janet Gil, A. María Soto, J. Iván Usma, and O. Darío Gutiérrez, "Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments," *Producción + Limpia*, vol. 7, no. 2, Dec. 2012.
[37] R. Leandro De Souza and M. Tubino, "Spectrophotometric Determination of Diclofenac in Pharmaceutical Preparations," *J. Braz. Chem. Soc*, vol. 16, no. 5, pp. 1068–1073, 2005.
[38] L. Lonappan, S. K. Brar, R. K. Das, M. Verma, and R. Y. Surampalli, "Diclofenac and its transformation products: Environmental occurrence and toxicity - A review," *Environ Int*, vol. 96, pp. 127–138, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.09.014.
[39] A. F. Keb Canul, "Mecanismo de los AINES y antiinflamatorios derivados para el control del dolor y la inflamación. Uso de antiinflamatorios en odontología.," *Revista de la Asociación Dental Mexicana*, vol. 79, no. 1, pp. 38–47, 2022, doi: 10.35366/103817.
[40] T. O. Uwah, E. I. Akpabio, D. E. Ekpa, A. E. Akpabio, and J. Godwin, "PRELIMINARY INVESTIGATIONS INTO THE PHYSICOCHEMICAL AND COMPACTION CHARACTERISTICS OF MODIFIED STARCH OF DISCOREA ALATA USING DICLOFENAC SODIUM TABLET," *Int J Pharm Pharm Sci*, vol. 10, no. 7, p. 66, Jul. 2018, doi: 10.22159/ijpps.2018v10i7.23730.

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMPOSITOS DE POLI(3-HEXILTIOFENO) Y QUITOSANO PARA LA DETECCIÓN DE IONES DE NÍQUEL EN AGUA

S.P Casarrubias, M.E. Nicho-Díaz, and J. Castrellón-Uribe

Laboratorio de síntesis y caracterización de polímeros, Laboratorio de sensores fotónicos. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM. Av. Universidad 1001, col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca Mor. stefanny.palacios@uaem.edu.mx

RESUMEN

La contaminación del agua por níquel es un problema ambiental que ocurre cuando este metal se encuentra en concentraciones elevadas. Su presencia puede deberse a fuentes naturales, como la erosión de rocas, o por actividades humanas como la metalurgia, la minería, la fabricación de baterías y la contaminación industrial. Los métodos actuales para detectar metales pesados en el agua requieren tratamientos químicos previos, además de equipos costosos y voluminosos, lo que limita su uso a laboratorios especializados. Actualmente, se están investigando nuevos materiales con propiedades ópticas para aplicaciones en el monitoreo óptico de metales pesados en el agua.

En este trabajo se reporta la síntesis por método de mezcla y caracterización de biocompositos basados en poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) y quitosano (CHT), obtenidos con diferentes concentraciones de CHT (25, 50 y 75 % en peso). Se analizó la respuesta óptica de estos biocompositos cuando fueron inmersos en una solución de iones de níquel. Los materiales obtenidos fueron caracterizados mediante diversas técnicas: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de energía dispersiva de rayos X (EDS) y espectroscopía UV-Vis.

El análisis FTIR permitió identificar que la interacción entre el P3HT y el CHT fue únicamente física. Se observó una disminución en las señales correspondientes a los grupos amino y al anillo de tiofeno tras la exposición de los compositos al contaminante, lo que sugiere la participación activa de estos grupos en la interacción con los iones de níquel. El estudio morfológico mediante SEM evidenció que la superficie de las películas, inicialmente homogénea, experimenta cambios significativos tras el contacto con Ni^{2+}, adoptando una morfología rugosa con formación de cúmulos. Además, el análisis EDS confirmó la presencia de los elementos constituyentes del compuesto y la incorporación de iones de níquel.

En el análisis UV-Vis realizado a los compositos después de entrar en contacto con los iones Ni^{2+} en el rango de longitud de onda de 190 a 1100 nm, se observó un desplazamiento del pico máximo en 500-520 nm (correspondiente a la banda π-π * del P3HT) hacia longitudes de onda menores, acompañado de una reducción en su intensidad. Este fenómeno se atribuye a la interacción de los enlaces π-π * con los iones Ni^{2+}. Asimismo, se evidencia la interacción del CHT con los iones metálicos, reflejada en el aumento de la intensidad de las señales detectadas en el rango de 290-315 nm. Finalmente, los resultados obtenidos sugieren que los biocompositos de P3HT y CHT tienen un gran potencial para la detección de iones de metales pesados en agua, representando una alternativa prometedora para aplicaciones en el desarrollo de sensores ópticos.

INTRODUCCIÓN

El níquel es un metal pesado ampliamente utilizado en diversas industrias, como la metalurgia, la fabricación de baterías y la producción de aceros inoxidables. Sin embargo, su presencia en el agua representa un riesgo ambiental y para la salud humana, ya que puede provocar efectos tóxicos en el organismo, incluyendo reacciones alérgicas, problemas dermatológicos y daños en el sistema respiratorio y renal [8].

Para abordar este problema, se han desarrollado materiales poliméricos capaces de detectar selectivamente iones de níquel en medios acuosos. Entre estos, el poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) y el CHT han demostrado ser materiales prometedores [7]. El P3HT, un polímero conductor, es ampliamente utilizado en sensores debido a su alta sensibilidad a cambios en la concentración de iones metálicos, lo que permite la detección electroquímica del níquel [3]. Por otro lado, el CHT, un biopolímero derivado de la quitina, presenta una alta capacidad de adsorción de metales pesados gracias a la presencia de grupos funcionales amino e hidroxilo, lo que facilita la captura de iones de níquel en soluciones acuosas [9].

La combinación de estos materiales en sensores y sistemas de monitoreo ambiental ofrece una alternativa eficiente, económica y sostenible para la detección de níquel en el agua. Su aplicación es crucial para garantizar la calidad del agua y prevenir la contaminación, contribuyendo así a la protección del medio ambiente y la salud pública.

TEORÍA

Detección del níquel.
La detección de metales pesados en el agua se puede realizar mediante diversos métodos analíticos tradicionales, que han sido utilizados durante décadas para determinar la presencia y concentración de níquel en muestras de agua. En la siguiente tabla se describen las ventajas y desventajas de los métodos de detección más utilizados [10,11].

Tabla 1. Métodos tradicionales de detección de níquel.

Método	Ventajas	Desventajas
AAS (Espectrofotometría de absorción atómica)	Buena sensitividad (mg/L) Específico para metales Accesible	Necesita equipo y técnicos especializados
ICP-OES (Espectrofotometría de emision óptica con plasma)	Análisis multielemental Rápido Buena sensitividad	Costo medio-alto del equipo Requiere gases y mantenimiento. No tan sensible.
ICP-MS (Espectrometría de masas con plasma)	Altísima sensitividad Permite análisis traza	Muy costoso. Requiere personal altamente calificado. Riesgo de interferencias isotópicas.
Colorimetría (uso de dimetilglioxima u otros reactivos)	Económico y sencillo Útil para pruebas rápidas o de campo No requiere equipo sofisticado	Baja especificidad. Sensitividad limitada.
Métodos electroquímicos	Portátiles y de bajo costo. Buena sensitividad en algunos casos. Detección rápida.	Susceptibles a interferencias químicas. Requieren frecuente calibración. Sensitividad variable en diversas condiciones.

P3HT en sensores de níquel.
El poli(3-hexiltiofeno) (P3HT) es un material semiconductor orgánico que ha sido ampliamente utilizado por sus propiedades electrónicas y su capacidad de formar películas delgadas [2]. En el campo de los sensores, la mayoría de las investigaciones en P3HT se han centrado en la detección de gases como el formaldehído [1]. Sin embargo, su estructura conjugada y sus propiedades electrónicas sugieren un potencial en la detección de iones metálicos [3, 7]. Hasta la fecha, no se han encontrado estudios específicos en donde se utilice P3HT puro para la detección de metales

pesados como el níquel, aunque los polímeros conductores han mostrado buen desempeño en la detección de diversos iones metálicos pesados en soluciones acuosas.

Quitosano (CHT).

El CHT es un biopolímero derivado de la quitina, que se encuentra en los exoesqueletos de crustáceos, hongos y algunos insectos. En este proyecto se utilizó *Litopenaeus vannamei* (camarón blanco del Pacífico), una de las mejores fuentes para la extracción de CHT debido a su alta disponibilidad, al ser una de las especies con mayor producción a nivel mundial [5]. Además, el exoesqueleto tiene un alto porcentaje de quitina, lo que permite obtener mayores rendimientos de CHT en comparación con otras fuentes naturales [4]. La quitina extraída del exoesqueleto de camarón también es más fácil de procesar debido al menor contenido de carbonato de calcio en comparación con otros crustáceos [6].

.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de CHT.

Para la síntesis de CHT se siguieron diferentes etapas que se describirán a continuación (figura 1).

- **Preparación de materia prima**: se utilizaron camarones litopenaeus vannamei. Las cáscaras se lavaron y secaron para hacerlas quebradizas hasta que el peso se volvió constante (5 horas). Posteriormente, una vez seco el exoesqueleto recolectado, se molió hasta obtener un polvo fino usando una licuadora, y fue tamizado utilizando un tamiz de 250 micras.
- **Desmineralización:** se utilizó ácido clorhídrico diluido a 0.25 M para prevenir la hidrólisis de quitina. La solución con el polvo de camarón se mantuvo en agitación constante a 150 rpm durante 180 minutos a temperatura ambiente, la proporción utilizada fue de 40mL/g. Posteriormente el polvo desmineralizado se filtró y recolectó con papel filtro Ahlstrom No.1, se lavó a neutralidad con agua destilada tres veces y se secó en un horno con intervalo de temperatura de (55°C-80°C) durante 24h.
- **Desproteinación:** Se llevó a cabo utilizando NaOH 1 M (20 mL/g) a 70°C por 24h. El tratamiento se repitió 2 veces. La muestra resultante se lavó hasta la neutralidad con agua desionizada y se secó durante 24h en un horno a temperatura de 55°C para obtener la quitina.
- **Desacetilación (DA):** Se utilizó una solución al 50% de NaOH por 24h. Posteriormente se procedió con la desacetilación utilizando una solución de NaOH al 45% (15mL/g) a 110°C por 2h. Luego el CHT resultante se filtró y almacenó en recipientes herméticos.

Síntesis oxidativa (método Sugimoto) del poli(3-hexiltiofeno)

En atmósfera inerte, se agregó gota a gota 3HT (0.5 mL) en 37 ml de cloroformo seco y se utilizaron 1.08g de $FeCl_3$ como agente reactivo que lleva a cabo la polimerización, este paso se concluyó al término de 1 hora aproximadamente.

La mezcla se dejó en agitación constante durante 24 h a temperatura 0°C. Posteriormente, se precipitó el polímero agregando 225mL de metanol. Una vez precipitado el polímero, se filtró con papel filtro de poro chico dentro de un embudo y se lavó con los siguientes solventes:

1. Metanol
2. Acetona
3. Agua

Cada lavado se realizó 3 veces, y se puso en agitación durante 5 minutos entre cada lavado. El metanol se encarga de remover las impurezas oligoméricas utiliza para eliminar los iones de fierro.

Compositos P3HT-CS

Se realizaron compositos P3HT-CHT por método de mezcla en proporciones de 25, 50 y 75% utilizando 20 mg de composito en 2 ml de clorobenceno (C_6H_5Cl), se colocó la mezcla en agitación a 300 rpm por 72h a temperatura ambiente.

Elaboración de películas

Se utilizaron sustratos de vidrio Corning, cortados con dimensiones aproximadas de 0.9 × 2.5 cm. Estos vidrios pueden presentar impurezas superficiales como polvo, grasa, aceites o residuos orgánicos derivados de su manipulación. Para mejorar la adhesión de la película polimérica, los sustratos fueron previamente limpiados mediante el uso de solventes orgánicos. Se empleó acetona, eficaz para disolver grasas y contaminantes orgánicos de baja polaridad, seguida de metanol, el cual permite remover residuos solubles en agua y eliminar trazas de acetona.

La deposición de las películas sobre los sustratos se realizó mediante la técnica de *spin-coating* en atmósfera inerte. Se aplicaron 60 µL de cada compósito, girando a una velocidad de 2000 rpm durante 60 segundos.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se utilizó el equipo Perkin Elmer Spectrum Two, con un rango espectral de 4000-400 cm^{-1}, se colocó la muestra sobre el accesorio ATR asegurando un buen contacto y se registró el espectro. Posteriormente se identificaron las bandas características de los grupos funcionales.

Se analizaron las muestras antes y después de estar en contacto con la solución de $NiCl_2$ a 10 ppm y se observaron los cambios en las bandas características (C=O, N-H, O-H).

Análisis UV-Vis

Una vez realizadas las películas de compositos se realizó el análisis de UV-Vis, utilizando el espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10 Scanning) cuyo rango de medición es de 200 a 1000 nm y utiliza como fuente de luz una lámpara de Xenón. Se realizaron análisis UV-Vis a las películas de biocompositos y posteriormente análisis in-situ utilizando soluciones de $NiCl_2$ a 10 ppm y una celda de cuarzo.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para observar la morfología superficial y la composición elemental de los biocompositos se utilizó el microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6010, las muestras se recubrieron de oro para mejorar la conductividad de la muestra, el voltaje utilizado para el análisis fue de 15kV y el acercamiento para la observación fue 2500X. Se analizaron las muestras antes y después de entrar en contacto con el contaminante ($NiCl_2$).

RESULTADOS

Síntesis de CHT

En la figura 1 se observan las etapas principales de la obtención de CHT a partir de exoesqueleto de camarón

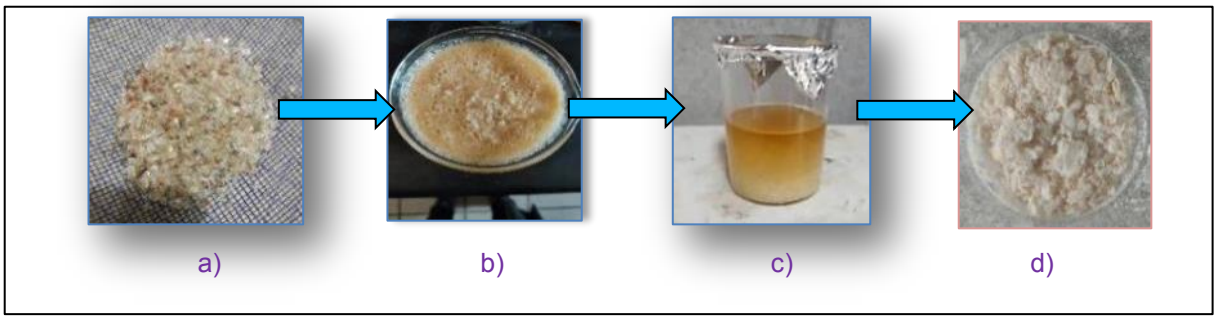


Figura 1. Síntesis de quitosano a partir de exoesqueleto de camarón: a) camarón pulverizado, b) desmineralización, c) desproteinación, d) Quitosano.

Síntesis de P3HT

En la figura 2 se observa el uso de globos y cánulas para mantener la atmósfera de nitrógeno dentro de los matraces utilizados para la síntesis de P3HT y para el secado del cloroformo.

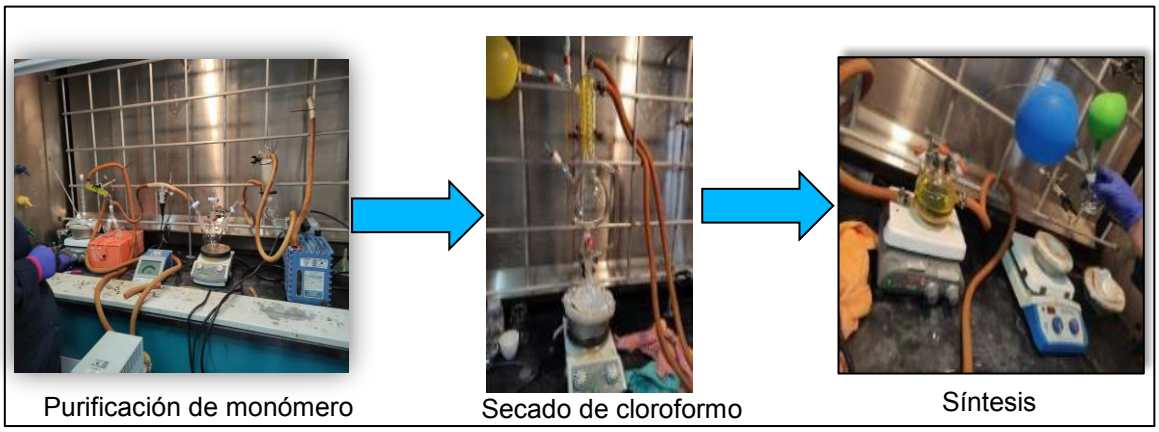


Figura 2. Proceso de síntesis oxidativa del P3HT.

Elaboración de las películas

Se recubrieron los vidrios Corning con la metodología previamente indicada y se midió el espesor de película utilizando un perfilómetro, se puede observar que a medida que el contenido de CHT aumenta, la tonalidad del composito disminuye y la película se vuelve más delgada (tabla 1). Este efecto puede atribuirse a diversos factores. Al aumentar el contenido de CHT, el porcentaje del material conjugado disminuye, lo que reduce la capacidad del sistema para formar capas densas y continuas, además de que impacta directamente con la disminución de la densidad de estados electrónicos π-π*.

Tabla 2. Películas de biocompuesto realizados

Composito	Espesor	Película
P3HT	166.2 nm	
P3HT-CHT 25%	118.14 nm	
P3HT-CHT 50%	90.05 nm	
P3HT-CHT 75%	76.40 nm	

Análisis UV-Vis

La Figura 3 presenta los espectros de absorción UV-Vis de las películas de CHT, P3HT y de los biocompositos obtenidos mediante el método de mezcla, evaluados a diferentes concentraciones. La muestra de CHT exhibe un pico de absorción en la región ultravioleta, dentro del rango de longitud de onda de 190 a 280 nm. Por otro lado, la muestra de P3HT muestra una banda de absorción amplia

en el intervalo de 320 a 650 nm, con un pico máximo alrededor de los ~500 nm, correspondiente a la transición electrónica π-π* característica del P3HT.

En cuanto a los biocompositos P3HT/CHT preparados por el método de mezcla, se observaron las siguientes variaciones espectrales según la proporción de CHT:

- Con 25% de CHT, el biocomposito presentó una banda de absorción entre 320 y 650 nm, con un máximo en ~490 nm.
- Para la muestra con 50% de CHT, el pico máximo se desplazó ligeramente hacia los ~506 nm.
- Finalmente, el biocomposito con 75% de CHT mostró su máxima absorción a ~504 nm, manteniéndose dentro del mismo intervalo espectral.

Estos desplazamientos indican posibles interacciones entre las cadenas del P3HT y los grupos funcionales del CHT, lo cual podría modificar la conjugación electrónica del sistema (véase Figura 3). Así mismo se observa un decremento en la intensidad de la banda π-π* con la incorporación e incremento del CHT, lo que es de esperarse ya que dicha banda se debe al P3HT.

La Figura 4 muestra los espectros de absorción del biocomposito P3HT/CHT con 25% de contenido de quitosano, medidos en el intervalo de longitud de onda de 200 a 1100 nm. Se observa una banda de absorción centrada alrededor de los 506 nm, atribuida a las transiciones electrónicas π-π* del sistema conjugado del P3HT.

Al sumergir la biopelícula en una solución de $NiCl_2$ durante diferentes tiempos de exposición, se registraron variaciones en la intensidad de absorción. En condiciones iniciales (en aire), la absorbancia fue de 0.28. (b) Se tomó la señal al entrar en contacto con la inmersión, tras 5 minutos de inmersión en la solución contaminante, la absorbancia disminuyó notablemente a 0.15. Sin embargo, para tiempos de exposición prolongados, entre 10 y 30 minutos, la absorbancia se estabilizó en torno a 0.26.

Posteriormente, la biopelícula fue retirada de la solución de $NiCl_2$ y secada a temperatura ambiente durante 5 minutos. Una vez seca, se realizó una nueva medición espectroscópica, obteniéndose un valor de absorbancia de 0.23. Estos resultados sugieren una interacción entre el Ni^{2+} y el material activo del sensor, probablemente relacionada con mecanismos de adsorción o dopado irreversible (véase Figura 4).

La Figura 5 presenta los espectros de absorción del biocomposito P3HT/CHT con un 50% de contenido de quitosano, medidos en el rango espectral de 200 a 1100 nm. En condiciones iniciales, sin exposición al contaminante, se observa una banda de absorción con un pico máximo a 512 nm y una absorbancia de 0.17.

A diferencia del biocomposito con 25% de quitosano, en este caso, tras la inmersión de la biopelícula en una solución de $NiCl_2$ durante periodos de 5 a 30 minutos, la absorbancia disminuyó ligeramente y se mantuvo prácticamente constante alrededor de un valor de 0.15. Esta reducción fue acompañada por un leve desplazamiento del pico de absorción hacia los 505 nm (véase Figura 5)

Estos cambios en la absorbancia y el desplazamiento espectral podrían estar relacionados con interacciones entre los iones Ni^{2+} y las cadenas conjugadas del P3HT, modificando ligeramente su estructura electrónica o su grado de orden molecular.

La Figura 6 muestra los espectros de absorción del biocomposito P3HT/CHT con un 75% de contenido de quitosano, medidos en el intervalo de longitud de onda de 200 a 1100 nm. En condiciones iniciales (sin exposición al contaminante), la biopelícula presentó una banda de absorción con un pico máximo a 512 nm y una absorbancia de 0.05.

Estos cambios en la absorbancia y el desplazamiento espectral podrían estar relacionados con interacciones entre los iones Ni^{2+} y las cadenas conjugadas del P3HT, modificando ligeramente su estructura electrónica o su grado de orden molecular.

La Figura 6 muestra los espectros de absorción del biocomposito P3HT/CHT con un 75% de contenido de quitosano, medidos en el intervalo de longitud de onda de 200 a 1100 nm. En condiciones iniciales (sin exposición al contaminante), la biopelícula presentó una banda de absorción con un pico máximo a 512 nm y una absorbancia de 0.05.

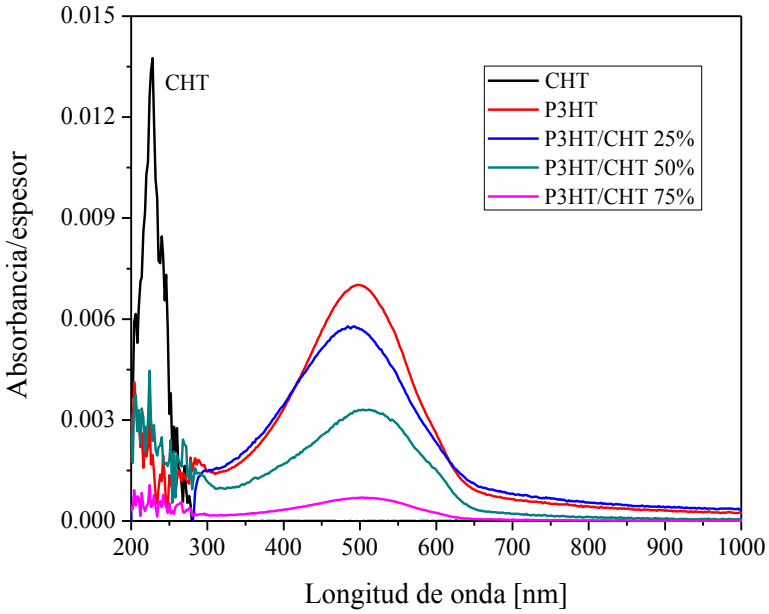


Figura 3. Espectros de UV-Vis de los compositos mezcla.

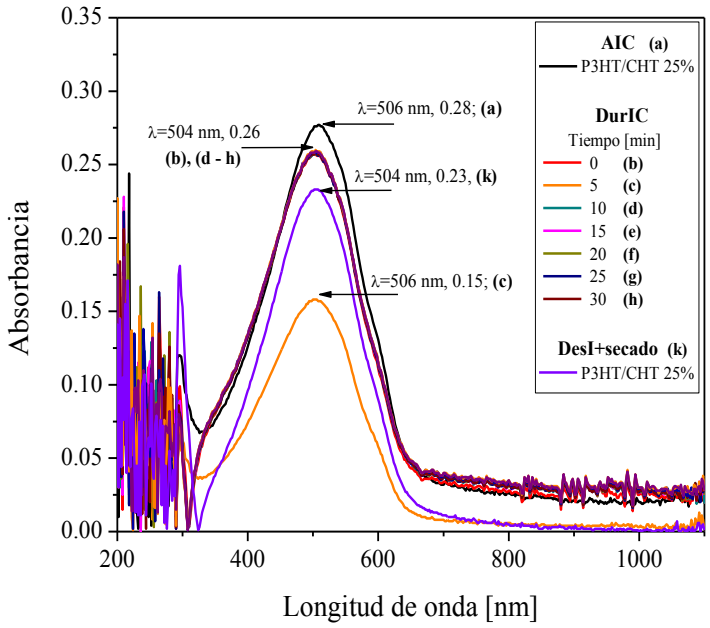


Figura 4. Espectros de absorción de las películas de P3HT-CHT al 25%, a) antes, AIC, bh) durante, DurIC, y k) después de la inmersión en el contaminante (NiCl2), DesI+secado de la muestra.

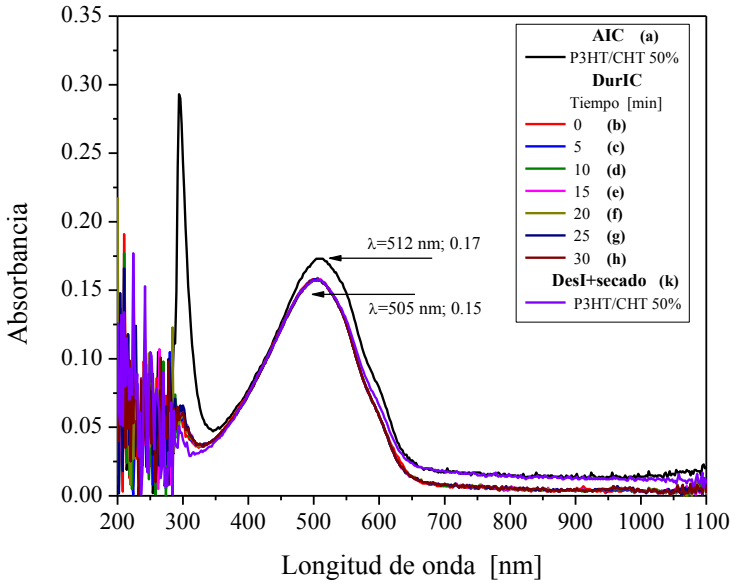


Figura 5. Espectros de absorción de las películas de P3HT-CHT al 50%, a) antes, AIC, b-h) durante, DurIC, y k) después de la inmersión en el contaminante (NiCl2), DesI+secado de la muestra.

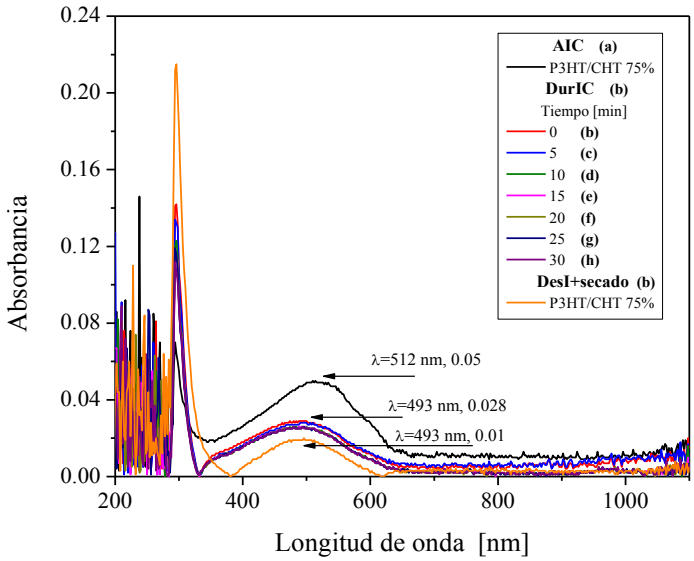


Figura 6. Espectros de absorción de las películas de P3HT-CHT al 75%, a) antes, AIC, b-h) durante, DurIC, y k) después de la inmersión en el contaminante (NiCl2), DesI+secado de la muestra.

Tras la inmersión del composito en una solución de $NiCl_2$ durante un periodo de 5 a 30 minutos, se observó una disminución de la absorbancia, que se estabilizó en un valor de aproximadamente 0.028, con un desplazamiento del pico hacia 493 nm (véase Figura 6).

Posteriormente, la biopelícula fue retirada de la solución contaminante y secada a temperatura ambiente durante 5 minutos. Luego de este proceso, la absorbancia se redujo aún más hasta alcanzar un valor de 0.01, mientras que la posición del pico máximo permaneció constante. Estos resultados indican una disminución progresiva de la respuesta óptica del material frente a la exposición al Ni^{2+}, lo cual podría estar asociado con saturación de sitios activos o una posible desorganización de las cadenas del polímero inducida por el contacto prolongado con el contaminante. Por otro lado, se aprecia un incremento en intensidad de la señal correspondiente al

CHT al entrar en contacto el composito con la solución de níquel. La muestra que fue secada mostró una mayor intensidad de dicha señal. Estos cambios indican una interacción del níquel con la estructura química del composito.

Análisis FTIR

En la figura 7 se puede observar una comparación de los espectros FTIR observados antes y después de que las películas sean inmersas en $NiCl_2$

En el panel a) muestra los espectros de FTIR de P3HT y compositos en película, antes de entrar en contacto con el contaminante, encontrando las siguientes señales:

- P3HT (Negro): Se observan las bandas características de los grupos alifáticos CH (~2952, 2922, 2852 cm^{-1}), el CH del anillo de tiofeno (~3052 cm^{-1}), y las vibraciones simétricas y asimétricas del anillo de tiofeno (C=C) alrededor de 1458 y 1540 cm^{-1}, respectivamente.
- P3HT/CHT 25% (Rojo): Este espectro muestra una combinación de las bandas del P3HT y el quitosano, aunque la proporción de quitosano es menor. Se observan señales en las siguientes regiones:
    - Una banda alrededor de 3300 cm^{-1} (OH y NH del quitosano), aunque menos intensa que en el quitosano puro.
    - Las bandas CH del P3HT (~2920 y 2850 cm^{-1}).
    - Una banda referente a C=O alrededor de 1650 cm^{-1}
    - Bandas alrededor de 1590 cm^{-1} (NH de la amida secundaria del quitosano) y ~1375 cm^{-1} (CN del quitosano), aunque pueden ser sutiles debido a la menor concentración de quitosano.
    - Las bandas del anillo de tiofeno del P3HT (~1540 y 1458 cm^{-1}).
- P3HT/CHT 50% (Azul): En este espectro, la contribución del quitosano es más evidente:
    - La banda de OH y NH alrededor de 3300 cm^{-1} es más pronunciada que en la muestra con 25% de quitosano.
    - Las bandas de C=O ~1650 cm^{-1}, NH ~1590 cm^{-1} y CN ~1375 cm^{-1} del quitosano son más intensas.
    - Las bandas CH del P3HT (~1368 cm^{-1}) y las del anillo de tiofeno también están presentes.
- P3HT/CHT 75% (Verde): Este espectro muestra la mayor influencia del quitosano:
    - La banda de OH y NH alrededor de 3300 cm^{-1} es la más intensa de las mezclas.
    - Las bandas de quitosano son claramente visibles y más intensas que en las otras mezclas.
    - Las bandas características del P3HT (CH alifático y del anillo de tiofeno) aún se observan, pero con menor intensidad relativa debido a la mayor proporción de quitosano.

En el panel derecho b) se hace referencia a los espectros de FTIR de las mismas películas después de haber sido inmersas en una solución de cloruro de níquel. Al comparar estos espectros con los del panel izquierdo, podemos observar los siguientes cambios:

- P3HT (Negro): se observan ensanchamientos en las bandas correspondientes al anillo de tiofeno.
- P3HT/CHT 25% - $NiCl_2$ (Rosa): Se pueden observar algunos cambios en comparación con la muestra sin contaminar:
    - La banda ancha de OH y NH alrededor de 3300 cm^{-1} parece haberse ensanchado ligeramente y podría haber un ligero desplazamiento, lo que podría indicar la

interacción de los grupos hidroxilo y amino del quitosano con iones níquel y/o la presencia de agua de hidratación asociada al níquel.
    - Podría haber una ligera alteración en la región de las amidas (1700-1500 cm^{-1}), lo que también podría ser indicativo de la interacción con los iones metálicos.
    - Las diferencias en la banda alrededor de 1630 cm^{-1}s podría ser atribuida a la interacción del grupo C=O con los iones metálicos.
- P3HT/CHT 50% - $NiCl_2$ (Azul): Los cambios observados en la muestra con 25% de quitosano son más pronunciados aquí:
    - El ensanchamiento y posible desplazamiento de la banda OH/NH alrededor de 3300 cm^{-1} es más evidente.
    - Las alteraciones en la región de NH_2, NH y CN son más notables, sugiriendo una mayor interacción del níquel con los grupos funcionales del quitosano.
    - El ensanchamiento de la banda alrededor de 1630 cm^{-1} (C=O) podría ser más clara.
- P3HT/CHT 75% - $NiCl_2$ (Verde): Esta muestra, con la mayor proporción de quitosano, muestra los cambios más significativos después de la inmersión en cloruro de níquel:
    - La banda ancha de OH y NH es significativamente más ancha y puede estar desplazada, indicando una mayor interacción con los iones níquel y la presencia de agua de hidratación coordinada.
    - Se observan cambios más evidentes en las bandas de NH_2, NH y CN, lo que sugiere una fuerte interacción entre los grupos amida del quitosano y los iones níquel.
    - Modificaciones banda alrededor de 1630 cm^{-1} debido a la mayor cantidad de quitosano que puede coordinar los iones níquel y 6los grupos C=O.

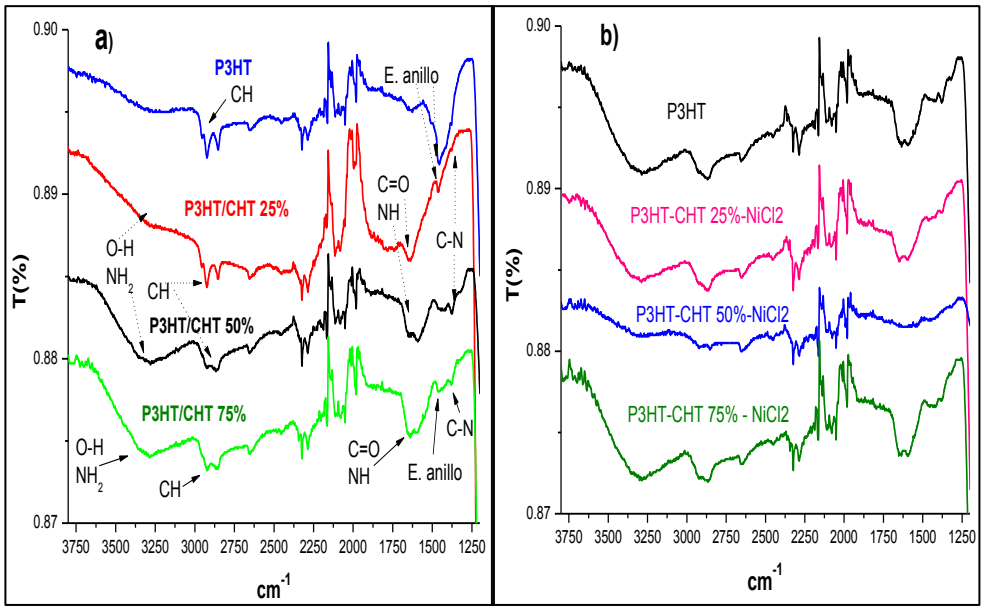


Figura 7. Análisis FTIR de muestras a) sin contaminar b) contaminadas con solución de 10ppm $\mathbf{NiCl_2}$.

Análisis SEM

Se realizaron micrografías de las películas de P3HT y compositos tipo mezcla (25, 50 y 75%) con y sin contacto con el contaminante cloruro de níquel. Se utilizó un voltaje de 15 kV, y acercamientos de 2500X, las películas fueron recubiertas con oro.

En la figura 8, a) la película de P3HT sin contaminar presenta una superficie relativamente lisa y homogénea a baja magnificación, revelando una microestructura granular fina a mayor aumento, sin evidencia de estructuras prominentes o porosidad significativa. En b) la película de P3HT contaminada muestra una superficie significativamente alterada por la presencia de numerosas estructuras esféricas o nodulares que se han depositado o formado sobre la película. Esto indica que la sustancia contaminante (presumiblemente cloruro de níquel o sus productos de reacción) ha interactuado con la superficie del P3HT, modificando su morfología.

En la figura 9, a) la película de P3HT-CHT 25% sin contaminar presenta una superficie más rugosa y heterogénea que el P3HT puro, indicando la presencia y dispersión del quitosano en la matriz polimérica. En b) la película de P3HT-CHT 25% contaminada muestra una superficie significativamente modificada con la formación de depósitos irregulares y un aumento considerable en la rugosidad. Esto sugiere que el cloruro de níquel ha interactuado mayormente con la superficie de la película del composito en comparación con la película de P3HT, dando paso a la formación de estas nuevas estructuras y porosidades.

En la figura 10, a) la película de P3HT-CHT 50% sin contaminar muestra una superficie heterogénea con la presencia de estructuras globulares incrustadas en una matriz diferente, lo que sugiere una separación de fases entre el P3HT y el quitosano. En b) la película de P3HT-CHT 50% contaminada muestra una superficie modificada por la presencia del contaminante. Las estructuras globulares originales han cambiado, y se observa la formación de depósitos irregulares y un aumento significativo en la rugosidad de la superficie.
En la figura 11, a) la película de P3HT-CHT 75% sin contaminar presenta una superficie lisa y homogénea, con la presencia de esferas dispersas que podrían corresponder a imperfecciones de formación. La película parece tener poca rugosidad superficial y no presenta fracturas o defectos estructurales importantes. La distribución de las esferas es uniforme y se evidencian zonas de porosidad marcada, en la parte superior se observa la presencia de una red de quitosano. En b) se observa una modificación aún mayor de la morfología, se observa que las paredes de la red de quitosano están cubiertas por una capa de material con una morfología diferente, posiblemente los compuestos de níquel.

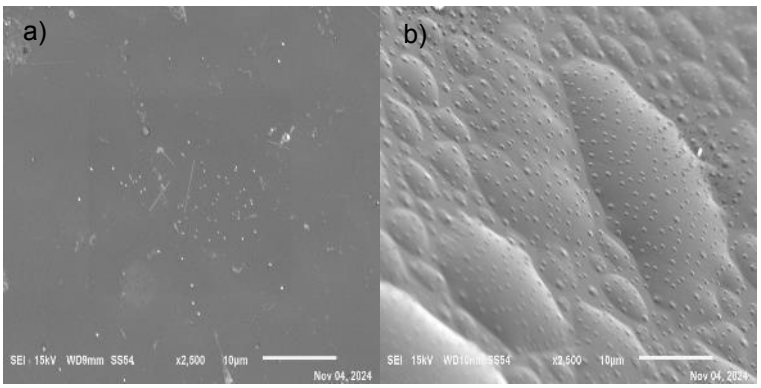


Figura 8. Micrografía de P3HT 2500X. a) Película de P3HT antes de entrar en contacto con NiCl2 y b) Película de P3HT después de ser inmerso en el contaminante y secado.

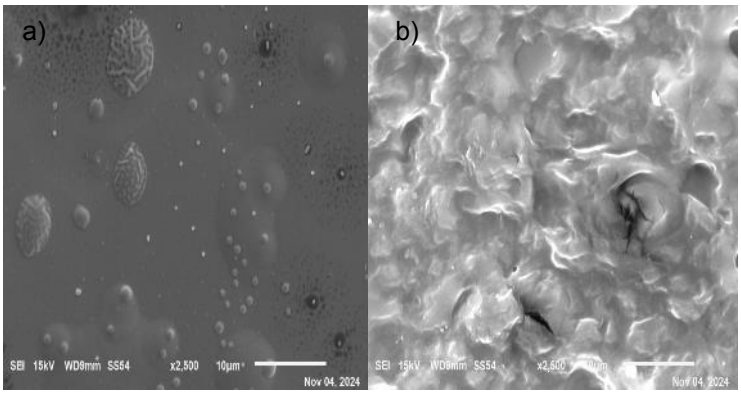


Figura 9. Micrografía de P3HT-CHT 25% a 2500X. a) Película de P3HT-CHT 25% antes de entrar en contacto con NiCl2 y b) Película de P3HT-CHT 25% después de ser inmerso en el contaminante y secado.

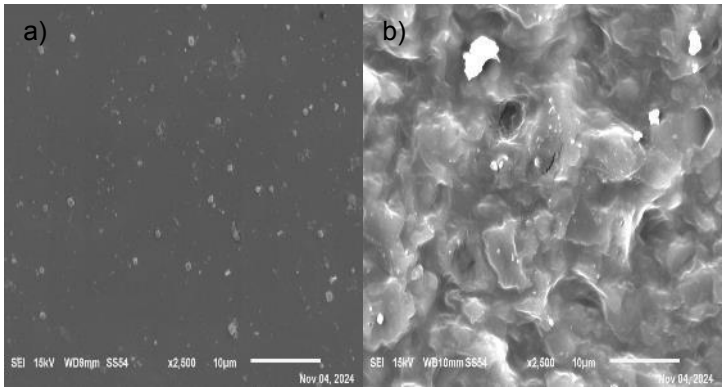


Figura 10. Micrografía de P3HT-CHT 50% a 2500X. a) Película de P3HT-CHT 50% antes de entrar en contacto con NiCl2 y b) Película de P3HT-CHT 50% después de ser inmerso en el contaminante y secado.

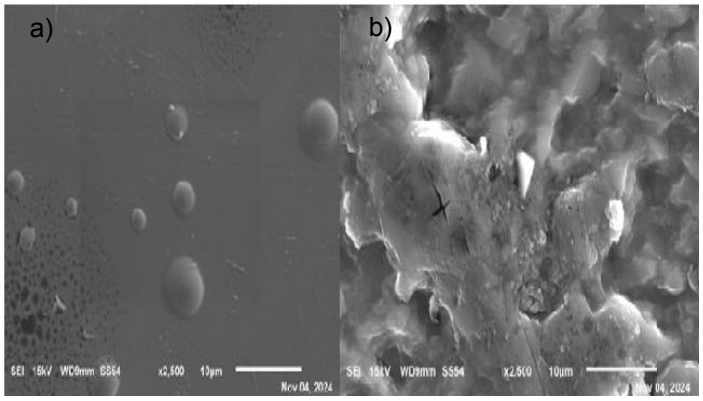


Figura 11. Micrografía de P3HT-CHT 75% a 2500X. a) Película de P3HT-CHT 75% antes de entrar en contacto con NiCl2 y b) Película de P3HT-CHT 75% después de ser inmerso en el contaminante y secado.

Para verificar la existencia de los elementos característicos del $NiCl_2$, P3HT y CHT, se realizó el análisis EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) de las películas observadas en SEM para poder identificar los elementos característicos de los materiales.

En la figura 12 se observan los resultados obtenidos para P3HT. Los resultados de EDS muestran que la película de P3HT antes del contacto con el contaminante no presenta señales atribuibles a níquel, confirmando su estado puro.Tras la exposición a la solución de $NiCl_2$, se detectó un 3,34 % de níquel en la superficie, lo que evidencia la absorción o retención de este ion en la matriz del polímero. Esta modificación en la composición elemental también está acompañada por una disminución relativa de los porcentajes de carbono y azufre, siendo su relación muy similar en ambos casos, lo que demuestra su disminución (% masa) debido a la interacción superficial del Ni con las estructuras químicas de los materiales que conforman el composito. Estos resultados respaldan la capacidad de las películas de P3HT para interactuar con especies metálicas en solución, lo que podría influir directamente en sus propiedades ópticas y electrónicas.

En los espectros EDS mostrados en la figura 13 a): se comparan las composiciones elementales de una película de la película P3HT-CHT 25% antes y después de su exposición a una solución acuosa de cloruro de níquel. Para la muestra sin contaminar no se detecta la presencia de níquel, como era de esperarse. En contraste, el espectro correspondiente a la muestra que estuvo en contacto con $NiCl_2$ (espectro inferior) evidencia la aparición clara del elemento níquel con un contenido del 6.75%, lo cual indica una interacción significativa entre la película y los iones metálicos. Además, se observa un aumento del oxígeno (14.09%) y la aparición del cloro (8.91%), lo que sugiere la retención del anión Cl^- junto con los cationes Ni^{2+}. También se detecta una reducción en los porcentajes de azufre (9,20%) y nitrógeno (3,82%), posiblemente debido al enmascaramiento superficial por la exposición al contaminante. Para los compositos P3HT-CHT 50% (Figura 13 b)) y P3HT-CHT 75% (Figura 13 c)) se confirma la presencia de níquel y cloro después del contacto con la solución de cloruro de níquel, lo que indica que el material ha adherido al contaminante. La película con mayor proporción de quitosano (75%) parece haber incorporado una mayor cantidad de níquel (9.08%), esto sugiere que el CHT tiene una mayor afinidad por los iones de níquel, esto puede deberse a sus grupos funcionales amino e hidroxilo.

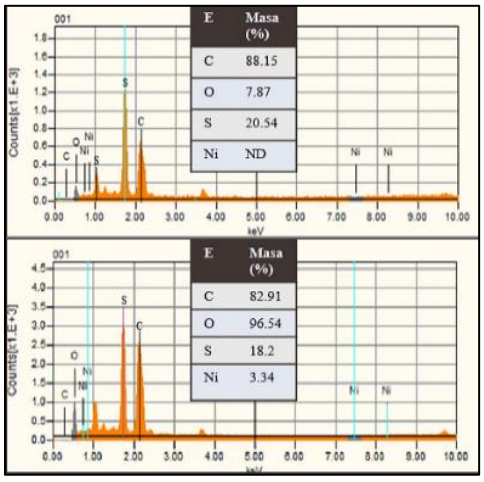
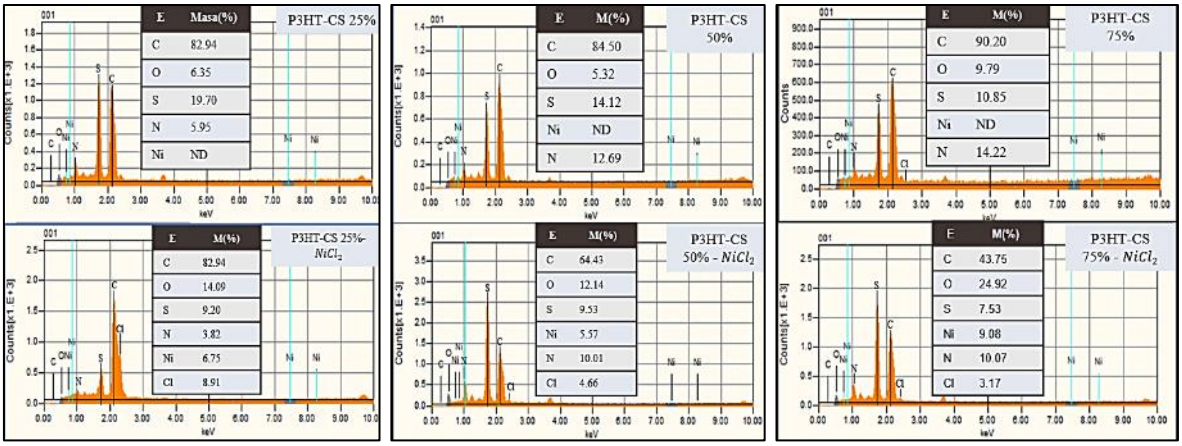


Figura 12. EDS para P3HT antes y después de contaminar.



a) b) c)

Figura 13. a) EDS para P3HT/CHT 25% y P3HT/CHT 25%-NiCl2. b) EDS para P3HT/CHT 50% y P3HT/CHT 50%-NiCl2. c) EDS para P3HT/CHT 75% y P3HT/CHT 75%-NiCl2.

Los cambios en la proporción de C, O, S y N después de la contaminación son más pronunciados en la muestra con mayor contenido de quitosano. El aumento significativo de oxígeno podría estar relacionado con la hidratación del cloruro de níquel incorporado. La disminución relativa de carbono y azufre podría deberse al aumento en la proporción de elementos pesados (Ni y Cl) en la región analizada por el EDS.

CONCLUSIONES

Los iones de níquel (Ni^{2+}), como cationes de transición bivalentes, presentan alta afinidad por ligandos que contienen átomos donadores como nitrógeno, oxígeno y azufre. En un sistema compuesto de P3HT y quitosano, estos iones pueden actuar como centros de coordinación, estableciendo enlaces entre ambos polímeros. Los resultados de las caracterizaciones FTIR, SEM y EDS confirman que los biocompositos P3HT/CHT presenta sitios activos capaces de retener iones metálicos, lo que lo hace potencialmente útil en aplicaciones relacionadas con la detección o remediación de contaminantes metálicos. La presencia de cloro y el aumento en oxígeno respaldan la hipótesis de que parte del contaminante queda adsorbido o atrapado dentro de la matriz polimérica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010). Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors. Sensors, 10(3), 2088–2106. https://doi.org/10.3390/s100302088
2. Facchetti, A. (2007). π-Conjugated polymers for organic electronics and photovoltaic cell applications. Chemistry of Materials, 23(3), 733–758. https://doi.org/10.1021/cm102419z
3. Jaiswal, A., & Verma, N. (2016). Detection of heavy metal ions using conducting polymer-based sensors: A review. Biosensors and Bioelectronics, 83, 133–150. https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.04.062
4. Kumar, M. N. V. R. (2000). A review of chitin and chitosan applications. Reactive and Functional Polymers, 46(1), 1–27. https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9
5. Synowiecki, J., & Al-Khateeb, N. A. A. Q. (2003). Production, properties, and some new applications of chitin and its derivatives. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 43(2), 145–171. https://doi.org/10.1080/10408690390826473

6. Aranaz, I., Mengíbar, M., Harris, R., Panos, I., Miralles, B., Acosta, N., ... & Heras, Á. (2009). Functional characterization of chitin and chitosan. Current Chemical Biology, 3(2), 203–230.
7. Cervera-Chiner, L., Puchol, V., Monzó, J., & Escrig, J. (2020). Heavy metals detection using conducting polymers: A review. Journal of Materials Chemistry C, 8(38), 13215–13236.
8. Klaassen, C. D. (Ed.). (2013). *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
9. Crini, G., & Badot, P. M. (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Progress in Polymer Science*, *33*(4), 399–447.
10. Bolisetty, S., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2019). Sustainable technologies for water purification from heavy metals: Review and analysis. *Chemical Society Reviews*, *48*(2), 463–487.
11. Saha, S., Gupta, B., & Bhattacharya, S. (2017). A review on the detection of heavy metal ions in water using optical and electrochemical techniques. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *7*, 112–122.

EFECTO DE LA VARIACIÓN EN LA LONGITUD DEL GRUPO ESPACIADOR SOBRE LA BIRREFRINGENCIA FOTO-INDUCIDA DE AZOPOLÍMEROS LÍQUIDO-CRISTALINOS

Rosa Julia Rodríguez González, Leticia Larios López, Isaura Felix Serrano, Dámaso Navarro Rodríguez

Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México
julia.rodriguez@ciqa.edu.mx

RESUMEN

Los polímeros fotosensibles de tipo azobenceno ha sido de gran interés en las últimas décadas debido a la gran diversidad de áreas tecnológicas en que pueden ser aplicados, como el grabado holográfico, almacenamiento de datos, entre otras. La razón se basa en su capacidad de fotoisomerizar cuando son irradiados con luz visible de cierta longitud de onda, así como de su capacidad de presentar propiedades líquido-cristalinas (LC) debido a su asimetría molecular. En nuestro grupo de trabajo hemos estudiado previamente un azopolímero LC hexiloxi sustituido (POC6-0), el cual mostró resultados interesantes en birrefringencia fotoinducida (Δn), así como en el grabado de rejillas, tanto en estado puro como al doparlo con nanoestructuras de carbono (NSC). Al ser un material interesante en sus propiedades, en el presente trabajo estudiamos el efecto del incorporar una cadena oxialquílica como espaciador entre el azobenceno y la cadena polimérica, en longitudes de 2 (POC6-2) y 6 (POC6-6) átomos de carbono, y la comparamos con el POC6-0. Para obtener los precursores empleados se empleó la metodología previamente reportada. Los azobencenos con espaciador se obtuvieron mediante una reacción de Williamson para incorporar la cadena oxialquílica de longitud específica. Posteriormente, se realizó la formación de los monómeros de tipo acrilato a partir de un haluro de acilo y un fenol. La polimerización se llevó a cabo por radicales libres a 60°C en DMF como medio de reacción, usando 2% de AIBN como iniciador, durante un tiempo de reacción de 40 horas. Los polímeros fueron recuperados mediante precipitación en una solución de agua/metanol (50/50). Las técnicas empleadas para caracterizar los azopolímeros y sus monómeros fueron Resonancia Magnética Nuclear de Protón (1H NMR), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), Análisis Termogravimétrico (TGA), Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), y Microscopia Óptica de Luz Polarizada (POM). La caracterización química mostró una alta pureza de los materiales, un incremento en la estabilidad térmica de los polímeros (hasta 250°C). Los monómeros y polímeros presentaron la propiedad de CL. La Δn fue evaluada irradiando películas delgadas preparadas por spin-coating, usando un láser de 405 nm. Estos resultados mostraron un comportamiento interesante, ya que en el POC6-2 la birrefringencia mostró un decremento con respecto al observado en el POC6-0. Por el contrario, el POC6-6 mejoró la respuesta en un 20% a 180 segundos de irradiación, lo cual se puede explicar por un incremento en el volumen libre entre las moléculas de azobenceno al aumentar la longitud del espaciador. Además, en pruebas ON-OFF (encendido y apagado del láser) en dos ciclos, los azopolímeros con menor espacio (POC6-0 y POC6-2) mostraron que al apagar el láser (OFF) se observa una disminución de la birrefringencia. Contrario a esto, el POC6-6 mostró mayor estabilidad en la respuesta, tanto en el primero como en el segundo ciclo, ninguno de los azopolímeros presentó el fenómeno conocido como relajación inversa, observada anteriormente en el POC6-0 dopado con NSC y en algunos azopolímeros LC. Este comportamiento indica un mejor acomodo molecular ocasionado por el incremento en el volumen libre generado por el incremento en la longitud de la cadena alquílica.

INTRODUCCIÓN

Los compuestos de tipo azobenceno son materiales interesantes por su propiedad de isomerizar cuando se les hace incidir un haz de luz de una longitud de onda determinada. Esta “foto-isomerización” puede producir fenómenos interesantes que pueden ser aprovechados en aplicaciones de vanguardia (fig. 1). Por otro lado, los polímeros son materiales de gran interés industrial debido a sus propiedades como la resistencia al impacto, flexibilidad, transparencia, alta

elasticidad, entre muchas otras. Los azocompuestos y los polímeros son materiales que ocupan disciplinas diferentes de la ciencia y la tecnología, al combinarlos formando azopolímeros foto-responsivos se han obtenido materiales con propiedades de mayor interés. La razón se basa en que, al estar unidos los azocompuestos a un polímero y fotoisomerizar cuando son irradiados con luz visible de cierta longitud de onda generan un movimiento másico, respuesta interesante que ha sido explotada en aplicaciones como el grabado holográfico, fotoactuadores, biosensores, velas solares, almacenamiento de datos, entre otras[1-2]. Aunado a esto, por su estructura asimétrica, en forma de rodillo, estos materiales pueden presentar propiedades líquido-cristalinas (CL), propiedad que puede mejorar la respuesta foto-inducida de los azopolímeros[3]. En este sentido, la estructura molecular de los azocompuestos también es relevante en la respuesta foto-inducida de los azopolímeros, por lo que en este grupo de trabajo hemos diseñado y estudiado azocompuestos variando la estructura química[4-6], encontrando algunos azopolímeros que han mostrado respuesta foto-inducida interesante[6]. Uno de ellos es el POC6-0, el cual mostró una birrefringencia comparable con lo reportado en la literatura, un buen grabado de rejillas de relieve de superficie[5], y dopado con nanoestructuras de carbono (CNS), mejoró su respuesta, además de presentar relajación inversa de la birrefringencia cuando esta dopado con CNS[6]. En el presente trabajo hemos modificado la longitud del grupo espaciador entre el azocompuesto y la cadena polimérica en 2 (POC6-2) y 6 (POC6-6) átomos de carbono, y reportamos su respuesta comparada con la observada en el POC6-0. La Δn fue evaluada en películas delgadas preparadas por spin-coating, irradiando con un láser de 405 nm. También fue evaluado el comportamiento de cristal líquido en función de la longitud del espaciador para compararla con el azopolímero POC6-0, el cual presenta una fase tipo esméctica a altas temperaturas[4].

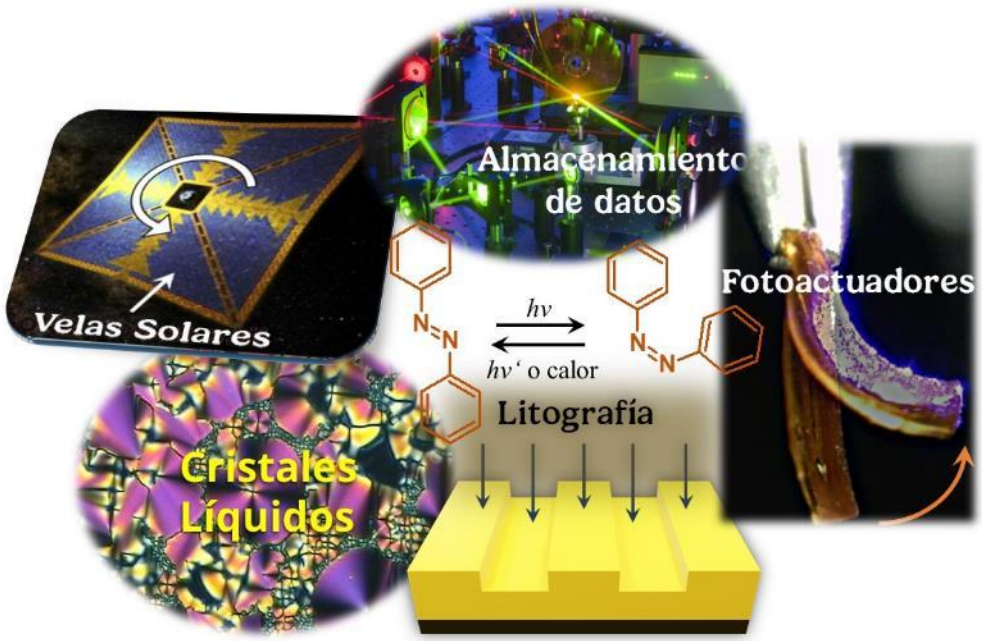
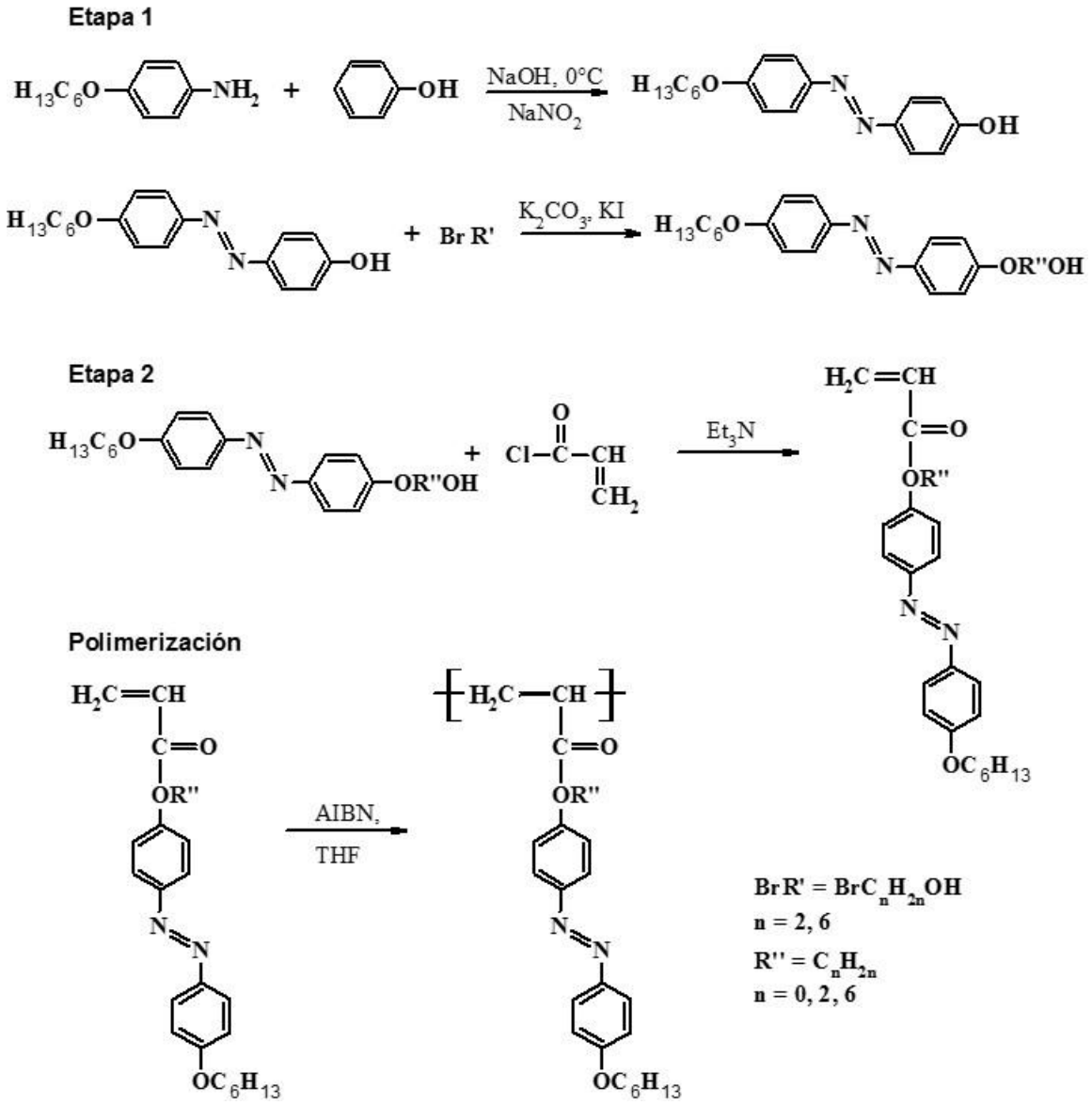


Figura 1. Azopolímeros foto-responsivos de gran interés por sus propiedades y posibles aplicaciones como el grabado holográfico, fotoactuadores, biosensores, velas solares, almacenamiento de datos

PARTE EXPERIMENTAL

Los materiales empleados en el presente trabajo fueron sintetizados de acuerdo a la siguiente ruta de reacción (ver esquema 1). En términos generales, la metodología previa a la obtención de los polímeros consta de dos etapas: 1) Primero la obtención de los precursores usados para preparar los monómeros azobencenos y consiste en la formación de sales de diazonio de la 4-(hexiloxi) anilina (*in-situ*) y su acoplamiento con fenol (N-alquilación) para la preparación del 4-hidróxi-

4'hexiloxiazobenceno (Azo1), y para incorporar los grupos espaciadores al Azo1, se llevó a cabo la formación de un éter a partir de un bromoalcohol de longitudes 2 (Azo2) y 6 (Azo3) átomos de carbono y el Azo1 mediante una reacción de Williamson. 2) En la segunda etapa se realizó la formación de un acrilato a partir del cloruro de acriloilo y un fenol para obtener los monómeros acrílicos (MOC6-0, MOC6-2 y MOC6-6). La polimerización se llevó a cabo por radicales libres a 60°C en DMF como medio de reacción, usando 2% de AIBN como iniciador, durante un tiempo de reacción de 40 horas. Los polímeros fueron recuperados mediante precipitación en una solución de agua/metanol (50/50). La caracterización química se realizó por las técnicas de Resonancia Magnética Nuclear de Protón (^{1}H NMR) y Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). El comportamiento de cristal líquido fue evaluado por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) y Microscopia Óptica de Luz Polarizada (POM). La birrefringencia fue evaluada mediante la irradiación con un haz de láser de diodo de 405 nm polarizado de manera lineal vertical. El cambio en la birrefringencia producido en el material con respecto al tiempo fue medido con un Polarímetro de Stokes marca Thorlabs, empleando un haz de láser de 633 nm linealmente polarizado a 45°.



Esquema 1. Ruta de síntesis de los precursores, monómeros y azopolímeros estudiados.

RESULTADOS

Caracterización Química

Los azopolímeros fueron caracterizados químicamente con la finalidad de corroborar su pureza y estructura macromolecular. La caracterización química de los monómeros por Resonancia Magnética Nuclear de Protón (^{1}H NMR) corroboró su pureza con las señales finas características de moléculas pequeñas. También se observaron pequeñas señales espejo que en estudios previos[8] se han relacionado con el isómero *cis* del azocompuesto respectivo, lo cual corroboramos en nuestro grupo, como se muestra en la figura 2A. A diferencia de las señales finas observadas en los monómeros, los polímeros exhibieron las señales anchas características de una macromolécula, que, a manera de ejemplo se muestra la comparación de los espectros de MOC6-2 y POC6-2 en la Fig. 2B. La ausencia de los desplazamientos correspondientes a los hidrógenos vinílicos (entre 5.5 y 6.5 ppm) confirma que el producto obtenido no contiene monómero residual. Otra señal característica observada a 4.0 ppm corresponde a los protones del grupo metileno (CH_2) vecino a un oxígeno aromático, además de las señales observadas entre 4.25 y 4.75 ppm correspondientes a los grupos metilenos vecinos a los oxígenos del grupo espaciador, con lo cual se comprueba que las estructuras obtenidas corresponden a los compuestos deseados.

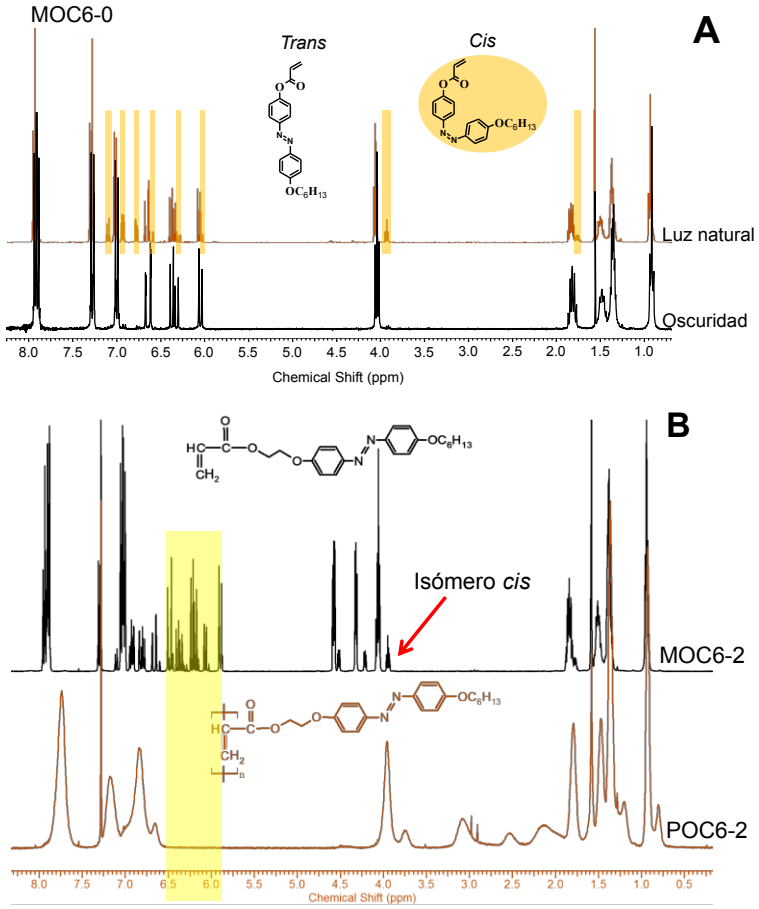


Figura 2. Caracterización química de los materiales, (A) comparativo del monómero MOC6-0 expuesto a luz natural y a la oscuridad para corroborar la fotoisomerización del monómero al exponerlo a la luz. (B) Comparativo de MOC6-2 y POC6-2.

La caracterización por espectroscopía de FT-IR (no mostrada en este trabajo) permitió corroborar lo observado por ^{1}H NMR.

Pesos moleculares y caracterización térmica

Por otro lado, los pesos moleculares de los azopolímeros obtenidos (tabla 1) fueron acordes con lo reportado en estudios de birrefringencia, en el intervalo de 10000 a 13000 gr/mol. La resistencia térmica a la degradación aumentó en el caso de POC6-6, lo cual no se puede asociar a la longitud del espaciador ya que el POC6-2 presentó una temperatura de degradación menor que el POC6-0 sin espaciador, sin embargo, esta diferencia también se puede relacionar con el peso molecular, ya que la presencia de cadenas cortas acelera la degradación[4,9]. Los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 1 corroboran que se obtuvieron polímeros con pesos moleculares adecuados para la preparación de películas poliméricas fotosensibles, con una temperatura de degradación adecuada para ser irradiados sin sufrir daño.

Tabla 1**. Pesos moleculares (Mn y Mw) y temperaturas de degradación (T_{di}) de los azopolímeros acrílicos de cadena lateral.**

Polímero	Mn (g/mol)	Mw (g/mol)	IP [Mw/Mn]	$T_{d2\%}$ (°C)
POC6-0	**13155**	**23290**	**1.77**	**277**
POC6-2	**10427**	**15736**	**1.51**	**260**
POC6-6	**10908**	**16093**	**1.47**	**310**

El análisis de las transiciones térmicas por DSC (ver fig. 3) reveló que los monómeros y polímeros tipo azobenceno presentan propiedades de cristal líquido (CL). Su comportamiento de CL cambió por efecto de la longitud del grupo espaciador, disminuyendo la temperatura de las transiciones con el incremento de la longitud del espaciador. El POC6-0 mostró una fase CL de tipo esméctico a alta temperatura, cercana a la temperatura de degradación, la cual ya fue reportada anteriormente[4]. Sin embargo, aún con mayor estabilidad térmica, debida al incremento en el peso molecular, el polímero no fluyó, solo se reblandeció, por lo que no se logró obtener una buena textura de la fase, como se muestra en la figura 4 (izq).

En el caso del POC6-2, la fase CL muestra una textura similar al POC6-0, pero a menor temperatura (175-180 °C) y con mayor fluidez debido a que la cadena del espaciador desacopla el grupo azobenceno de la cadena polimérica principal y favorece la movilidad de este. Finalmente, el POC6-6 mostró las transiciones con temperaturas más bajas y mayor fluidez. En este polímero la textura observada es de tipo abanico, que es asociada a la fase tipo esméctico, lo cual muestra que el tipo de fase no cambia, ya que los tres azopolímeros presentan texturas asociadas a la fase esméctica, no obstante, las temperaturas de fase disminuyeron con el incremento de la longitud del grupo espaciador.

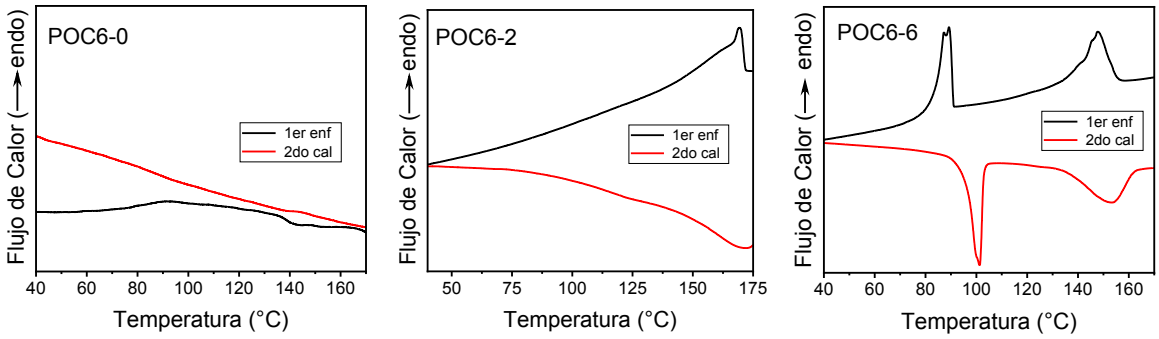
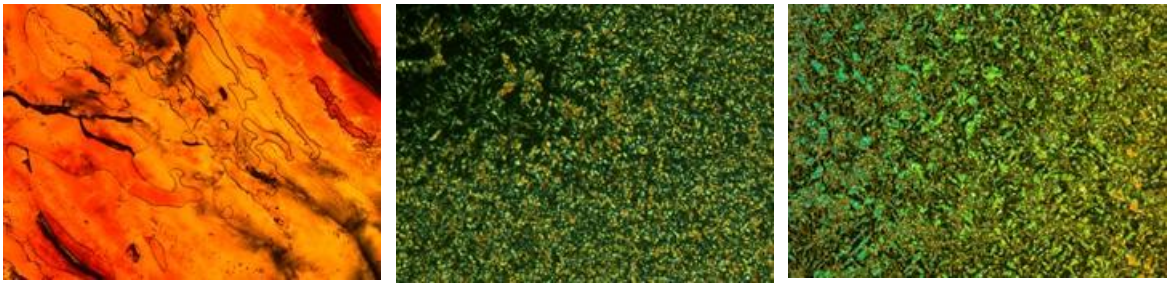


Figura 3. Caracterización por DSC de las transiciones térmicas de los azopolímeros en ciclos de calentamiento enfriamiento a 10°C/min. En estas gráficas se muestran el primer ciclo de enfriamiento y el segundo ciclo de calentamiento.



POC6-0 a 240°C por 2 h POC6-2 a 160°C por 3 h POC6-6 a 125°C por 2 h

Figura 4. Figura 4. Micrografías de los azopolímeros obtenidas por POM a diferentes temperaturas. Las muestras fueron calentadas a temperaturas de fase y se dejaron por períodos largos (2-3 horas) para conseguir un mejor desarrollo de la fase.

Birrefringencia

En este trabajo, la birrefringencia fue evaluada en películas delgadas preparadas mediante la técnica de *spin-coating*, usando diluciones de 20 mg/mL y su espesor fue medido por perfilometria. Estas películas fueron irradiadas con un haz de luz láser de 405 nm y el cambio producido fue seguido con ayuda de un láser de longitud de onda de 633 nm. Los experimentos realizados fueron de dos ciclos completos de encendido y apagado del láser (Ciclos ON-OFF). El valor obtenido por el POC6-0 con un mayor peso molecular fue similar a los reportados previamente.[4-5] Con relación a las diferencias en el grupo espaciador, los resultados obtenidos mostraron un comportamiento interesante, ya que en el POC6-2 la birrefringencia mostró un decremento con respecto al observado en el POC6-0. Este comportamiento no se puede relacionar con las propiedades CL, ni con el grupo espaciador, ya que al mostrar el POC6-2 mayor fluidez que el POC6-0, y por el desacoplamiento que genera la incorporación del grupo espaciador entre el azobenceno y la cadena polimérica se esperaría que la respuesta foto-inducida fuera mejor, sin embargo, disminuyó en un 15% con respecto al POC6-0 a un tiempo de 180 s de irradiación. Contrario al POC6-2, el POC6-6 mejoró la respuesta en un 20% a 180 s de irradiación, lo cual se puede explicar por un incremento en el volumen libre entre las moléculas de azobenceno al aumentar la longitud del espaciador.

Los estudios completos durante las pruebas ON-OFF (encendido y apagado del láser) en dos ciclos se muestran en la figura 5 der. Estos resultados mostraron que los azopolímeros con espaciador corto o sin espaciador (POC6-0 y POC6-2) presentan un comportamiento común en estudios de este tipo, en los cuales se ha observado que durante la irradiación de los azopolímeros (ON) se tiene una primera etapa de incremento rápido de la birrefringencia hasta un nivel cercano a la saturación, y al dejar de irradiar (OFF) el nivel de birrefringencia decae hasta encontrar un nuevo nivel de saturación, esto se conoce como relajación de la birrefringencia[10]. Este decremento, en ambos azopolímeros

fue el 9% de su valor máximo. Contrario a esto, el POC6-6 mostró un comportamiento estable al apagar el láser lo que se traduce como mayor estabilidad en la respuesta, y al volver a irradiar (ON) la birrefringencia volvió a incrementar 12% más al valor alcanzado en el primer ciclo, lo que es interesante para su posible uso en películas para grabado holográfico. Finalmente, es importante destacar que ninguno de los azopolímeros estudiados mostró un incremento en la birrefringencia, conocido como relajación inversa, observada anteriormente en el POC6-0 dopado con NSC y en algunos azopolímeros LC.

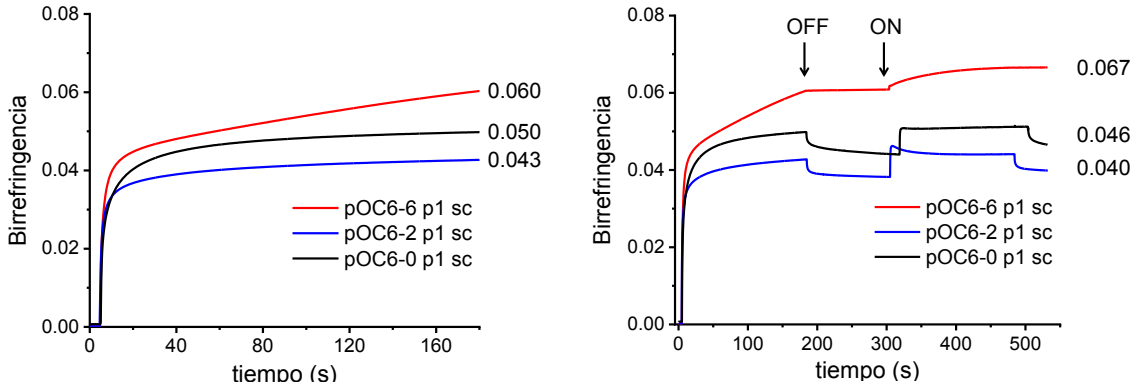


Figura 5. Birrefringencia fotoinducida de los azopolímeros irradiando (izq.) a 170 s, y en ciclos de encendido y apagado del láser (ON-OFF) para evaluar la estabilidad de la birrefringencia.

CONCLUSIONES

La caracterización química y térmica mostró una alta pureza de los materiales y un incremento en la estabilidad térmica de los polímeros (hasta 250°C). Los monómeros y polímeros presentaron la propiedad de CL. La Δn fue evaluada irradiando películas delgadas preparadas por *spin-coating*, usando un láser de 405 nm. Estos resultados mostraron un comportamiento interesante, ya que en el POC6-2 la birrefringencia mostró un decremento con respecto al observado en el POC6-0. Por el contrario, el POC6-6 mejoró la respuesta en un 20% a 180 s de irradiación, lo cual se puede explicar por un incremento en el volumen libre entre las moléculas de azobenceno al aumentar la longitud del espaciador. Además, en pruebas ON-OFF (encendido y apagado del láser) en dos ciclos, los azopolímeros con menor espaciador (POC6-0 y POC6-2) mostraron una disminución de la birrefringencia al apagar el láser (OFF). Contrario a esto, el POC6-6 mostró mayor estabilidad en la respuesta, aunque no presentó un incremento en la birrefringencia, conocido como relajación inversa, observada anteriormente en el POC6-0 dopado con NSC y en algunos azopolímeros LC. Este comportamiento indica un mejor acomodo molecular ocasionado por el incremento en el volumen libre generado por el incremento en la longitud de la cadena alquílica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Xu, X., Feng, J., Li, W. Y., Wang, G., Feng, W., & Yu, H. (2024). “Azobenzene-containing polymer for solar thermal energy storage and release: Advances, challenges, and opportunities.” Progress in Polymer Science, 149, 101782.
2. Saphiannikova, M., Toshchevikov, V., & Tverdokhleb, N. (2024). “Optical deformations of azobenzene polymers: orientation approach vs. other concepts.” Soft Matter, 20(12), 2688-2710.
3. García, T., Larios-López, L., Rodríguez-González, R. J., Martínez-Ponce, G., Solano, C., & Navarro-Rodríguez, D. (2012). “Liquid-crystalline polymers bearing phenylene (azobenzene) moieties substituted with an electron-donor or electron-acceptor lateral group. Synthesis, mesomorphic behavior and photo-induced isomerization.” Polymer, 53(10), 2049-2061.
4. Rodríguez-González, R. J. Tesis de Maestría "Síntesis y caracterización de las propiedades ópticas fotoinducidas y de cristal líquido de polímeros y copolímeros acrílicos de tipo azobenceno", Saltillo, Coahuila, 2007

5. Rodríguez-González, R. J., Larios-López, L., Navarro-Rodríguez, D., Solano, C., Martínez-Ponce, G. "Optical and liquid crystalline properties of new alkyl-substituted azopolymers." Molecular Crystals and Liquid Crystals 511.1, 2009, pp. 283-1753.
6. Rodríguez-González, R. J., de León, A. R. D., Hernández-Hernández, E., Larios-López, L., Ruiz-Martínez, A. Y., Felix-Serrano, I., Navarro-Rodríguez, D. "Enhancement of the photoinduced birefringence and inverse relaxation of a liquid crystal azopolymer by doping with carbon nanostructures". Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 435, 2023, pp. 114342.
7. De Jesús-Téllez, M. A., Felix-Serrano, I., Rodríguez-González, R. J., Navarro-Rodríguez, D., & Larios-López, L. (2020). “Effect of gold and graphene oxide nanoparticles on the thermo- and photo-actuation of monodomain liquid crystal elastomers.” Polymer, 205, 122837.
8. Xiong, Y., Zhang, L., Weis, P., Naumov, P., & Wu, S. (2018). A solar actuator based on hydrogen-bonded azopolymers for electricity generation. Journal of Materials Chemistry A, 6(8), 3361-3366.
9. Al-Itry, R., Lamnawar, K., & Maazouz, A. (2012). “Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy.” Polymer degradation and stability, 97(10), 1898-1914.
10. Brown, D., Natansohn, A., & Rochon, P. (1995). “Azo polymers for reversible optical storage. 5. Orientation and dipolar interactions of azobenzene side groups in copolymers and blends containing methyl methacrylate structural units.” Macromolecules, 28(18), 6116-6123.

EL IMPACTO DE IOT Y LAS TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN EN LA TRAZABILIDAD DEL VINO PARA SU AUTENTICIDAD Y ORIGEN

Diana Jazmín Casas Del Ángel[1], Estephania Jazvi Casas Del Ángel[2], María Susana Ávila García[1], María Elena Sosa Morales[3], Roberto Rojas Laguna[4], Stefano Toffanin[5], Marco Bianchetti[1]

[1]Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca Universidad de Guanajuato, Av. Universidad S/N, Yuriria 38944, Guanajuato, México. [2]Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Comunidad de Palo Blanco, 36885, Guanajuato, México. [3]Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca Universidad de Guanajuato, Ex Hacienda el Copal, Irapuato, 36500, Guanajuato, México. [4]Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Comunidad de Palo Blanco, 36885, Guanajuato, México.

[5]ISMN, CNR, Via Piero Gobetti 101, 40136, Bolonia, Italia.

dj.casasdelangel@ugto.mx

RESUMEN

La autenticidad y origen del vino en años recientes ha representado un desafío para los proveedores, puesto que la falsificación y falta de información recabada en la trazabilidad provoca pérdidas a las empresas vinícolas. Aunado a ello, el actual consumidor presta más atención a los datos de calidad y autenticidad de los vinos que adquiere[1], con el fin de evitar comprar productos adulterados o falsificados. Estos factores refuerzan la importancia de implementar un sistema de trazabilidad capaz de recabar la información relevante sobre la manufactura de cada botella de vino, garantizando por consiguiente las normativas de producción que requiere para su fabricación.

Esta investigación revisó literatura académica a nivel global referente a la trazabilidad en la industria vinícola, centrándose en la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de la información para la recolección de datos y gestión de la información. También se comparó la aplicación de las tecnologías propuestas a nivel nacional e internacional, resaltando su importancia para cumplir con las normativas y estándares nacionales e internacionales para la recopilación y almacenamiento de datos. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de la información son factores cruciales para la trazabilidad de la industria vinícola. Varias de las aplicaciones revisadas en la literatura demostraron como se mejoró el proceso de la trazabilidad al aplicar de manera estratégica dispositivos como Identificación por Radiofrecuencia (RFID) y Quick Response (QR) para la captura de datos. También demuestran que la aplicación de sistemas basados en blockchain pueden optimizar la gestión de datos, reduciendo el riesgo de fraude y mejorando la transparencia del proceso para proveedores y consumidores.

En conclusión, la aplicación correcta y bien gestionada de las tecnologías de la información y el IoT en la trazabilidad del vino garantiza su autenticidad y calidad de cada botella de vino para los consumidores. El buen uso de los datos permite transparencia en el proceso de producción para cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales. Con base en los resultados obtenidos de la investigación resulta atractivo aplicar la trazabilidad por medio del Internet de las Cosas (IoT) y las tecnologías de la información en las empresas vinícolas mexicanas, Jauregui et al. (2024).

INTRODUCCIÓN

La industria del vino ha mostrado una evolución en base al crecimiento de la economía global, siendo así que entra en una competencia de mercado nacional e internacional, por lo que su producción requiere implementar prácticas culturales, sostenibilidad y políticas de calidad para ser atractivos ante su mercado y la misma competencia. Sin embargo, existen retos constantes por la creciente

inquietud y mejora del fraude en botellas, así como la falta de mecanismos de trazabilidad efectivos que garanticen la autenticidad del producto. El vino se encuentra entre los productos más susceptibles a ser adulterados, ya sea mediante la mezcla de variedades no autorizadas, el uso de aditivos no permitidos o el etiquetado incorrecto del origen. Como respuesta a estos retos, los consumidores exigen cada vez más garantías sobre la procedencia, la calidad y las condiciones en las que fue elaborado un vino.

En México, el interés por el vino nacional ha aumentado significativamente, en especial en regiones como Guanajuato, donde se ha consolidado un ecosistema productivo en crecimiento por su "Ruta del Vino". Estudios como el de Jauregui et al. (2024) evidencian que la percepción de calidad y autenticidad en el vino es un criterio determinante de compra para los consumidores mexicanos. Aunado a ello, los productores deben cumplir con regulaciones nacionales e internacionales, tales como la certificación de denominación de origen, las normas ISO y otras especificaciones de etiquetado dictadas por el país de elaboración y al que se desea exportar. Ejemplo de ello es el cumplimiento de la NORMA Oficial Mexicana NOM-142 para etiquetado de bebidas alcohólicas.

Este trabajo analiza cómo la integración de tecnologías como el IoT, blockchain y etiquetas inteligentes puede transformar la cadena de suministro del vino, comunicando todas las fases de su producción, calidad del producto y la transparencia en su comercialización por medio de la trazabilidad de la botella de vino.

TEORÍA

La trazabilidad es definida por Sun et al. (2021) como la capacidad de rastrear un producto a lo largo de todas las etapas de producción, transformación y distribución, permitiendo conocer su historial, aplicación o localización. En la industria del vino, esta trazabilidad comienza desde el viñedo, donde se cultiva la uva, pasando por la recolección, limpieza, procesamiento, fermentación, almacenamiento, embotellado, distribución y, finalmente, la compra del consumidor final.

El vino, por definición, es una bebida alcohólica resultante de la fermentación total o parcial de la uva (Sun et al., 2021). Las variables como el tipo de uva, el clima y los procesos de vinificación influyen directamente en su calidad. Por ello, contar con mecanismos que registren y validen estos factores de manera automatizada y verificable es fundamental para garantizar la calidad y autenticidad del producto final.

La arquitectura ARIS propuesta por Gayialis et al. (2022) ofrece un marco conceptual útil para modelar sistemas de trazabilidad. Esta arquitectura considera cinco vistas esenciales: datos, funciones, organización, procesos y productos. Integrar tecnologías emergentes en este marco permite gestionar grandes volúmenes de datos provenientes de múltiples fuentes, automatizar procesos de verificación y facilitar el cumplimiento normativo.

Entre las tecnologías más destacadas para implementar sistemas de trazabilidad se encuentran:

- Sensores IoT: capturan datos ambientales como temperatura, humedad, luz, y vibraciones durante el cultivo, almacenamiento y transporte.
- Etiquetas RFID y códigos QR: permiten la identificación única de cada lote o botella de vino y el rastreo a lo largo de la cadena.
- Blockchain: proporciona un registro inmutable de cada evento o transacción, garantizando la integridad y seguridad de la información.
- Aplicaciones móviles: permiten a los consumidores verificar la autenticidad y acceder al historial completo del producto mediante el escaneo de etiquetas.

La importancia de conocer el origen y la autenticidad del vino radica en la necesidad de proteger al consumidor, garantizar el cumplimiento de las normativas vigentes y fortalecer la competitividad de los productores. El concepto de trazabilidad implica la capacidad de rastrear el historial completo de un producto, desde su origen hasta su destino final, incluyendo todos los procesos intermedios. En

el sector vinícola, esta práctica permite evitar el fraude, proteger denominaciones de origen y mejorar la gestión de calidad.

En el estado de Guanajuato, la industria del vino ha cobrado relevancia en los últimos años. Municipios como Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende y Guanajuato capital destacan por su producción vinícola. Este crecimiento ha impulsado la necesidad de adoptar tecnologías que garanticen la calidad del producto local y lo posicionen competitivamente frente a vinos de otras regiones nacionales e internacionales.

El uso del Internet de las Cosas (IoT) y las Tecnologías de la Información (TI) en la industria del vino ha permitido automatizar procesos, generar registros precisos y ofrecer a los consumidores herramientas para verificar el origen del producto. Estas tecnologías no solo mejoran la trazabilidad, sino que también aportan eficiencia operativa y valor agregado.

RESULTADOS

En el contexto mexicano, existen diversas oportunidades para implementar sistemas de trazabilidad tecnológica en la industria del vino como lo han demostrado diversas investigaciones (tabla 1). En base a investigaciones anteriores y sus resultados obtenidos se destacan los siguientes puntos clave dentro del proceso de trazabilidad para mejorar la confianza da los datos y su interacción:

- Digitalización de viñedos: instalación de sensores IoT en campo para monitorear variables de la uva.
- Implementación de plataformas blockchain: para registrar eventos críticos de forma inmutable.
- Desarrollo de apps móviles: orientadas a la trazabilidad y educación del consumidor.
- Integración de etiquetas inteligentes: con QR dinámicos, NFC y autenticación por tinta fotosensible.
- Educación tecnológica para productores: capacitación sobre el uso y beneficios de estas tecnologías.

Tabla 1. investigaciones sobre trazabilidad del vino y resultados.

Publicación	Tecnología aplicada	Etapa de producción	Resultados obtenidos
Agnusdei et al. (2022)	Sensores GPS, RFID	Cultivo, transporte, producción	Mejor trazabilidad del producto desde origen
Popovic et al. (2021)	QR con tinta invisible	Envasado y distribución	Prevención del fraude mediante códigos únicos
Cakic et al. (2021)	App móvil con blockchain	Consumo	Validación de origen por parte del consumidor final
Gayialis et al. (2022)	Arquitectura ARIS	Todas las etapas	Modelo de referencia de procesos para trazabilidad
Vukatana et al. (2016)	Sistema integrado TI	Producción y logística	Mejora de control mediante estándares ISO

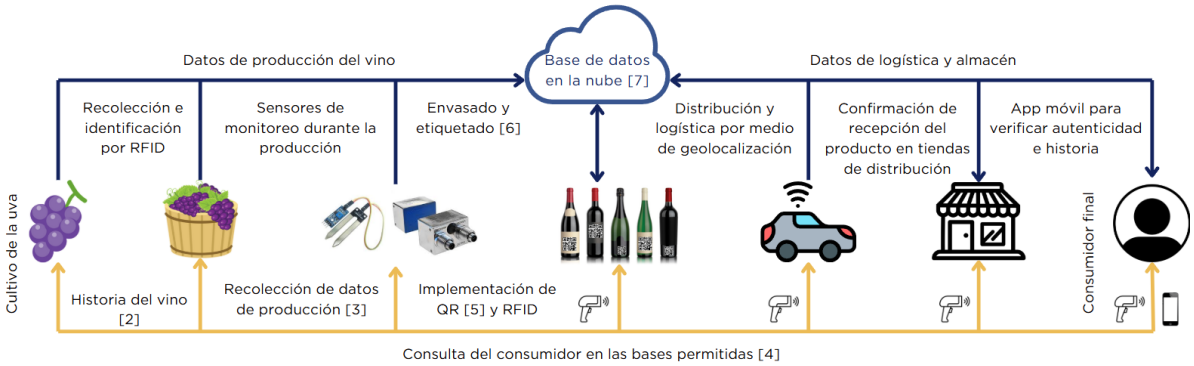
Aunado con lo anterior se puede hacer una gran comparativa sobre el uso de las tecnologías que se usaban y en algunos casos aún se siguen utilizando, y cuáles son las tecnologías que han ido emergiendo para permitir la digitalización de los datos y el intercambio de información. Un ejemplo claro de ello es el registro de los datos por medio de bitácoras de control a papel, actualmente hay diversas opciones para la digitalización ya sea por medio de sensores IoT o bien por medio de aplicaciones móviles (tabla 2).

Tabla 2. Comparativa de tecnologías para la trazabilidad del vino.

Categoría	Tecnología Tradicional	Tecnología Emergente
Identificación	Etiquetas impresas	Códigos QR, RFID, NFC
Registro de datos	Manual / papel	IoT: sensores, automatización, apps móviles
Validación	Inspección visual	Blockchain, firma digital, QR único
Seguimiento logístico	Parcial y lento	Geolocalización y trazabilidad en tiempo real
Acceso del consumidor	Información limitada	App interactiva, historia del vino, escaneo QR

Una propuesta de interacción entre estas propuestas se observa en la figura 1, donde se propone una interacción de los datos por medio de una base de datos en la nube, la cual será quien recopila y da el acceso a los datos de acuerdo al permiso otorgado. La primera sección de este diagrama que corresponde a las 3 primeras fases, consiste en recopilación y generación de datos para así llegar a la fase de interacción por medio de etiquetas QR o RFID las cuales permiten el reporteo de la fase en la que se encuentra el producto y permitirá la conexión con las ultimas 3 fases que son distribución, confirmación de recepción en tiendas y la verificación final por el consumidor.

Figura 2. Trazabilidad propuesta. De la Vid a la Mesa.



Además, se abren líneas de investigación en torno al análisis de datos vinícolas, el diseño de políticas públicas para fomentar la trazabilidad y la integración de principios de economía circular en el uso de envases y retorno de las botellas.

Este análisis muestra que la trazabilidad del vino no es un proceso aislado, sino un sistema integral que debe abarcar todas las fases del ciclo de vida del producto. La clave del éxito radica en la interoperabilidad de los sistemas y la participación de todos los actores: productores, distribuidores, autoridades y consumidores.

CONCLUSIONES

La trazabilidad inteligente del vino representa una convergencia entre tecnología, tradición y calidad. Su implementación no solo permite satisfacer las demandas del mercado internacional y local en cuanto a autenticidad, sino también facilita la adopción de prácticas sostenibles y mejora la gestión interna de las bodegas. En el caso específico de Guanajuato, la adopción de estas herramientas podría posicionar al vino guanajuatense como referente nacional en innovación y transparencia.

Los beneficios de integrar tecnologías como IoT, blockchain, sensores y plataformas móviles en la trazabilidad del vino incluyen: mejora de la eficiencia operativa, reducción de fraudes, mayor confianza del cliente, cumplimiento de normativas internacionales y acceso a nuevos mercados. Sin embargo, se requiere una estrategia articulada que incluya capacitación tecnológica, inversión en infraestructura digital y colaboración entre actores del ecosistema vinícola.

Sin embargo, hay retos muy marcados para lograrlo, como lo es la disponibilidad de datos, las normativas aplicables y el rol de las TI. Referente a la disponibilidad de los datos actualmente muchos de estos datos no son accesibles al consumidor ni al productor de manera centralizada. Por otro lado, en las normativas existen requisitos para cada país en conceptos como el origen, ingredientes, composición, etc. Por último, es cierto que las Tecnologías de la Información facilitan la gestión y el análisis de los datos que se recolectan, más una mala gestión de esta puede llevar a eventos no deseados dentro de la empresa.

Futuras investigaciones deberán centrarse en desarrollar pilotos locales, validar tecnologías en contextos reales y evaluar el impacto económico y social de su implementación. Asimismo, es fundamental establecer marcos regulatorios claros que impulsen la digitalización de la trazabilidad vinícola en México.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agnusdei, G., Coluccia, B., Elia, V. y Miglietta, P. (2022). IoT technologies for wine supply chain traceability: potential application in the Southern Apulia Region (Italy). ELSEVIER, Procedia Computer Science 200 (2022) 1125–1134. http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.312
2. Cakic, S., Ismailisufi, A., Popovic, T., Kroco, S., Gligoric, N., Kupresanin, S. y Maras, V. (2021). Digital Transformation and Transparency in Wine Supply Chain Using OCR and DLT. 25th International Conference on Information Technology (IT). IEEE 2021. DOI: 10.1109/IT51528.2021.9390117
3. Gayialis, S.P., Kechagias, E.P., Papadopoulos, G.A. y Panayiotou, N.A. (2022). A Business Process Reference Model for the Development of a Wine Traceability System. Sustainability 2022, 14, 11687. https://doi.org/10.3390/su141811687
4. Hunter, O. y Kumar, E. (2021). The integration of a sustainable packaging process in the supply chain. [Tesis de maestría]. Jonkoping University, International Bussines School.
5. Jauregui, C., Espejel, A., Barrera, A., Hernández, A. y Hernández, L. (2024). Perception of wine with protection of origin using free association: case study Mexico. ELSEVIER, Applied Food Research 4 (2024) 100364.https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100364
6. Papadakos, P., Chrysakis, I., Patkos, T., Flouris, G., Samaritakis, G., Angelakis, D., Basina, N., Tsampanaki, N., Pratikaki, A., Baritakis, P., Loulakakis I., Gouma, M., Kioupakis, A., Apostolidi, C. y Lyrarakis, B. (2023). Message in a bottle: engaging stories around sustainable and safe wine products. Discover Sustainable. https://doi.org/10.1007/s43621-023-00160-8
7. Popovic, T., Krco, S., Maras, V., Hakola, L., Radonjic, S., Kranenburg, R. y Sandi, S. (2021). A novel solution for counterfeit prevention in the wine industry based on IoT, smart tags, and crowd-sourced information. ELSEVIER, Internet of Things 14 (2021) 100375. https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100375
8. Sánchez, E., Oliveras, I., Castillo, M., y Salazar, A. (2023). Influence of the sociocultural perspective on the sensory perception of wine consumers in Mexico and Spain. Frontiers in Psychology, 14. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1171289.
9. Sowak, M. (2023). From Vine to Bottle. [Tesis de maestría]. Master's Programme International Management Branch of study: International Management Alpen-Adria-Universität Klagenfurt.
10. Sun, X., Zhang, F., Gutiérrez, G., Ge, Q., Xu, P., Zhang, Q., Fang, Y. y Ma, T. (2021): Real wine or not? Protecting wine with traceability and authenticity for consumers: chemical and

technical basis, technique applications, challenge, and perspectives, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, DOI: 10.1080/10408398.2021.1906624

11. Verzeletti, T., Priamo, Wagner. y Flores Shana. (2023). Use of information technology for traceability and quality control: Case study in a Brazilian winery. BIO Web of Conferences 68, 04018. https://doi.org/10.1051/bioconf/20236804018
12. Vukatana, K., Sevrani, K. y Hoxha, E. (2016). Wine Traceability: A Data Model and Prototype in Albanian Context. MDPI, Foods 2016, 5, 11. https://doi.org/10.3390/foods5010011
13. Zambianchi, S., Soffritti, G., Stagnati, L., Patrone, V., Morelli, L., Vercesi, A., y Busconi, M. (2021). Applicability of DNA traceability along the entire wine production chain in the real case of a large Italian cooperative winery. Food Control, 124, 107929. https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.107929.

DESARROLLO SUSTENTABLE: LA PERSPECTIVA DESDE UN FUTURO INGENIERO INDUSTRIAL

Mónica Mendoza Kohrs[1], Juan Antonio Magdaleno Zavala[1], Norma Elizabeth Rodríguez Bustos[1], Juan de Dios Bautista Vázquez [1], Ximena Murillo Corona[1]

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.
[1] monica.mk@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

En el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, el desarrollo sustentable emerge como un eje transformador en la formación de ingenieros industriales. Se reconoce la necesidad de integrar el progreso económico con la equidad social y la preservación ambiental, estableciendo una sinergia entre estos pilares. Durante el quinto semestre, se impulsó una conexión profunda entre la ingeniería industrial y los recursos naturales, buscando que los futuros profesionales comprendan y lideren la gestión sostenible.

Durante un periodo semestral, estudiantes de ingeniería industrial se sumergieron en el mundo del desarrollo sustentable, descubriendo la intrincada relación entre la biodiversidad y la actividad humana. A través de actividades prácticas, como visitas a museos y exploraciones de la flora y fauna local, se despertó una conciencia profunda sobre la importancia de los recursos naturales.

El agua, un recurso vital, se convirtió en el eje central de su investigación. Identificaron fuentes de agua dentro de su institución, incluyendo un humedal en donde en ciertas temporadas se visualizan una bandada de patos y una Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR), y exploraron el potencial de la reutilización del agua. Su trabajo culminó en la participación en el concurso "Educación Ambiental para Ingenieros", donde obtuvieron el tercer lugar, demostrando su capacidad para proponer soluciones innovadoras.

Con el objetivo de profundizar su conocimiento, los estudiantes colaboraron con JAPAMI para organizar una charla sobre la importancia del cuidado del agua, creando conciencia entre sus compañeros sobre las consecuencias de su mal uso.

La investigación los llevó a realizar un diagnóstico de seguridad e higiene en la PTAR, revelando deficiencias que impedían el aprovechamiento óptimo del recurso. Los resultados se plasmaron en el cartel "Diagnóstico inicial de seguridad e higiene en la PTAR del TECNM/ITESI", presentado en el 2do Congreso Internacional de Administración y Ciencias Sociales en el Tecnológico de Campeche (ITESCAM).

Su participación en el congreso les permitió compartir sus hallazgos y perspectivas sobre la gestión sostenible de los recursos hídricos, obteniendo reconocimiento por su investigación y su compromiso con la ciencia y el medio ambiente.

La experiencia demostró la importancia de la investigación estudiantil en la gestión de recursos. Se evidenció la necesidad de aplicar conocimientos técnicos para resolver problemas ambientales. La participación en el congreso fortaleció el compromiso con la sostenibilidad y la divulgación científica.

INTRODUCCIÓN

En el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, el desarrollo sustentable se ha consolidado como un eje fundamental en la formación de los futuros ingenieros industriales. A lo largo del semestre, la materia de Desarrollo Sustentable brindó a los estudiantes la oportunidad de explorar la relación

entre la actividad humana y el medio ambiente, con un enfoque especial en la gestión responsable de los recursos naturales, en particular el agua.

Mediante actividades como visitas a museos, identificación de fuentes hídricas dentro del entorno institucional, trabajo de campo en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y colaboración con JAPAMI, los estudiantes fortalecieron su vínculo con los sistemas naturales que nos rodean. Estas experiencias despertaron conciencia sobre la biodiversidad, el impacto ambiental de los procesos humanos y la necesidad de integrar principios éticos y sostenibles en su futura práctica profesional.

Asimismo, se promovió el desarrollo de habilidades clave en el ingeniero industrial, como el diagnóstico, el análisis de procesos y la mejora continua. La integración de la sustentabilidad en su formación no solo responde a los retos ambientales actuales, sino que prepara a los estudiantes para liderar soluciones innovadoras en contextos industriales más responsables, eficientes y comprometidos con el entorno.

TEORÍA

Dentro del desarrollo teórico, se aborda diversas actividades orientadas al fortalecimiento de habilidades, dentro de estas acciones nos enfocamos al recurso hídrico, al identificarse una falta de visión institucional respecto a su uso eficiente. Esta situación motivó a los estudiantes a enfocar su investigación en los múltiples factores ambientales que se encuentran dentro del ITESI en la fase de Planificación (Plan), se identificó la necesidad de evaluar las condiciones de seguridad e higiene en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del ITESI, así como de promover el uso responsable de los recursos hídricos entre la comunidad estudiantil.

En la etapa de Ejecución (Do), se realizaron diversas actividades prácticas, tales como visitas de campo, toma de datos, conferencias y la elaboración de un cartel técnico. Estas acciones permitieron fortalecer competencias propias del perfil del ingeniero industrial, como la gestión de proyectos, el trabajo en equipo y la comunicación científica.

Posteriormente, en la fase de Verificación (Check), se analizaron los datos obtenidos, evaluando tanto el estado de la PTAR como el impacto de las actividades educativas. Esto promovió el desarrollo del pensamiento crítico y del enfoque sistémico en la resolución de problemas ambientales reales.

Finalmente, en la etapa de Actuar (Act), los resultados fueron presentados en el 2º Congreso Internacional del ITESCAM, consolidando el compromiso del ingeniero industrial con la sostenibilidad y demostrando cómo este perfil profesional puede contribuir activamente a la mejora continua en contextos ambientales.

A continuación, se muestra la aplicación del ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act) como herramienta metodológica utilizada por los estudiantes para estructurar su proyecto de diagnóstico y concientización ambiental en la ingeniería industrial.



Figura 1. Ciclo PDCA

PARTE EXPERIMENTAL

A lo largo del curso, los estudiantes participaron activamente en diversas actividades centradas en el desarrollo sustentable y la gestión responsable del agua. Desde el inicio, se les motivó a reflexionar sobre la importancia de los recursos naturales, en especial el agua, lo que despertó una mayor conciencia ambiental.

Visión inicial al desarrollo sustentable:
La visita al museo de la carrera de biología ubicado dentro de la institución permitió ver con materiales visuales, como muestras de insectos y animales disecados con carteles, complementar el aprendizaje adquirido, mientras que se habilitó un acceso sustentable que refleja el compromiso del instituto con la sostenibilidad.

Humedal y PTAR:
Durante esta salida de campo en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), los estudiantes pudieron observar fuentes hídricas y ecosistemas naturales que les permitieron valorar la biodiversidad y comprender su relación con la sustentabilidad. En este contexto, observaron un humedal y una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) lo que representó una experiencia significativa.

Educación Ambiental para Ingenieros:
Como parte de esta experiencia se promovió la participación estudiantil en el concurso “Educación Ambiental para Ingenieros”, donde se reconoció el esfuerzo y compromiso de los estudiantes en el ámbito de la educación ambiental.

Cuidado del agua por JAPAMI:
Para profundizar el conocimiento del cuidado del agua, los alumnos invitaron a JAPAMI institución comprometida con el uso responsable del agua para brindar una charla donde se destacó como adoptar prácticas sostenibles y responsables en el uso de este recurso.

Análisis de la PTAR:
Finalmente, la colaboración con la institución reguladora reforzó la importancia de asumir una responsabilidad activa como futuros ingenieros en temas de protección ambiental y gestión de recursos hídricos. Con esto se presentó un cartel con el diagnóstico inicial de seguridad e higiene en

la PTAR de TECNM/ITES, el cual permitió a los estudiantes entender las deficiencias del sistema y los retos ambientales asociados. Todo este conjunto de actividades formativas permitió a los estudiantes integrar conocimientos técnicos con una visión ética y sustentable del ejercicio profesional.

A continuación, se muestra la aplicación de un esquema como herramienta visual utilizada por los estudiantes para plasmar las múltiples actividades realizadas durante el análisis dentro de la ingeniería industrial.



Figura 2. Actividades de educación por estudiantes de Ingeniería Industrial enfocadas en el desarrollo sustentable, en el TECNM/ITESI.

RESULTADOS

Mediante el conjunto de acciones se logró la participación en el 2do Congreso Internacional de Administración y Ciencias Sociales en el Tecnológico de Campeche (ITESCAM), los investigadores presentaron el cartel titulado "Diagnóstico inicial de seguridad e higiene en la PTAR del TECNM/ITESI".

La investigación permitió identificar diversas deficiencias en las condiciones de seguridad e higiene dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del ITESI, lo que limita el aprovechamiento eficiente del recurso hídrico. Este hallazgo evidenció la necesidad de implementar medidas correctivas y fortalecer la gestión técnica y operativa de la planta.

Además, la experiencia reforzó el compromiso de los futuros ingenieros industriales con la sostenibilidad, al aplicar herramientas de diagnóstico, análisis de procesos y mejora continua en un contexto ambiental. La participación en el congreso también destacó el valor de la divulgación científica como parte integral del perfil profesional, al permitir compartir propuestas y soluciones a problemáticas ambientales con una comunidad académica más amplia.

CONCLUSIONES

La experiencia formativa permitió a los estudiantes aplicar teoría y práctica en torno al desarrollo sustentable, fortaleciendo su compromiso con la sostenibilidad. Mediante diagnósticos, análisis de

la PTAR y divulgación científica, demostraron capacidad técnica para resolver problemáticas ambientales reales y promover una cultura de responsabilidad e innovación ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

1. MundoConceptual. (s. f.). *Planeta Reverdece: Inspirando Cambios Sustentables - Planeta Reverdece: La plataforma donde la innovación verde cobra vida. Únete, educa y transforma el futuro que compartimos*. Planeta Reverdece: Inspirando Cambios Sustentables. https://desarrollo-sustentable.org/
2. Equipo editorial, Etecé. (2022a, febrero 8). Desarrollo Sustentable - Qué es, tipos, objetivos y ejemplos. Concepto. https://concepto.de/desarrollo-sustentable/

ACTIVACIÓN DE INVERSOR MULTINIVEL DE 15 NIVELES MEDIANTE HARDWARE RECONFIGURABLE

José Juan Alfaro Rodríguez, Mario Alberto Juárez Balderas, Jesús Alberto Cabrera Martínez, Kevin Jonathan González Robles, Guadalupe Aranzazu Camacho Martínez, Julia María García Granados

Tecnológico Nacional de México – ITS Irapuato,
jose.ar@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Recientes avances en aplicaciones industriales como la conversión de energía directa a alterna, siguen impulsando el desarrollo de los inversores multinivel ya que se han convertido en un producto robusto y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones como control de motores, arrancadores de turbinas, compensación de potencia reactiva, propulsión marina, corriente continua de alta tensión, iluminación, conversión de energía eólica y fotovoltaica, tracción ferroviaria, vehículos eléctricos, estaciones de carga, carga inhalámbrica, por nombrar algunos.

Desde su aparición, los inversores multinivel de puentes H en cascada se han popularizado ya que tienen buen rendimiento y eficiencia y bajo dv/dt; están conformados por dos o más inversores de puente H completo conectados en serie, lo cual permite que los interruptores de potencia manejen sólo una parte del voltaje total del sistema que mediante la suma del voltaje de salida de cada inversor es generado cada uno de los niveles de voltaje de salida. Por otra parte el lenguaje de descripción de hardware VHDL mediate el uso de dispositivos programables es una opción para el control de activación de los dispositivos de conmutación de un inversor multinivel.

En el presente trabajo se desarrolla, mediante la tarjeta de desarrollo Nexys A7™ de Digilent, la descripción de hardware y generación de las señales del control de los dispositivos de conmutación para un inversor multinivel de puentes H en cascada de 15 niveles.

Para generar la señal de 15 niveles se utiliza un arreglo de 3 puentes H en cascada diseñado con 12 dispositivos de conmutación y 3 fuentes de DC asimétricas ($V_{DC1}=2V_{DC2}=4V_{DC3}$). Una de las técnicas utilizadas para el control de los dispositivos de conmutación y generar los 15 niveles es conocida técnica de modulación por ancho de pulso de corrimiento de nivel. La validación de la estrategia de modulación realizada en VHDL se realizará mediante software numérico utilizando las técnicas de modulación PO, POD y APOD y se comprueban las técnicas en un ptototipo experimental.

INTRODUCCIÓN

Se puede implementar algoritmos en las FPGAs (Field Programmable Gate Array), denominadas como tarjetas de desarrollo, en trabajos como la generación de PWM trifásicos, PWM en inversores multinivel en cascada, y eliminación selectiva de armónicos en inversores, entre otros.
El diseño de código de control del inversor multinivel se implementó en una tarjeta de desarrollo Nexys A7™ de Digilent la cual se muestra en la figura 1.

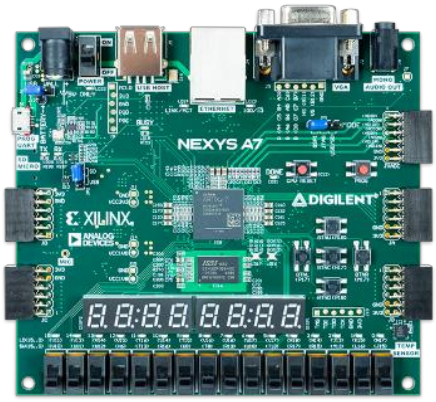


Figura 1. Tarjeta de desarrollo Nexys A7

Algunos trabajos donde se aplican las FPGAs es en la generación de PWM trifásicos aplicado a inversores (Venkatesan 2020), en control de corriente de histéresis multibanda para inversores multinivel de puente H en cascada (Gautam 2023), control de voltaje del capacitor mediante estrategia de modulación CPS-SPWM. (Sun 2016), en la realización de controladores SPWM para inversores (Sarker 2020), balance de capacitores en inversores NPC-MLI en sistemas fotovoltaicos (Bharatiraja 2014) y eliminación de armónicos mediante técnicas LS-PWM en una Spartan 6 (Chitra 2020), entre otros.

TEORÍA

Las técnicas de modulación LS-PWM, (Sarker 2020 y Chitra 2020) mostradas en la figura 2.a,b y c, se basan en la comparación entre una señal senoidal de baja frecuencia y un conjunto de señales triangulares de alta frecuencia llamadas multiportadoras. Dependiendo de la modulación se clasifica en: PD (Phase Disposition), APOD (Alternative Phase Opposition Disposition) y POD (Phase Opposition Disposition).

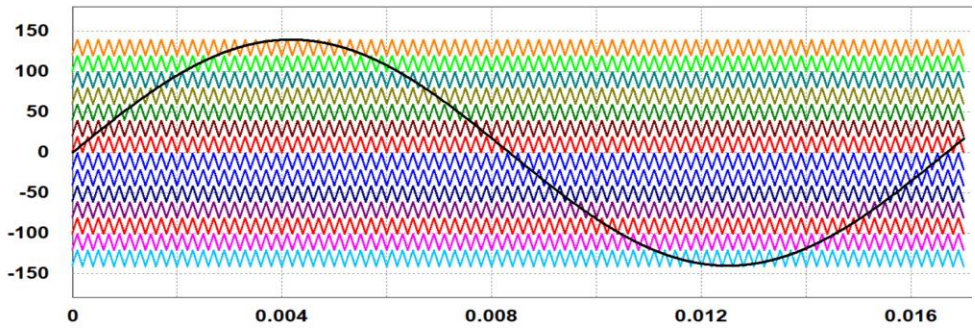


Figura 2.a) Técnica PD (Phase Disposition)

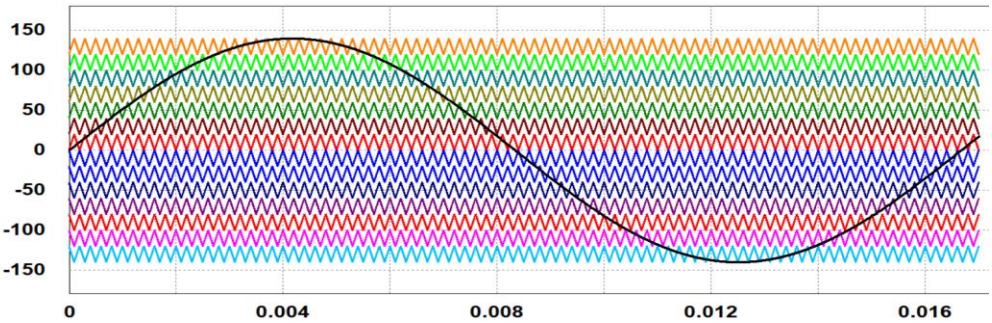


Figura 2.b) Técnica POD (Phase Opposition Disposition)

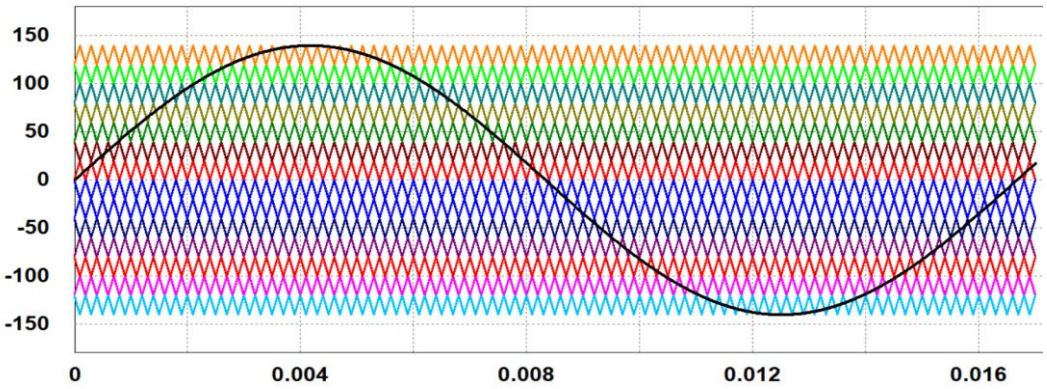


Figura 2.c) Técnica PD (Alternative Phase Opposition Disposition)

CONTROL DEL INVERSOR

Para el diseño del algoritmo de control del inversor multinivel se optó por implementarlo mediante hardware reconfigurable. El diagrama de generación de las señales y las operaciones necesarias para el control de los interruptores se muestran en la figura 3:

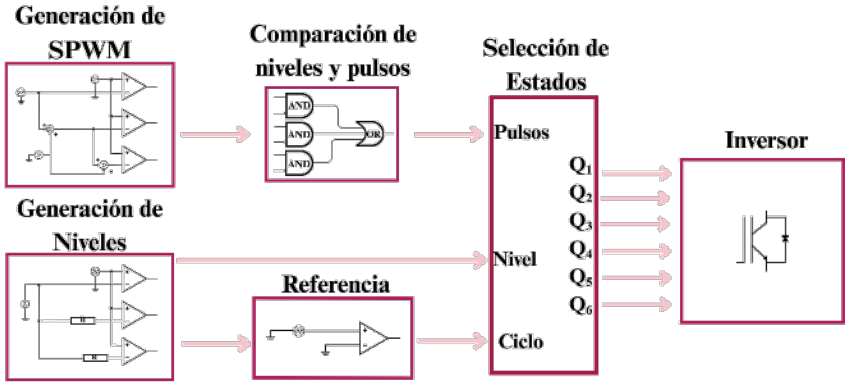


Figura 3) Diagrama de control del inversor

ALGORITMO DE CONTROL

El desarrollo del algoritmo de control se implementa en lenguaje VHDL (Very High Description Language) se realiza en Vivado. Este algoritmo permite generar las señales que activan los dispositivos semiconductores del inversor multinivel (figura 4) y obtener los 15 niveles deseados.

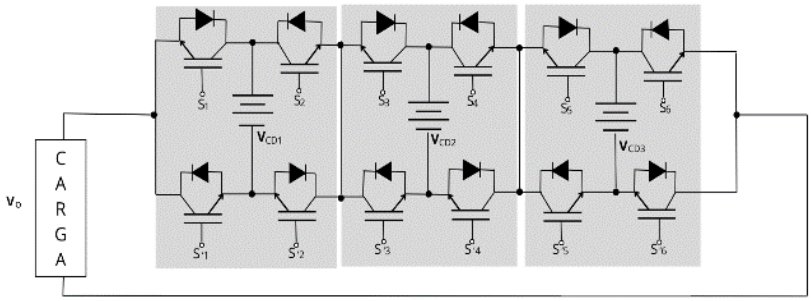


Figura 4) Inversor puente H en cascada de fuentes asimétricas para generar 15 niveles

Al integrar el algoritmo de control, que contiene el código que generar la señal senoidal, las multiportadoras y la lógica combinacional utilizada (figuras 5.a,b) con el prototipo experimental se obtiene la señal multinivel, tanto en simulación como en experimental.

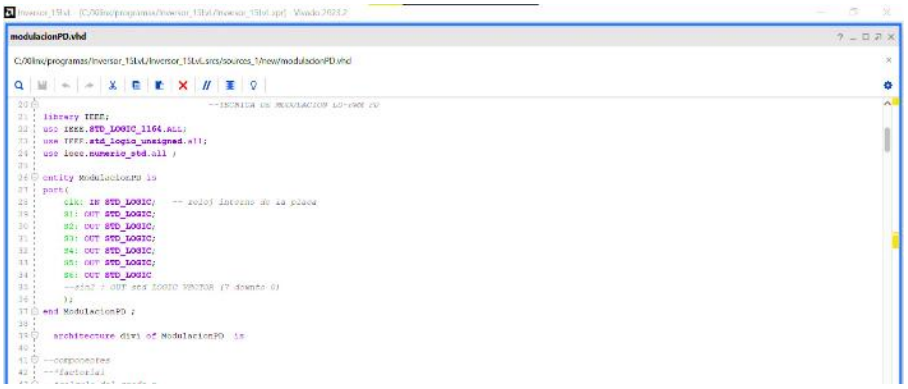


Figura 5.a) Código general para la modulación

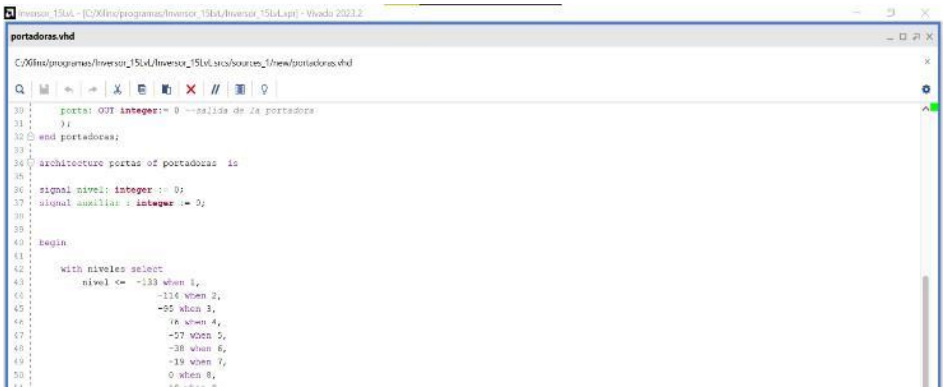


Figura 5.b) Código de generación de portadoras.

RESULTADOS

Se realiza la simulación de la modulación del inversor en software matemático, y del algoritmo de control de VHDL en ModelSim e integrando las señales mediante un prototipo experimental. Se comprueba y se valida la señal de salida generada en el inversor multinivel como se muestra en las figuras 6, 7 y 8.

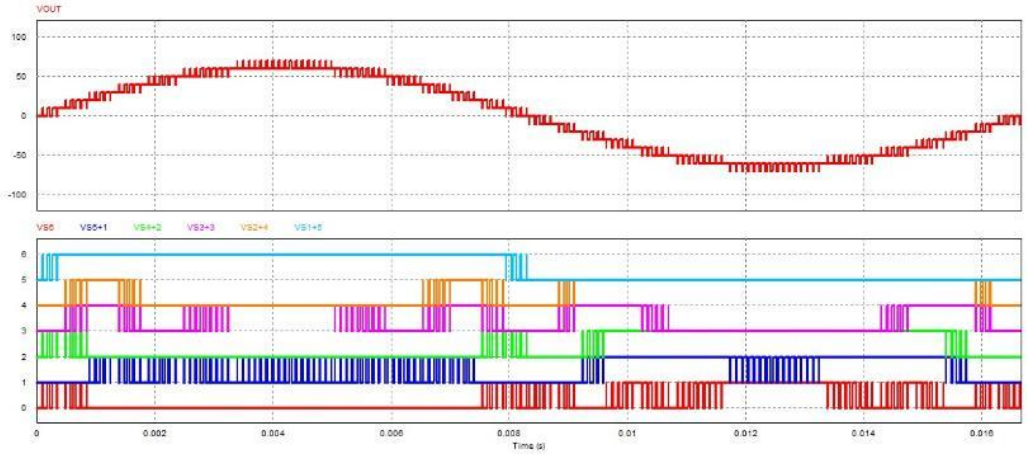


Figura 6. Simulación en software matemático.

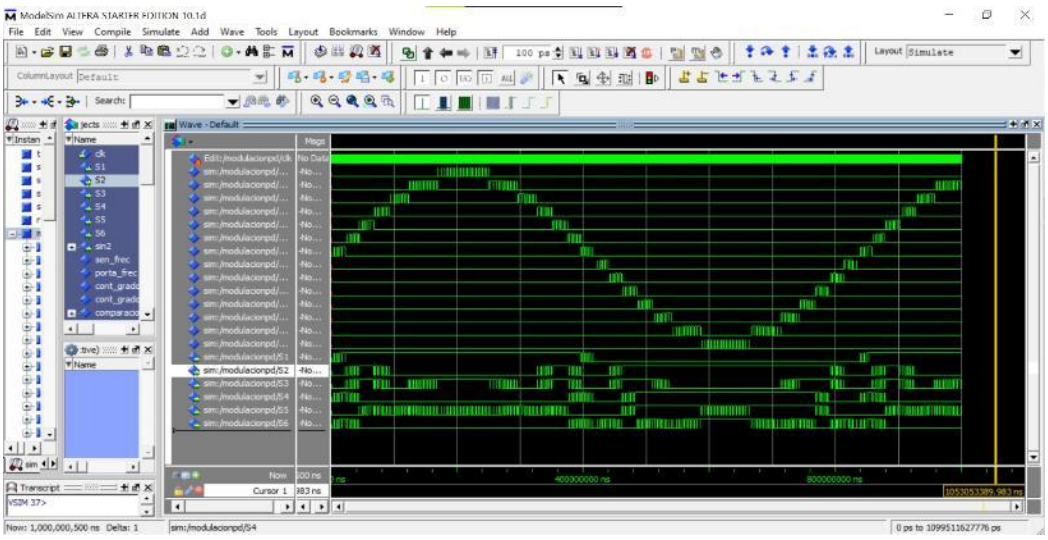


Figura 7. Simulación de algoritmo de control de VHDL en ModelSim.

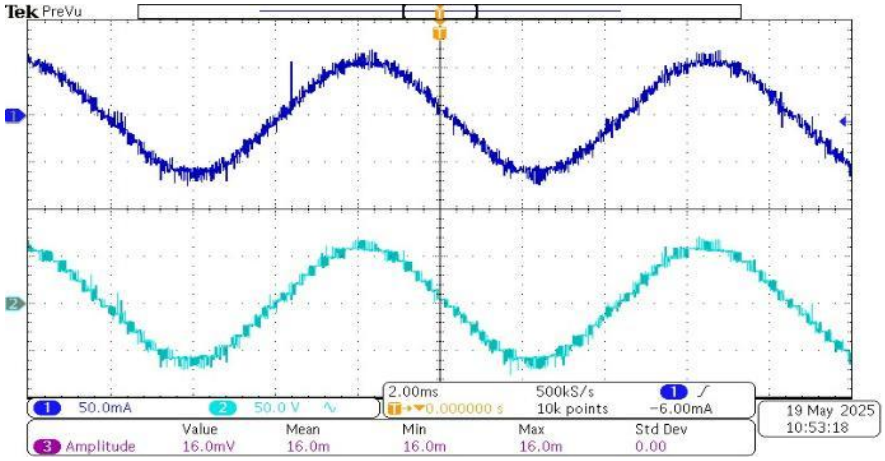


Figura 8. Señal de 15 niveles del prototipo experimental con carga de 100 Ω

CONCLUSIONES

En este artículo se concluye que el algoritmo de control implementado en la tarjeta de desarrollo Nexys A7™ de Digilent mediante lenguaje VHDL se validó mediante la simulación de las técnicas PD, POD y APOD denominadas LSC-PWM. Se comprueba su resultados y operación en un inversor multinivel puente H de 15 niveles utilizando una carga de 100 Ω. Por lo que se cumple el objetivo y los requerimientos para generar una señal multinivel de 15 niveles en el inversor de tres puentes H en cascada con fuentes asimétricas al doble.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. Venkatesan, B. Adhavan, K. Suresh, K. Balachander, M. Lordwin Cencil Prabakar, “Research on FPGA controlled three phase PV inverter using multi carrier PWM control schemes”, Microprocessors and Microsystems 76, 2020, https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103089
2. S. Gautam and R. Gupta, "Switching Frequency Derivation for the Cascaded Multilevel Inverter Operating in Current Control Mode Using Multiband Hysteresis Modulation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 3, pp. 1480-1489, March 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2262807

3. X. Sun, B. Wang, Y. Zhou, W. Wang, H. Du and Z. Lu, "A Single DC Source Cascaded Seven-Level Inverter Integrating Switched-Capacitor Techniques," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 11, pp. 7184-7194, Nov. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2557317.
4. R. Sarker, A. Datta, S. Debnath, "FPGA-based variable modulation-indexed-SPWM generator architecture for constant-output-voltage inverter applications", Microprocessors and Microsystems, Volume 77, 2020,https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103123.
5. C. Bharatiraja, S. Jeevananthan, R. Latha, “FPGA based practical implementation of NPC-MLI with SVPWM for an autonomous operation PV system with capacitor balancing”, Electrical Power and Energy Systems 61, 2014, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.066.
6. S. Chitra, K.R. Valluvan, “Design and implementation of cascaded H-Bridge multilevel inverter using FPGA with multiple carrier phase disposition modulation scheme”, Microprocessors and Microsystems 76, 2020, https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103108.
7. R. Sarker, A. Datta and S. Debnath, "FPGA Implementation of Phase Disposition PWM (PD-PWM) Strategy for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)," 2020 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON), Kolkata, India, 2020, pp. 80-84, doi: 10.1109/ASPCON49795.2020.9276676.

METODOLOGIA PARA LA DETECCIÓN DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE GAS PROPANO EN BASE A LA RESPUESTA ELÉCTRICA DINÁMICA DEL ÓXIDO $CoSb_2O_6$

José Trinidad Guillen Bonilla, Héctor Guillen Bonilla, Maricela Jiménez Rodríguez, Alex Guillen Bonilla, Juan Carlos Estrada Gutiérrez, María Eugenia Sánchez Morales, Lucia Ivonne Juárez Amador

Universidad de Guadalajara.
trinidad.guillen@academicos.udg.mx.

RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología para detectar zonas de riesgo con alta posibilidad de explosión debido a la presencia de gas propano en la atmósfera. En nuestra propuesta, el sensor de gas es fabricado usando el óxido $CoSb_2O_6$ y en base a su respuesta eléctrica dinámica se propone una metodología para hacer la adaptación de señal entre el sensor de gas y un microcontrolador. La metodología consiste en los sientes pasos: a) fabricación de polvos del óxido $CoSb_2O_6$, b) fabricación de sensor de gas, c) caracterización eléctrica de sensor usando pruebas eléctricas dinámicas, d) detección de picos con altas concentraciones de gas, e) regresión lineal para obtener la función matemática de comportamiento concentración Vs. resistencia, f) circuito para adaptación de señal entre sensor de gas y microcontrolador, g) consideración de señales de entrada al microcontrolador, h) consideración de señales de salidas del sistema detector de gas propano, i) condiciones de operación del dispositivo y j) pruebas de funcionalidad. El conjunto de las etapas hace posible la construcción de un prototipo, aplicado en la detección de gas propano, siendo posible ubicar zonas con alto riesgo de explosión. Esta metodología tiene alta posibilidad de aplicarse en el desarrollo de sistemas de seguridad los cuales encuentran aplicación en la industria y en hogares. En la industria puede usarse en procesos de combustión y en hogares puede emplearse en zonas donde el gas propano está presente

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, muchos procesos industriales requieren de vapores los cuales son producidos por calderas y donde al menos son cuatro variables a controlar y monitorear: temperatura, presión, nivel y combustión entre dos gases aire/combustible [1]. En particular, en el proceso de combustión se requiere una relación óptima entre los flujos de aire y combustible, asegurando la mayor cantidad de energía en el proceso de combustión, como consecuencias, el coste es reducido y posibles fugas de combustible a la atmósfera son eliminadas. Estos sistemas de combustión emplean un control de relación y sistemas detectores de llama junto a detectores de gas. El sistema de control de relación es instalado en campo de la planta mientras que el detector de gas es colocado en la chimenea de la caldera con el objetivo de detectar el gas de interés.

Entonces, si un sistema de detección de gas es requerido para detectar atmósferas con gas propano (C_3H_8), el sensor de gas debe de instalarse en la chimenea de la caldera, soportar altas temperaturas, tener tiempo de respuesta corto, tener alta sensibilidad y excelente resolución. Estos sensores pueden fabricarse en base a semiconductores [2] o con un material sensible al gas cuyo interés sea detectarlo [3]. En particular, cuando un sensor es fabricado con semiconductores, el proceso básico es síntesis de polvos, análisis de difracción de rayos X y caracterización eléctrica ya sea estáticas o dinámicas [4,5]. Estas etapas ayudan a conocer las características del sensor y en base a su respuesta eléctrica se puede proponer un circuito electrónico digital para su procesamiento de señales. Este dispositivo electrónico debe tener tiempo corto de ejecución, rápida respuesta, bajo coste económico, fácil implementación y los componentes deben ser fáciles de adquirir.

En este trabajo es propuesta una metodología para detectar diferentes concentraciones de gas propano en base a la respuesta eléctrica de un sensor construido por medio del óxido $CoSb_2O_6$. El procedimiento de fabricación del sensor consiste en la síntesis de material y caracterización de

eléctrica con pruebas dinámicas. En base a su respuesta eléctrica se desarrolla una metodología para la adaptación de señal entre el sensor de gas y un dispositivo digital fundamentado en un microcontroladore PIC. Esta metodología asentará las bases para implementar sistemas de detección de gas toxico en base a su respuesta eléctrica dinámica.

TEORÍA

Un sistema de detección de gas propano (C_3H_8) requiere de un sensor y un sistema electrónico para la adaptación de señal. Entonces, si un sensor de gas es construido y caracterizado, el dispositivo electrónico para su adaptación de señal puede implementarse con microcontroladores, siendo necesario las siguientes etapas: 1) fabricación y caracterización del sensor de gas; 2) circuito para adaptación de señal entre el sensor y el microcontrolador; 3) circuito de interface entre el microcontrolador y el usuario; 4) circuito para corrección de señal; 5) microcontrolador; 6) fuente de alimentación; 7) programación de microcontrolador en base a la teoría de operación del detector de gas. En Figura 1 se muestra esquemáticamente las etapas. Estos dispositivos o prototipos deben tener las siguientes características con el objetivo de reducir posibles catástrofes en la planta industrial o a nivel social por fugas de combustibles:

- *Tiempo corto de respuesta*: esto permite actuar inmediatamente en la corrección del proceso ya que, si la flama se apaga entonces es posible una fuga de combustible a través de la chimenea.
- *Alta resolución:* Sabiendo que la resolución es la mínima variación detectable con el instrumento, depende de las características de los componentes electrónicos y el ruido en el sistema, entonces una alta resolución permite actuar con el menor tiempo posible en la corrección de las señales.
- *Alta sensibilidad*: Ya que este parámetro está relacionado con la resolución, una alta resolución permite una alta sensibilidad, y como consecuencia, la alta sensibilidad provoca tiempos cortos de respuesta en el detector de gas por desarrollar.
- *Conectividad:* Esta característica permite al sistema detector de gas la comunicación con otros dispositivos.

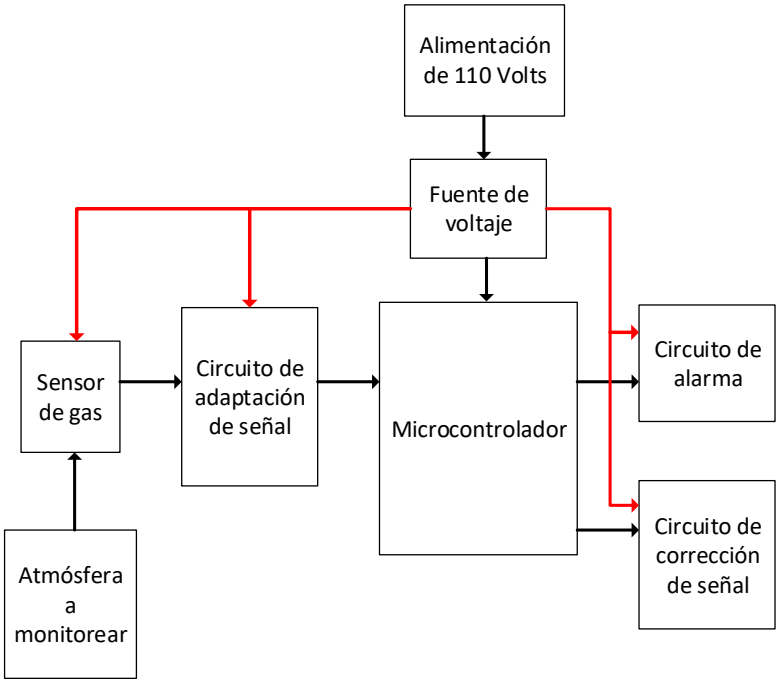


Figura 1. Etapas requeridas para la implementación de un detector de gas propano en base a la respuesta eléctrica dinámica de un sensor de gas fabricado con el óxido $CoSb_2O_6$: líneas rojas indican la alimentación de voltaje y flechas negras indica al proceso

Desde Figura 1, el sensor de gas propano construido en base al óxido $CoSb_2O_6$ se instala en la atmósfera a monitorear y este es alimentado con un voltaje de activación de 5Volts. Sus terminales se conectan a uno de los brazos del puente de Wheatstone el cual es empleado como circuito para adaptar la señal entre el sensor y microcontrolador. Cuando el sensor detecta la presencia de gas en la atmósfera, el sensor sufre una variación de resistencia $\boldsymbol{\Delta R_s}$ causando un desbalanceo en el puente de Wheatstone, y como una consecuencia, el puente tiene dos voltajes de salida $\mathbf{V_a}$ y $\mathbf{V_b}$. Ambos voltajes son medidos con el microcontrolador a través de sus puertos analógicos de entrada. En base a la programación del microcontrolador, la condición $\mathbf{V_a} > \mathbf{V_b}$ es verificada y si esta se cumple, el microcontrolador coloca un uno lógico en una de sus salidas digitales, esta salida digital sirve para activar un circuito electrónico llamado circuito de corrección de señal; la función del circuito es enviar una señal de corrección del proceso, cerrando el flujo de gas propano con una electroválvula. Al mismo tiempo que se cumple la condición $\mathbf{V_a} > \mathbf{V_b}$, el microcontrolador envía una segunda señal a un segundo puerto digital pero esta señal activa a un circuito de alarma. La alarma puede ser sonora o una luz. El sistema detector de gas propano es alimentado con una fuente de 5 Volts la cual está conformada por una clavija, un transformador reductor de 110Volts a 18 Volts, un puente de diodos rectificadores cuya función es convertir la señal de corriente alterna a corriente directa, un filtro analógico usado para eliminar las componentes de frecuencia no necesarias, y finalmente un regulador de voltaje el cual estabiliza a 5 Volts su señal de salida.

PARTE EXPERIMENTAL

Los experimentos de pruebas eléctricas consisten en realizar la medición de la resistencia eléctrica del sensor de gas fabricado en base al óxido $CoSb_2O_6$, cuando una temperatura de 350°C fue aplicada y lo cambios de concentración fueron de 1172, 2290, 3095 y 3701 ppm. Los valores de resistencia registrados fueron 42.56, 43.40. 44.10 y 4.44 KΩ, registrándose variaciones de resistencia debido a los cambios de concentración en el sensor de gas. Para construir la pastilla fueron usados 0.300 g del polvo cuya compactación fue hecha con una prensa hidráulica Simplex Ital Equip-25 Tons, aplicando 10 Ton durante 60s. La pastilla (sensor de gas tiene las siguientes características: 0.5 mm de espesor y 12 mm de diámetro. Previamente a las mediciones de detección de gas; a la pastilla se le colocaron dos contactos óhmicos de pintura de plata coloidal en la superficie (Alfa Aesar, 99%). Más tarde, la pastilla de óxido semiconductor fue colocada dentro de una cámara de medición (Chambers) con capacidad de vacío en 10^{-3} torr [6]. La presión parcial de los gases del Chambers fue controlada usando un detector TM20 Leybold. Mientras que la medición de la resistencia eléctrica se llevó acabo con un multímetro modelo Keithley 2001. Ambos, variaciones de resistencia y concentración fueron medidas y registradas.

RESULTADOS

Los polvos del sensor de $CoSb_2O_6$ se sintetizaron por un proceso de química húmedo asistido con radiación de microondas reportado en la referencia [7]. Posteriormente con los resultados se generó la Tabla 1 donde los valores de resistencia $(\boldsymbol{K\Omega})$ y concentración pueden ser observados.

Tabla 1. Datos experimentales medidos en las pruebas eléctricas del sensor de gas fabricado en base al óxido $CoSb_2O_6$ y temperatura de operación de 350°C.

Resistencia de sensor de gas [KΩ]	Concentración de gas [ppm]
42.56	1172
43.40	2290
44.10	3095
44.44	3701

Observando Tabla 1, la resistencia del sensor incrementa en base al aumento de concentración aplicado sobre el sensor de gas. En base a los cambios de resistencia observados en los sensores de gas y tomando en consideración el proceso descrito en sección dos (teoría), nuevos dispositivos detectores de concentración pueden ser construidos. En Figura 2 se muestra en ejemplo de un sistema detector de gas el cual fue construido en base al procedimiento descrito en la sección de teoría (ver Figura 1).

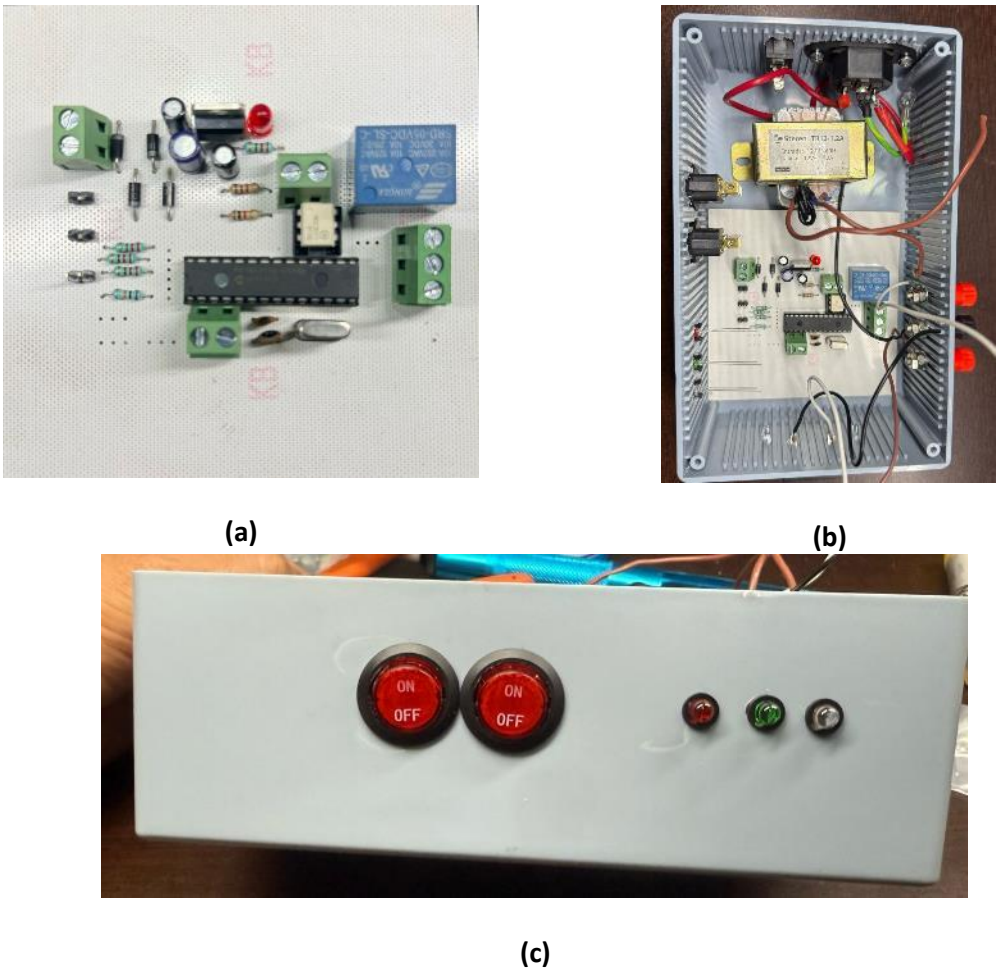


Figura 2. Sistema detector de gas propano fabricado en base al procedimiento descrito en sección 2 (teoría): (a) Tableta electrónica; (b) Vista interna del sistema detector de gas propano, (c) Vista frontal del sistema detector de gas

Desde Figura 2a, la tarjeta electrónica está basada en el microcontrolador, en este caso, el microcontrolador es el PIC16F887. En Figura 2b, la tarjeta electrónica es instalada en una caja con el objetivo de cablear los elementos restantes; botones, resistencias variables, interruptores, entre otras cosas. Finalmente, en Figura 2c es mostrada la cara frontal del detector de gas propano fabricado en base al óxido $CoSb_2O_6$.
Observando Figura 2, el prototipo es económico porque fue fabricado usando componentes comerciales de tamaño grande, sin embargo, su tamaño puede reducirse empleando otro tipo de componentes electrónicos en u fabricación.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología para hacer la adaptación de señal entre un sensor de gas y un microcontrolador. El sensor de gas está hecho en base al óxido $CoSb_2O_6$ y el circuito electrónico está construido por medio de un microcontrolador PIC16F887A. El nuevo detector de concentraciones de gas propano es económico, opera a 350^{o}C, detecta concentraciones dentro del intervalo de 1172 a 3701 ppm, los componentes electrónicos son comerciales por tal motivo tiene bajo coste de fabricación y fácil reparación.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. N. Norizan, N. A. Abdullah, N. A. Halim, S. Z. Ngah Demon and I. S. Mohamad, Heterojuntions of rGO/Metal oxide nanocomposites as promising gas-sensing materials-A review. Nanomaterials, 2022,12,2278.
2. Xing Gao, Tong Zhang. An overview: Facet-dependent metal oxide semiconductor gas sensors. Sensors & Actuators: B. Chemical 277 (2018) 604–633
3. M. Morshed, S. Asaduzzaman, F. Huq Arif, K. Ahmed, Proposal of simple gas sensor based on micro structure optical fiber. 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), 2025, Savar, Bangladesh.
4. A. A. Ralib, A. Syahirah, An Investigation of the sensitivity of polymer-coated Surface acustic wave-based gas sensors in the detection of volatile organic compounds. IIUM Engineering Journal, 2021, Vol. 22, No. 2.
5. J. A. Ramírez-Ortega, H. Guillén-Bonilla, A. Guillén-Bonilla, V. M. Rodríguez-Betancourtt, A Sánchez-Martínez, J. T. Guillén-Bonilla, L. Gildo-Ortiz, E. Huízar-Padilla, J. Reyes-Gómez. Synthesis of the oxide $NiSb_2O_6$ and its electrical characterization in toxic atmospheres for its application as a gas sensor. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 33, pages18268–18283 (2022).
6. A. Guillén Bonilla, V. M. Rodríguez Betancourtt, H, Guillén Bonilla, L. Gildo Ortiz, O. Blanco Alonso, N. E. Franco Rodríguez, J. Reyes Gómez, A. Casillas Zamora, J. T. Guillen Bonilla. A new CO_2 detection system based on the trirutile-type $CoSb_2O_6$ oxide. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, (2018) 29:15741–15753
7. J. T. Guillen Bonilla, H. Guillen Bonilla, V. M. Rodríguez-Betancourtt, A. Guillen Bonilla, A. Casillas Zamora, O. Blanco Alonso, J. A. Ramírez Ortega. A Gas Sensor for Application as a Propane Leak Detector. Journal of Sensors, Volume 2021, Article ID 8871166, 11 pages

CARRO AUTOMÁTICO DE SIEMBRA

José Antonio Valadez Ortega, Jesús Santiago Hernández Ruiz, Héctor Alexander Maldonado Ramírez, José Trinidad Guillen Bonilla, Héctor Guillen Bonilla, María Eugenia Sánchez Morales, Alex Guillen Bonilla,

Universidad de Guadalajara.
trinidad.guillen@academicos.udg.mx

RESUMEN

En este trabajo se propone un prototipo de un carro automático de siembra, el cual tiene la función de automatizar el proceso de siembra de plantas en el campo. En la construcción del prototipo fueron requeridos diferentes sistemas: mecánico, electrónico, comunicaciones, energía solar, y de riego. En el sistema mecánico, los elementos fueron diseñados y utilizados para fabricar el carro automático de siembra, y este hacia posible el movimiento del carro. En el sistema electrónico, se diseñaron, simularon y construyeron circuitos de interfaz de potencia y control con el objetivo de instalarlos en el carro de siembra. Mientras que, en el sistema de comunicaciones, se implementó la comunicación entre el carro de siembra y una estación de trabajo. La comunicación con el carro se fue de forma remota y además se monitoreo parámetros importantes como tipo de terreno y humedad en el medio ambiente. El sistema conto con un panel solar en el carro que junto con un banco de baterías recargables se alimentaba el sistema electrónico del carro. Finalmente, el sistema de riego es usado para rociar de agua a la semilla sembrada con el carro. Experimentalmente, cada una de las etapas fue verificada y posteriormente fueron probadas en conjunto de forma en escala, obteniéndose resultados de funcionalidad prometedores para su aplicación en el campo.

INTRODUCCIÓN

En México, la adopción de tecnologías avanzadas en el sector agrícola sigue enfrentando desafíos significativos. De acuerdo con SAGARPA (2018) [1], la falta de acceso a soluciones tecnológicas accesibles y eficientes ha limitado la modernización del campo mexicano. Frecuentemente, los agricultores dependen de maquinaria pesada para la siembra, lo que no solo implica altos costos operativos, sino también efectos adversos en la calidad del suelo, como la compactación, que reduce su fertilidad a largo plazo (FAO, 2017) [2]. Además, las técnicas manuales de siembra, aún prevalentes en muchas regiones, suelen generar inconsistencias en la distribución de las semillas, lo que afecta negativamente el rendimiento de los cultivos y la eficiencia en el uso de insumos.

Frente a estos desafíos, el Carro Automático de Siembra se presenta como una solución innovadora y sostenible. Este sistema autónomo integra tecnologías de vanguardia como el Internet de las Cosas (IoT), la energía solar y sistemas de navegación autónoma, permitiendo una siembra precisa y eficiente. Según Zhang et al. (2020) [3], la implementación de sistemas autónomos en la agricultura no solo mejora la productividad, sino que también reduce la dependencia de la mano de obra y minimiza el impacto ambiental. Con este enfoque, el Carro Automático de Siembra busca contribuir a la modernización del sector agrícola en México, ofreciendo una alternativa accesible y sostenible para los agricultores.

En este trabajo se propone el Carro Automático de Siembra, el cual surge como una solución innovadora para abordar estos problemas. Este sistema autónomo permite la siembra de cultivos con alta precisión, utilizando tecnologías como IoT, energía solar y sistemas de navegación autónoma. Con su implementación, se espera mejorar la productividad, reducir la mano de obra requerida y minimizar el impacto ambiental en la agricultura.

TEORÍA

El desarrollo del Carro Automático de Siembra requiere la integración de múltiples disciplinas, como electrónica, programación, mecánica y energías renovables. Para lograr un funcionamiento autónomo, preciso y eficiente, es indispensable comprender los principios tecnológicos en los que

se fundamenta cada uno de sus subsistemas. Esta sección presenta la base teórica que sustenta el diseño del prototipo, explicando el funcionamiento y la relevancia de los módulos que lo componen, desde el control de movimiento hasta la distribución de semilla y el abastecimiento energético por medio de energía solar.

En Figura 1 se muestra esquemáticamente cada una de los sistemas requeridos para la construcción del carro automático de siembra. Los sistemas son algoritmo de control y parámetros, control de motores y accionamiento de componentes, movimiento, distribución de semilla, riego de agua, comunicaciones y energía solar.

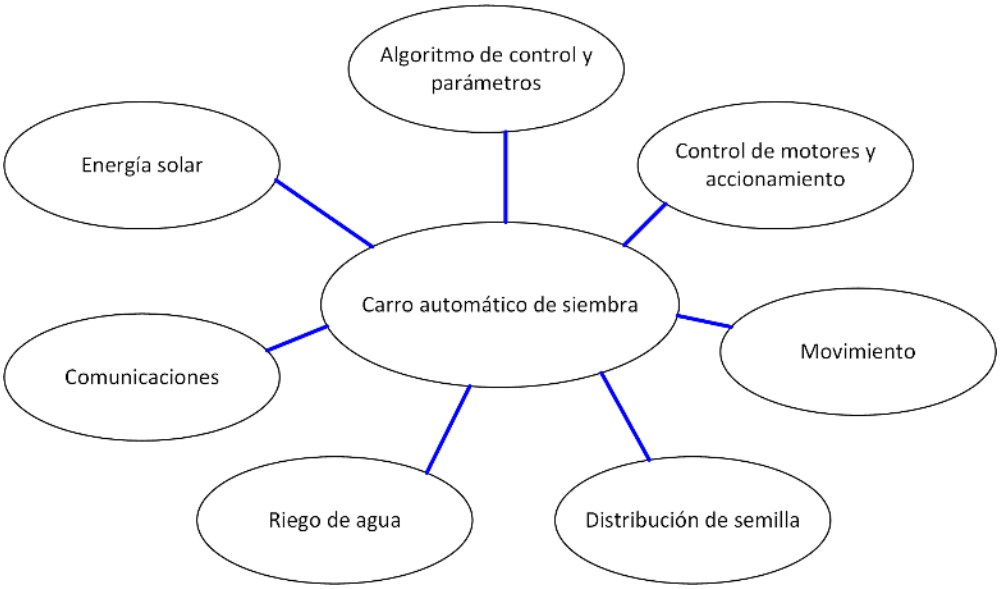


Figura 1. Sistemas necesarios para construir el carro automático de siembra

A continuación, es descrito cada una de los sistemas:

- *Algoritmo de control y parámetros:* el firmware desarrollado para el microcontrolador ESP32 permite que el usuario configure parámetros con el objetivo de optimizar la siembra de acuerdo al tipo de cultivo y las condiciones del terreno. Entre estos parámetros se incluyen la distancia entre semillas, nuero de filas y columnas, área total a cubrir y modo de siembra.
- Control de motores y accionamiento de componentes: El ESP32 está encargado de coordinar el accionamiento de motores de CD, los cuales permiten el movimiento del carro automático de siembra. Esto se logra implementando un puente H basado en relevadores con el que se controla dirección y desplazamiento del carro. Además, con el microcontrolador se accionan otros elementos esenciales como son bomba de agua y servomotor.
- *Sistema de movimiento:* La estabilidad y tracción del carro en distintos tipos de terreno fueron evaluados para el sistema mecánico, asegurándonos de desplazamientos precisos en sentido de frente y en reversa. Este sistema fue verificado en base a los circuitos electrónicos fabricados para el control de los servos motores, motores y bomba de agua.
- *Distribución de semilla:* Este fue probado con el objetivo de garantizar una siembra uniforme y precisa. En la dosificación de semilla se verifico que las semillas se distribuyeran a la distancia configurada por el usuario. se evaluó la uniformidad en la distribución de semillas en diferentes áreas del terreno y la siembra por voleo fue verificada la cual consistía en que las semillas se distribuyeran de manera más dispersa.

- *Riego de agua:* Este sistema fue probado con la meta de garantizar una distribución eficiente de agua en las áreas sembradas. Durante las pruebas fue verificado que la cantidad de agua fuera suministrada adecuadamente para las necesidades del cultivo, se evaluó la uniformidad en la distribución de agua en diferentes áreas del terreno y se probó que el sistema de riego se activará automáticamente según las señales de los sensores de humedad del suelo.
- *Comunicaciones:* En estas pruebas de comunicación se valida el monitoreo en tiempo real y la correcta transmisión de imágenes tomadas por las cámaras ESP32-CAM al correo electrónico del usuario. En las pruebas se incluyó, la transmisión de datos de los sensores midiéndose en tiempo real la temperatura, la humedad, la altitud, la presión y el oxígeno. Tales datos eran transmitidos a la plataforma Blynk
- *Sistema de energía solar:* La autonomía y eficiencia del carro es mejorada a través de un panel de energía solar y un banco de baterías. El panel de energía solar es también usado para recargar el banco de baterías. Mientras que, el banco de baterías es empleado para alimentación de los circuitos electrónicos usados para generar el movimiento del carro automático de siembra

PARTE EXPERIMENTAL

Una vez realizadas las pruebas individuales de cada uno de los sistemas del carro automático de siembra, la operación de los sistemas en conjunto fue probada experimentalmente. Estas pruebas consistieron en realizar una sesión sobre la siembra junto con el riego de agua, verificándose el correcto funcionamiento del movimiento, distribución de semilla, riego, comunicación y energía solar. En el proceso se evaluó la precisión y eficiencia del carro en condiciones reales de operación. Durante el proceso se identificaron áreas de mejora, como la optimización del consumo de energía y la precisión en la distribución de semillas.

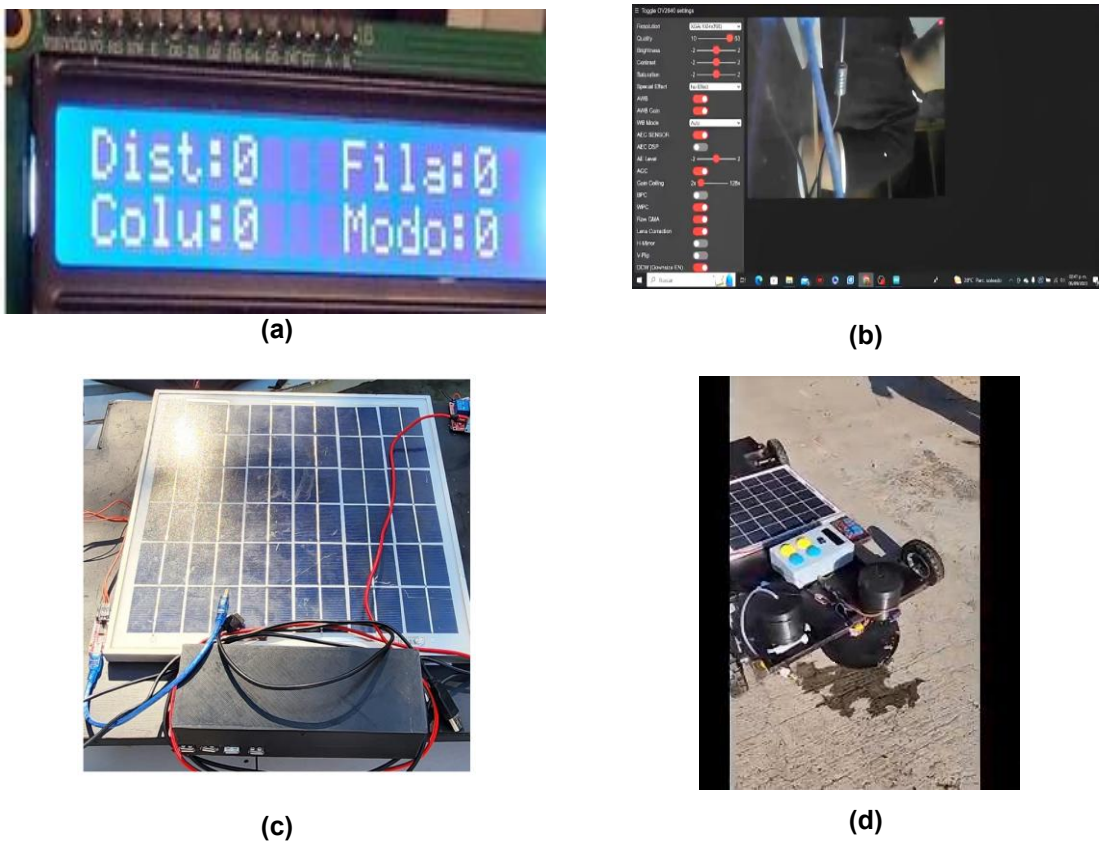
RESULTADOS

En Figura 2 se muestran algunos resultados obtenidos a partir de la fabricación del carro automático de siembra. En Figura 2a se muestra una pantalla LCD donde los siguientes parámetros deben ser configurados: “Dist” indica la distancia que el carro debe recorrer; “Fila” es la fila en el campo de sembradío, “Colu” corresponde a la columna en el campo de sembradío y “Modo” indica el modo de operación identificados como modo 1 y modo 2. En Figura 2b se muestra la pantalla de comunicaciones donde puede observarse una imagen transmitida desde el carro de siembra hasta la PC empleada para el monitoreo. En Figura 2c es mostrado el panel solar utilizado en nuestro sistema de siembra. Finalmente, en Figura 2d se muestra el carro automático de siembre, el cual fue construido en base a las etapas de Figura 1.

En base a los resultados, un carro automático de siembra fue construido y probado experimentalmente. Para su implementación se emplearon las disciplinas de mecánica, comunicaciones, electrónica, desarrollo de software, entre otras. Los puntos siguientes pueden destacarse de nuestro trabajo:

- El sistema es autónomo debido a que opera en forma automática.
- Las pruebas de funcionalidad demostraron su eficiencia en la operación.
- El carro automático de siembra tiene potencial aplicación en agricultura.
- Sus sistemas fueron optimizados y tuvieron excelente funcionamiento
- Su aplicación en agricultura reduce tiempos y esfuerzo de mano/hombre
- Cada uno de sus sistemas fue verificado experimentalmente, demostrándose su eficiencia en operación
- El sistema mecánico del carro automático de siembra se diseñó y construyó utilizando materiales y componentes cuidadosamente seleccionados para garantizar su funcionalidad y durabilidad.

- Los materiales empleados son fundamentales para su correcto funcionamiento, ya que define la estructura, los mecanismos de movimiento y la transmisión de potencia. En este capítulo se detallarán los materiales utilizados, los mecanismos de tracción y dirección, así como los engranes impresos en 3D diseñados específicamente para este proyecto.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 2. Resultados obtenidos en la construcción del carro automático de siembra.

CONCLUSIONES

El carro automático de siembra ha cumplido exitosamente con los objetivos establecidos, demostrando ser una solución eficiente y autónoma para la siembra. La implementación de sistemas mecánicos, electrónicos y de energía, junto con el uso de energía solar, ha permitido optimizar recursos y reducir costos operativos, promoviendo la sostenibilidad.

La tecnología utilizada, como el microcontrolador ESP32 y el sistema de navegación autónoma, ha garantizado una siembra precisa y el monitoreo en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

1. Informe de la FAO analiza cómo la automatización en la agricultura contribuye a transformar los sistemas agroalimentarios. FAO. https://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/1613568/.
2. SAGARPA. (2018). Diagnóstico del sector rural y pesquero. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

3. FAO. (2017). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
4. Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2020). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 1-17

APLICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL EN LA CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN EL CALZADO

Jorge Armando Ramos Frutos[1], Israel Miguel Andrés[1], Diego Oliva Navarro[2], Javier Pérez Inocencio[3], Octavio Ramírez Rojas[3] y Andrés Emiliano Macías Vázquez[1]

[1] Posgrados, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), León, México. [2] División de Tecnologías para la Integración Ciber-Humana, Universidad de Guadalajara (CUCEI), Guadalajara, México. [3] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Jiquilpan, Jiquilpan, México

RESUMEN

La toma de decisiones en la industria manufacturera, específicamente en el sector del calzado, depende en gran medida de la evaluación humana, lo que introduce subjetividad y posibles errores en la inspección de calidad. Actualmente, muchos procesos carecen de automatización y criterios objetivos para determinar si el calzado cumple con los estándares acordados. La Inteligencia Artificial (IA) emerge como una herramienta clave para mejorar estos procesos, ofreciendo métodos precisos y escalables. El objetivo de este estudio es proponer una metodología basada en algoritmos de Aprendizaje Automático (AA) para la detección automática de defectos en calzado, utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. Se desarrolló un sistema de clasificación mediante una Máquina de Soporte Vectorial (SVM), combinando dos descriptores de imágenes: los momentos de Hu (para características geométricas) y el descriptor de Patrón Binario Local (LBP, para texturas). El modelo se entrenó y validó con un conjunto de 500 imágenes de calzado, etiquetadas según tres tipos de defectos. Para evaluar el rendimiento, se emplearon métricas como precisión, curvas ROC (Receiver Operating Characteristic) y el Área Bajo la Curva (AUC), que permiten medir la capacidad discriminativa del clasificador. El SVM alcanzó una precisión superior al 90% en la clasificación de defectos, demostrando una alta efectividad para clasificar imágenes de calzado. Las curvas ROC y los valores de AUC (cercanos a 1) confirmaron un excelente desempeño en la distinción entre zapatos defectuosos y no defectuosos. Estos resultados validan la robustez de la metodología propuesta, destacando su potencial para integrarse en líneas de producción reales. Este trabajo muestra que la combinación de descriptores de imágenes (momentos de Hu y LBP) con SVM ofrece una solución viable para la inspección de calidad en la industria del calzado con criterios objetivos, reduciendo la subjetividad humana. Los altos niveles de precisión y las métricas de evaluación respaldan la escalabilidad del método en entornos industriales.

INTRODUCCIÓN

La industria del calzado, especialmente en regiones con alta concentración de manufactura artesanal como el estado de Guanajuato en México, representa un sector estratégico tanto por su impacto económico como por su valor cultural. No obstante, uno de los principales desafíos que enfrenta esta industria es el aseguramiento de la calidad en los productos terminados. En la mayoría de las fábricas y talleres, el control de calidad se basa en inspecciones visuales realizadas por operarios humanos, las cuales dependen en gran medida de la experiencia individual, lo que introduce una fuerte carga de subjetividad, variabilidad en los resultados y una alta probabilidad de error. Esta situación no solo limita la escalabilidad de los procesos, sino que también compromete la uniformidad del producto y la satisfacción del cliente final.

En este contexto, la automatización del proceso de inspección se presenta como una necesidad urgente y estratégica. Gracias al avance de las tecnologías emergentes asociadas a la llamada Industria 4.0; particularmente la inteligencia artificial (IA), la visión por computadora y el aprendizaje automático (Machine Learning, ML), es posible desarrollar soluciones inteligentes que detecten,

clasifiquen y evalúen defectos con gran precisión y consistencia. Estas tecnologías no solo permiten reducir la carga de trabajo humano y eliminar la subjetividad, sino que también posibilitan la trazabilidad, el análisis predictivo y la mejora continua del proceso productivo.

El presente estudio propone una metodología automatizada para la detección de defectos en calzado artesanal mediante el uso de una Máquina de Soporte Vectorial (Support Vector Machine, SVM), un algoritmo supervisado de clasificación reconocido por su capacidad para resolver problemas complejos incluso con conjuntos de datos de tamaño moderado. La propuesta se complementa con la extracción de características de las imágenes a través de descriptores visuales: los momentos de Hu, que capturan la información geométrica de las formas, y el Local Binary Pattern (LBP), que extrae patrones texturales clave en superficies. Estas herramientas permiten representar matemáticamente los defectos presentes en la superficie del calzado.

El sistema propuesto fue entrenado con una base de datos compuesta por 500 imágenes etiquetadas manualmente, que incluyen distintos tipos de defectos: raspaduras, diferencias de tono en el color, y presencia de suciedad o impurezas. En la Fig. 1 se ilustran ejemplos representativos de estos defectos.



a) b) c)

Figura 1. Algunos defectos en el calzado artesanal. a) Raspón, b) tonos distintos y c) falta de limpieza

El resto del documento se estructura en la Sección 1 con los trabajos relacionados con la clasificación de defectos utilizando algoritmos de aprendizaje máquina.

Trabajos relacionados

La aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la detección de defectos en procesos de manufactura ha sido ampliamente investigada en diversas industrias. A continuación, se presentan algunos estudios relevantes que respaldan y contextualizan la metodología propuesta en este trabajo:

- Inspección automatizada en chips LED: Se desarrolló un sistema de inspección automática para clasificar micro defectos en chips LED utilizando SVM con diseño óptimo de parámetros. El sistema logró una tasa de reconocimiento superior al 96%, demostrando la eficacia de las SVM en la clasificación precisa de defectos en componentes electrónicos [1].
- Detección de defectos en productos de film envolvente: En este trabajo se propuso un enfoque híbrido que combina redes neuronales convolucionales (CNN) y SVM de una clase (OCSVM) para detectar defectos en productos de film envolvente. Utilizando vectores de covarianza derivados de autoencoders variacionales, el sistema alcanzó una precisión del 90% en la detección de defectos, incluso sin necesidad de imágenes defectuosas para el entrenamiento [2].
- Sistema de visión artificial para cajas de embalaje: Se desarrolló un sistema inteligente de visión artificial basado en SVM para detectar defectos superficiales en cajas de embalaje. El estudio destacó la superioridad de las SVM en comparación con otros métodos de

extracción de características, como el patrón binario local (LBP), en la clasificación de defectos en superficies con texturas aleatorias [3].

- Aplicación de SVM en manufactura de metales: Aquí se evaluaron diversas técnicas de aprendizaje automático, incluyendo SVM, para mejorar la calidad en la manufactura de productos metálicos. Aunque las redes neuronales mostraron la mayor precisión, las SVM destacaron por su rapidez en el entrenamiento y su eficacia en la clasificación de ciertos tipos de defectos, como rayaduras y problemas de dureza [4].

Estos estudios evidencian la versatilidad y eficacia de las SVM en la detección y clasificación de defectos en diversos contextos industriales. La combinación de SVM con descriptores de imagen, como los momentos de Hu y LBP, ha demostrado ser una estrategia efectiva para automatizar el control de calidad, reducir la dependencia de inspecciones visuales humanas y mejorar la consistencia en la detección de defectos.

METODOLOGÍA

La metodología consiste en la extracción de características que serán clasificadas por el SVM (Fig. 2). El primer paso es dar lectura a la imagen en los canales RGB. Para disminuir el costo computacional, se realiza un cambio a escala de grises y se reduce el tamaño de la imagen. Con la imagen redimensionada se lleva a cabo la segmentación por umbralización multinivel en los defectos. Con los defectos segmentados, se pueden extraer las características con LBP y los momentos de Hu. Estas características son la entrada del SVM que se dará a la tarea de clasificar el tipo de defecto o no defecto observado en las imágenes.

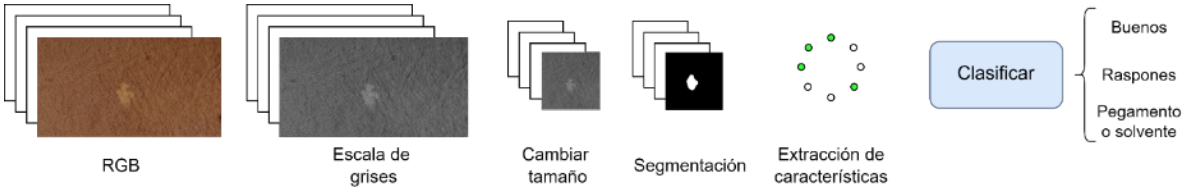


Figura 2. Metodología para la clasificación de defectos en superficies de calzado artesanal.

La evaluación comparativa del modelo SVM incluyó cuatro algoritmos de referencia: Adaptive Boosting (ADABOOST) [5], Árboles de Decisión (DT) [6], Análisis de Discriminante Lineal (LDA) [7] y Naive Bayes (NB) [8], cuyos parámetros (Tabla 1) se optimizaron mediante experimentación.

Tabla 1. Parámetros de los algoritmos comparados en el problema de clasificación de defectos en superficies de calzado artesanal.

Algoritmo	Parámetros
ADABOOST	n_estimators=50, learning_rate=1.0
DT	criterion= gini, min_samples_leaf=5, min_samples_split=20, max_depth=5
LDA	solver=svd, n_components=2
SVM	C=1.0, max_iter=1000, kernel = linear
NB	var_smoothing=1e-09

RESULTADOS

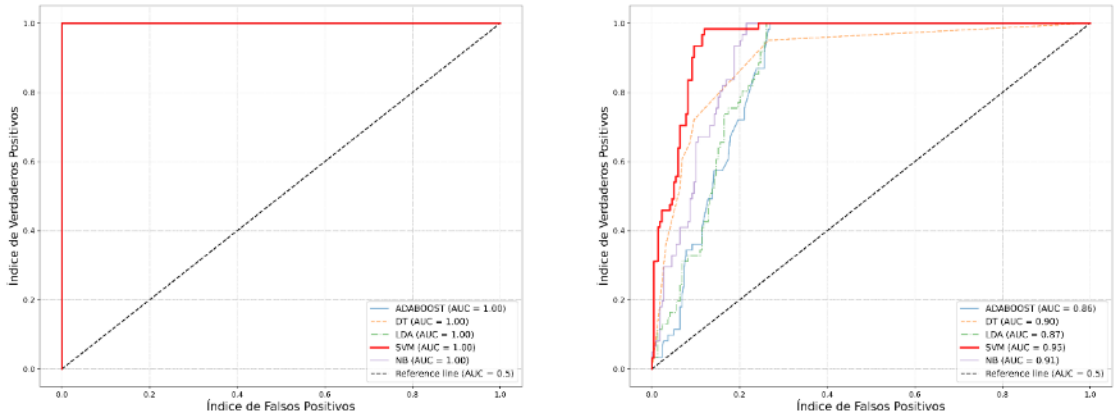
El clasificador SVM demostró el mejor rendimiento, con un 90% de exactitud y métricas superiores (Precisión = 0.874, F1-score = 0.842, Recall = 0.845), confirmando su robustez en la clasificación de defectos. El DT tuvo un desempeño aceptable, aunque inferior al SVM, mientras que NB mostró

limitaciones debido a su enfoque simplificado. Las métricas Cohen Kappa (0.828) y Jaccard (0.745) validan la consistencia del SVM, superando significativamente el azar y alineándose con estudios previos que respaldan su eficacia en visión por computadora. Estos resultados destacan al SVM como la mejor opción para esta tarea, gracias a su capacidad para manejar características combinadas y su alto poder discriminatorio, ver Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de los algoritmos comparados en el problema de clasificación de defectos en superficies de calzado artesanal.

Clasificador	Exactitud	Presición	F1-score	Recall	Jaccard	Cohen Kappa
ADABOOST	7.78E-01	6.49E-01	5.91E-01	6.61E-01	5.13E-01	6.21E-01
DT	8.75E-01	8.08E-01	8.07E-01	8.07E-01	7.01E-01	7.86E-01
LDA	7.67E-01	6.41E-01	6.37E-01	6.43E-01	5.31E-01	6.01E-01
SVM	**9.00E-01**	**8.74E-01**	**8.42E-01**	**8.45E-01**	**7.45E-01**	**8.28E-01**
NB	8.42E-01	7.58E-01	7.57E-01	7.58E-01	6.44E-01	7.31E-01

Para complementar el análisis del SVM se agregan las curvas ROC y el AUC en la Fig. 3. Se observa que la predicción de los no defectuosos es perfecta y el AUC es igual que 1.



a) b)

Figura 3. Curvas ROC y AUC del SVM con los algoritmos comparados.

En la Fig. 4 se muestran las matrices de confusión que se obtienen con los algoritmos de clasificación comparados. Logrando un mayor acercamiento a las capacidades de estos algoritmos.

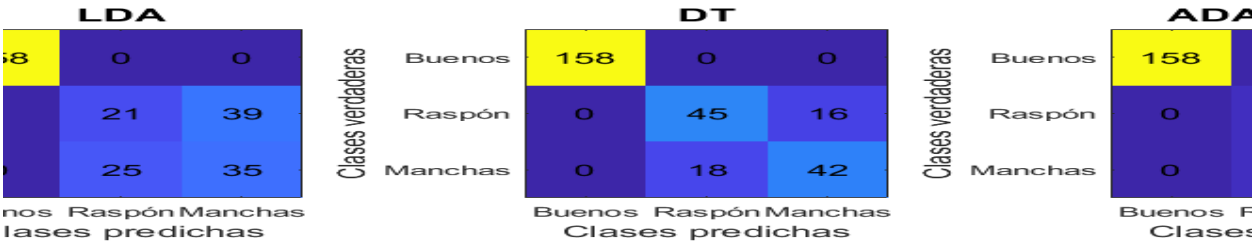


Figura 4. Matrices de confusión de los clasificadores probados en las superficies de calzado artesanal.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología eficaz para la clasificación de defectos en calzado artesanal mediante el uso de técnicas de visión por computadora y aprendizaje automático. Se demuestra que

el uso combinado de momentos de Hu y LBP como descriptores de imagen, junto con un clasificador SVM, permite alcanzar resultados sobresalientes en términos de precisión y robustez.

La propuesta no solo mejora la eficiencia del control de calidad, sino que también disminuye la dependencia de la inspección humana, reduciendo errores y mejorando la trazabilidad del proceso. La metodología puede ser fácilmente adaptada a otras industrias que enfrentan retos similares en inspección visual.

En trabajos futuros, se sugiere explorar enfoques híbridos que combinen SVM con técnicas de optimización o redes neuronales para incrementar aún más el desempeño del sistema. También sería valioso implementar esta metodología en una línea de producción real para validar su impacto en condiciones industriales.

BIBLIOGRAFIA

[1] Wu, C.-F., Hsu, C.-T., Liu, Z.-X., & Wu, H.-C. (2016). Applying the support vector machine with optimal parameter design into an automatic inspection system for classifying micro-defects on surfaces of light-emitting diode chips. Journal of Intelligent Manufacturing, 27(5), 1033–1043.

[2] Tao, X., Zhang, D., Ma, W., Liu, X., & Xu, D. (2018). Automatic metallic surface defect detection and recognition with convolutional neural networks. Applied Sciences, 8(9), 1575.

[3] Wu, Y., & Lu, Y. (2019). An intelligent machine vision system for detecting surface defects on packing boxes based on support vector machine. Measurement and Control, 52(9–10), 1182–1189.

[4] Tao, Y. (2024). Research on metal image defect detection based on convolutional neural network, random forest model and support vector machine model. Applied and Computational Engineering, 45, 312–318.

[5] Y. Freund and R. E. Schapire, "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting," Journal of Computer and System Sciences, vol. 55, no. 1, pp. 119–139, 1997.

[6] L. Breiman, J. Friedman, C. J. Stone, and R. A. Olshen, Classification and Regression Trees. Belmont, CA: Wadsworth, 1984.

[7] R. A. Fisher, “The use of multiple measurements in taxonomic problems,” Annals of Eugenics, vol. 7, no. 2, pp. 179–188, 1936.

[8] P. Langley, W. Iba, and K. Thompson, “An analysis of Bayesian classifiers,” in Proceedings of the Tenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-92), 1992, pp. 223–228.

DETECTOR DE DIOXIDO DE CARBONO FABRICADO EN BASE A LA RESPUESTA ELÉCTRICA DEL OXIDO $NiSb_2O_6$

José Trinidad Guillen Bonilla[1], Héctor Guillen Bonilla[1], María Eugenia Sánchez Morales[1], Alex Guillen Bonilla[1], Maricela Jiménez Rodríguez[1], Corazón de Jesús Gutiérrez Bogarin[1], Emilio Huizar Padilla[2], Juan Carlos Estrada Gutiérrez[1]

[1] Universidad de Guadalajara, [2] Universidad de Colima.
trinidad.guillen@academicos.udg.mx.

RESUMEN

En este trabajo se propone un prototipo para la detección del gas dióxido de Carbono (CO_2) y opera en atmosferas con altas temperaturas (300°C). El dispositivo se diseña en base a la respuesta eléctrica del sensor de gas y en el tiempo de respuesta del dispositivo. El sensor de gas fue fabricado usando el óxido $NiSb_2O_6$ y el circuito electrónico fue construido usando el microcontrolador PIC16F887A. La adaptación de señal entre el sensor de gas y el microcontrolador fue hecha por medio de un puente de Wheatstone cuyas señales de salida eran las señales de entrada en los canales analógicos del microcontrolador. El prototipo detector de gas dióxido de carbono opera a una concentración de gas de 50 ppm, una temperatura de 300°C y su tiempo de respuesta fue de aproximadamente 1.2 s. Para la construcción del dispositivo se consideraron 5 etapas básicas: 1) fabricación de sensor de gas con el óxido $NiSb_2O_6$; 2) caracterización del sensor de gas con pruebas eléctricas estáticas; 3) diseño de circuito electrónico para la adaptación de señal en base a la respuesta eléctrica del sensor; 4) conexión de dispositivos para las señales de entrada; 5) conexión de dispositivos para las señales de salida; 6) programación de microcontrolador PIC16F887A; 7) pruebas de funcionalidad. Cada una de las etapas fue probada comprobándose la eficiencia del prototipo detector de gas tóxico.

En base a los resultados, el prototipo, detector de gas dióxido de carbono tiene un buen funcionamiento, es ideal para aplicarse en sistemas de seguridad industrial ó en casa habitación, es económico y tiene fácil construcción.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en instalaciones industriales son usados dispositivos de detección de gases tóxico con el objetivo de la seguridad industrial. Estos sistemas de protección están conformados por un sensor de gas tóxico y un sistema electrónicos para su adaptación de señal. Los sensores pueden ser de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), gas propano (C_3H_8), entre otro tipo de gases [1,2]. Por otro lado, el dispositivo electrónico implementado para la adaptación de señal puede ser basado en electrónica analógica o digital [3].

Con respecto a los sensores de gas, existen dos tipos de sensores donde cada uno de ellos tiene su principio de funcionamiento y dependen del método de fabricación. En base a su principio de operación, hay dos grupos generales: grupo 1) los sensores funcionan por medio de absorción, reacciones químicas y de contacto con el gas; grupo 2) los sensores funcionan en base a emisiones infrarrojas o ultrasónicas. Otra forma de agrupar es por medio del gas detectado y estos pueden ser 1) los sensores que detectan gases combustibles son generalmente catalíticos, infrarrojos y semiconductores; 2) los sensores que detectan gases tóxicos son generalmente electroquímicos y de semiconductores de óxido de metal. A continuación, el principio de funcionamiento de algunos sensores es descrito:

- *Sensores infrarrojos:* Su principio de funcionamiento se basa en la absorción de energía a la longitud de onda del infrarrojo cuando el gas está entre una fuente emisora y un detector de luz. Una característica importante es que, estos tipos de sensores son funcionales cuando el gas tiene más de un tipo de átomo (dióxido de carbono, CO_2; metano, CH_4; propano, C_3H_8)

y cuando el gas solamente tiene un tipo de átomo no son operativos (Oxigeno O_2 Hidrogeno H_2).

- *Sensores ultrasónicos:* Su principio es basado en la modificación del ruido de fondo del ambiente cuando el gas está entre una fuente sónica (entre 25KHz y 10MHz) y un receptor con el mismo intervalo de frecuencia. Estos sensores son principalmente aplicados en tuberías.
- *Sensores electroquímicos:* consisten de dos electrodos divididos por una capa de electrolitos, los cuales pueden ser líquidos o sólidos en forma de gel. Cuando el gas entra al sensor a través de una membrana y un diferencial de potencial está siendo aplicado, existe una reacción de reducción-oxidación que genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración de gas.
- *Sensores catalíticos:* Están compuestos por dos bobinas de platino, ambas encapsuladas con un material cerámico de alúmina. Uno de estos está cubierto frecuentemente de paladio que acelera la oxidación del elemento (reconocida como elemento detector), mientras que el otro no tiene ese material para la oxidación del gas (conocido como elemento de referencia), motivo por el cual es inerte. Su funcionamiento es basado en la oxidación del gas vía catalítica. En este caso existe una oxidación del gas en la superficie del elemento catalítico debido a calor generado con una bobina eléctrica. La corriente aplicada hace que la bobina alcance temperaturas entre 450^{o}C y 550^{o}C. Cuando el gas ha sido oxidado, causa un incremento de temperatura en el elemento detector, provocando un desajuste en el circuito mediante la variación de resistencia eléctrica. Mientras que, el elemento de referencia permanece sin cambios de resistencia.
- *Sensores semiconductores:* Estos sensores funcionan en base a una película o pastilla sensible al gas de interés, pueden operar en ambientes húmedos y a altas temperaturas (entre 250^{o}C y 350^{o}C). Los semiconductores pueden ser del tipo n o p. En estos sensores, una reacción química ocurre cuando el gas hace contacto con la película (perteneciente al sensor), provocando una variación de conductancia y como una consecuencia, la resistencia cambia. El valor del cambio de resistencia depende de la concentración medida en partículas por millón (ppm). Para su adaptación de señal, estos sensores son conectados frecuentemente a uno de los brazos de un puente de Wheatstone o un divisor de tensión.

En este trabajo se propone un novedoso sistema digital para la detección del gas Dióxido de Carbono CO_2. El sensor fue fabricado con partículas del óxido $NiSb_2O_6$. El diseño de los circuitos electrónicos se basó en las señales de la resistencia eléctrica obtenida cuando una pastilla del óxido $NiSb_2O_6$ fue sometido a diferentes concentraciones de gas CO_2, así como a diferentes temperaturas de operación. La pastilla se coloca en uno de los brazos del puente de Wheatstone el cual es alimentado con una fuente de corriente directa (CD). La salida del puente de Wheatstone se conecta a dos entradas analógicas de un microcontrolador PIC16F887A (PIC Peripheral Interface Controller por sus siglas en inglés). A través de la programación del microcontrolador PIC se detecta cuando en la atmosfera existe la presencia de gas CO_2 y si no existe. Cuando se detecta gas en la atmosfera, el dispositivo muestra el mensaje “Presencia de gas en atmósfera” a través de una pantalla LCD. Sin embargo, cuando no se detecta la presencia de gas tóxico, el dispositivo solamente muestra el mensaje “no existe gas en la atmósfera”. Este dispositivo es fabricado y probado experimentalmente. Con los resultados obtenidos se demuestra la alta factibilidad de construir un dispositivo electrónico económico para detectar distintas concentraciones de gas CO_2. Su aplicación puede ser industrial y doméstica.

MATERIALES Y MÉTODOS

a) Síntesis de polvos del óxido $NiSb_2O_6$

Para obtener los polvos del óxido $NiSb_2O_6$ fue usado un proceso de química húmedo asistido con radiación de microondas. En su fabricación se empleó: 1.4560 g de $Ni(NO_3)_2{\bullet}6H_2O$ (Mallinckrodt Beker, 99%), 2.2802 g de $SbCl_3$ (Sigma-Aldrich ≥ 99%) y 0.5 mL de etilendiamina (Sigma-Aldrich ≥ 99%). Los reactivos fueron diluidos en 5 mL de alcohol etílico absoluto (CTR) y posteriormente fueron

agitados a temperatura ambiente por 20 minutos. Las soluciones de nitrato de níquel y cloruro de antimonio fueron agregadas por goteo a la solución de etilendiamina, la mezcla resultante produjo un precipitado de color verde que se mantuvo en agitación a temperatura ambiente pore 24 h a una velocidad de 300 rpm. La evaporación del solvente fue hecha mediante aplicación de microondas a baja potencia donde un microondas doméstico General Electric modelo JES796WK fue empleado. Para la evaporación, 17 exposiciones fueron realizadas por 90 segundos a una potencia de 140 W (la energía adsorbida por la solución se estimó en ~214.2 kJ). Posteriormente, al material precursor se le aplicó dos tratamientos térmicos; el primero fue un secado a 200 °C por 8 h, mientras que el segundo fue una calcinación a 800 °C durante 5 h. Los tratamientos térmicos fueron realizados en una mufla marca novatech de control programable con aumentos de temperatura de 100 °C/h en aire. El procedimiento completo fue descrito en la referencia [4].

b) Caracterización eléctrica de sensor de gas

Los experimentos de las pruebas de sensibilidad consistieron en medir los cambios de resistencia eléctrica de la pastilla del $NiSb_2O_6$ cuando se aplica una temperatura de 100 °C en diferentes concentraciones de C_3H_8 (0, 5, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 ppm). Para la construcción de la pastilla (sensor de gas), 0.300 g del polvo a 800 °C fueron usados los cuales fueron compactados con una prensa hidráulica Simplex Ital Equip-25 Tons, aplicando 10 toneladas durante 60s. Las dimensiones de la pastilla fueron en 0.5 mm de espesor y 12 mm de diámetro. Previamente a las mediciones de detección de gases; a la pastilla se le colocaron dos contactos óhmicos de pintura de plata coloidal en la superficie (Alfa Aesar, 99%). Más tarde, la pastilla de $NiSb_2O_6$ fue colocada dentro de una cámara de medición (Chambers) con capacidad de vacío en 10^{-3} torr. La presión parcial de los gases del Chambers fue controlada usando un detector TM20 Leybold. Mientras que la medición de la resistencia eléctrica se llevó acabo con un multímetro modelo Keithley 2001. Finalmente, para calcular la magnitud de la sensibilidad (S) fue usada la ecuación [10, 12, 14]: $\boldsymbol{S = \frac{G_G - G_o}{G_o}}$ donde, $\boldsymbol{G_G}$ y $\boldsymbol{G_o}$ son las conductancias de la pastilla (1/resistencia eléctrica) en las pruebas de gas (C_3H_8) y aire.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

a) Respuesta eléctrica de sensor de gas

La respuesta eléctrica del sensor de gas fabricado en base al óxido $NiSb_2O_6$ y debido a su exposición a las concentraciones de gas dióxido de carbono (CO_2), puede observarse en Tabla 1. En esta Tabla 1 es observable que el sensor de gas es sensible a las variaciones de concentraciones de gas CO_2 ya que su resistencia eléctrica cambia por las variaciones de concentración de gas. Su alta respuesta está relacionada con la absorción de gas en la superficie del sensor. Así como al aumento de la concentración de gas en la prueba. Esto se corrobora en los valores de la Tabla 1 ya que si la concentración de gas aumenta la eficiencia del sensor mejora en la detección del gas tóxico CO_2. Estos resultados se atribuyen a que la temperatura de operación presenta una alta cinética en la reacción entre la superficie del sensor de gas (fabricado con $NiSb_2O_6$) y el gas CO_2 usado durante la operación [5]; estos contribuyen a que durante la adsorción del gas se presente una mayor desorción de oxigeno [5,6] llegando a registrarse las variaciones de la resistencia eléctrica del material y en consecuencia la alta respuesta obtenida durante las pruebas de detección. La respuesta de la pastilla del óxido $NiSb_2O_6$ está asociada al mecanismo de desorción de oxígeno a elevadas temperaturas.

Tabla 1. Respuesta eléctrica del sensor fabricado en base al óxido $NiSb_2O_6$

Parámetro	Valores de medición						
Concentración (ppm)	5	50	100	200	300	400	50
Resistencia (Ω)	598	596	591	597	583	579	576

Para conocer las variaciones de la respuesta eléctrica (resistividad) en presencia de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), fueron estimados los cambios de la resistividad eléctrica en función de la concentración de los gases y de la temperatura de operación. El cálculo

fue llevado acabo considerando la ecuación reportada en la literatura [4]: $\boldsymbol{\rho = \frac{RA}{t}}$ donde $\boldsymbol{R}$ es la resistencia eléctrica en los gases de prueba, $\boldsymbol{A}$ es el área de la sección transversal y $\boldsymbol{t}$ es el espesor de la pastilla (0.5 mm; el diámetro de la pastilla fue 12 mm), ver Tabla 1. De acuerdo a estos resultados, la resistividad eléctrica del material en atmósferas de CO_2 decae conforme la concentración de gas dióxido de carbono se incrementa. Este tipo de comportamiento se atribuye principalmente a que, por el efecto de la temperatura los portadores de carga muestran más movilidad en la superficie de la pastilla llevando a registrar el incremento de la conductividad eléctrica del material [5]. Además, es observable que incrementar de concentración del gas de prueba (CO_2) favorece a la disminución de la resistividad. Este fenómeno se presenta porque la actividad cinética de las moléculas del gas en la superficie de la pastilla se eleva por el aumento de la temperatura de operación. Se ha reportado en la literatura que la temperatura y la forma geométrica del sensor (pastilla o películas) [5], juega un papel muy importante en la interacción química entre los gases de prueba y el oxígeno quimiosorbido en la superficie del material, contribuyendo de esta manera a producir los cambios de resistividad eléctrica como los mostrados en Tabla 1.

b) Detector de gas Dióxido de carbono

Obtenida la respuesta eléctrica del sensor de gas, en Figura 1 se muestra el diagrama electrónico para hacer la adaptación del sensor de gas. Observando Figura 1, el detector de gas está diseñado en base a un microcontrolador PIC16F887A [7] donde la adaptación de señal del sensor se hace por medio de un puente de Wheatstone, el circuito electrónico es alimentado por una fuente de 5 Volts y una pantalla LCD 16x2 es usado como interface con el usuario.

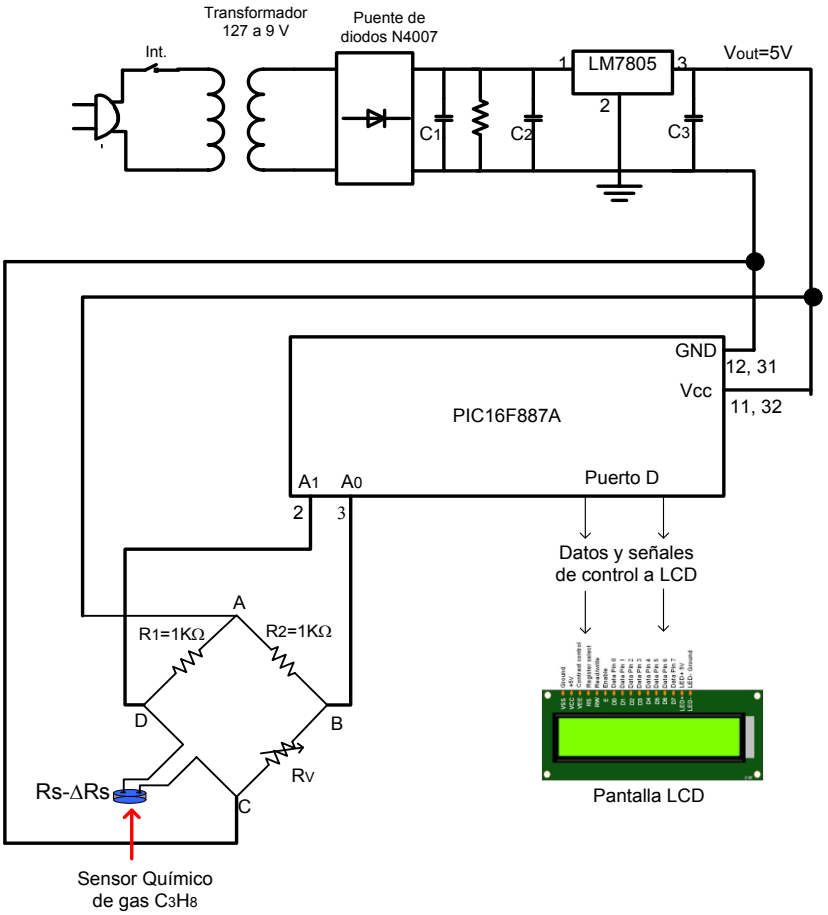


Figura 1. Diagrama electrónico empleado en fabricación del detector de gas Dióxido de carbono en base al sensor de gas fabricado con el óxido $NiSb_2O_6$

Basados en Figura 1, el principio de operación del detector de gas corresponde a los siguientes puntos: a) el sensor de gas es instalado en la atmósfera a monitorear; b) el sensor de gas es seleccionado a una resistencia eléctrica de 596Ω, forzando que el dipositivo opera a una concentración de 50ppm (ver Tabla 1); c) si el sensor de gas no detecta la presencia de gas en la atmosfera a monitorear, entonces el sensor no tiene variaciones de resistencia, y como una consecuencia, el puente de Wheatstone no es desbalanceado. En este caso, el voltaje de salida del puente de Wheatstone es cero y este valor es detectado con los puertos analógicos del microcontrolador PIC16F887A, mandado un mensaje a través de la pantalla LCD “No hay presencia de gas en la atmósfera”.; d) si el sensor detecta la presencia de gas en la atmósfera a monitorear, su resistencia eléctrica disminuye, y como una consecuencia, el puente de Wheatstone es desbalanceado y su voltaje de salida es diferente de cero. Esta diferencia potencial es detectada a través de los puertos analógicos del PIC16F887A y entonces en base a la programación del sistema digital, el mensaje de “la presencia de gas ha sido detectada” es enviado a la pantalla LCD. Con este mensaje, el usuario del sistema detector de gas sabe que, la zona tiene alto riesgo de intoxicación debido a la presencia de gas dióxido de carbono en la atmósfera. En Figura 2 es mostrada una fotografía del detector de gas fabricado.

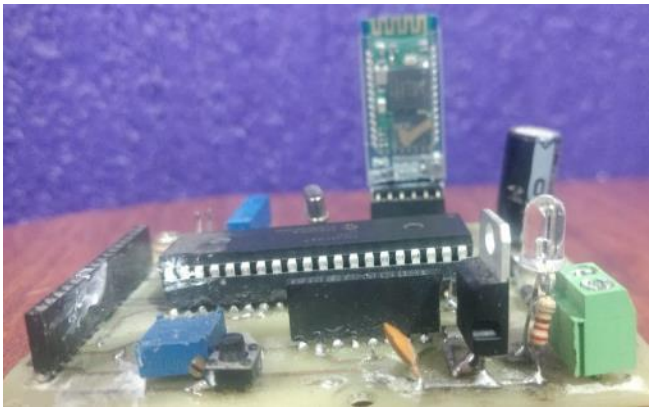


Figura 2. Dispositivo electrónico fabricado para la detección de gas dióxido de Carbono (CO_2)

c) Discusión

En este trabajo se propone un nuevo sensor químico de gas y un dispositivo electrónico para procesar su señal, siendo fabricado un prototipo para la detección de gas C_3H_8. El sensor químico se fabricó con nano-partículas del óxido $NiSb_2O_6$ y se basa en la modificación de resistencia debido a la absorción de gas por el material. El nuevo sensor químico fue caracterizado eléctricamente a una temperatura de operación de 300 ^oC. A partir de los resultados experimentales se verifico su potencial aplicación como detector y se propuso el microcontrolador PIC16F/887A para su adaptación de señal. El microcontrolador fue programado de tal forma que, a partir de una concentración seleccionada (50 ppm), este nuevo dispositivo puede detectar atmosferas con alto riesgo de explosión.

CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron nanopartículas cuyo tamaño en promedio de ~ 23.24. Tal material fue usado para fabricar un sensor de gas dióxido de carbono, el cual fue caracterizado a través de pruebas eléctricas estáticas. En base a su respuesta eléctrica, un circuito electrónico digital fue propuesto para su procesado de señal. El dispositivo digital fue fabricado con un microcontrolador PIC16F887A. Este prototipo fue probado experimentalmente a una concentración de 50 ppm y temperatura de operación de 300^oC. Los resultados experimentales indicaron que el dispositivo tiene rápida respuesta y bajo coste de fabricación. Este dispositivo es ideal para su aplicación en la detección de atmósferas tóxicas debido a la presencia de gas CO_2.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Singh, A. Singh, S. Singh, P. Tandon. Nickel antimony oxide ($NiSb_2O_6$): A fascinating nanostructured material for gas sensing application, Chemical Physics Letters 646 (2016) 41-46.
2. X. Yang, S. Zhang, Q. Yu, P. Sun, F. Liu, H. Lu, X. Yan, X. Zhou, X. Liang, Y. Gao, G. Lu. Solvothermal synthesis of porous $CuFe_2O_4$ nanospheres for high performance acetone sensor. Sensors & Actuators: B. Chemical 270 (2018) 538–544
3. J. T. Guillen Bonilla, A. Guillen Bonilla, A. Casillas Zamora, and H. Guillen Bonilla, Zinc aluminate (ZnAl2O4) applied in the development of a propane gas sensor and in the design of a digital gas detector. J Mater Sci: Mater Electron (2023) 34:967
4. X. Deng, C. Wang, X.-M. Sun, and Y.-D. Li, “Structure-directing coordination template effect of ethylenediamine in formations of ZnS and ZnSe nanocrystallites via solvothermal route,” *Inorganic Chemistry*, vol. 41, pp. 869–873, 2002
5. V. K. Lamer and R. H. Dinegar, “Theory, production and mechanism of formation of monodispersed hydrosols,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 72, no. 11, pp. 4847–4854, 1950.
6. V. K. Lamer and R. H. Dinegar, “Theory, production and mechanism of formation of monodispersed hydrosols,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 72, no. 11, pp. 4847–4854, 1950
7. MIKROE ,2019,https://www.mikroe.com/ebooks/microcontroladores-pic-programacion-en-c-con-ejemplos/caracteristicas-basicas-del-pic16f887

REDISTRIBUCION Y SIMULACION APLICADOS EN LA MEJORA DE UN PROCESO DE MEZCLADO PARA LA ELABORACION DE EVA

Mario Guadalupe Moreno Salcido, Armando Mares Castro, José Ramon Gómez Armenta.

Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle # 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato. C.P. 36413, México.
MPS24110001@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

Este análisis se llevó a cabo en una empresa ubicada en San Francisco del Rincón, Guanajuato, dedicada a la producción de EVA, un material ampliamente utilizado en diversas industrias. El área de estudio fue la etapa de “Mezclado,” donde se combinan materias primas plásticas y químicas mediante equipos como batidores, molinos y laminadoras. Aunque las dos líneas de producción del área cuentan con estructuras similares en maquinaria, se identificó que carecían de una ubicación adecuada y estandarizada para las materias primas, lo que generaba recorridos innecesarios que afectaban la eficiencia operativa y la ergonomía.

La metodología propuesta para solucionar esta problemática comenzó con el diagnostico donde se analizaron las actividades realizadas por los operadores de ambas líneas mediante diagramas de recorrido y simulaciones con software especializado. En la situación inicial, los operadores de la línea 1 debían recorrer 53 metros para trasladar los insumos hacia el batidor o “Bambury,” mientras que en la línea 2 la distancia era de 40 metros. Estas largas distancias resultaban de una disposición ineficaz de las tarimas con materias primas. A partir de estos resultados, se diseñaron propuestas de mejora considerando factores clave como la cantidad de unidades almacenadas por tarima y la frecuencia de reposición de insumos con el apoyo de montacargas. La nueva distribución planteó la colocación estratégica de las tarimas en los extremos del área de trabajo para facilitar el manejo y reducir los traslados.

Los resultados obtenidos a través de las simulaciones y los diagramas de recorrido mostraron un impacto positivo significativo. Las distancias recorridas se redujeron a 29 metros en la línea 1 y a 28 metros en la línea 2, lo que representa disminuciones del 45% y 30%, respectivamente. Este ajuste, aplicado a un programa diario de 50 cargas, implica que los operadores caminarían 700 metros menos en la línea 1 y 600 metros menos en la línea 2 durante una jornada laboral. Esto optimiza el tiempo, reduce la fatiga de los operadores y mejora la productividad del área.

En conclusión, las mejoras propuestas permiten estandarizar la ubicación de las materias primas y los recorridos, incrementando así la productividad del área de “Mezclado.” Al eliminar tareas que no generan valor y promover un entorno más organizado y ergonómico, se asegura un desempeño más eficiente y sostenible a largo plazo. Estas acciones fortalecen la operación general de la empresa y sientan las bases para futuras mejoras.

INTRODUCCIÓN

La productividad de un área de trabajo no solo depende de los recursos tecnológicos o la eficiencia de los procesos, sino también de cómo está organizada físicamente y de la manera en que las personas interactúan con su entorno. Una distribución adecuada del espacio puede optimizar el rendimiento de los trabajadores, mejorar la seguridad y reducir el desgaste físico y mental.

El factor humano juega un papel clave en este equilibrio. Cuando los trabajadores cuentan con un entorno bien estructurado, con herramientas al alcance, zonas seguras y una disposición que favorezca la movilidad eficiente, su desempeño mejora y el riesgo de accidentes disminuye.

Por lo tanto, la relación entre productividad y distribución no es solo cuestión de logística, sino de comprender las necesidades humanas dentro del sistema. A través de enfoques como el diseño ergonómico y la mejora continua, las empresas pueden garantizar que sus espacios favorezcan tanto la eficiencia operativa como el bienestar de sus trabajadores **(García García, 2011)**.

La presente investigación se fundamenta en un proceso de mezclado para la elaboración de EVA, donde se llevó a cabo una redistribución del área de trabajo con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y garantizar condiciones óptimas para los trabajadores. A través de un análisis detallado de la disposición del espacio, se implementaron ajustes estratégicos para optimizar los tiempos de traslado y reducir movimientos innecesarios, asegurando así un entorno más organizado y funcional. Esta reorganización no solo contribuyó a una mayor productividad, sino que también promovió el bienestar del equipo y demostrando la importancia de una distribución estructurada.

TEORÍA

Distribución de planta

Quesada define la distribución de planta es un concepto relacionado con la disposición de las máquinas, los departamentos, las estaciones de trabajo, las áreas de almacenamiento, los pasillos y los espacios comunes dentro de una instalación productiva propuesta o ya existente. La finalidad fundamental de la distribución en planta consiste en organizar estos elementos de manera que se asegure la fluidez del flujo de trabajo, materiales, personas e información a través del sistema productivo. Además, se busca con esta hallar una ordenación de las áreas de trabajo y equipo, siendo la más económica para el trabajo, de igual forma segura y satisfactoria para los empleados.

Objetivos de una distribución en planta:

- Reducción del riesgo para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.
- Elevación de la moral y satisfacción del obrero.
- Incremento de la producción.
- Disminución en los retrasos de la producción.
- Ahorro de área ocupada. o Reducción del material en proceso.
- Acortamiento del tiempo de fabricación.
- Disminución de la congestión o confusión.
- Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.

Richard Muther buscó la necesidad de establecer una industria que produjera a su máxima capacidad, eliminando cualquier desperdicio en todos los sentidos. Los principios de distribución en planta según Muther se han convertido en una referencia de optimización de espacios para cualquier sector, tales cómo, construcción, comercio, hotelería, manufacturero, entre otros. Él desarrollo los siguientes principios a seguir:

Muther establece los siguientes principios básicos para selección de una distribución de planta:

- Principio de la Integración de conjunto

Este principio de integración de conjunto consiste en integrar al hombre, máquinas, y materiales de la forma más racional posible, logrando así que funcionen como un equipo único. Además, parte de la idea que no es suficiente conseguir una buena distribución para cada área, sino que esta incluso debe ser beneficiosa para las áreas que la afectan indirectamente.

- Principio de la mínima distancia recorrida

Este principio consiste en que la mejor distribución es aquella en la cual se pueda mover el material a la distancia más corta posible entre operaciones consecutivas, en el traslado de material se debe

procurar el ahorro, reduciendo las distancias de recorrido, lo que significa que se debe colocar operaciones sucesivas inmediatamente adyacentes unas a otras.

- Principio de la circulación o recorrido

Este principio plantea que será mejor aquella distribución que tenga ordenadas las áreas de trabajo en la misma secuencia en que se transforman o montan los materiales. Es un complemento del principio de la Distancia Recorrida y significa que el material se moverá progresivamente de cada operación a la siguiente, sin que existan retrocesos o movimientos transversales, buscando un progreso constante hacia su terminación sin interrupciones o interferencias.

- Principio del espacio cúbico

Este principio consiste en que la distribución más económica será aquella que utilice los espacios horizontales y verticales, ya que se obtiene un ahorro del espacio, aprovechando sus tres dimensiones por igual.

- Principio de satisfacción y seguridad

Este principio consiste en que la distribución que proporcione a los trabajadores mayor seguridad y confianza es la mejor, y que una distribución nunca puede ser efectiva si somete a los trabajadores a riesgos o accidentes.

- Principio de flexibilidad

Este principio consiste en que aquella distribución de planta que pueda ser reordenada o ajustada con pocos inconvenientes y además al costo más bajo posible. Actualmente, es uno de los principios que se considera más importante ya que las plantas incurren en pérdidas de dinero al no poder adaptar sus sistemas productivos con rapidez a los cambios constantes del entorno.

Factores que influyen directamente en una distribución de planta

Según Luis Carlos Acero Palacios en su libro Ingeniería de Métodos, movimientos y tiempos, en la distribución de planta no sólo hay que considerar los diferentes tipos de distribución existentes de acuerdo el proceso productivo, sino que hay factores que influyen directamente con el proceso de diseñar una distribución de planta y estos son:

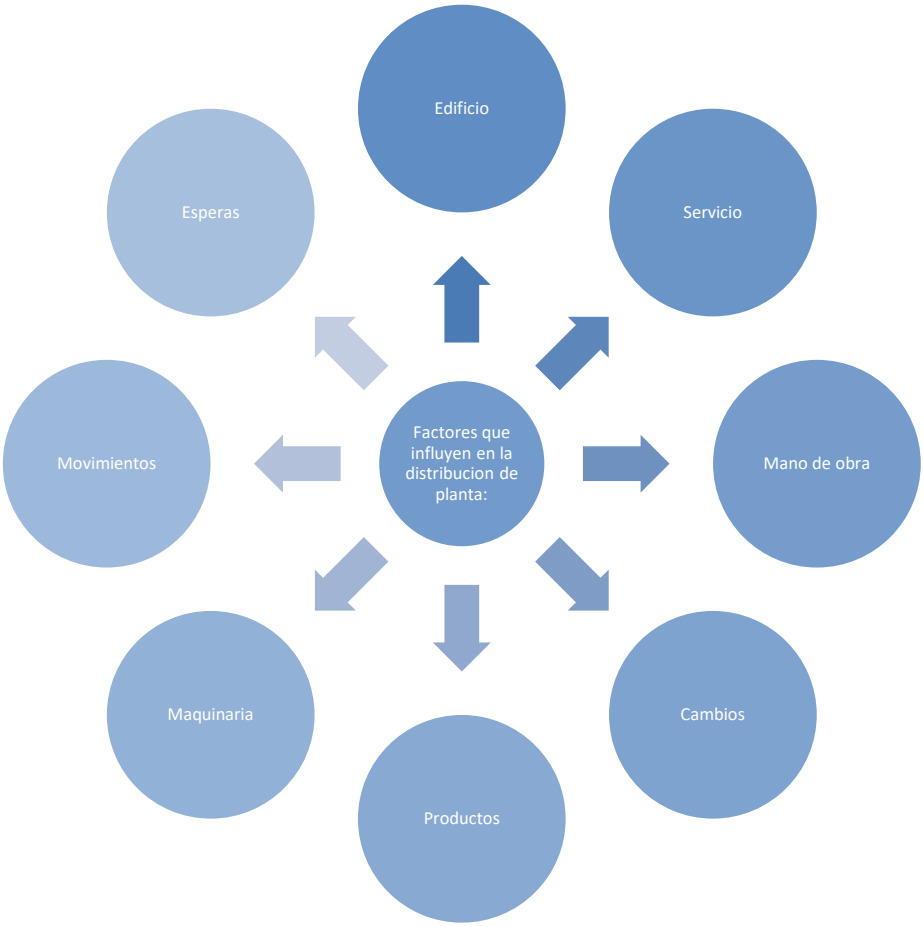


Ilustración 1: Factores que influyen en la distribución de planta (Palacios,2016)

Fases de un proyecto de redistribución de planta

Forero y Cardona plantean seis etapas en un proceso de redistribución de planta:

1. Prediseño: Esta etapa describe el proceso por el cual el planeador advierte la oportunidad de mejora y plantea la solución al problema.
2. Diseño del plan: Después de evaluar la factibilidad de la solución planteada en el prediseño, se genera una propuesta detallada del proyecto a ejecutar y se realiza una evaluación económica de la misma.
3. Preparación: Ya aceptado el proyecto, se deben empezar a ejecutar las actividades planeadas para que el proyecto resulte en la menor alteración del sistema como sea posible. En esta etapa generalmente se genera inventario extra o se realiza el empalme con otra planta para que produzca lo que dejará de producir el sistema debido al proyecto.
4. Realización y control del proyecto: Inicia en el momento en que se interrumpe el sistema para ejecutar las actividades del proyecto. Generalmente los proyectos de redistribución de planta suponen un paro de producción y este es el momento en que inicia la ejecución del proyecto. Durante esta etapa es que se incurre en la mayoría de los costos del proyecto debido a que es aquí donde se realizan los movimientos y el paro de producción. La etapa termina al momento de arrancar el sistema nuevamente.
5. Adaptación: El nuevo sistema presenta un escenario diferente para los trabajadores por lo que resulta necesario un periodo de entrenamiento y adaptación. De igual manera, tanto el sistema como los procesos y equipos requieren pruebas de calidad para verificar su

rendimiento. Esta etapa también consume recursos monetarios y tiempo por lo que es importante tenerla en cuenta aparte de las demás.

6. Cierre del proyecto: Al momento en que se comprueba con certeza que el sistema se encuentra trabajando de acuerdo a lo estipulado, se debe dar un proceso de cierre del proyecto donde se evaluará la experiencia y los resultados de la misma para tener una retroalimentación del proceso.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el análisis y optimización de los recorridos dentro de las dos líneas de producción de EVA debemos considerar que cada línea está compuesta por un Bambury, un molino, un molino laminador y una calandria, dispuestos conforme a la distribución real de la planta.

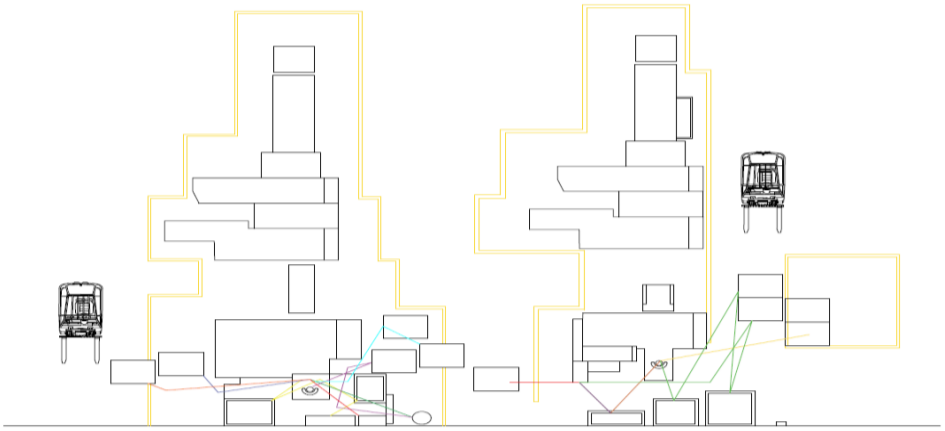


Ilustración 2: Diagramas de recorridos (Inicial) Elaboración: Propia

Para comprender el flujo operativo y la interacción entre los distintos elementos de producción, se diseñaron diagramas de recorrido considerando la disposición actual de la maquinaria y los puntos de acceso dentro de la planta. Estos diagramas permitieron visualizar las trayectorias seguidas por los operadores y los montacargas, identificando posibles áreas de mejora en la disposición de los materiales y equipos.

A partir de los diagramas obtenidos, se realizaron mediciones detalladas de las distancias recorridas por los operadores en cada línea de producción. Se identificaron los tramos de mayor impacto en la eficiencia del proceso y aquellos que representaban oportunidades para reducir tiempos de desplazamiento.

Tabla 1: Distancias recorridas. Elaboración: Propia

Línea	Tipo de EVA	Distancia recorrida por carga realizada (metros)
1	Negra-Blanca	53
2	Negra-Blanca	40

Con base en el análisis de recorridos, se generaron propuestas específicas para cada línea de producción, incorporando criterios clave como:

- Tamaño de las tarimas y su disposición en la planta, considerando su estiva para maximizar el aprovechamiento del espacio.
- Importancia de cada punto de acceso, asegurando que las tarimas sean fácilmente accesibles tanto para los operadores como para los montacargas.
- Reducción de trayectorias innecesarias, buscando minimizar las distancias recorridas por el personal y los equipos de transporte interno.

El objetivo de esta reestructuración es aumentar la productividad mediante una disposición más eficiente, reduciendo la fatiga de los operadores y mejorando la interacción entre los procesos productivos. El nuevo diseño también considera la facilidad de operación y manipulación de los materiales, garantizando que el flujo de trabajo sea más ágil y efectivo.
Este enfoque experimental proporciona una base sólida para la toma de decisiones operativas, permitiendo ajustes estratégicos que mejoren el rendimiento de la planta y maximicen la eficiencia en el manejo de recursos.

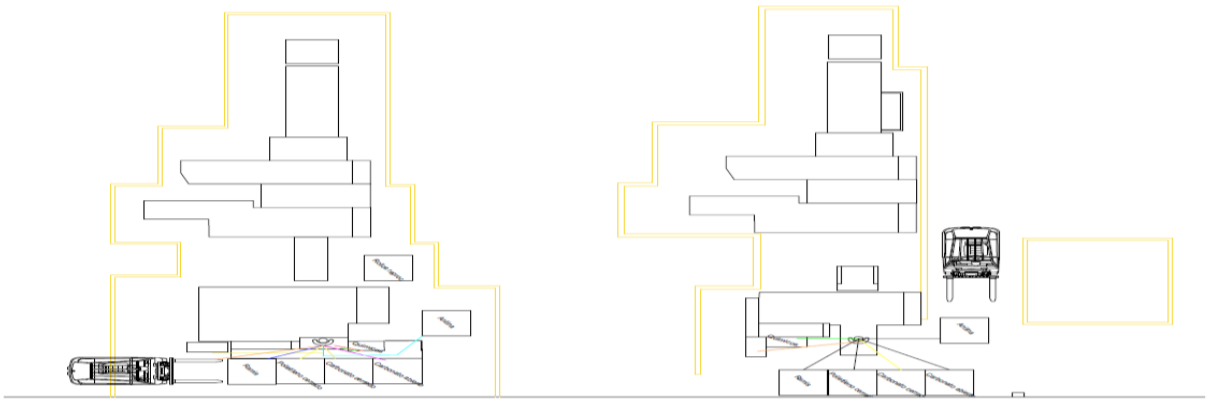


Ilustración 3: Diagrama de recorridos (Mejora). Elaboración: Propia

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a través de las simulaciones y los diagramas de recorrido evidenciaron un impacto positivo significativo en la distribución del área de trabajo. En particular, las distancias recorridas por los operadores se redujeron a 39 metros en la línea 1 y 28 metros en la línea 2, lo que representa una disminución del 26% y 30%, respectivamente, como se muestra en la tabla 2.

Este ajuste, aplicado a un programa diario de 50 cargas, implica que, durante una jornada laboral, los operadores recorrerían 700 metros menos en la línea 1, como se muestra en la ilustración 4, parte A-B, y 600 metros menos en la línea 2, ilustración 4, parte C-D.

La reducción de estas distancias contribuye directamente a la optimización del tiempo de operación, la disminución de la fatiga de los trabajadores y la mejora en la productividad del área, factores fundamentales para la eficiencia operativa.

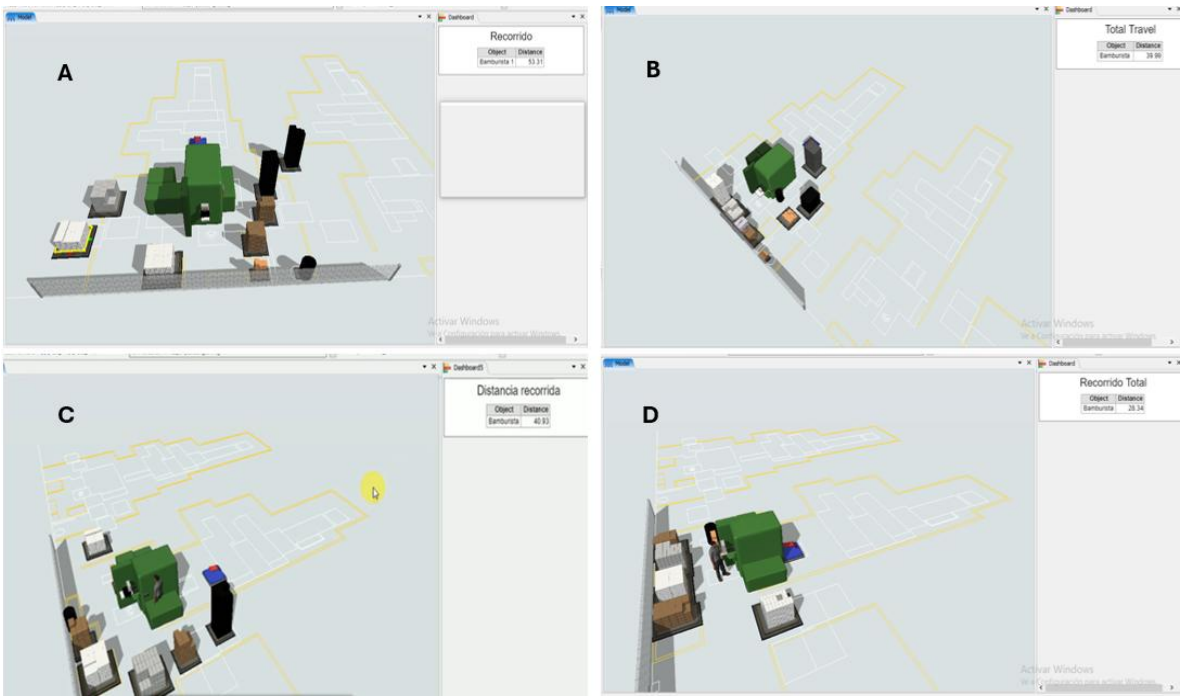


Ilustración 4: Simulación de recorridos. Elaboración: Propia

Para evaluar estos cambios, se llevaron a cabo simulaciones basadas en la distribución existente del área de trabajo, abarcando tanto la línea 1 como la línea 2. En este análisis, se examinaron las condiciones actuales de disposición de los elementos dentro del espacio, comparándolas con los recorridos y flujos de trabajo resultantes del nuevo reacomodo.
El objetivo de este contraste fue determinar el impacto de la reorganización en la eficiencia operativa, considerando aspectos clave como la reducción de tiempos de desplazamiento, la optimización en la ubicación de los recursos y la mejora en la interacción entre los distintos procesos productivos.
Al analizar ambos escenarios, se identificaron las ventajas y oportunidades de mejora que ofrece el nuevo diseño, así como los posibles desafíos que podrían surgir en la implementación de estos cambios estructurales. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la toma de decisiones estratégicas orientadas a la optimización del desempeño en el área de trabajo.

Tabla 2: Comparativa de distancias recorridas

Línea	**Distancias recorridas (metros)**		
	Inicial	Propuesta	Reducción
1	53	39	**26%**
2	40	28	**30%**

CONCLUSIONES

Las mejoras propuestas permiten estandarizar la ubicación de las materias primas y los recorridos, incrementando así la productividad del área de “Mezclado.” Al eliminar tareas que no generan valor y promover un entorno más organizado y ergonómico, se asegura un desempeño más eficiente y sostenible a largo plazo. Estas acciones fortalecen la operación general de la empresa y sientan las bases para futuras mejoras.

BIBLIOGRAFÍA

Cielo Pantoja, J. P. (2017). Metodología de distribución de plantas en ambientes de agrupación celular. Elsevier.
Coronado, W. G. (2021). Distribución de planta y su influencia en la productividad en el área de producción. UPN.
Daniel Cardona, J. D. (2012). El WIP como objetivo estratégico en la distribución de planta . Ingenium, 23-36.
García García, M. S. (2011). Aplicaciones ergonómicas como herramienta de mejora de la actividad proyectual de procesos de producción. Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos.
Muther, R. (1970). Distribucion en planta. New York: Mc Graw Hill.
Palacios, L. C. (2016). Ingeniería de Métodos, movimientos y tiempos. ECOE.
Quesada, D. d. (2005). Distribucion en planta. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE ENFERMEDADES DERMATOLÓGICAS BASADO EN PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES Y APRENDIZAJE PROFUNDO

Gerardo Trejo Caballero [1], Guillermo Tapia Tinoco [2], Marcos Jesús Villaseñor Aguilar [1], Luis Moisés Burgara López [1], Miroslava Cano Lara[1]

[1]TecNM / ITS de Irapuato, [2] Universidad de Guanajuato.
gerardo.tc@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Diversas anomalías de origen genético y metabólico han sido identificadas como factores que contribuyen al desarrollo del cáncer, una enfermedad que en muchos casos resulta letal. El cáncer cutáneo constituye uno de los tipos de neoplasia más prevalentes a nivel global, con una incidencia en constante aumento. En este contexto, la implementación de estrategias de detección temprana resulta crucial para mejorar el pronóstico clínico. El presente trabajo propone una red neuronal convolucional (*Convolutional Neural Network*, CNN) para la clasificación de tumores cutáneos en dos categorías: benignos y malignos. Para ello, se utilizaron imágenes de lesiones dermatológicas provenientes de la base de datos pública ISIC 2018. La CNN fue entrenada de forma iterativa y su rendimiento fue evaluado mediante validación cruzada. La principal innovación metodológica del trabajo consiste en una etapa de pre-procesamiento que incorpora técnicas de mejoramiento de la imagen, aumento de datos, normalización y redimensionamiento, lo cual permitió mejorar significativamente la calidad de entrada de los datos para la red neuronal. Los resultados experimentales mostraron que la CNN alcanzó una exactitud del 83.18 %, evidenciando la efectividad de la estrategia propuesta para la clasificación automatizada de lesiones cutáneas basada en procesamiento de imágenes y aprendizaje profundo.

INTRODUCCIÓN

Uno de los tipos de cáncer con mayor incremento a nivel mundial es el cáncer de piel, una enfermedad en la que las células cutáneas anormales proliferan de manera desordenada. Para definir tratamientos oncológicos adecuados, la detección temprana y el diagnóstico preciso son fundamentales. El melanoma, la forma más letal de cáncer de piel, es responsable de la mayoría de las muertes por cáncer cutáneo en los países desarrollados. Los principales tipos de cáncer de piel incluyen el carcinoma basocelular, el carcinoma de células escamosas y el melanoma [1].

La evaluación por imágenes diagnósticas desempeña un papel crucial en la identificación de anomalías en diversas regiones del cuerpo, como el cáncer de piel. Para garantizar un mejor pronóstico y disminuir la mortalidad, la detección temprana del cáncer de piel es crucial. Un número creciente de profesionales de la salud está adoptando técnicas de inteligencia artificial (IA) para diagnóstico médico [2], con el fin de mejorar y agilizar el proceso de toma de decisiones clínicas. Los sistemas de diagnóstico asistido por computadora permiten diagnosticar rápidamente, con fiabilidad y de forma consistente, una amplia gama de trastornos. Además, ofrece la posibilidad de una detección avanzada de enfermedades tumorales de manera precisa y rentable. Los métodos convencionales empleados por los médicos para evaluar e interpretar imágenes de lesiones son complejos, prolongados, subjetivos y propensos al error, debido principalmente a la complejidad inherente de las imágenes dermatológicas. La identificación inequívoca de los píxeles que conforman una lesión es esencial para llevar a cabo un análisis de imagen adecuado, tanto para la evaluación clínica como para la concienciación sobre estas patologías. El uso de enfoques de aprendizaje automático y visión por computadora ha propiciado avances significativos en los sistemas de diagnóstico y predicción para la detección de cáncer de piel [3].

El crecimiento exponencial en la capacidad de procesamiento ha propiciado avances significativos en las tecnologías de visión por computadora, particularmente en el desarrollo de modelos de aprendizaje profundo como las redes neuronales convolucionales (CNN). Actualmente, la detección temprana del cáncer de piel se ha vuelto una necesidad, y la identificación temprana del cáncer de piel mediante técnicas de aprendizaje profundo ha superado el desempeño de especialistas humanos en muchos desafíos de visión por computadora, lo cual ha contribuido a la reducción de las tasas de mortalidad.

Con el objetivo de diagnosticar correctamente los signos tempranos del cáncer a partir de imágenes de lesiones, el presente trabajo propone un modelo híbrido basado en procesamiento de imágenes digitales y aprendizaje profundo para la clasificación automática de lesiones cutáneas y predicción del cáncer. El pre-procesamiento y la clasificación constituyen los componentes clave del sistema propuesto: durante la etapa de pre-procesamiento, se mejora la intensidad global de la imagen para reducir las inconsistencias entre las fotografías, además, la imagen es escalada y normalizada para ajustarse a la escala del modelo de entrenamiento. Múltiples métricas para evaluar el desempeño del modelo propuesto son presentadas: exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad y el puntaje F1.

MARCO TEÓRICO

El cáncer cutáneo es una de las neoplasias más comunes a nivel mundial, con una incidencia en aumento debido a factores como la exposición prolongada a la radiación ultravioleta y cambios en los estilos de vida. Aunque representa aproximadamente el 1% de todos los cánceres de piel, el melanoma es responsable de la mayoría de las muertes asociadas a esta enfermedad, destacando la importancia de su detección temprana para mejorar el pronóstico clínico.

En los últimos años, los avances en inteligencia artificial, particularmente en el aprendizaje profundo (deep learning), han revolucionado el análisis de imágenes médicas. Las redes neuronales convolucionales (Convolutional Neural Networks, CNNs) han demostrado una capacidad sobresaliente para clasificar imágenes dermatológicas, superando en algunos casos el rendimiento de dermatólogos expertos [3]. Estas redes son especialmente eficaces en la detección de patrones complejos y sutiles en imágenes de lesiones cutáneas, facilitando la diferenciación entre lesiones benignas y malignas. Entre las arquitecturas de CNNs, ResNet50 ha sido ampliamente utilizada debido a su capacidad para entrenar redes profundas sin sufrir problemas de degradación, gracias a sus conexiones residuales. Estudios recientes han demostrado que modelos basados en ResNet50, especialmente cuando se combinan con otras arquitecturas como Xception, pueden alcanzar precisiones superiores al 97% en la clasificación de lesiones cutáneas [4]. La calidad y cantidad de los datos son fundamentales para el rendimiento de los modelos de aprendizaje profundo. En este contexto, el conjunto de datos ISIC (International Skin Imaging Collaboration) se ha convertido en una referencia estándar, proporcionando miles de imágenes de lesiones cutáneas con anotaciones detalladas y diagnósticos confirmados [5]. Sin embargo, estos conjuntos de datos a menudo presentan desequilibrios en la distribución de clases, lo que puede afectar la capacidad del modelo para generalizar.

Para abordar estos desafíos, se han implementado diversas técnicas de preprocesamiento y aumento de datos. El preprocesamiento incluye la normalización de imágenes, mejora del contraste y eliminación de artefactos, mientras que el aumento de datos implica la generación de nuevas imágenes a través de transformaciones como rotaciones, reflejos y ajustes de brillo. Estas técnicas no solo aumentan la diversidad del conjunto de entrenamiento, sino que también ayudan a mitigar el sobreajuste y mejorar la robustez del modelo [6].

En resumen, la combinación de arquitecturas avanzadas de CNNs, conjuntos de datos de alta calidad y técnicas de pre-procesamiento y aumento de datos ha permitido avances significativos en la clasificación automatizada de lesiones cutáneas. Estos desarrollos ofrecen herramientas prometedoras para la detección temprana del cáncer de piel, con el potencial de mejorar significativamente los resultados clínicos y reducir la carga sobre los sistemas de salud.

La métrica principal para evaluar la efectividad de un clasificador es la *Exactitud*, definida como la proporción entre los resultados verdaderos y el número total de casos examinados $\boldsymbol{V^p + V^n + F^p + F^n}$ (Ec. 1). En forma práctica, resulta la cantidad de predicciones positivas que fueron correctas ($\boldsymbol{V^p + V^n}$). Adicionalmente se calculan la *Precisión,* definida como la proporción de verdaderos positivos V^p dividido entre todos los resultados positivos (Ec. 2), es decir, es el porcentaje de casos positivos correctamente detectados; la *Sensibilidad* o tasa de verdaderos positivos, definida como la proporción de casos positivos que son correctamente identificados (Ec. 3); la *Especificidad* o tasa de verdaderos negativos, definida como la proporción de casos negativos que son correctamente identificados (Ec. 4); y el *Puntaje F1*, que resume la precisión y sensibilidad (Ec. 5), métrica de gran utilidad cuando la distribución de clases es desigual.

$$\boldsymbol{Exactitud} = \frac{V^p + V^n}{V^p + V^n + F^p + F^n} \qquad \text{Ec. 1}$$

$$\boldsymbol{Precisión} = \frac{V^p}{V^p + F^p} \qquad \text{Ec. 2}$$

$$\boldsymbol{Sensibilidad} = \frac{V^p}{V^p + F^n} \qquad \text{Ec. 3}$$

$$\boldsymbol{Especificidad} = \frac{V^n}{V^n + F^p} \qquad \text{Ec. 4}$$

$$\boldsymbol{Puntaje\ F1} = \frac{2 * Precisión * Sensibilidad}{Precisión + Sensibilidad} \qquad \text{Ec. 3}$$

METODOLOGÍA

La presente propuesta emplea una CNN para la clasificación binaria de lesiones cutáneas, distinguiendo entre tumores benignos y malignos (Figura 1). La metodología se estructura en cuatro etapas principales: selección y preparación del conjunto de datos, pre-procesamiento de imágenes, arquitectura y entrenamiento del modelo CNN, y la evaluación del desempeño mediante validación cruzada.

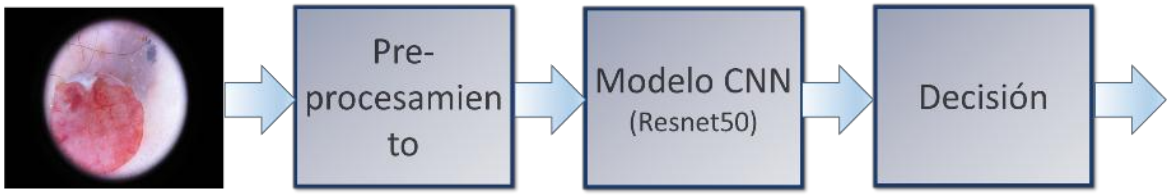


Figura 1. Modelo propuesto para el sistema de detección temprana.

Conjunto de datos

El conjunto de datos empleado fue el ISIC 2018 (*International Skin Imaging Collaboration*), una base de datos de acceso abierto ampliamente utilizada en investigaciones sobre diagnóstico automatizado de cáncer de piel [2]. Esta colección está compuesta por 11,527 imágenes dermatoscópicas de alta resolución, de las cuales 10,015 corresponden al conjunto de entrenamiento y 1,512 al conjunto de prueba, todas ellas con diagnósticos confirmados por especialistas. Para la etapa de entrenamiento, se ha seleccionado un subconjunto de 3,533 imágenes clasificadas en dos categorías: 1,760 lesiones benignas y 1,773 lesiones malignas, lo cual representa una distribución prácticamente equilibrada entre ambas clases.

Las imágenes presentan una amplia variabilidad en cuanto a iluminación, enfoque, tipo de lesión, tamaño, forma y coloración, lo que refleja condiciones clínicas reales y proporciona un entorno

desafiante para el reconocimiento automatizado. Esta diversidad también refuerza la necesidad de aplicar técnicas de pre-procesamiento robustas que permitan homogenizar las condiciones de entrada para el modelo de clasificación.

Pre-procesamiento de imágenes

La etapa de pre-procesamiento desempeñó un papel fundamental en la mejora de la calidad visual de las imágenes y en la optimización del rendimiento del modelo de clasificación. Esta fase incluyó operaciones orientadas tanto al mejoramiento del contraste, como al aumento de datos y la normalización de las entradas.

Para mejorar la visibilidad de los detalles en las imágenes originales, se aplicó un algoritmo evolutivo de mejora del contraste, el cual modifica dinámicamente los elementos de luminosidad en el histograma de cada imagen. Esta técnica permite resaltar texturas, bordes y estructuras relevantes en la lesión, corrigiendo deficiencias comunes como bajo contraste o iluminación no uniforme. Como resultado, se mejoró significativamente la visualización de bordes y arcos estructurales en las regiones de interés, lo cual facilita la extracción de características discriminativas durante el proceso de entrenamiento.

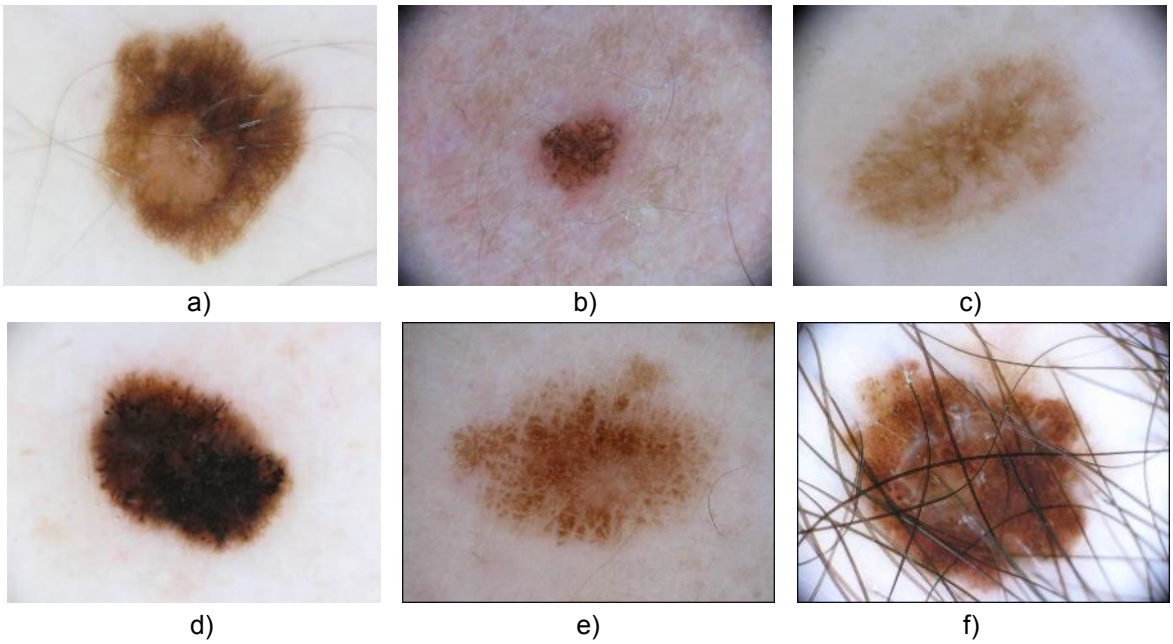


Figura 2. Imágenes de lesiones del conjunto de validación: benignas (a, b, c) y malignas (d, e, f).

Posteriormente, se implementó un esquema de aumento de datos (*data augmentation*) con el fin de incrementar la cantidad y diversidad del conjunto de entrenamiento. Para cada imagen, se generaron nuevas variantes mediante transformaciones geométricas y fotométricas que incluyeron: i) rotación aleatoria en rangos controlados, ii) reflexión horizontal y vertical, iii) traslaciones, iv) ajustes de brillo para simular diferentes condiciones de captura y v) redimensionamiento uniforme a una resolución estándar de 224 × 224 píxeles. Inicialmente, se seleccionaron 1,440 imágenes benignas y 1,197 imágenes malignas del conjunto etiquetado. Tras aplicar las técnicas de aumento de datos, se logró expandir el conjunto de entrenamiento a 1,760 imágenes benignas y 1,773 malignas, alcanzando una distribución más equilibrada entre ambas clases. Adicionalmente, se aplicó una técnica de sobremuestreo (*oversampling*) dirigida a compensar el desbalance residual en la clase de lesiones malignas, con el propósito de evitar sesgos durante el aprendizaje supervisado.

Finalmente, todas las imágenes fueron normalizadas para ajustar los valores de intensidad de los píxeles al rango [-1,1], lo cual contribuye a la estabilidad del proceso de entrenamiento al reducir la varianza entre muestras. Esta normalización, en conjunto con el pre-procesamiento adaptativo y el aumento de datos, permitió mejorar significativamente la calidad de los datos de entrada a la red neuronal y, con ello, el desempeño general del modelo.

Arquitectura y entrenamiento del modelo CNN

Para la clasificación automatizada de las imágenes dermatológicas se empleó una arquitectura *ResNet50* (*Residual Network* de 50 capas), una red neuronal convolucional profunda y pre-entrenada sobre el conjunto de datos *ImageNet*, reconocida por su capacidad de mantener un rendimiento elevado en tareas complejas de visión por computadora. La elección de esta arquitectura se debe a su estructura residual, que permite mitigar el problema del desvanecimiento del gradiente y facilita el entrenamiento eficiente de redes profundas mediante conexiones de atajo (*skip connections*).

Durante el proceso de entrenamiento, se implementaron múltiples configuraciones experimentales con el objetivo de maximizar la precisión de clasificación y reducir el riesgo de sobreajuste. Entre las configuraciones evaluadas se incluyeron variaciones en la tasa de aprendizaje, número de épocas, funciones de activación y tamaño del *batch*. Además, se aplicó la validación cruzada para garantizar la generalización del modelo.

El entrenamiento de la red se realizó utilizando el conjunto de datos previamente pre-procesado y balanceado. Para evaluar el desempeño de la propuesta, se utilizó un conjunto de validación independiente compuesto por 660 imágenes, de las cuales 360 correspondían a casos benignos y 300 a casos malignos, cuidadosamente seleccionadas para representar la heterogeneidad visual de las lesiones y validar la robustez del sistema. La Figura 2 muestra varios ejemplos de imágenes de lesiones del conjunto de validación, evidenciando la diversidad de situaciones de los pacientes en la colección.

Implementación

La implementación del sistema propuesto se llevó a cabo en un entorno de desarrollo basado en Linux, utilizando una estación de trabajo equipada con una *GPU NVIDIA RTX 3060* y 8 GB de memoria RAM, lo cual permitió acelerar significativamente los procesos de entrenamiento y validación del modelo.

El desarrollo del esquema de clasificación se realizó empleando la biblioteca *TensorFlow Keras*, debido a su flexibilidad y capacidad para facilitar la construcción e implementación de arquitecturas convolucionales profundas como *ResNet50*. El modelo fue entrenado utilizando el optimizador Adam, ampliamente reconocido por su eficiencia en la convergencia del error y su adaptabilidad a diferentes funciones de pérdida. Con el objetivo de mejorar la estabilidad del aprendizaje y prevenir el sobreentrenamiento, se incorporó un ajuste dinámico de la tasa de aprendizaje, el cual reduce progresivamente su valor cuando la métrica de validación no presenta mejoras durante un número determinado de iteraciones, utilizando un mecanismo de paciencia como criterio de control. Esta estrategia permitió refinar el proceso de ajuste de pesos en las últimas etapas del entrenamiento, mejorando la precisión sin comprometer la generalización del modelo.

En conjunto, estas configuraciones computacionales y metodológicas permitieron optimizar el rendimiento del modelo y garantizar la reproducibilidad de los resultados en un entorno de ejecución controlado.

RESULTADOS

El sistema propuesto fue evaluado utilizando un conjunto independiente de 660 imágenes, distribuidas en 360 casos benignos y 300 casos malignos, permitiendo medir de manera objetiva el desempeño del clasificador. La red neuronal convolucional basada en ResNet50, complementada con el pre-procesamiento especializado y las técnicas de aumento y balanceo de datos, alcanzó una exactitud global del 83.18 % en la clasificación binaria de las lesiones cutáneas.

Para un análisis más detallado del desempeño del modelo, se calcularon métricas adicionales, incluyendo precisión, sensibilidad (*recall*), especificidad y F1-score. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1:

Tabla 1. Indicadores de desempeño del modelo.

Indicador	valor
Exactitud	0.8318
Precisión	0.8136
Sensibilidad	0.8972
Especificidad	0.7533
Puntaje F1	0.8534

La Figura 3 muestra la matriz de confusión para la detección de lesiones benignas y malignas usando el modelo propuesto. Se aprecia que se clasificaron erróneamente 37 imágenes de lesiones benignas como malignas, y 74 imágenes de lesiones malignas como benignas.

Estos resultados evidencian un buen equilibrio entre sensibilidad y especificidad, lo cual es fundamental en aplicaciones clínicas, donde minimizar tanto los falsos negativos como los falsos positivos resulta crucial. La alta sensibilidad para lesiones malignas (84 %) sugiere que el sistema es eficaz en detectar casos potencialmente peligrosos, mientras que la especificidad del 83 % indica una baja tasa de alarmas injustificadas en lesiones benignas.

Los resultados también ponen de manifiesto la efectividad de la estrategia de pre-procesamiento y aumento de datos, ya que permitieron enriquecer el conjunto de entrenamiento con imágenes más informativas y diversas. La técnica de mejora evolutiva del contraste contribuyó significativamente a la calidad visual de las imágenes, facilitando la extracción de características discriminantes por parte de la red neuronal.

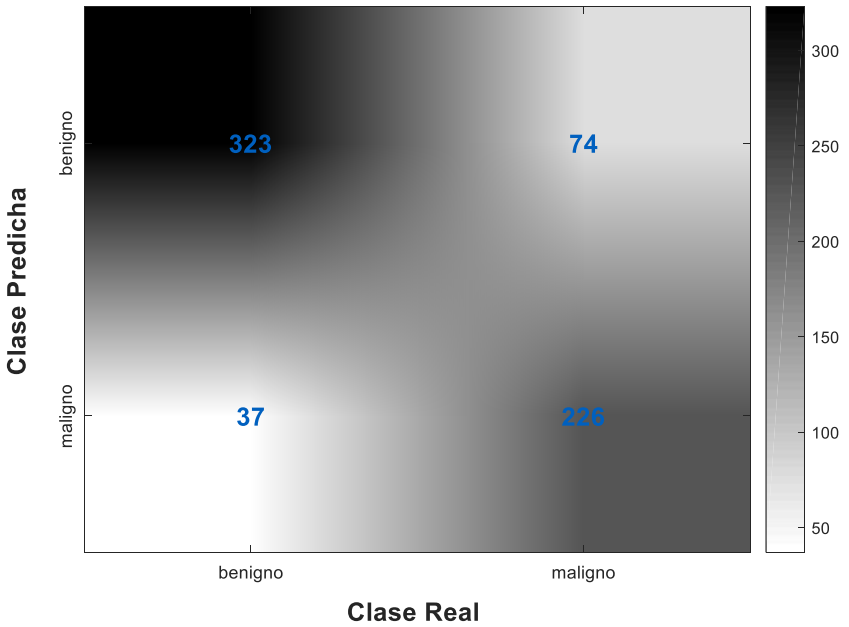


Figura 3. Matriz de Confusión para el conjunto de datos de validación.

.

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la eficacia del aprendizaje profundo, en particular de la arquitectura ResNet50, para la clasificación automatizada de tumores cutáneos en dos categorías: benignos y malignos. La integración de un proceso riguroso de pre-procesamiento de imágenes, que incluyó técnicas de mejora evolutiva del contraste, aumento de datos, normalización y rebalanceo por lotes, resultó fundamental para mejorar la calidad de entrada del modelo y alcanzar una exactitud del 83.18 %. Los resultados obtenidos evidencian un desempeño robusto tanto en sensibilidad como en especificidad, lo que respalda el potencial de esta propuesta como herramienta de apoyo para la detección temprana de cáncer cutáneo. En particular, la correcta identificación de lesiones malignas —que suelen presentar mayor complejidad morfológica— representa un avance relevante en el uso de sistemas inteligentes para aplicaciones clínicas.

Como trabajo futuro, se plantea la exploración del uso de otras arquitecturas profundas como *DenseNet*, *VGG* o *AlexNet* para el análisis de datos oncológicos, con el fin de mejorar el desempeño del sistema.

En conjunto, esta investigación reafirma que los avances en procesamiento de imágenes y aprendizaje profundo pueden ser aprovechados de forma efectiva para mejorar los procesos diagnósticos en dermatología, ofreciendo alternativas no invasivas, precisas y escalables para el beneficio de la salud pública.

BIBLIOGRAFÍA

1. Zhou, L., Zhong, Y., Han, L., Xie, Y., & Wan, M. (2025). Global, regional, and national trends in the burden of melanoma and non-melanoma skin cancer: Insights from the global burden of disease study 1990–2021. Scientific Reports, 15(1), 5996.
2. Combalia, M., Codella, N., Rotemberg, V., Carrera, C., Dusza, S., Gutman, D., & Malvehy, J. (2022). Validation of artificial intelligence prediction models for skin cancer diagnosis using dermoscopy images: the 2019 International Skin Imaging Collaboration Grand Challenge. The Lancet Digital Health, 4(5), e330-e339.
3. Brinker, T. J., Hekler, A., Enk, A. H., et al. (2019). Skin cancer classification via convolutional neural networks: systematic review of studies involving human experts. The Lancet Oncology, 20(7), 938-947.
4. Khan, M. A., Akram, T., Sharif, M., et al. (2022). Concatenated Xception-ResNet50 - A novel hybrid approach for accurate skin cancer prediction. Computers in Biology and Medicine, 145, 105438.
5. Codella, N. C. F., Nguyen, Q. B., Pankanti, S., et al. (2018). Deep learning ensembles for melanoma recognition in dermoscopy images. IBM Journal of Research and Development, 61(4/5), 5:1-5:15.
6. Perez, F., Vasconcelos, C., Avila, S., & Valle, E. (2018). Data Augmentation for Skin Lesion Analysis. arXiv preprint arXiv:1809.01442.
7. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). Digital Image Processing. Pearson Prentice Hall.

COMPATIBILIDAD DE CRUDOS PESADOS CON LÍQUIDOS IÓNICOS COMO SURFACTANTES UTILIZANDO EL BALANCE HIDROFÍLICO-LIPOFÍLICO (HLB)

Alma Delia Miranda Olvera, José Manuel Domínguez Esquivel, Jesús Martínez Ramírez

Instituto Mexicano del Petróleo, Ciudad de México, 07730, México
admiranda@imp.mx

RESUMEN

Este estudio investigo la compatibilidad de crudos pesados con líquidos iónicos (LIs) actuando como surfactantes mediante un análisis del balance hidrofílico-lipofílico (HLB). Se utilizaron métodos independientes para determinar el rango de HLB de cada especie, incluidos el análisis de función de partición (KHL), al análisis SARA y el parámetro de solubilidad de Hildebrand (δ) para los hidrocarburos. Para los líquidos iónicos (LIs), se utilizó el parámetro de solubilidad (δ) determinado por el método de Davis y Lin[7], validado mediante mediciones calorimétricas (DSC). Además, se exploró una correlación entre los valores de HLB de los crudos pesados y sus propiedades físicas, como tensión interfacial (σ) y viscosidad (η), evaluando las tendencias de formación de emulsiones y su evaluación reológica en una serie de crudos pesados con gravedad API de 9 a 13°. La afinidad de los LIs con los crudos pesados se analizó mediante la convergencia de los parámetros HLB, δ (Hildebrand) y TIF en un locus esférico, identificando los pares óptimos que coinciden dentro del espacio esférico definido por la esfera de interacción. Los resultados mostraron que los puntos dentro de esta esfera conducen a una reducción significativa en la tensión interfacial y la viscosidad de los crudos pesados, mejorando su movilidad. Por el contrario, la dispersión de puntos fuera de la Esfera de interacción dio lugar a emulsiones parciales y menores efectos en las propiedades reológicas. Este método proporciona un enfoque sistemático para seleccionar los surfactantes óptimos que mejoren la movilidad de crudos pesados.

INTRODUCCIÓN

Los crudos pesados y extrapesados presentan características fisicoquímicas que dificultan su producción, transporte y refinación. Estos hidrocarburos se caracterizan por poseer una alta viscosidad (frecuentemente superior a 10,000 cP a 20 °C) y una baja gravedad API (entre 5 y 22.3°),[1,2] lo cual limita su movilidad natural en el yacimiento y complica su manejo superficial. Su densidad, cercana o superior a 1,000 kg/m³, ocasiona problemas operativos importantes en campo, generando costos adicionales asociados al bombeo, la dilución, la emulsificación no deseada y el transporte.[3,4] Una estrategia común para mitigar estas limitaciones ha sido la dilución in situ con fracciones más ligeras como querosenos o aceites de baja calidad. No obstante, esta práctica depende de la disponibilidad local de diluyentes, requiere infraestructura costosa y, en muchos casos, no es ambiental ni económicamente sostenible.

Ante este panorama, ha cobrado relevancia el diseño de métodos alternativos que permitan mejorar las propiedades reológicas de los crudos pesados sin depender exclusivamente de la dilución. En este contexto, el uso de surfactantes para promover la formación de emulsiones tipo aceite en agua (o/w) ha demostrado ser una estrategia efectiva, ya que puede reducir la viscosidad aparente del crudo pesado y facilitar su transporte.[5] Sin embargo, la selección de surfactantes adecuados para cada tipo de crudo ha sido históricamente empírica, basada en pruebas de laboratorio tipo ensayo-error, sin contar con modelos predictivos que integren las propiedades específicas del crudo y las características estructurales del surfactante.

En respuesta a esta necesidad, el presente trabajo propone una metodología predictiva basada en un modelo geométrico tridimensional denominado Esfera de Interacción. Este modelo integra tres parámetros fisicoquímicos fundamentales para describir la afinidad entre crudos pesados y surfactantes: el balance hidrofílico-lipofílico (HLB), el parámetro de solubilidad de Hildebrand (δ) y la

tensión interfacial (TIF). La hipótesis central es que cuando un par crudo–surfactante presenta convergencia en estos tres parámetros, sus puntos se localizan dentro de una misma esfera de interacción, lo cual indica compatibilidad para formar emulsiones estables y lograr una reducción significativa en la viscosidad del sistema.

El modelo de esfera de interacción permitió identificar combinaciones óptimas de LIs y crudos con alta afinidad, las cuales mostraron una reducción de hasta el 99% en la viscosidad en condiciones de laboratorio. Este enfoque no solo sustituye al método ensayo-error tradicional, sino que proporciona una herramienta racional, escalable y adaptable para el diseño de surfactantes en aplicaciones de recuperación mejorada y transporte de crudos pesados.

PARTE EXPERIMENTAL

Se sintetizaron cuatro líquidos iónicos (LIs) denominados M1, M3, M4 y M5, y se compararon con un líquido iónico comercial (M2), N,N,N-trimetil-hexadecil amonio cloruro. La síntesis se realizó a partir de precursores comerciales de alta pureza (≥97%), y las estructuras fueron confirmadas por espectroscopía de RMN (^{1}H y ^{13}C), FTIR y espectrometría de masas. Los LIs se liofilizaron y su parámetro de solubilidad (δ) se determinó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), de acuerdo con la norma ASTM E-794-12. El HLB de los LIs se calculó utilizando el método de Davies modificado, incorporando la contribución de grupos moleculares hidrofílicos y lipofílicos, y validado por pruebas de partición aceite/agua.

Se caracterizaron nueve crudos pesados de un campo terrestre del sureste de México. Se determinó su composición mediante análisis SARA (ASTM D-2007-98), viscosidad (ASTM D-445-88), gravedad API, contenido de agua, TAN, TBN y tensión interfacial (TIF). Las viscosidades dinámicas de mezclas crudo-LI se midieron a 25 °C con un reómetro Physica MCR 301 en geometría de placas paralelas y tasas de corte de 0 a 100 s^{-1}. Las mediciones se realizaron por triplicado con una reproducibilidad del 5%. La TIF se midió por el método de gota colgante usando un sistema CAM 200. El HLB de los crudos se determinó mediante el coeficiente de partición (KHL) por extracción tolueno-agua. Finalmente, se construyeron representaciones gráficas tridimensionales (HLB, δ, TIF) en MATLAB para visualizar zonas de compatibilidad crudo–LI según el modelo de esfera de interacción.

RESULTADOS

Se caracterizaron nueve crudos pesados mexicanos, con valores de viscosidad superiores a 10,000 cP a 25 °C, gravedad API entre 9 y 13°, y composiciones diversas en fracciones SARA. Se observaron diferencias significativas en los contenidos de asfaltenos (8–22 %) y en la acidez total (TAN), lo que influye en la compatibilidad con surfactantes. Las propiedades experimentales fueron comparadas con cinco líquidos iónicos surfactantes (LIs): cuatro sintetizados (M1, M3, M4, M5) y uno comercial (M2), evaluando su capacidad para reducir la tensión interfacial (TIF) y modificar la viscosidad.

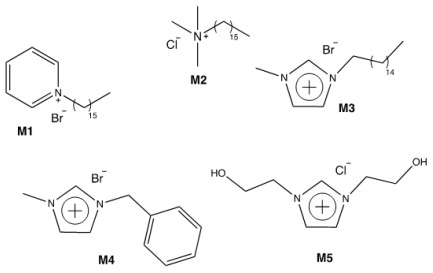


Figura 1. Estructuras representativas de los líquidos iónicos surfactantes.

Se aplicó un modelo de correlación HLB–δ–TIF basado en la geometría de una esfera de interacción. Este modelo establece que la compatibilidad entre un crudo y un surfactante se maximiza cuando los tres parámetros convergen dentro de una región tridimensional definida por un radio crítico r. El modelo permitió representar gráficamente la afinidad entre crudos y LIs mediante diagramas tridimensionales generados en MATLAB.

Correlación entre HLB, δ e TIF

Los valores de HLB se calcularon mediante una versión modificada del método de Davies, incorporando parámetros estructurales derivados del modelo Effective Chain Length (ECL) y correlacionados con datos experimentales de partición en sistemas agua/tolueno. Se observó una buena concordancia entre los valores de HLB teóricos y aquellos derivados de pruebas experimentales, particularmente en LIs con estructuras más simétricas.

La TIF se midió con el método de gota colgante, y se observaron reducciones sustanciales en presencia de LIs, con valores mínimos alcanzados por M5 (de 38.7 a 20.0 dyn/cm en promedio). Las tendencias indican que los LIs con cadenas más largas tienden a disminuir más eficazmente la TIF, al mejorar la solubilidad en ambas fases y promover la desagregación de asfaltenos.

Aplicación del Modelo de Esfera de Interacción

El modelo se validó comparando puntos experimentales (crudo + LI) con el centro de la esfera (HLB_LI, δ_LI, TIF_LI). Aquellos crudos cuya distancia al centro fue menor o igual al radio crítico presentaron una mayor reducción de viscosidad y mejor estabilidad de emulsión. En cambio, combinaciones fuera del radio generaron emulsiones inestables o comportamiento reológico deficiente.

Este enfoque permitió identificar una “zona de afinidad” donde las propiedades del surfactante se alinean con las del crudo, reemplazando el enfoque tradicional de prueba y error. Por ejemplo, los crudos C4, C5 y C6 se encontraron dentro de la esfera de interacción de M3 y mostraron la mayor respuesta positiva en términos de reducción de viscosidad.

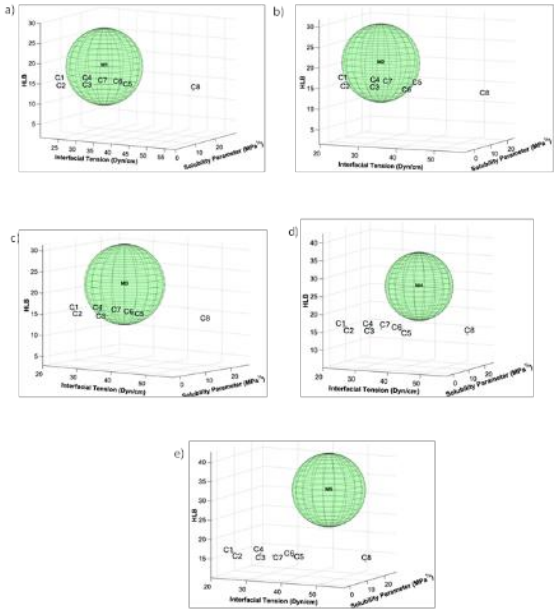


Figura 2. Modelo de Esfera de Interacción para la selección de pares de crudo-líquido iónico surfactante.

Validación reológica

Las curvas de viscosidad obtenidas con reómetro mostraron un comportamiento pseudoplástico típico de crudos pesados, con una disminución progresiva de la viscosidad con el incremento del esfuerzo cortante. Al adicionar LIs compatibles (especialmente M3), la viscosidad se redujo en todo el rango de esfuerzo cortante, con una reducción máxima a bajas velocidades de corte como se muestra en la Figura 3, lo cual es clave para el transporte en ductos.

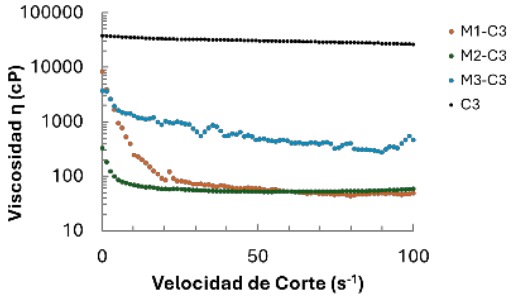


Figura 3. Reducción de la viscosidad para el crudo C3 al ser tratado con líquidos iónicos surfactante M1, M2 y M3.

Perspectivas del modelo y su aplicabilidad

El modelo propuesto puede aplicarse a otros sistemas crudo–surfactante, permitiendo el diseño racional de formulaciones para la recuperación de aceite, transporte de crudo, y tratamiento de emulsiones. Su aplicación evita extensos ensayos empíricos y permite seleccionar rápidamente los surfactantes óptimos a partir de parámetros fisicoquímicos medibles.

CONCLUSIONES

Este estudio propone un método sistemático para seleccionar líquidos iónicos (LIs) como surfactantes efectivos en la reducción de viscosidad en crudos pesados. Al integrar el balance hidrofílico-lipofílico (HLB), el parámetro de solubilidad (δ) y la tensión interfacial (TIF) dentro de una esfera de interacción, se identificaron combinaciones óptimas LI-crudo. Los LIs M1, M2 y M3 mostraron una alta afinidad y mejor desempeño. Esta metodología reduce la dependencia del enfoque empírico, ahorra recursos y ofrece una herramienta predictiva útil para aplicaciones en recuperación mejorada de petróleo.

Este trabajo está basado en el artículo original publicado en Langmuir (Ref. 6), adaptado exclusivamente para fines académicos y de divulgación en el marco del XXII Encuentro: Participación de la Mujer en la Ciencia. Las figuras presentadas corresponden a dicho artículo y han sido utilizadas con este mismo propósito.

BIBLIOGRAFÍA

1. Meyer, R. F.; Witt W. Definition and World Resources of Natural Bitumens; U.S. Geological Survey Bulletin, 1990; Vol. 1944. https://doi.org/10.3133/b1944.
2. Hinkle, A.; Batzle, M. Heavy Oils: A Worldwide Overview. The Leading Edge 2006, 25 (6), 742–749. https://doi.org/10.1190/1.2210073.
3. Speight, J. G. “The Chemistry and Technology of Petroleum”; CRC Press, 2006. https://doi.org/10.1201/9781420008388.

4. Muriel, D. F.; Katz, J. “Time Evolution and Effect of Dispersant on the Morphology and Viscosity of Water-In-Crude-Oil Emulsions”, Langmuir 2021, 37 (5), 1725–1742. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02986
5. Garcell, L.; Morales, M. P.; Andres-Vergés, M.; Tartaj, P.; Serna, C. J. “Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions”, J Colloid Interface Sci 1998, 205 (2), 470–475. https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5654
6. Miranda-Olvera, A. D.; Domínguez-Esquivel, J. M.; Martínez, J. “Hydrophilic–Lipophilic Balance (HLB) Correlation Method for the Selection of Ionic Liquid Surfactant Modifiers of the Viscosity and Emulsion Stability of Heavy Oils”, Langmuir 2025, https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c05309
7. Davies, J. T. “A quantitative kinetic theory of emulsion type”, Proc. Int. Congr. Surface Activity, 1957.

EL RIESGO OCULTO DE LOS MUROS ASIMÉTRICOS EN LOS EDIFICIOS DE ESQUINA: ¿PORQUÉ SE CAEN ESTOS EDIFICIOS DURANTE LOS SISMOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO?

Juan Ignacio López Pérez, José Manuel Jara Guerrero, Bertha Alejandra Olmos Navarrete, Abel Martínez Silva, Eduardo Reyes Negrete

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
ignacio.perez@umich.mx

RESUMEN

Los edificios de concreto reforzado ubicados en esquinas han mostrado una mayor susceptibilidad al daño estructural durante los terremotos de 1985 y 2017 en la Ciudad de México. Esta vulnerabilidad se atribuye a la presencia de muros de mampostería dispuestos asimétricamente, los cuales inducen efectos de torsión en la estructura. A partir de la observación de los daños en edificaciones colapsadas, se formuló la hipótesis de que la configuración asimétrica de los muros incrementa la demanda de desplazamientos en zonas específicas del edificio, favoreciendo la concentración del daño. Comprender este fenómeno es crucial para mejorar los criterios de diseño y mitigar riesgos estructurales.

En este trabajo, se realizó un estudio que incluyó la observación detallada de los edificios dañados durante la acción de temblores en México, la determinación de sus patologías estructurales, la creación de modelos numéricos y la medición de su comportamiento al ser sometidas al movimiento originado por los temblores. Una de las patologías más frecuentes es la inclusión de muros de relleno conectados a las columnas. Para evaluar el impacto de los muros de relleno asimétricos, se utilizó una metodología que consiste en seleccionar edificios de cuatro, seis y ocho pisos, representativos de los que colapsaron en la Ciudad de México en 2017, con base en las estadísticas publicadas de los daños en edificios. Posteriormente se diseñan de acuerdo con el reglamento vigente en 1976. Una vez diseñados, se crean modelos numéricos que incorporan el comportamiento no lineal geométrico y de los materiales, para dos posibles configuraciones: sin muros de relleno (regular) y con muros colocados en forma asimétrica (esquina). Estos modelos se analizan sísmicamente con análisis dinámicos en la historia del tiempo, utilizando registros sísmicos reales del sismo de 2017. Finalmente, el daño esperado se cuantifica con base en los desplazamientos determinados en distintas zonas de la estructura.

Los resultados de los análisis no lineales mostraron que los edificios sin muros experimentaron desplazamientos uniformes en sus esquinas, en ausencia del efecto de torsión. En contraste, los edificios de esquina con muros asimétricos presentaron desplazamientos diferenciales significativos entre las esquinas rígida y flexible, concentrando el daño en esta última. El efecto de torsión concentró la mayor parte del daño en un número reducido de columnas, aumentando el riesgo de colapso. La comparación entre los modelos numéricos y la evidencia observada en edificaciones colapsadas confirmó que la distribución asimétrica de los muros influye directamente en la respuesta sísmica del edificio.

Se concluye que la conexión de muros de mampostería asimétricos unidos con las columnas, sin considerar su influencia en la rigidez global genera efectos de torsión perjudiciales. En consecuencia, se recomienda desconectar estos muros en el diseño de edificios de esquina para reducir el riesgo de daño severo. Además, los hallazgos obtenidos sugieren la necesidad de evaluar las edificaciones existentes para determinar si requieren intervenciones estructurales que permitan mitigar su riesgo ante temblores futuros.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la torsión en las edificaciones no es reciente, ya desde 1970 se realizaron algunas investigaciones en las que se utilizaban modelos simplificados de edificios, con los cuales se mostraba que la torsión causaba un comportamiento poco deseable en las edificaciones. Sin embargo, en la práctica de la construcción en muchos países aún es común encontrar edificaciones que desde su planeación llevan implícito el fenómeno de la torsión. Desde el punto de vista reglamentario, países como México, Estados Unidos, Japón y otros pertenecientes a la Unión Europea, incluyen desde hace algunos años criterios para cuantificar la torsión en edificios, de manera que desde la etapa de proyecto se puede determinar si el edificio presentará torsión. Por otro lado, la práctica arquitectónica y constructiva demanda en muchos casos formas y elementos que conducen a la torsión, ya sea porque no hay una distribución simétrica de la masa en el edificio o bien de su rigidez.

En el caso de la masa se puede atribuir por ejemplo a una distribución no uniforme del peso en un edificio, como cuando se tienen bodegas o tinacos, los cuales pueden resultar en un incremento del peso en zonas muy localizadas. Mientras que en lo que se refiere a la rigidez, la torsión puede tener su origen en el propio sistema estructural que se utilice para resolver el proyecto del edificio, ya sea porque la planta es irregular debido a la presencia de huecos o salientes en la losa, o bien por la falta de simetría en la colocación de columnas y muros.

Un caso particular de los efectos de torsión causados por muros son los edificios de esquina, ya que debido a la presencia de edificios colindantes se tiene la necesidad de colocar muros en las caras del edificio que están en contacto con la colindancia, mientras que por otro lado en las fachadas del edificio suele haber una cantidad importante de ventanas y por lo tanto poca presencia de muros (Figura). Este arreglo asimétrico de los muros es lo que causa el fenómeno de la torsión cuando el edificio es sometido a cargas laterales, como ocurre en el caso de un sismo.



a) b)

Figura 1. Configuración estructural de un edificio con patología de esquina, a) planta esquemática, b) edificio colapsado que se ubicaba en la esquina de las calles Escocia y Gabriel Mancera en la Ciudad de México

DAÑOS POR SISMO EN EDIFICIOS DE ESQUINA

Diversos estudios han señalado que la torsión estructural es una de las principales causas de daño en edificios con irregularidades, como los ubicados en esquinas. Aunque no siempre se cuenta con estadísticas precisas, investigaciones recientes en Turquía (Al-Ahmar et al., 2023; Yön et al., 2024) y otros países (Dutta y Hussain, 2020) han destacado la vulnerabilidad sísmica de edificios con irregularidades torsionales, observada en eventos como los sismos de Nepal (2015), India (2001) y México (1985).

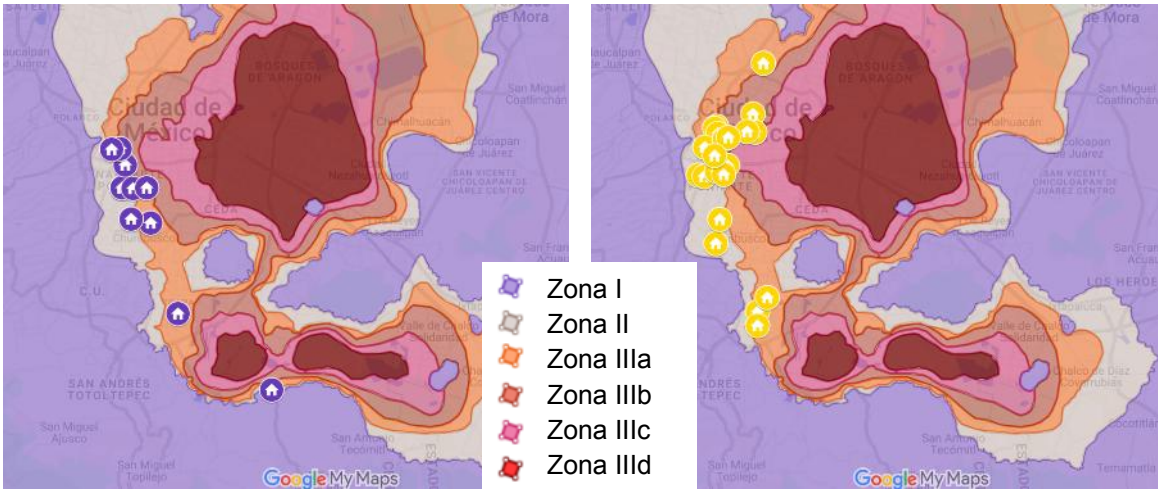
En México, Orozco y Reinoso (2007) reportaron que el 40% de los edificios dañados en el sismo de 1957 fueron estructuras en esquina. De forma similar, tras el sismo del 19 de septiembre de 1985, aproximadamente el 42% de los edificios afectados correspondían a edificios de esquina con muros de mampostería colocados asimétricamente (Meli et al., 2019).

Edificios de esquina dañados en 2017 en la ciudad de México

El 19 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo intraplaca de magnitud 7.1, con epicentro entre los estados de Puebla y Morelos, el cual causó daños en zonas cercanas al epicentro, así como en la Ciudad de México. Aunque el epicentro se ubicó a más de 120 km de distancia, la Ciudad de México registró fallas estructurales graves, especialmente en edificaciones de baja y mediana altura. De los 44 colapsos documentados, 31 correspondieron a edificios, de los cuales 11 (35%) se encontraban en esquina (Figura a).

Entre los factores que contribuyeron al colapso se encuentran, los efectos de amplificación sísmica debido a la presencia de suelos blandos en la Ciudad de México, la antigüedad de las edificaciones, ya que la mayoría de los edificios colapsados habían sido diseñados con reglamentos previos al sismo de 1985, y finalmente la presencia de patologías estructurales, como la planta baja débil (Jara et al. 2020; Jara et al. 2023) o la irregularidad en planta. Los efectos del suelo son claramente visibles, ya que el 74% de los colapsos en edificios ocurrieron en la Zona IIIa (Figura), la cual se caracteriza por tener suelos blandos con periodos dominantes entre 1.0 y 2.0 segundos, coincidiendo en buena medida con los periodos naturales de los edificios colapsados (de 3 a 10 niveles).

La mayoría de estas construcciones fueron diseñadas usando normas anteriores al sismo de 1985, con espectros sísmicos que tenían aceleraciones espectrales considerablemente inferiores que lo que se considera actualmente en los reglamentos. Lo anterior causó que la demanda impuesta por el sismo superara la capacidad estructural de los edificios. Además, el 58% de los edificios colapsados presentaban deficiencias como pisos blandos o irregularidades torsionales. Según Tena-Colunga et al. (2020), el 41.3% de las estructuras dañadas tenían irregularidades en planta, entre los cuales se encuentran los edificios en esquina. Este porcentaje incluye no solamente a los edificios colapsados, sino también a aquellos edificios que experimentaron daños severos y fueron clasificados como en alto riesgo de colapso, entre los cuales se identificaron otros 20 edificios con tipología de esquina (Figura b).



a) b)

Figura 2. Edificios dañados en la CDMX durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, a) colapsados, b) en alto riesgo de colapso

MODELACIÓN NUMÉRICA

Para evaluar el comportamiento ante sismo de los edificios de esquina, se realizaron modelos numéricos que fueran representativos de los edificios de esquina dañados en la Ciudad de México por el sismo de 2017. Para lo cual primeramente se estudió la geometría de dichos edificios, incluyendo los colapsados y los de alto riesgo de colapso, cuyos resultados se resumen en la Tabla , donde L1 y L2 se refieren a las dimensiones mayor y menor en planta respectivamente.

Tabla 1. Resumen de dimensiones de los edificios de esquina dañados debido al sismo ocurrido el 19 de septiembre de 2017

Categoría de edificios de esquina	Dimensiones en planta		Altura de entrepiso (m)	Número de crujías	
	L1 (m)	L2 (m)		Dirección L1	Dirección L2
Colapsados	15-2020-25	10-1515-20	2.60-2.80	3-5	3-4
Alto riesgo de colapso	15-2020-25	10-1515-20	2.60-3.20	4-5	3-4

En su mayoría, la estructura de estos edificios estaba compuesta por marcos de concreto reforzado, con muros de relleno de mampostería en los extremos colindantes del edificio. Por otro lado, tenían diferentes sistemas de piso, principalmente losa plana reticular y losa maciza, predominando este último. El uso de los edificios era en su mayoría habitacional, oficinas y comercios. Con estos datos se propuso analizar en este trabajo una muestra formada por tres edificios de cuatro, seis y ocho niveles, con una estructura formada por marcos de concreto reforzado y muros de relleno de mampostería de tabique rojo recocido para dar lugar a la tipología de esquina. Se consideró un edificio regular de oficinas con unas dimensiones en planta de 15x 20 m, altura de entrepiso de 2.70 m, y separaciones de columnas a cada cinco metros, dando lugar a cuatro crujías en la dirección larga del edificio y tres crujías en la dirección corta (Figura).

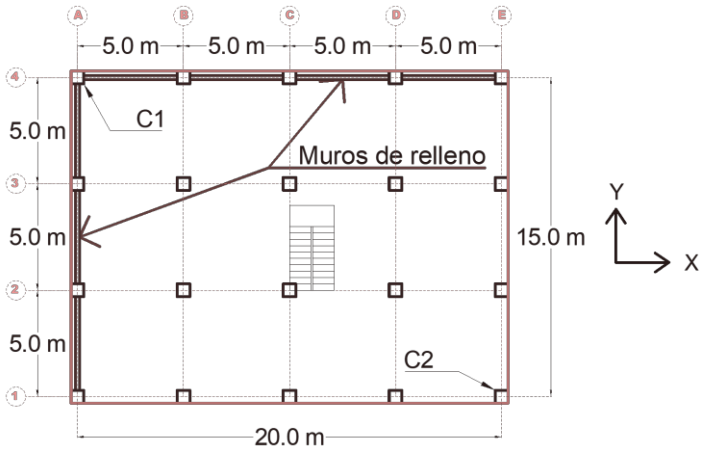


Figura 3. Geometría en planta de los edificios de esquina analizados

Los modelos numéricos se realizaron en el software de análisis y diseño de edificios ETABS (CSI ETABS, 2023), utilizando las propiedades de los materiales mostrados en la Tabla . Los marcos se modelaron mediante barras rectas, mientras que losas macizas se representaron como elementos tipo placa de 12 cm para todos los edificios, sobre las cuales se aplicaron las cargas muertas y vivas señaladas en la Tabla . Para diseñar los edificios se utilizó el espectro de diseño sísmico del Reglamento de la Ciudad de México de 1976 (NTC, 1976) considerando para el estado límite de prevención de colapso, un factor de comportamiento sísmico Q=4 comúnmente utilizado en la época (Figura).

Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en los modelos numéricos

Material	Resistencia a la compresión (Kg/cm^2)	Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	Resistencia a la fluencia (kg/cm^2)
Concreto	250	158,114	-
Mampostería	40	16,000	-
Acero	-	2,040,000	4,200

Tabla 3. Cargas gravitacionales utilizadas en los edificios (kg/m2)

Nivel	Sobrecarga muerta	Carga viva máxima	Carga viva instantánea
Azotea	333	100	70
Entrepiso	132.5	250	90

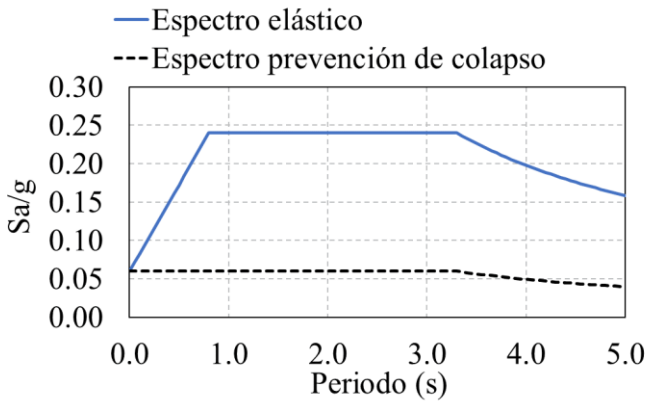


Figura 4. Espectro de diseño sísmico utilizado en el diseño de los edificios

Utilizando las combinaciones de carga establecidas en el reglamento (NTC, 1976) se diseñaron los tres edificios, con lo cual se obtuvieron las dimensiones y porcentajes de acero en columnas (Tabla) y trabes (Tabla). Con las dimensiones finales de los edificios se obtuvieron las formas modales. Considerando que en esta etapa se trata de edificios regulares, en todos los casos los primeros dos modos de vibración fueron de traslación en las dos direcciones principales del edificio (x, y) y el tercer modo fue de torsión alrededor del eje vertical. Posteriormente se colocaron los muros de mampostería en los ejes A y 4 para generar el edificio de esquina y obtener nuevamente las formas modales (Tabla). Para representar los muros se utilizó el criterio de la diagonal equivalente señalado en las normas actuales de la Ciudad de México (NTC, 2017), mediante el cual se puede representar al muro como una diagonal articulada en ambos extremos que trabaja únicamente en compresión. La sección transversal de la diagonal calculada con este criterio fue de 0.15x1.40m.

Tabla 4. Secciones transversales y porcentajes de acero de refuerzo en columnas

Edificio	Niveles	Sección transversal (m)	Porcentaje de acero de refuerzo (ρ)
4 niveles	1 - 4	0.40x0.40	1.49 %
6 niveles	1 - 6	0.45x0.45	1.17 %
8 niveles	1 - 5	0.50x0.50	0.95 %
	6 - 8	0.65x0.65	1.02 %

Tabla 5. Secciones transversales y porcentajes de acero de refuerzo en columnas

Edificio	**Niveles**	**Sección transversal (m)**	**Porcentaje de acero de refuerzo (ρ)**	
			Lecho inferior	Lecho superior
4-story	1 - 2	0.20x0.45	0.48 %	0.74 %
	3 - 4		0.32 %	0.50 %
6-story	1 - 4		0.48 %	0.74 %
	5 - 6		0.32 %	0.65 %
8-story	1 - 5		0.48 %	0.74 %
	6 - 8		0.48 %	0.65 %

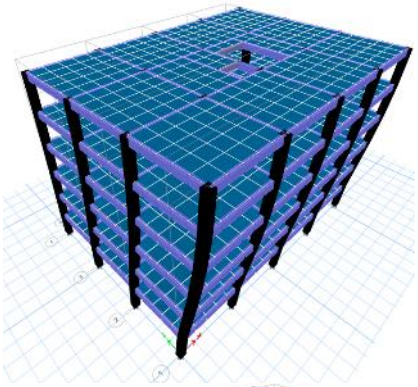
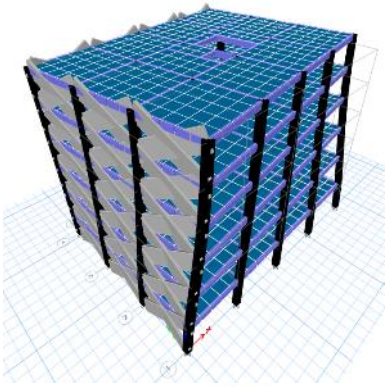
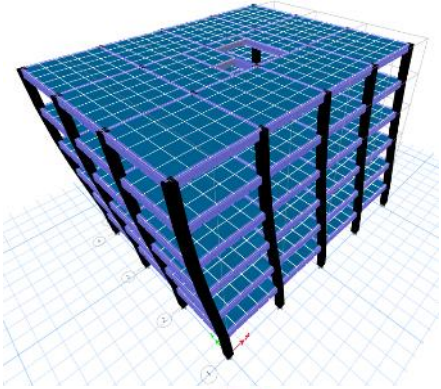
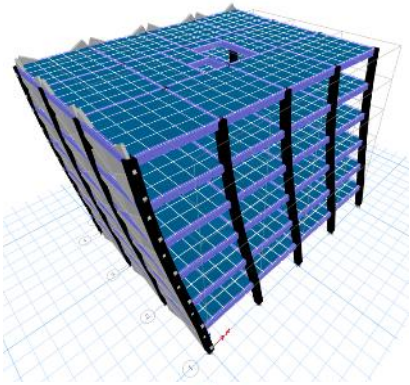
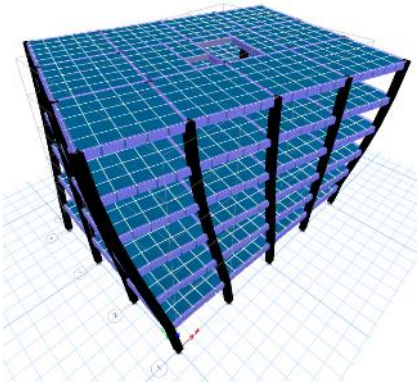
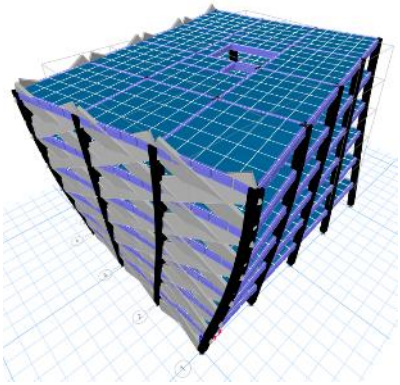
Tabla 6. Modos de vibrar y factores de participación de masa de los edificios regular y de esquina

Edificio	Edificio regular					Edificio de esquina				
	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ
4 niveles	1	0.918	0.003	**0.829**	0.004	1	0.859	0.210	**0.400**	0.226
	2	0.903	**0.831**	0.003	0.003	2	0.479	**0.506**	0.346	0.009
	3	0.782	0.004	0.003	**0.830**	3	0.282	0.145	0.108	**0.627**
6 niveles	1	1.141	0.004	**0.799**	0.005	1	1.064	0.201	**0.393**	0.215
	2	1.118	**0.801**	0.004	0.005	2	0.651	**0.489**	0.329	0.010
	3	0.974	0.006	0.005	**0.799**	3	0.392	0.139	0.099	**0.612**
8 niveles	1	1.33	0.003	**0.748**	0.004	1	1.234	0.186	**0.374**	0.195
	2	1.303	**0.75**	0.003	0.004	2	0.811	**0.469**	0.307	0.01
	3	1.117	0.004	0.004	**0.747**	3	0.504	0.132	0.095	**0.587**

En esta etapa los edificios de esquina muestran un cambio en su respuesta modal, ya que aunque se mantiene el orden de los factores de participación se observa que los modos ahora son acoplados. En los tres edificios de esquina el primer modo exhibe traslación en las dos direcciones principales del edificio, pero también torsión. Por otro lado, el segundo modo muestra un acoplamiento de traslación en las direcciones x,y, y el tercer modo sigue siendo mayormente de torsión. Este primer análisis muestra que dicha configuración de muros cambia considerablemente el comportamiento de los edificios, aunque deberá verificarse mediante los análisis no lineales. La

El siguiente paso fue realizar los análisis no lineales de los edificios, los cuales permitirán considerar tanto la no linealidad geométrica, como la no linealidad del comportamiento de los materiales. Los modelos se realizaron en el software Perform3D (CSI Perform3D, 2021). En este caso se consideró la no linealidad de la estructura sismo resistente, es decir, marcos y muros, para lo cual se utilizó el criterio de plasticidad concentrada. Las articulaciones plásticas se definieron con base en los resultados del diseño y las características de los materiales señaladas previamente, utilizando las envolventes de momento-rotación para trabes y columnas y la envolvente de esfuerzo cortante-deformación unitaria para los muros de mampostería.

Tabla 7. Formas modales del edificio de seis niveles regular y de esquina

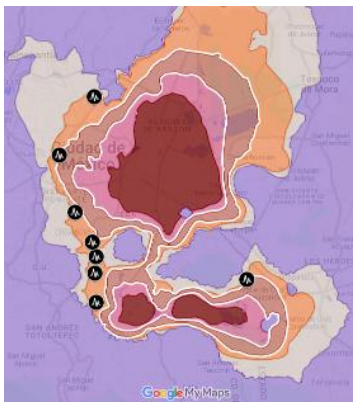
Modo	Edificio regular	Edificio de esquina
1er		
2o		
3er		

Demanda sísmica

Se eligió como demanda sísmica los registros obtenidos del temblor del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México, ya que ahí se ubicaban los edificios que sirvieron de muestra para los edificios analizados en este trabajo. Para este trabajo únicamente se incluyeron los registros de la zona IIIa (suelo blando), ya que fue donde ocurrió la mayoría de los daños y colapsos en edificios. El temblor se registró en ocho estaciones dentro de la zona IIIa, las cuales registraron una aceleración máxima del suelo de entre 104 y 226 gales en la dirección norte-sur, entre 119 y 220 gales en la dirección este-oeste y entre 26 y 84 gales en la dirección vertical (Tabla). Los espectros de pseudoaceleración obtenidos con estos registros muestran una zona de amplificación sísmica entre los periodos de 1.0 y 1.5 segundos (Figura). En este intervalo también se encuentran los periodos de vibrar de los edificios afectados por el sismo, por lo que se puede afirmar que la ubicación de los edificios también jugó un papel importante en los daños.

Tabla 8. Estaciones sísmicas que registraron el sismo del 19 de septiembre de 2017 en la zona IIIa de *la* Ciudad de México

Estación sísmica	***PGA (cm/s²)***		
	E - O	**N - S**	**V**
CH84	225.60	148.96	83.81
IB22	160.88	119.01	46.21
JC54	204.11	220.27	59.85
LI33	113.38	137.93	65.26
LV17	104.14	123.02	25.93
MI15	133.43	207.19	55.29
SI53	177.57	129.03	56.78
UC44	124.93	125.32	41.73



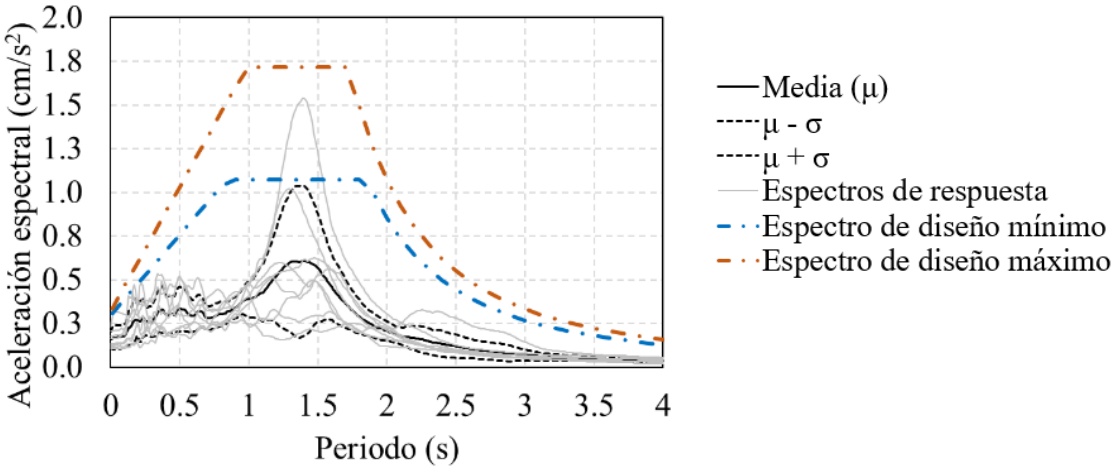


Figura 5. Espectros de respuesta de pseudoaceleración obtenidos con los registros de la zona IIIa

RESULTADOS

Con los registros seleccionados se aplicó análisis dinámico no lineal, tanto en los edificios regulares (ER) como en los de esquina (EE). Para evaluar los efectos de torsión se utilizó la deriva de entrepiso, definida como el cociente del desplazamiento lateral de un entrepiso entre su altura. En este caso se obtuvieron las derivas para todos los registros de la zona IIIa en dos ubicaciones del edificio, la columna C1 donde convergen los muros de mampostería y por lo tanto es la zona más rígida del edificio y la columna C2 que corresponde a la esquina donde convergen las fachadas del edificio y al ser la zona más alejada de los muros es también la más flexible (Figura). Reconociendo la variabilidad de los resultados entre cada uno de los registros y siendo que pertenecen a una misma zona sísmica, se obtuvo el valor medio de las derivas de entrepiso obtenidas con todos los registros.

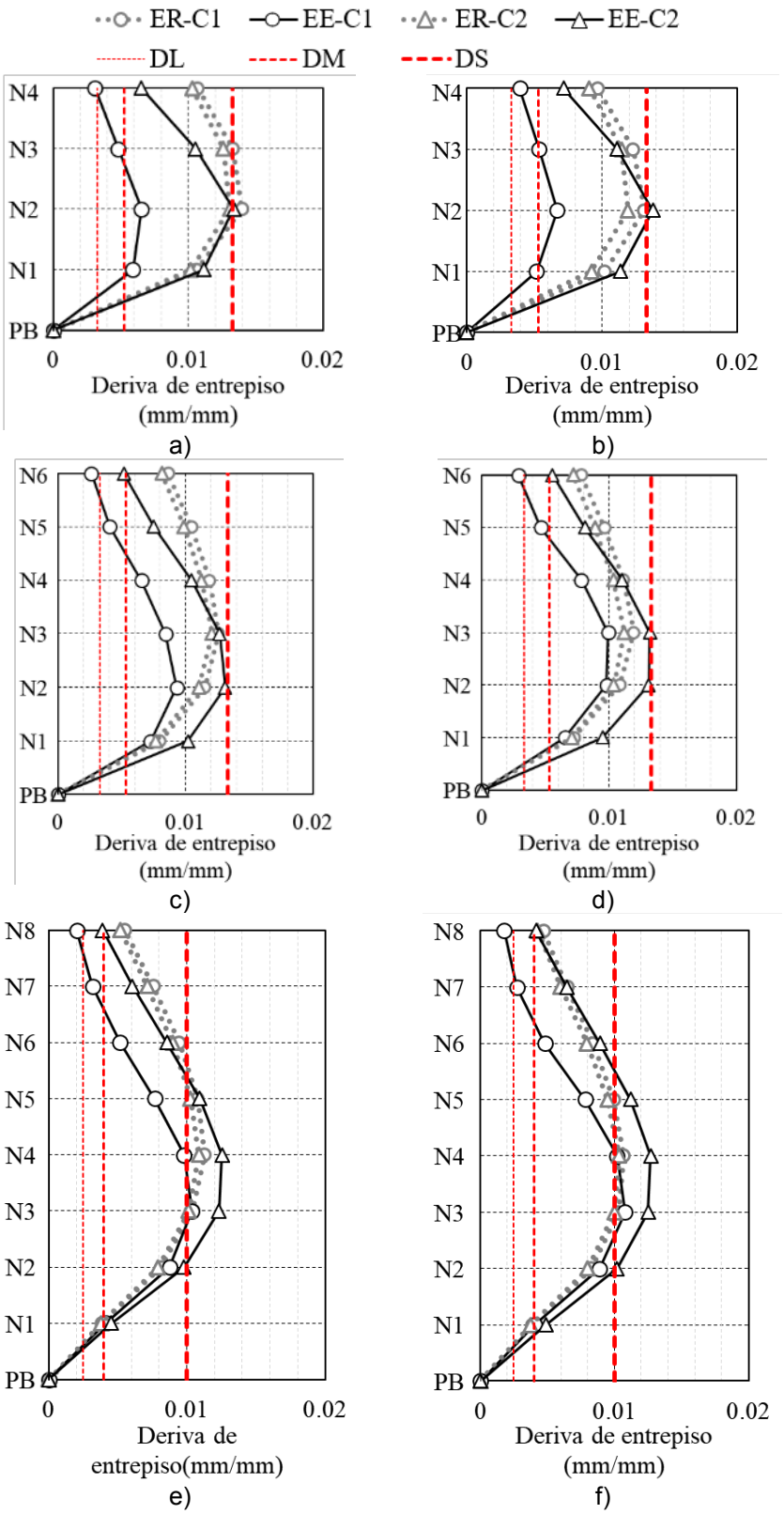


Figura 6. Derivas de entrepiso en columnas C1 y C3 en edificio regular y de esquina, a) 4N-dirección x, b) 4N-dirección y, c) 6N-dirección x, d) 6N-dirección y, e) 8N-dirección x, f) 8N-dirección y.

Las líneas en color rojo muestran los límites para evaluar los niveles de daño con base en las derivas de entrepiso, establecidos en la agencia Federal para el manejo de emergencias de Estados Unidos (FEMA, 2022), que en este caso corresponden a daños ligero (DL), daño moderado (DM) y daño severo (DS). Con base en estos límites se observa que en todos los casos los edificios alcanzaron al menos un nivel de daño moderado, llegando incluso a daño severo en los edificios de ocho niveles. Esto en gran medida puede atribuirse a los efectos de amplificación sísmica derivados del tipo de suelo presente en la zona IIIa en la Ciudad de México. Sin embargo, es importante señalar que los mayores desplazamientos se presentaron siempre en la columna C3, siendo mayores incluso que en los edificios regulares. Este comportamiento si es atribuible a la presencia de los muros de mampostería colocados en forma asimétrica, evidenciando el cambio en la respuesta sísmica de los edificios.

CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto de los muros de mampostería colocados en forma asimétrica entre los marcos en edificios de esquina, sometiendo un conjunto de edificios a una demanda sísmica compuesta por registros obtenidos del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la zona sísmica IIIa de la Ciudad de México. Las características de los edificios analizados se propusieron con base en los edificios dañados por el sismo. El efecto de esquina se evaluó a partir de las derivas de entrepiso en los lados rígido y flexible de los edificios. Los resultados muestran que los edificios de esquina tuvieron amplificaciones en los desplazamientos de la esquina C3 ubicada en la zona flexible, causando que se alcance un nivel de daño severo, ya que en todos los casos la esquina C3 presentó mayores desplazamientos que la esquina C1, pero también mayores que los desplazamientos en ambas esquinas del edificio regular.

Estos resultados permiten visualizar el riesgo que se tiene en los edificios de esquina, ya que la colocación de muros en sus colindancias es una práctica común, que, aunque pueda parecer inofensiva, genera cambios importantes en la respuesta estructural del edificio, incrementando el riesgo de colapso al aumentar los desplazamientos en la esquina del lado más flexible. Estos resultados son consistentes con los daños observados en los edificios de la Ciudad de México, ya que en algunos de ellos se observó que esta zona fue la más afectada e incluso donde inició el colapso.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Tena-Colunga, H. Hernández-Ramírez, A. Godínez-Domínguez, L. E. Pérez-Rocha, A. Grande-Vega, L. A. Urbina-Californias (2020), “Performance of the built environment in Mexico City during the September 19, 2017 earthquake”, International Journal of Disaster Risk Reduction, 51, pp. 1-25.
2. B. Yon, I. O. Dedeoglu, M. Yetkin, H. Erkek, Y. Calayir (2024), “Evaluation of the seismic response of reinforced concrete buildings in the light of lessons learned from the February 6, 2023, Kahramanmaras Turkiye earthquake sequences”, Natural Hazards, pp. 1-37.
3. CSI ETABS. (2023), “ETABS Building Analysis and Design V1.0.1”, Computers and Structures Inc. Berkeley, California.
4. CSI Perform3D (2021), “Perform3D, Nonlinear analysis and performance assessment of 3D structures V8.0.0”, Computers and Structures Inc.
5. FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2022), “Hazus Earthquake Model Technical Manual”, Hazus 5.1.
6. NTC (1976), “Manual de diseño por sismo según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de la UNAM.
7. NTC (2017), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
8. R. Al-Ahmar, M. A. Al Kousa, G. Wardesh (2023), “Some of recommendations and learned lessons from buildings performance during the recent Turkey-Syria earthquake”, Journal of University of Duhok, 26(2), pp. 264-276.

9. R. Meli, E. Miranda, C. López, O. López (2019), “Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la CDMX”, Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México.
10. S. C. Dutta, M. A. Hussain (2020), “Inelastic seismic behavior of asymmetric structures under bidirectional ground motion: an effort to incorporate the effect of bidirectional interaction in load resisting elements”, Structures, 25, pp. 241-255.
11. V. Orozco-Narváez, E. Reinoso-Angulo (2007), “Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica”, Revista de Ingeniería sísmica (76), pp. 61-87.

APROVECHAMIENTO DE DESECHOS DE CAFÉ PARA LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE CARBONO

Diana Laura Díaz Santiago[1], Oscar Guadalupe Rojas Valencia[2], José Luis Casas Espínola[1], Miriam Estrada Flores[2], Carmen Magdalena Reza San German[2]

[1]UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, 07340, CDMX, México. [2]ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, 07700, CDMX, México

ddiazs1700@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Ante la creciente crisis ambiental, la ciencia y la industria han explorado alternativas sostenibles para reducir el impacto ecológico, como el uso de energías limpias, el desarrollo de materiales ecológicos y la valorización de residuos agroindustriales. En este contexto, el presente trabajo presenta una ruta sostenible para la síntesis de nanopartículas de carbono a partir de residuos de la industria del café, específicamente la pulpa de café. Este subproducto, si no se gestiona adecuadamente, puede contaminar suelos y cuerpos de agua debido a su alto contenido de materia orgánica y compuestos bioactivos.

Para la obtención de las partículas de carbono, se empleó un proceso de carbonización asistida por mufla, utilizando la pulpa de café como fuente de carbono y grupos funcionales (provenientes de sus compuestos bioactivos) para la funcionalización en un solo paso del material deseado. El material fue sometido a diferentes temperaturas y tiempos de carbonización, empleando únicamente agua como disolvente y sin la adición de otros reactivos químicos, garantizando así un proceso ecológico y accesible.

Los nanomateriales obtenidos fueron caracterizados mediante diversas técnicas espectroscópicas. La espectroscopía de fotoluminiscencia reveló picos de emisión a 435 y 455 nm al ser excitados con un láser de 325 nm, evidenciando un corrimiento red-shift respecto a la banda de absorción ubicada alrededor de 271 nm. La espectroscopía FT-IR permitió identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de las nanopartículas, los cuales influyen en sus propiedades ópticas y luminiscentes. En comparación con otras investigaciones reportadas en la literatura, donde se emplearon residuos agroindustriales como cáscaras de frutas y restos vegetales [1,2], este trabajo destaca por su simplicidad y menor impacto ambiental. Mientras que dichos métodos requirieron el uso de catalizadores químicos o agentes oxidantes, el proceso aquí descrito utiliza únicamente agua como disolvente, reduciendo así la generación de subproductos y promoviendo una metodología más segura y sustentable. Este método se caracteriza por emplear un residuo agroindustrial en lugar de una fuente de carbono refinada, reduciendo así el costo del proceso y promoviendo la economía circular.

Finalmente, la utilización de pulpa de café como fuente de carbono para la síntesis de nanopartículas de carbono demostró ser una estrategia efectiva para valorizar un residuo agroindustrial, permitiendo obtener materiales luminiscentes con potenciales aplicaciones en sensores y dispositivos fotónicos. Esto evidencia que es posible generar tecnología accesible y, al mismo tiempo, aprovechar desechos orgánicos, ayudando a mitigar problemas ambientales y contribuir a la economía circular. Asimismo, el método propuesto representa un avance hacia procesos de síntesis más verdes, sencillos y económicos.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de nanomateriales ha revolucionado diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Dentro de este campo, los nanomateriales de carbono (NMC), tales como los puntos cuánticos de carbono (CQDs), nanografito y nanotubos, han despertado un creciente interés debido a sus propiedades únicas, como baja toxicidad, biocompatibilidad, estabilidad química y

fotoluminiscencia [3,4]. Estas características han permitido su aplicación en diversas áreas como sensores, dispositivos optoelectrónicos, catálisis y biomedicina [5].

Los métodos tradicionales para la síntesis de NMC suelen requerir materias primas nuevas, procesos complejos y condiciones severas que involucran altas temperaturas, reactivos tóxicos o costosos, lo que limita su sostenibilidad y viabilidad económica [3,5]. En respuesta a estas limitaciones, ha surgido una tendencia hacia la búsqueda de rutas de síntesis verdes, donde el uso de biomasa como fuente de carbono ha demostrado ser una alternativa prometedora. La biomasa y ciertos residuos orgánicos contienen compuestos ricos en carbono, como celulosa, hemicelulosa, lignina y compuestos bioactivos con grupos funcionales oxigenados, lo que los convierte en precursores ideales para la obtención de NMC mediante técnicas ambientalmente amigables [2,5].

Entre las diversas fuentes de biomasa, los residuos agroindustriales representan una oportunidad significativa tanto por su abundancia como por su bajo costo. Cuando estos subproductos no se gestionan adecuadamente pueden representar una amenaza ambiental considerable [6]. Tal es el caso de la pulpa de café, un residuo generado en grandes cantidades durante el procesamiento del grano, que posee un alto contenido de materia orgánica y compuestos fenólicos capaces de contaminar cuerpos de agua y suelos [7,8]. La valorización de estos desechos, transformándolos en materiales funcionales de valor añadido, no solo mitiga su impacto ambiental, sino que también permite cerrar ciclos productivos dentro de un enfoque de economía circular [7,9].

La transformación de residuos en nanomateriales funcionales se alinea directamente con los principios de la química verde, al promover rutas de síntesis que minimicen el uso de reactivos peligrosos, reduzcan el consumo energético y utilicen solventes seguros o inocuos, como el agua [10]. Estos principios resultan fundamentales para el diseño de tecnologías que no solo sean eficientes, sino también responsables con el entorno y accesibles en términos económicos y tecnológicos.

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología sostenible para la síntesis de nanopartículas de carbono a partir de residuos de la industria cafetalera, específicamente la pulpa de café. El método se basa en un proceso de carbonización asistido por mufla, en el que se emplea exclusivamente agua como disolvente y no se añaden reactivos químicos adicionales. Al aplicar diferentes temperaturas de carbonización, es posible modificar los grupos funcionales y obtener materiales con propiedades luminiscentes, útiles para aplicaciones como fotocatálisis y detección de contaminantes en aguas residuales. Este enfoque permite aprovechar un residuo orgánico de bajo costo, transformar un problema ambiental en una oportunidad tecnológica y generar materiales avanzados de forma accesible, todo dentro de un marco que responde a los desafíos de sostenibilidad y gestión responsable de recursos.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis

El método de síntesis consiste en la carbonización asistida por mufla de un solo paso en atmósfera de aire a partir de desechos de café. La experimentación se realizó en el laboratorio de Fundamentos de Nanotecnología ubicado en el edificio Z5 de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional.

El proceso inició con la adquisición de la pulpa de café en base húmeda de un beneficio de café ubicado en la Sierra Norte de Oaxaca. Teniendo en cuenta los principios de la química verde y para disminuir el consumo energético se optó por deshidratarlo bajo luz solar, se expuso directamente al sol por dos semanas para eliminar la mayor cantidad de humedad presente.

Del material seco se tomaron porciones de 10 g y se colocaron en un crisol para ser carbonizados en una mufla a temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C y 400°C durante un periodo de 4h.

Posteriormente cada muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente y se trituró manualmente en un mortero hasta obtener un polvo fino. Del polvo obtenido se tomaron muestras de 0.1 g y se dispersaron en aproximadamente 10 ml de agua destilada.

Esta solución se agitó hasta obtener una solución uniforme y posteriormente se filtró con un papel de 22 µm. Después, el líquido obtenido se hizo pasar por un segundo filtro de membrana de 0.24 µm, para finalmente hacerse pasar por un filtro de 0.1 µm (100 nm).

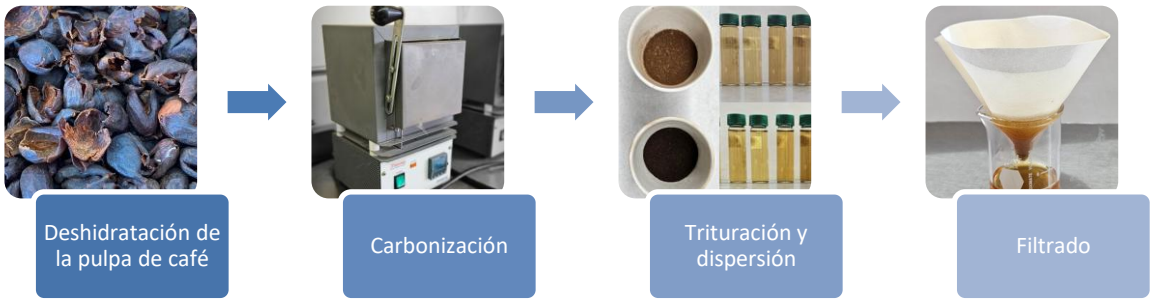


Figura 1. Esquema del proceso de síntesis.

Caracterización

Como parte de la caracterización, se realizaron mediciones de espectroscopia infrarroja (FT-IR) para identificar a los grupos funcionales presentes en la muestra y observar cómo cambian al variar las condiciones de síntesis. Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) para determinar el rango de absorción de la muestra y espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) para determinar la longitud de onda de emisión.

RESULTADOS

Como primer paso en la caracterización, se realizó una prueba preliminar para verificar la presencia de propiedades de emisión en las muestras obtenidas. Para ello, las nanopartículas dispersas en agua fueron expuestas a una lámpara de luz ultravioleta con una longitud de onda de 325 nm. Bajo esta excitación, se observó una emisión visible en la región del azul, lo cual sugiere que las nanopartículas poseen características luminiscentes.

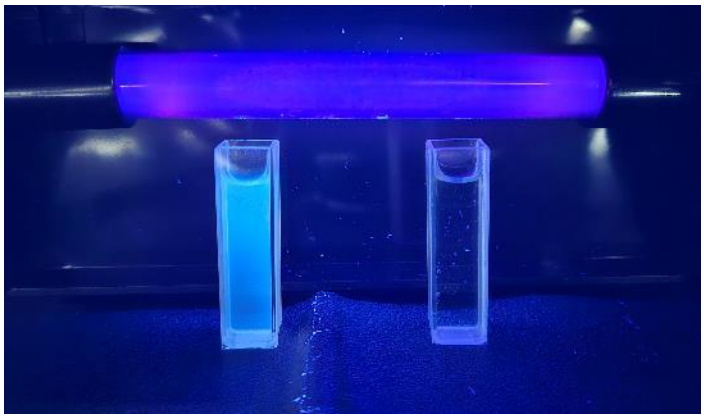


Figura 2. Celdas de cuarzo con la muestra sintetizada (izquierda) y agua (derecha) expuestas a una lampara UV.

Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

En los espectros UV-Vis (Fig. 1) de las muestras analizadas se observa una región característica asociada a la transición electrónica $n \rightarrow \pi^*$ [11], atribuida a moléculas como cafeína y ácidos clorogénicos, compuestos presentes en el mucilago y pulpa de café. En particular, la banda localizada alrededor de 271 nm se relaciona con la absorción de los enlaces C=O presentes en

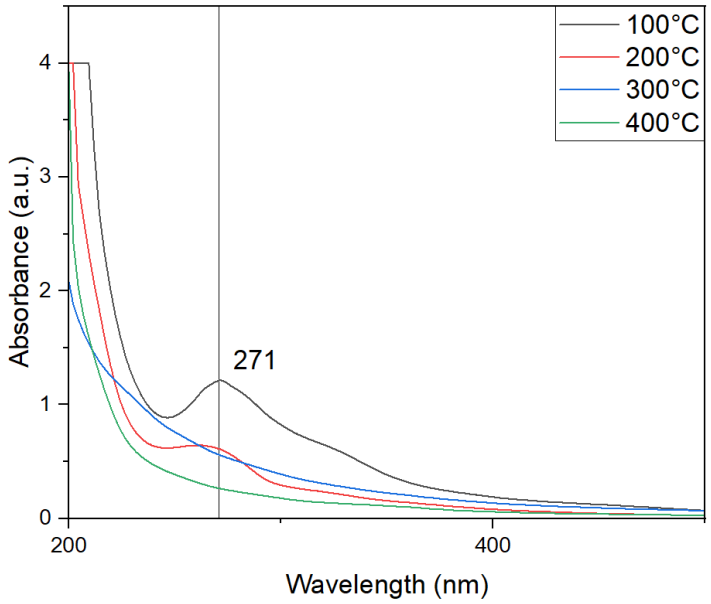


Figura 9. Espectros UV-Vis de las muestras sintetizadas.

esteres y carboxilatos, destacando su contribución a las propiedades ópticas del material.

Espectroscopia de fotoluminiscencia (PL)

Los espectros de fotoluminiscencia muestran dos picos de emisión principales a 435 nm y 455 nm, los cuales presentan un desplazamiento hacia mayores longitudes de onda (*red-shift*) en comparación con las bandas de absorción. Este corrimiento es consistente con la relajación de los electrones excitados hacia estados energéticos más bajos antes de emitir luz, fenómeno típico en materiales luminiscentes como las nanopartículas de carbono.

Las muestras sintetizadas a temperaturas de 200°C y 300°C exhiben las mayores intensidades de emisión, lo que indica que no son necesarias temperaturas excesivamente altas para obtener buenas propiedades luminiscentes. Sin embargo, la muestra tratada a 400°C muestra picos de emisión en longitudes de onda más cortas, lo que podría estar relacionado con cambios en el tamaño de las partículas, las estructuras superficiales o incluso con el fenómeno de *up-conversio*n.

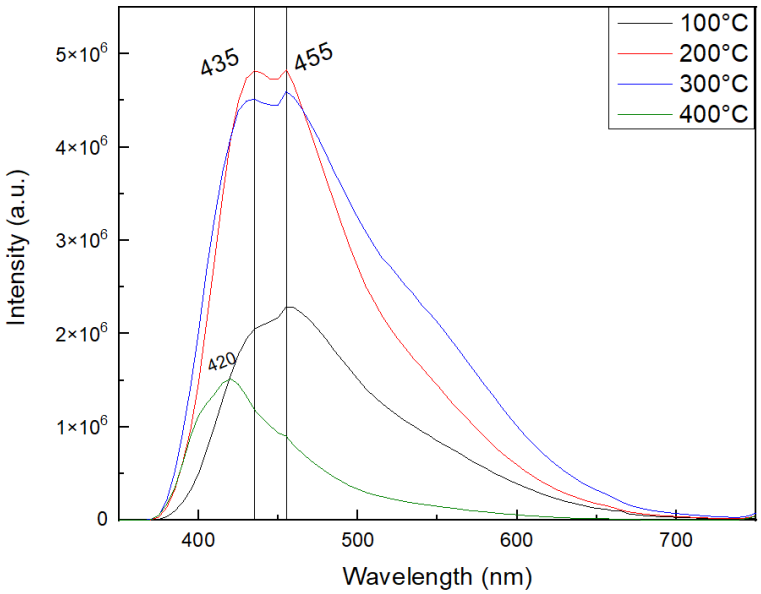


Figura 10. Espectros de fotoluminiscencia de las nanopartículas obtenidas.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

El análisis FT-IR de las muestras obtenidas a partir de la pulpa de café revela una compleja composición química, evidenciada por distintas bandas características. El pico alrededor de 3300 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de estiramiento de grupos -OH, lo cual indica la presencia de humedad residual; esta señal disminuye su intensidad a medida que la temperatura de síntesis aumenta. En torno a 2895 cm^{-1} se observa una banda asociada a las vibraciones de estiramiento C-H, relacionada con la presencia de cafeína. El pico alrededor de 2300 cm^{-1} se relaciona con carbohidratos y ácidos clorogénicos, compuestos bioactivos presentes en los desechos de café. La región entre 1650 y 1600 cm^{-1} mostró bandas características de enlaces C═C aromáticos, así como señales que coinciden con la huella espectral de la cafeína, lo que refuerza su detección en la muestra. El pico cercano a 1730 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento C═O, indicando la presencia de grupos acetilo y éster propios de las pectinas y lignina. Entre 1450 y 1000 cm^{-1} se identifica una región asociada con ácidos clorogénicos y otros ésteres, así como con vibraciones C-O y C-O-C, que apuntan a la existencia de carbohidratos como la sacarosa, picos más definidos en 1237 y 1028 cm^{-1} también son atribuidos a estos enlaces. Finalmente, la región entre 1500 y 700 cm^{-1} está dominada por vibraciones de grupos C-H además de contribuciones de carbohidratos. En conjunto, el análisis FT-IR indica que las muestras obtenidas están compuestas principalmente por carbohidratos como sacarosa y celulosa; lignina con grupos aromáticos y funcionales tipo carboxilato; cafeína; así como pectinas y ácidos clorogénicos.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Barrios-Rodríguez et al. [12], quienes utilizaron espectroscopía FT-IR para caracterizar la pulpa de cereza de café de diferentes variedades. En su estudio, identificaron bandas similares asociadas a grupos funcionales presentes en la cafeína, ácidos clorogénicos y carbohidratos, lo que respalda la presencia de estos compuestos en los residuos de café y valida la conservación de componentes estructurales clave del residuo, esenciales para las propiedades funcionales del nanomaterial obtenido.

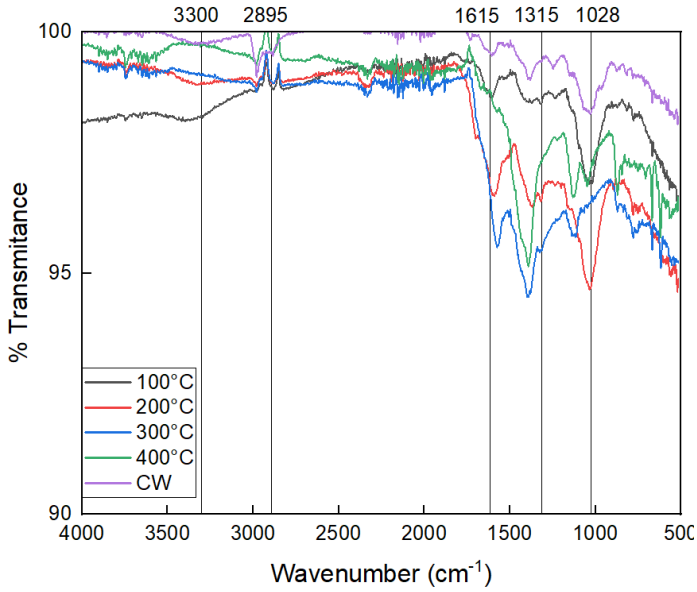


Figura 5. Espectro FT-IR de las muestras obtenidas

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de carbono obtenidas a partir de residuos de café representan una alternativa sostenible, eficiente y de bajo costo para el desarrollo de materiales funcionales. A través de un proceso de carbonización asistido por mufla, sin el uso de reactivos químicos adicionales y empleando únicamente agua como disolvente, se logró transformar la pulpa de café, un desecho agroindustrial abundante, en un nanomaterial con buenas propiedades ópticas. La caracterización por espectroscopía FT-IR confirmó la presencia de grupos funcionales derivados de componentes estructurales como lignina, celulosa, hemicelulosa, cafeína y ácidos clorogénicos, los cuales influyen directamente en la estabilidad y fotoluminiscencia de las nanopartículas. Esta estrategia no solo permite valorizar un residuo contaminante, sino que también se alinea con los principios de la química verde y la economía circular. Los resultados muestran que es posible obtener nanomateriales luminiscentes con aplicaciones potenciales en detección de contaminantes y fotocatálisis mediante un proceso ecológico y accesible.

BIBLIOGRAFÍA

1. 1. M. Kurian and A. Paul, “Recent trends in the use of green sources for carbon dot synthesis–A short review,” Carbon Trends, Vol. 3, 2021.
2. 2. S. D. Torres Landa, N. K. Reddy Bogireddy, I. Kaur, V. Batra, and V. Agarwal, “Heavy metal ion detection using green precursor derived carbon dots,” iScience, Vol. 25, 2, 2022, pp. 1–35.
3. S. Hui, “Carbon dots (CDs): basics, recent potential biomedical applications, challenges, and future perspectives,” Journal of Nanoparticle Research, vol. 25, no. 4.
4. A. Daulay et al., “Green sources for carbon dots synthesis in sensing for food application – A review,” Biosensors and Bioelectronics: X, vol. 17.
5. V. Manikandan and N. Y. Lee, “Green synthesis of carbon quantum dots and their environmental applications,” *Environmental Research*, vol. 212.
6. E. Díaz-Montes, “Residuos agroalimentarios,” Frontera Biotecnológica, vol. 23, no. 2, 2022.
7. G.A. Claudia, R.-R. Luis Antonio, G.T. Juan Fernando, and F.P. Ana Angélica, “Revaluation of coffee crop wastes: towards a circular economy,” *Digital Ciencia@UAQRO*, vol. 1, no. 14, pp. 71–79, 2021.

8. J. E. Wong Paz et al., “Alternativas Actuales para el Manejo Sustentable de los Residuos de la Industria del Café en México,” Acta Química Mexicana, vol. 5, no. 10, 2013.
9. V. Bressi, A. M. Balu, D. Iannazzo, and C. Espro, “Recent advances in the synthesis of carbon dots from renewable biomass by high-efficient hydrothermal and microwave green approaches,” Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, vol. 40.
10. S. Thakur, A. Bains, K. Sridhar, R. Kaushik, P. Chawla, and M. Sharma, “Valorization of food industrial waste: Green synthesis of carbon quantum dots and novel applications,” *Chemosphere*, vol. 347, Jan. 2024.
11. U. T. C. P. Souto et al., “UV-Vis spectrometric classification of coffees by SPA-LDA,” Food Chemistry, vol. 119, no. 1, pp. 368–371, Mar. 2010.
12. Y. Barrios-Rodríguez, G. A. Collazos-Escobar, and N. Gutiérrez-Guzmán, “ATR-FTIR for Characterizing and Differentiating Dried and Ground Coffee Cherry Pulp of Different Varieties (Coffea Arabica L.),” *Engenharia Agricola*, vol. 41, no. 1, pp. 70–77, Jan. 2021, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p70-77/2021.

RENDIMIENTO Y SEGURIDAD EN CENTROS DE DATOS: GESTIÓN TÉRMICA Y ORGANIZACIÓN DE SERVIDORES

Brenda Selene Diaz Guerrero[1], Marcelino Hernandez Aguilar[2], Adolfo Oliver Cruz Mendoza[3], Victor Manuel Martinez Silva[4],Lorena Mendoza Guzmán[5]

[1] TecNM ITS del Occidente del Estado de Hidalgo.
21011863@itsoeh.edu.mx

RESUMEN

Los centros de datos son un desafío para la industria tecnológica, con el crecimiento constante en la demanda de almacenamiento y procesamiento de información, es más importante que nunca encontrar soluciones innovadoras que ayuden a optimizar los recursos y asegurar la estabilidad de los sistemas.

El proyecto "Data Center Temperature Monitoring and Control System" desarrollado por el Instituto de Tecnología de Georgia, es un ejemplo destacado de cómo los sistemas de sensores inteligentes pueden revolucionar la gestión de centros de datos (Georgia Tech, 2021)[1]. Este innovador sistema monitorea las temperaturas al instante y ajusta automáticamente los sistemas de enfriamiento, lo que no solo previene el sobrecalentamiento, sino que también optimiza el consumo energético y mejora la eficiencia operativa. Se demuestra cómo el monitoreo constante es crucial para mantener la estabilidad de los servidores y garantizar el rendimiento óptimo de los centros de datos.

En las áreas en donde se localizan los servidores, la gestión térmica y la organización del espacio en los servidores de datos son esenciales para el rendimiento, estabilidad y durabilidad de los equipos. Un aumento en la temperatura puede causar fallos inesperados y daños en los componentes de hardware, ya que una mala disposición física de los servidores compromete la circulación del aire y dificulta el mantenimiento.

Muchas empresas no cuentan con sistemas de monitoreo de la temperatura y verificar la correcta ubicación de los equipos. Esta falta de supervisión impide la detección temprana de problemas, resultando en fallos graves y disminución en la disponibilidad de servicios digitales. Además, el sobrecalentamiento de los servidores aumenta los costos operativos debido al mayor consumo de energía para el enfriamiento.

Para abordar esa problemática, se desarrolló un sistema de monitoreo al instante utilizando sensores ultrasónicos y de temperatura. Donde se implementaran sensores en puntos estratégicos dentro del cuarto de servidores para recopilar datos continuamente. La información obtenida es la que nos generará las alertas automáticas cuando las temperaturas superen los límites preestablecidos o cuando se detecte un desplazamiento inesperado de los equipos. Se realizaron pruebas de funcionamiento para evaluar la precisión de las alertas y su efectividad en la prevención de sobrecalentamiento y desorden en la distribución de los equipos.

Esto nos dio como resultado una mejor supervisión y distribución de los equipos, evitando el sobrecalentamiento y reduciendo el riesgo de fallos críticos. Gracias a la detección temprana de variaciones térmicas y movimientos inesperados, se logró mejorar la seguridad y eficiencia en el cuarto de servidores. Además, la gestión térmica contribuyó en la reducción de costos energéticos, garantizando una mayor disponibilidad y estabilidad en los servicios digitales.

INTRODUCCIÓN

En la era actual, caracterizada por una rápida transformación digital y una creciente interconexión global, los centros de datos se han convertido en infraestructuras críticas y estratégicas para el funcionamiento de prácticamente todos los sectores económicos y sociales (Cisco, 2023; Gartner, 2022)[2]. Desde grandes corporaciones hasta gobiernos e instituciones educativas, dependen de estos centros para almacenar, procesar y distribuir cantidades masivas de información en tiempo real. El auge de tecnologías como el cómputo en la nube, la inteligencia artificial, el Internet de las cosas (IoT) y los servicios digitales ha generado un crecimiento exponencial en la demanda de capacidad computacional y almacenamiento, lo cual ha incrementado significativamente la complejidad operativa y los requerimientos técnicos de los centros de datos modernos (IDC, 2023)[3].

Estos entornos albergan una gran cantidad de servidores, unidades de almacenamiento, dispositivos de red y sistemas de respaldo energético, los cuales deben mantenerse operativos las 24 horas del día, los 365 días del año. Esta carga constante genera una enorme cantidad de calor, lo que convierte al control térmico en uno de los principales retos de la gestión de estos espacios (ASHRAE, 2021; Uptime Institute, 2022)[4]. Si no se manejan adecuadamente las temperaturas internas, se corre el riesgo de sufrir fallos críticos en los equipos, deterioro acelerado de componentes electrónicos, y en los casos más severos, pérdida total de hardware esencial (Google Data Center Efficiency, 2023)[5]. Además, la necesidad de mantener condiciones térmicas óptimas obliga a utilizar sofisticados sistemas de enfriamiento que, a su vez, implican un consumo energético elevado y costos operativos considerables (Energy Star, 2022)[6].

La eficiencia energética y la gestión térmica se han convertido así en prioridades fundamentales dentro del diseño, mantenimiento y operación de centros de datos (ASHRAE, 2021; Energy Star, 2022)[4]. Una estrategia térmica deficiente no solo incrementa los gastos, sino que también compromete la sostenibilidad del centro de datos al aumentar la huella de carbono (Uptime Institute, 2022)[7]. Por ello, se requieren soluciones tecnológicas que permitan un monitoreo continuo y preciso de las condiciones internas, de manera que se puedan anticipar los problemas antes de que estos afecten la disponibilidad y confiabilidad del sistema (Google Data Center Efficiency, 2023)[5].

Tradicionalmente, el monitoreo térmico en centros de datos se ha realizado mediante inspecciones manuales, revisiones periódicas o el uso de termómetros digitales colocados en puntos fijos. Sin embargo, estas metodologías resultan obsoletas frente a la creciente complejidad y escala de los centros de datos actuales. En muchos casos, no permiten una respuesta ágil ante variaciones térmicas abruptas o reconfiguraciones físicas en los racks de servidores. Este retraso en la detección de problemas puede desencadenar interrupciones no planificadas, pérdidas económicas significativas y una menor disponibilidad de los servicios digitales ofrecidos.

En este contexto, la implementación de sistemas inteligentes de monitoreo en tiempo real emerge como una solución innovadora y eficaz. Estos sistemas, basados en sensores de temperatura, sensores ultrasónicos, microcontroladores y plataformas de análisis de datos, permiten observar con alta precisión y en todo momento las condiciones térmicas y espaciales del entorno. Un ejemplo representativo de esta tendencia tecnológica es el sistema “Data Center Temperature Monitoring and Control System” desarrollado por el Instituto de Tecnología de Georgia. Este proyecto demostró la efectividad de integrar sensores distribuidos estratégicamente para ajustar dinámicamente los sistemas de enfriamiento, reduciendo tanto el consumo energético como el riesgo de fallos térmicos. Tomando como ejemplo este tipo de soluciones, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema de monitoreo térmico y espacial en tiempo real, utilizando sensores LM35 para temperatura y HC-SR04 para distancia, en conjunto con un microcontrolador ESP32 que permite la recolección y transmisión de datos de manera inalámbrica. Este sistema no solo es capaz de generar alertas automáticas al superar ciertos umbrales críticos, sino que también proporciona información útil para reorganizar los equipos de manera eficiente y prevenir la aparición de “zonas calientes”.

La principal ventaja de este sistema radica en su bajo costo, facilidad de implementación y escalabilidad, lo cual lo convierte en una alternativa viable frente a las soluciones comerciales que

suelen ser costosas y complejas. Además, su diseño modular permite adaptarlo a distintos tipos y tamaños de centros de datos, desde instalaciones pequeñas hasta infraestructuras empresariales de gran escala.

En síntesis, este proyecto busca ofrecer una herramienta integral, accesible y eficaz para mejorar la gestión térmica y espacial en centros de datos, reduciendo riesgos operativos, costos energéticos y contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad tecnológica. A través de la automatización, la sensorización y el análisis inteligente de datos, se aspira a transformar la manera en que se supervisa y protege la infraestructura digital en la actualidad.

TEORÍA

La administración térmica en los centros de datos es un componente fundamental para asegurar un funcionamiento eficaz, seguro y prolongado de los sistemas tecnológicos que contienen. Un data center estándar se compone de numerosas filas de estantes que incluyen servidores de alto rendimiento, dispositivos de almacenamiento, conmutadores de red, unidades de respaldo y otros aparatos esenciales que operan de manera continua. En el curso de su funcionamiento, estos aparatos producen una considerable cantidad de calor, el cual debe ser manejado y disipado de forma eficiente para prevenir daños en el hardware, caídas del sistema o interrupciones en los servicios digitales.

Cuando el calor no se gestiona de forma adecuada, se acumula en áreas específicas del centro de datos, creando lo que se denomina "puntos calientes". Estos incrementos de temperatura pueden causar desde una reducción en el rendimiento del sistema hasta una rápida degradación de los componentes electrónicos, tales como procesadores, memorias RAM, unidades SSD/HDD y placas base. En situaciones extremas, esto puede resultar en apagones inesperados, pérdida de datos e incluso incendios, impactando la continuidad de las operaciones y generando significativas pérdidas económicas.

Un aspecto crucial en la gestión térmica es el correcto flujo de aire. La mayoría de los centros de datos utilizan sistemas de refrigeración por aire que dirigen el aire frío hacia los equipos y eliminan el aire caliente que estos producen. Para lograr esto, se implementan configuraciones como el sistema de pasillo frío/pasillo caliente, el uso de paneles de contención y unidades CRAC. Estas tácticas permiten mantener una separación térmica adecuada, impidiendo que el aire caliente circule de nuevo hacia los equipos.

Sin embargo, si los servidores están mal distribuidos, si los pasillos de aire se obstruyen con cables, estructuras o racks desalineados, o si se utilizan sistemas de refrigeración sobredimensionados, la eficacia del flujo de aire se ve afectada, elevando el riesgo de sobrecalentamiento. Además, resulta contraproducente aplicar un enfriamiento excesivo, ya que esto no solo genera un gasto energético innecesario, sino que también puede provocar condensación o variaciones térmicas que perjudican la electrónica sensible.

Por lo tanto, la organización física del espacio, la adecuada ubicación y separación de los equipos, el control de obstáculos, la gestión del cableado y un uso eficiente de la energía son igualmente importantes como el propio enfriamiento. Esta organización debe ir acompañada de un monitoreo térmico constante, lo cual exige sistemas avanzados que puedan detectar cambios en tiempo real y facilitar una respuesta rápida. Sin este monitoreo, los centros de datos quedan vulnerables a condiciones críticas sin que el personal técnico tenga la capacidad de anticipar los problemas.

Como respuesta a esta demanda, la tecnología ha avanzado hacia sistemas inteligentes de monitoreo térmico. Estos sistemas incorporan sensores electrónicos que evalúan variables como temperatura, humedad, flujo de aire y desplazamiento físico. Los sensores de temperatura, tales como los termistores y los LM35, permiten registrar con precisión las fluctuaciones térmicas en ubicaciones específicas dentro del cuarto de servidores. Asimismo, los sensores ultrasónicos, como

el HC-SR04, miden la distancia entre objetos, lo que resulta útil para comprobar si algún equipo ha sido movido, retirado o instalado de una manera que pueda afectar el flujo de aire.

La combinación de estos sensores con microcontroladores programables (como el ESP32) y plataformas de procesamiento de datos en la nube facilita la creación de sistemas autónomos que recogen información en tiempo real, la transmiten de manera inalámbrica y la analizan para detectar comportamientos anómalos. Gracias a estos sistemas, es posible generar alertas automáticas que informan al personal técnico cuando se identifica una temperatura que excede el límite establecido o un cambio físico imprevisto en la posición de los servidores.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la capacidad de implementar estrategias de enfriamiento dinámico. Esto implica que los sistemas de refrigeración pueden ajustarse automáticamente de acuerdo a las necesidades térmicas reales que se detectan, evitando así el consumo constante de energía en áreas que no lo requieren. De esta manera, se protege la infraestructura y se optimiza el consumo energético, lo cual es crítico en un contexto donde los centros de datos constituyen una porción cada vez mayor de la demanda eléctrica global.

En conclusión, el uso de tecnologías de sensorización y automatización en la gestión térmica y espacial de centros de datos representa un avance crucial hacia una operación más segura, eficiente y sostenible. No solo se trata de mantener temperaturas adecuadas, sino de establecer un entorno inteligente capaz de adaptarse, alertar y optimizar en tiempo real. Así, se aumenta la resiliencia de los servicios digitales, se prolonga la vida útil del hardware y se ayuda a minimizar el impacto ambiental de las infraestructuras tecnológicas.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la creación del sistema de monitoreo térmico y espacial conocido como ThermoTrack, se utilizó un enfoque dividido en etapas que asegurara la funcionalidad, confiabilidad y efectividad del prototipo. La estrategia fusionó aspectos de ingeniería electrónica, programación embebida y manejo de datos, lo que permitió diseñar una solución práctica, asequible y escalable. A continuación, se detallan las fases y métodos utilizados:

1. Especificación de requisitos técnicos
El proceso comenzó con la determinación de las variables físicas a supervisar: la temperatura y la distancia, las cuales son esenciales para analizar el entorno térmico y la adecuada disposición del espacio en los servidores. Esta etapa incluyó:

- La elección de sensores económicos, de alta disponibilidad y precisión.
- La determinación de rangos operativos apropiados: 2–100 cm para distancia y -10 °C a 50 °C para temperatura ambiental.
- La necesidad de una plataforma de procesamiento que integrará conectividad inalámbrica, bajo consumo y la capacidad de comunicarse con bases de datos.

2. Selección e integración de componentes
Se optó por componentes accesibles y efectivos para facilitar la implementación en entornos reales con recursos limitados:

- Microcontrolador ESP32: seleccionado por su doble núcleo, conectividad Wi-Fi y adaptabilidad para proyectos de IoT.
- Sensor ultrasónico HC-SR04: responsable de medir la distancia entre racks o de detectar obstrucciones.
- Sensor de temperatura LM35: termómetro lineal que proporciona una salida analógica proporcional a la temperatura en grados Celsius.
- Se crearon tres módulos funcionales dentro del sistema:
- Recopilación de datos: medición de parámetros físicos mediante los sensores.
- Procesamiento embebido: lectura e interpretación de señales por parte del ESP32.

Integración de hardware: conexión física de los sensores al microcontrolador, teniendo en cuenta la compatibilidad eléctrica, la ubicación adecuada y el manejo de señales.

3. Desarrollo del firmware
La lógica del sistema se implementó programando en Arduino IDE, utilizando un enfoque modular que favorece la escalabilidad y el mantenimiento del código. Las funciones principales del firmware incluyeron:

- Lectura precisa de señales ultrasónicas y analógicas.
- Conversión de voltajes en unidades físicas (°C y cm).
- Control de la tasa de muestreo según la estabilidad del entorno.
- Interacción con un servidor a través de solicitudes HTTP POST.

4. Configuración y diseño de la base de datos
Se creó una base de datos MySQL en un servidor local o remoto, con tablas separadas para cada tipo de sensor y campos diseñados para almacenar:

- Valor medido.
- Fecha y hora del registro.
- Identificador del sensor o del área del servidor.
- Estado de alerta (si corresponde).
- La base de datos fue optimizada para facilitar el análisis histórico, el seguimiento de alertas y futuras conexiones a plataformas de visualización.

5. Validación experimental y ajustes
Por último, se realizaron pruebas funcionales en un entorno simulado, imitando condiciones reales de funcionamiento. Esta fase incluyó:

- Verificación de la precisión de los sensores utilizando instrumentos de referencia.
- Evaluación de la resistencia del sistema durante su funcionamiento constante.
- Evaluación de la conectividad Wi-Fi en diversas circunstancias de red.
- Estudio de la reacción del sistema frente a situaciones críticas (como un incremento repentino de temperatura o un obstáculo físico).
- Los hallazgos de esta fase facilitaron la precisión de los límites de alerta, la modificación de los periodos de muestreo y la comprobación de la fiabilidad general del sistema.

Para implementar el sistema de monitoreo térmico y espacial en un entorno simulado de centro de datos, se diseñó una metodología experimental cuidadosamente estructurada en cinco etapas clave. Este enfoque permitió asegurar la viabilidad técnica, eficiencia operativa, escalabilidad y precisión de la solución propuesta, garantizando además que cada componente cumpla una función específica dentro del sistema integral.

A continuación, se describe con mayor profundidad cada una de las fases del desarrollo experimental:

1. Selección de componentes.

La primera etapa consistió en la elección precisa de los componentes electrónicos que garantizaran un equilibrio entre rendimiento, compatibilidad, consumo energético y bajo costo, sin sacrificar la fiabilidad operativa del sistema. La arquitectura electrónica se diseñó en torno al microcontrolador ESP32, un SoC (System on Chip) altamente versátil, con capacidades de comunicación inalámbrica (Wi-Fi y Bluetooth), múltiples pines GPIO, bajo consumo en estado de reposo y una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz. Estas características lo convierten en la elección ideal para aplicaciones de

monitoreo remoto que requieren procesamiento en tiempo real y transmisión de datos hacia servidores externos.
Para el monitoreo térmico se seleccionó el sensor LM35, ampliamente reconocido por su precisión, respuesta lineal en grados Celsius, bajo costo y facilidad de calibración. Este sensor entrega una salida analógica proporcional a la temperatura, permitiendo la medición efectiva de variaciones térmicas mínimas en tiempo real. Su rango operativo (de -55 °C a 150 °C) lo hace perfectamente apto para ambientes controlados como los cuartos de servidores.
Para la medición espacial y detección de desplazamientos físicos, se empleó el sensor ultrasónico HC-SR04, el cual emite pulsos ultrasónicos y mide el tiempo de retorno para calcular distancias entre 2 cm y 400 cm, con una resolución milimétrica. Este sensor permite detectar cambios en la ubicación de los equipos o presencia de objetos que obstruyan los flujos de aire en los pasillos. Su fiabilidad y bajo consumo lo convierten en un componente fundamental para la dimensión espacial del sistema.

2. Integración de sensores al ESP32.

Con los componentes seleccionados, se procedió a la etapa de integración física y programación del sistema. Esta fase incluyó el cableado correcto entre los sensores y el ESP32, el diseño del esquema de conexión en protoboard y la implementación del firmware utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. La lógica del programa fue diseñada en bloques modulares que permitieran:

- Lectura periódica de valores analógicos (temperatura) y digitales (tiempos ultrasónicos).
- Calibración automática y filtrado de señales (mediante algoritmos de suavizado tipo media móvil).
- Conversión de datos a unidades físicas legibles (°C y cm).
- Gestión de eventos críticos mediante estructuras condicionales.
- Envío de datos mediante solicitudes HTTP a una base de datos externa vía Wi-Fi.

Durante la calibración, se compararon las lecturas del LM35 con termómetros digitales de referencia bajo condiciones de temperatura controlada. Para el HC-SR04, se realizaron ensayos con objetos a distancias conocidas, evaluando la repetibilidad y precisión de las mediciones. Se incluyó tolerancia a errores mediante condiciones de relectura cuando las variaciones superan el margen esperado.

También se optimizó el código para ejecutar rutinas de bajo consumo, desactivando temporalmente módulos del ESP32 cuando no se requería la adquisición de datos, lo cual prolonga la vida útil del sistema si se implementa en instalaciones reales con alimentación limitada (por ejemplo, mediante baterías o UPS).

3. Captura y transmisión de datos.

La tercera etapa se centró en garantizar una comunicación eficiente entre el sistema embebido y la base de datos remota. Para ello, se diseñó un mecanismo de captura de datos con frecuencia variable, es decir, un sistema de muestreo adaptable. En condiciones térmicas estables, el sistema realiza lecturas cada 60 segundos, reduciendo el uso de energía y tráfico en la red. Sin embargo, cuando se detecta una tendencia de aumento térmico o cambios de distancia fuera del rango de tolerancia, la frecuencia de lectura se incrementa a cada 10 segundos.

Los datos recopilados (temperatura, distancia y timestamp) son codificados en formato JSON y enviados a través de solicitudes HTTP POST a un servidor con base de datos MySQL alojada localmente o en la nube. Esta arquitectura permite la monitorización en tiempo real desde

ubicaciones remotas, sin necesidad de intervención física, lo cual resulta especialmente útil en entornos restringidos o con supervisión limitada.
Para asegurar la integridad de los datos, se implementó una lógica de verificación de respuesta del servidor (códigos HTTP 200 OK). En caso de fallo en la transmisión, los datos son almacenados temporalmente en memoria y enviados cuando se restablece la conexión.

4. Almacenamiento y visualización de datos.

Los datos generados por los sensores fueron organizados y almacenados en una base de datos MySQL, diseñada con una estructura relacional optimizada para el análisis histórico.

Las principales tablas incluyen:

- lecturas_termicas: temperatura, sensor_id, timestamp.
- lecturas_espaciales: distancia, sensor_id, timestamp.
- eventos: descripción del evento, tipo de alerta, hora, estado de respuesta.

Esta estructura facilita la trazabilidad de cada lectura y la posterior correlación con eventos críticos. Por ejemplo, es posible detectar si un aumento de temperatura coincide con el desplazamiento de un equipo que obstruye la ventilación.
Aunque la presente fase del proyecto no incluyó una interfaz gráfica de usuario (GUI), se contempló el desarrollo de una plataforma web basada en HTML, CSS, JavaScript y PHP, o el uso de frameworks modernos como Flask o Django, que permita a los técnicos acceder en tiempo real a dashboards con gráficas, alertas y registros históricos. Esta funcionalidad es clave para la interpretación rápida de los datos y para la toma de decisiones operativas fundamentadas.

5. Generación de alertas automatizadas.

La última etapa consistió en el diseño e implementación del sistema de alertas preventivas, cuya función principal es avisar de forma automática a los operadores del centro de datos cuando las condiciones del entorno excedan los valores de seguridad previamente definidos.

Se definieron umbrales críticos como:

- Temperatura > 35 °C en pasillos calientes.
- Distancia < 10 cm entre servidores y obstáculos.
- Fluctuación térmica ≥ 5 °C en 5 minutos.

Cuando el sistema detecta alguna de estas condiciones, genera una alerta codificada que se envía a través de servicios de mensajería (como correo electrónico, Telegram Bot o notificaciones push). Esto permite una intervención rápida, reduciendo el riesgo de fallos por sobrecalentamiento o bloqueo del flujo de aire.
Cada alerta se registra en la base de datos con hora y tipo de incidencia, y se marca como atendida una vez que el técnico realiza la acción correctiva. Esta trazabilidad permite evaluar la eficiencia de respuesta del personal y la frecuencia de incidencias, insumos valiosos para el mantenimiento predictivo.

RESULTADOS

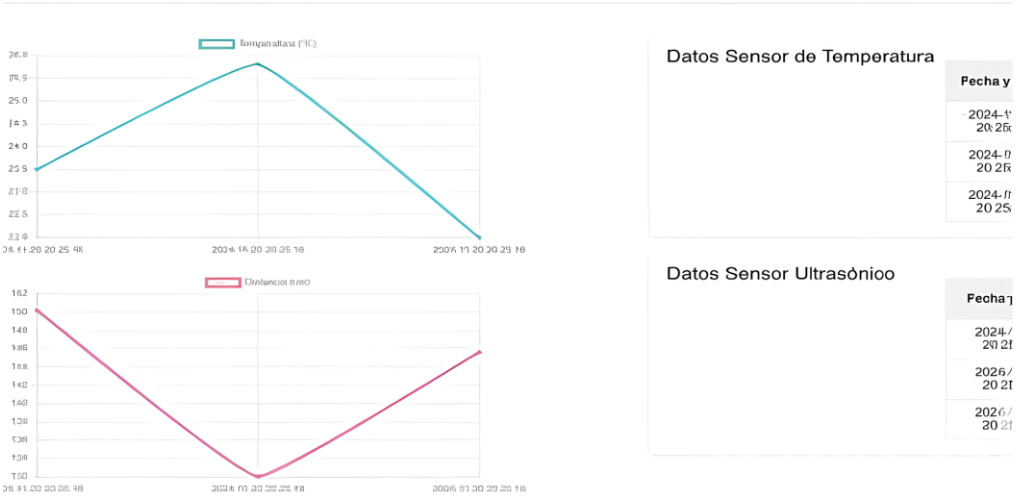
El desarrollo, implementación y evaluación del sistema denominado ThermoTrack permitieron validar la integración efectiva de sus componentes, así como la funcionalidad conjunta del sistema en condiciones controladas. Este prototipo fue diseñado con el propósito de realizar un monitoreo térmico y espacial continuo dentro de un entorno que simula un cuarto de servidores, demostrando que es posible implementar una solución inteligente, de bajo costo y con capacidad de expansión en infraestructuras reales.

Desempeño de los sensores ultrasónicos (HC-SR04) y del sensor de temperatura LM35.

Los sensores ultrasónicos HC-SR04, encargados de la medición de distancias entre los racks y posibles obstáculos físicos, mostraron un rendimiento sólido dentro del rango óptimo de operación (2 cm a 100 cm). Durante las pruebas se utilizaron diferentes configuraciones espaciales simuladas, en las cuales los sensores pudieron detectar con precisión el acercamiento o alejamiento de estructuras, permitiendo inferir el desplazamiento de servidores u obstrucciones en los pasillos de ventilación.

Se implementaron escenarios en los que se introdujeron objetos de diferente tamaño y material frente al sensor. Los resultados indicaron que la respuesta del sensor era más precisa con superficies planas y duras (como metales o acrílicos) y menos estable frente a materiales absorbentes como telas o superficies curvas. A pesar de estas limitaciones físicas, el sistema pudo detectar correctamente desplazamientos significativos (±3 cm o más), lo cual es suficiente para propósitos de seguridad y supervisión del flujo de aire.

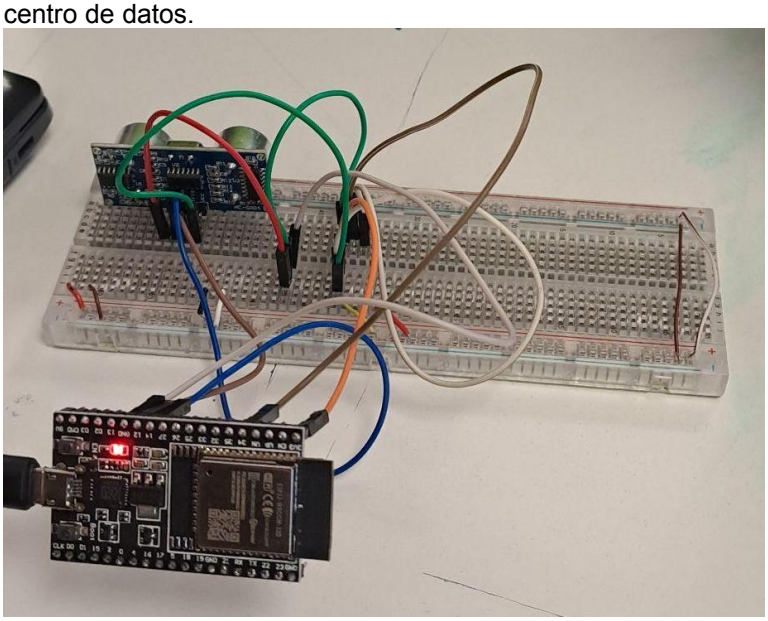
Una observación importante es que a distancias mayores a 100 cm, la precisión decrece debido a la dispersión del pulso ultrasónico y a la interferencia con otras señales. Esto sugiere que, para centros de datos con grandes distancias entre racks, sería recomendable utilizar sensores ultrasónicos de mayor alcance o complementarlos con sensores infrarrojos o de proximidad óptica.



El sensor LM35 presentó un comportamiento consistente y confiable, entregando valores con una tolerancia de ±0.5 °C en condiciones ambientales estables. Las mediciones térmicas fueron realizadas en diferentes zonas del entorno simulado, como dentro del rack, en la salida del flujo de aire y en zonas propensas a acumulación de calor. Esta distribución permitió identificar diferencias

térmicas entre pasillos, así como anticipar la formación de zonas calientes que podrían pasar desapercibidas con un monitoreo tradicional.

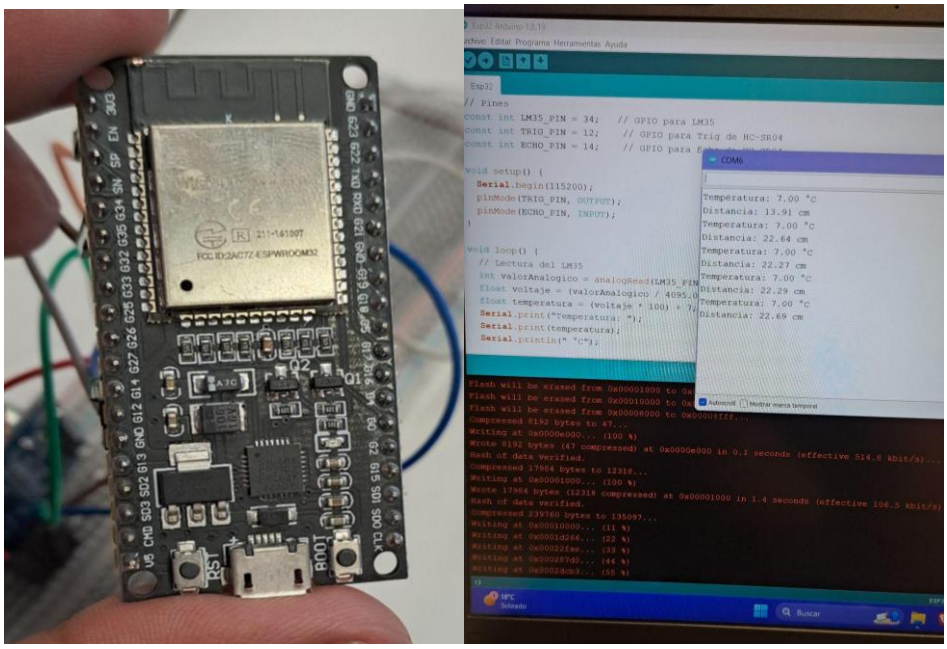
Cabe destacar que el sensor respondió rápidamente a cambios térmicos inducidos artificialmente mediante fuentes de calor. Esta sensibilidad lo hace ideal para detectar aumentos súbitos de temperatura provocados por fallos de ventilación o incremento de carga en los servidores. Las pruebas también confirmaron que el LM35 no sufre interferencias electromagnéticas significativas cuando opera cerca de otros dispositivos electrónicos, lo cual es esencial en entornos saturados de señales como un centro de datos.



Funcionamiento del microcontrolador ESP32.

El ESP32 se comportó de forma eficiente como unidad central de procesamiento y comunicación. Su conectividad Wi-Fi permitió el envío continuo de datos sin pérdidas apreciables ni desconexiones prolongadas. Además, su capacidad para ejecutar múltiples tareas (lectura de sensores, análisis de umbrales y transmisión de datos) de manera simultánea permitió mantener el sistema estable y sin interrupciones.
Una de las características más destacadas fue la implementación de una tasa de muestreo dinámica, que ajusta la frecuencia de recolección de datos en función de la estabilidad del entorno. En condiciones normales, el sistema opera a baja frecuencia (una lectura cada minuto), mientras que ante eventos críticos (como variaciones térmicas bruscas o cambios en la distancia), el sistema eleva la frecuencia hasta lecturas por segundo, permitiendo una supervisión más fina.

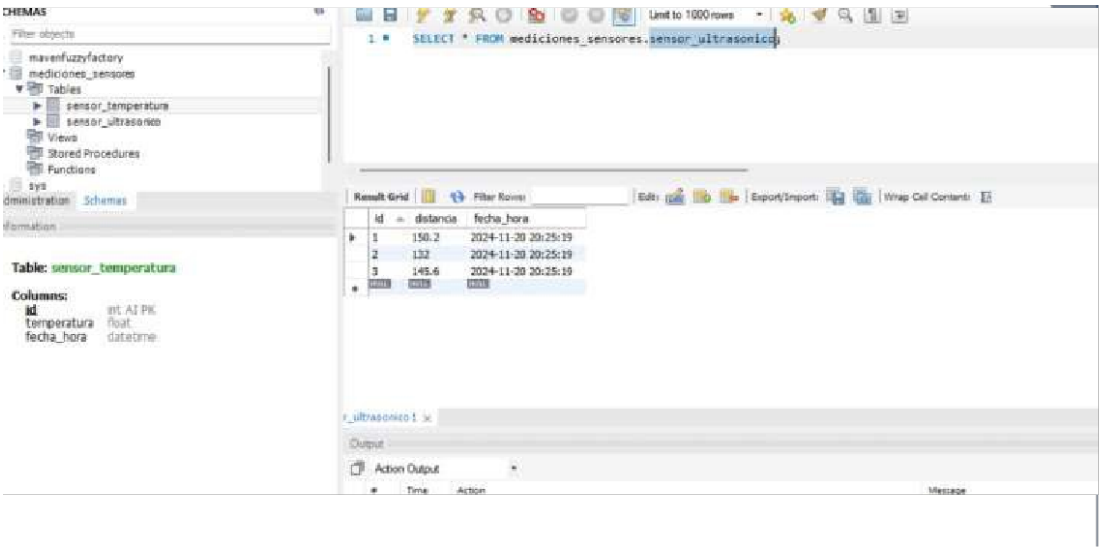
Este enfoque inteligente redujo el consumo de energía del ESP32, minimizó el tráfico en la red local y alargó la vida útil del sistema en caso de ser alimentado por baterías o fuentes auxiliares.



Rendimiento del sistema de almacenamiento (Base de datos MySQL).

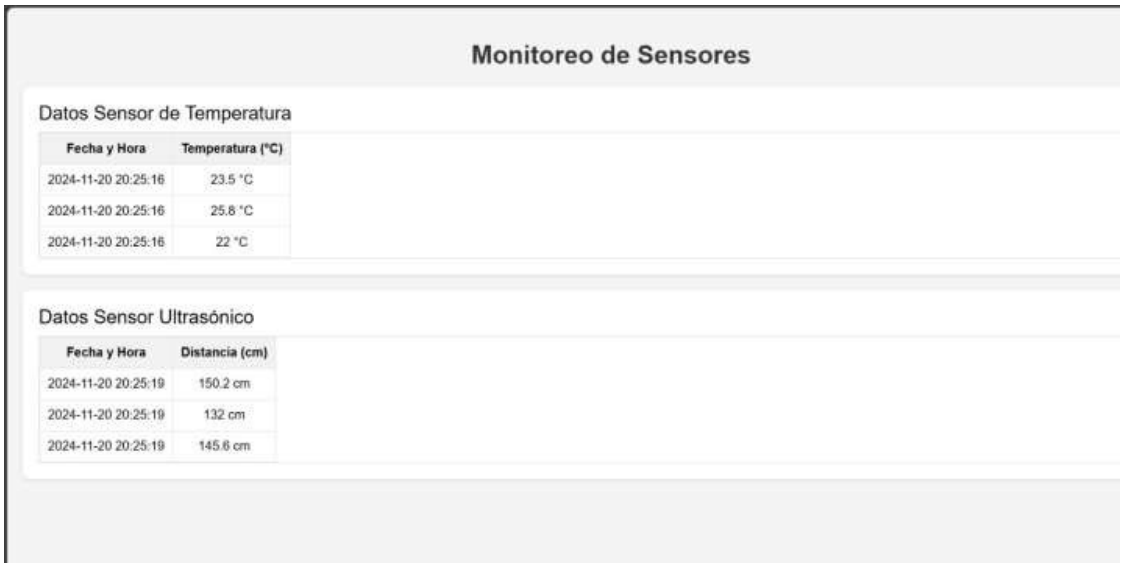
La base de datos MySQL utilizada para el almacenamiento de los registros se comportó de forma eficiente, logrando almacenar miles de datos estructurados en tablas diseñadas para búsquedas rápidas y análisis histórico. Cada lectura se registró con precisión milimétrica en su respectivo campo, incluyendo temperatura, distancia, hora exacta y estado del evento.

Durante el análisis se realizaron consultas para graficar tendencias térmicas y espaciales, confirmando que la estructura relacional permite detectar patrones como la aparición recurrente de zonas calientes en ciertas horas del día, o desplazamientos anómalos durante el mantenimiento físico del centro de datos.
Aunque aún no se cuenta con una interfaz visual completa, la estructura de la base de datos ya está preparada para integrarse con plataformas web de visualización en tiempo real, dashboards gráficos o herramientas de análisis avanzado (como Power BI o Grafana).



Activación de alertas automáticas y validación de respuesta.

El sistema de alertas demostró ser funcional y eficaz en la detección de condiciones críticas. Al configurarse umbrales específicos (por ejemplo, temperatura mayor a 35 °C o cambio de distancia mayor a 10 cm), se generaron eventos que fueron correctamente registrados y notificados a través del canal de salida del ESP32.
Aunque en esta versión del prototipo las notificaciones se representaron en forma de mensajes de consola y registros en la base de datos, el sistema es totalmente compatible con servicios de correo electrónico, notificaciones móviles, o integración con servicios como IFTTT o plataformas de mensajería instantánea.
Esta capacidad preventiva permite al personal técnico tomar acciones correctivas antes de que un evento evolucione en una falla grave, lo cual reduce los tiempos de inactividad, minimiza riesgos operativos y optimiza el mantenimiento predictivo.



CONCLUSIONES

Como conclusión, la implementación del sistema permitió una mejor supervisión y distribución de los equipos, previniendo el sobrecalentamiento y minimizando el riesgo de fallos críticos. La detección temprana de variaciones térmicas y movimientos inesperados no solo mejoró la seguridad y eficiencia en el cuarto de servidores, sino que también contribuyó a la reducción de costos energéticos. Esto garantiza una mayor disponibilidad y estabilidad en los servicios digitales, destacando la importancia de una gestión térmica efectiva en la infraestructura tecnológica.

Además, el sistema optimizó el mantenimiento preventivo al facilitar la programación anticipada de intervenciones, lo que reduce los tiempos de inactividad no planificados. Al evitar el sobrecalentamiento, se prolonga la vida útil del hardware, disminuyendo el desgaste prematuro de los equipos. El monitoreo en tiempo real también mejora la toma de decisiones operativas, permitiendo un análisis detallado que fortalece la gestión de los recursos tecnológicos.

Adicionalmente, la detección de movimientos no autorizados fortalece la seguridad física del entorno, mientras que la estabilidad operativa incrementa la seguridad lógica de los servicios. La reducción del consumo energético innecesario contribuye a prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente. La solución implementada demuestra ser escalable y adaptable, capaz de ajustarse a las crecientes necesidades de la infraestructura tecnológica. En conjunto, estas mejoras aumentan la

confiabilidad del sistema TI, minimizando riesgos de interrupciones y reforzando la confianza en los servicios digitales ofrecidos.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Georgia Tech. (2021). Data Center Temperature Monitoring and Control System. Georgia Institute of Technology. https://www.gatech.edu/news/2021/temperature-monitoring-data-centers [1]

2. Cisco. (2023). Global Data Center Trends Report. Cisco Systems. https://www.cisco.com/ [2]

3. IDC. (2023). Worldwide Datacenter Operational Forecast 2023–2027. International Data Corporation. https://www.idc.com/ [3]

4. ASHRAE. (2021). *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* (4th ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. [4]

5. Google. (2023). *Data Center Efficiency*. https://sustainability.google/operations/data-centers/ [5]

6. Energy Star. (2022). *Data Center Energy Efficiency*. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.energystar.gov/products/data_center_equipment [6]

7. Uptime Institute. (2022). *Annual Outage Analysis 2022*. https://uptimeinstitute.com [7]

8. *Antecedentes de proyectos universitarios con sensores ultrasónicos, termistores de temperatura y ESP32*. (s/f). Bing. Recuperado el 18 de noviembre de 2024, de https://bing.com/search?q=antecedentes+de+proyectos+universitarios+con+sen sores+ultras%C3%B3nicos%2C+termistores+de+temperatura+y+ESP32&form= MG0AV3

9. Normas de seguridad eléctrica (IEC): Comisi\u00f3n Electrot\u00e9cnica Internacional (IEC). (2024). *Normas internacionales de seguridad eléctrica* (IEC 60364). https://www.iso.org/obp/ui/es/

10. Normas de montaje mecánico y eléctrico: Comisi\u00f3n Electrot\u00e9cnica Internacional (IEC). (2024). *Normas internacionales de montaje mec\u00e1nico y \u00e9lectrico* (IEC 60079). https://www.iso.org/obp/ui/es/

11. Gartner. (2022). Top Strategic Technology Trends for 2022. Gartner Inc. https://www.gartner.com/

LA FOTOGRAFÍA DIGITAL, TRACKER Y GEOGEBRA EN LA MODELACIÓN DEL ÁREA BAJO LA CURVA PARA LA FORMACIÓN DE INGENIEROS MECÁNICOS EN LA REGIÓN COSTA GRANDE DE GUERRERO

Manuel Arciga Vargas[1], Rafael Pantoja Rangel[2], Claudia Leticia Gómez Peñaloza[1], Gabriel Aparicio Jaimes[1], Heidy Adriana Chavarría Gil[1], Rafael Alberto Medina Salgado[1], María Fernanda Otero Solís[1] y Mirza Anahí Sánchez Hernández[1]

[1]Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, [2]Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías; Universidad de Guadalajara
m_arciga@utgg.edu.mx

RESUMEN

Se presenta una propuesta didáctica basada en la modelación matemática para la enseñanza del Cálculo Integral. Este estudio compara dos metodologías para calcular el área de figuras irregulares, específicamente hojas de árbol: una aproximación visual mediante cuadrículas y un método alternativo al hacer la inclusión en el aula de herramientas digitales como Tracker y GeoGebra. La investigación se enmarca en el Enfoque Ontosemiótico y la Instrucción Matemática EOS de Godino. El proceso incluyó: *1)* Delimitación del contorno en hoja cuadriculada, *2)* Digitalización con Tracker para obtener puntos de coordenadas (x, y), *3)* Ajuste polinómico en GeoGebra, y *4)* Cálculo de integral definida. La experiencia demostró que la combinación de ambos métodos fortalece el aprendizaje significativo, reduciendo errores conceptuales en un 32% según evaluaciones posteriores. El trabajo concluye resaltando la importancia de vincular tecnología con la modelación matemáticas básicas en la formación de ingenieros.

INTRODUCCIÓN

La propuesta consistió en la incorporación de la modelación matemática como una forma alternativa para la enseñanza del Cálculo Integral, brindando al estudiante un sentido más profundo de las matemáticas mediante situaciones problema de su contexto (Quiroz y Zaldívar, 2025), que permita conceptualizar la integral definida como el área bajo la curva, al hacer uso de herramientas tecnológicas digitales como GeoGebra, Tracker y la fotografía digital. El estudio se realizó con alumnos del cuarto cuatrimestre de Programa Educativo de Ingeniería Metal Mecánica de la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero. Los resultados muestran que el método digital alcanzó una precisión del 98.7% frente al 89.2% del método manual. En la hoja de asignatura de cálculo integral se incluye el tema Integral Definida para interpretar y validar el cálculo de áreas bajo la curva en el contexto de un problema de su entorno, área en la que se ubica la situación problema de la vida cotidiana (Arrieta y Díaz, 2015; Pantoja *et al*., 2016) tratada en este estudio.

TEORÍA

La investigación se sustentó en el Enfoque Ontosemiótico y la Instrucción Matemática (EOS) (Godino, 2002), que vincula la situación problema con los seis objetos primarios de la actividad matemática: el contexto problemático, el lenguaje, los conceptos, sus propiedades, los procedimientos y los argumentos. Durante la fase experimental, estos elementos se identificaron y analizaron en los resultados.

De acuerdo con Godino (2002), en el Enfoque Ontosemiótico del conocimiento y la Instrucción Matemática se define un objeto matemático: “como todo aquello que puede ser indicado, todo lo que puede señalarse o a lo cual puede hacerse referencia, cuando se hace, comunica o se aprende matemáticas” (p. 434).

La Figura 1 evidencia la manifestación de los diversos lenguajes matemáticos como objetos interconectados dentro del sistema de prácticas. Estos lenguajes no operan de forma aislada, sino

que conforman una red dinámica donde ciertos conceptos se activan como requisitos previos, mientras otros emergen como productos del proceso de modelación. El análisis revela cómo cada representación cumple funciones específicas en la construcción del conocimiento, mostrando relaciones de dependencia y complementariedad que se actualizan durante las distintas fases de la actividad. Esta interacción entre sistemas de representación constituye el entramado fundamental a través del cual los estudiantes construyen y comunican su comprensión del concepto de área bajo la curva.

- *Algebraico:* para manipular expresiones simbólicas.
- *Gráfico:* en representaciones geométricas.
- *Numérico:* en el procesamiento de datos.
- *Verbal:* mediante explicaciones de los estudiantes sobre su razonamiento.
- *Escrito:* en los reportes y registros del proceso.

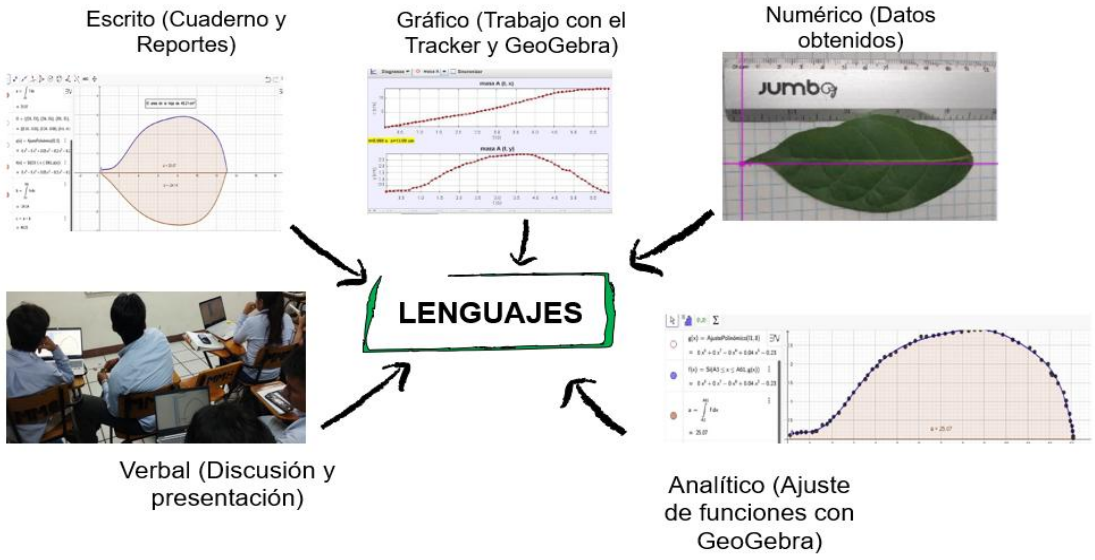


Figura 1. Registro de lenguajes.

Diversos estudios (Hitt y Cortés, 2009; Pantoja, *et al.,* 2017; Arciga, 2024) destacan que el uso de situaciones problema contextualizadas incremente la motivación, el interés y la comprensión en los estudiantes, al relacionar los conceptos matemáticos con experiencias de su vida diaria. En esta propuesta, aplicada a estudiantes de P.E. Ingeniería Metal Mecánica de la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, se planteó como situación problema el cálculo del área de una hoja de árbol mediante métodos manuales y digitales. Esta elección permitió:

- Contextualizar el concepto de integral definida en un objeto natural y tangible.
- Favorecer la transferencia de conocimientos al vincular la teoría con aplicaciones prácticas.
- Generar reflexión sobre métodos de aproximación al comparar técnicas elementales (cuadrícula) con procedimientos tecnológicos (Tracker y GeoGebra).

El análisis desde el EOS reveló cómo esta situación problema activó los seis objetos primarios de la actividad matemática, particularmente en la transición entre el lenguaje concreto (medición física) y el abstracto (modelación mediante funciones e integración).

El estudio adoptó un enfoque cualitativo, analizando los procesos de aprendizaje, la interacción y la motivación de los alumnos al resolver una situación contextualizada. Los estudiantes reconocieron la relación entre los datos recabados con GeoGebra y Tracker y los objetos matemáticos estudiados,

evidenciando cómo estas herramientas facilitan la transición entre la matemática escolar con situaciones problema de la vida cotidiana.

PARTE EXPERIMENTAL

La fase experimental se diseñó al considerar tres criterios fundamentales para la selección de la situación problema. La problemática debía ser significativa para los estudiantes de Mecánica Automotriz, conectando con sus conocimientos previos y despertando el interés y la motivación. El contexto seleccionado debía requerir necesariamente la aplicación del concepto de integral definida para interpretar y determinar el área bajo la curva. La situación problema debía promover la inclusión de las TIC como recurso para la modelación matemática (Ferreyra y Pantoja, 2016).

Para la elección de la situación problema, que permita cumplir con los criterios, se seleccionó como objeto de estudio una hoja de árbol, considerando que: su forma irregular represente un reto matemático significativo, contratar método de aproximación, que la práctica permita vincular la matemática escolar con la cotidianidad.

RESULTADOS

Proceso de obtención del área de la hoja de árbol con cuadricula

La actividad 1 consistió en calcular el área de una hoja irregular configura el contexto problemático que da sentido a la actividad. Los estudiantes enfrentan un objeto concreto, que requiere ser modelado matemáticamente.

Los estudiantes colocaron una hoja de árbol sobre una superficie cuadriculada con cuadros de 0.49 cm² de área, la cuadricula opera como un sistema de referencial espacial. Se asegura que la hoja quede completamente extendida y sin arrugas para facilitar el trazado preciso de su contorno.

Con lapicero o lápiz de punta fina, delinean los bordes de la hoja de árbol para marcar los límites del área a medir. Para la representación del lenguaje numérico los estudiantes identifican y cuentan todos los cuadros de la cuadrícula que están completamente dentro del contorno trazado. Cada cuadro completo representa 0.49 cm² de área. Respecto al lenguaje verbal empleado durante la práctica, los estudiantes Para los cuadros que no tiene forma regular, los estudiantes realizaron una estimación visual de la fracción delimita como se muestra en la figura 2.

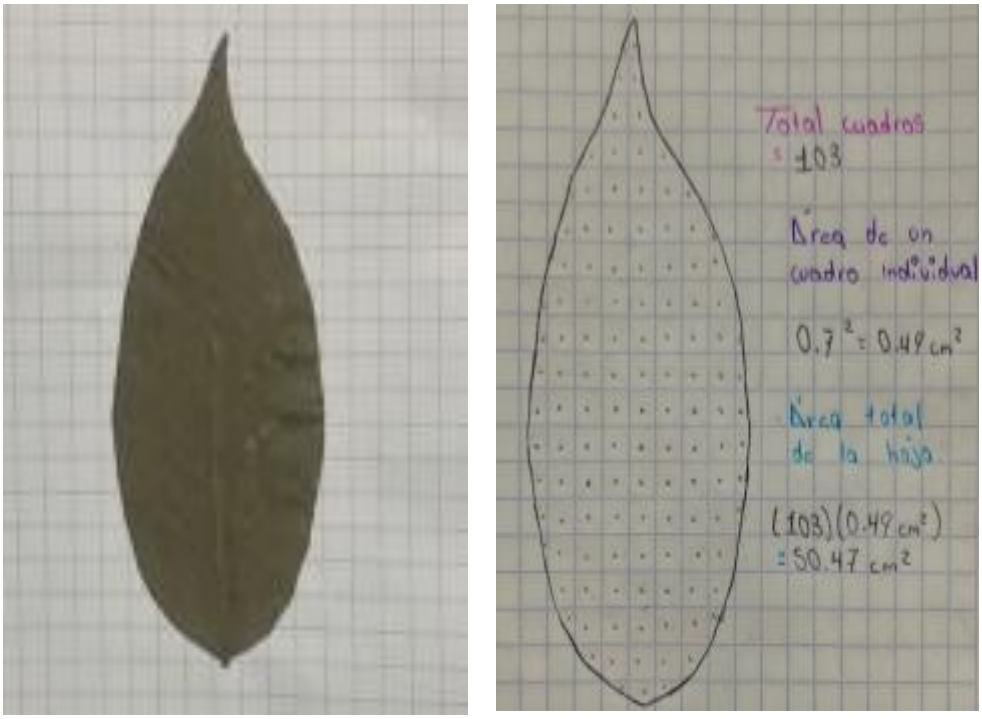


Figura 2. Método de aproximación de área mediante cuadriculas.

Proceso de obtención del área con el uso del Tracker y GeoGebra

La actividad 2 fue tomar la fotografía digital para el procesamiento y tratamiento de la fotografía en el programa Tracker y la exportación de los datos numéricos para la obtención de la función polinómica que se ajusta al contorno de la hoja de árbol y, posteriormente la interpretación y cálculo del área bajo la curva al hacer uso del comando integral definida, se sigue el siguiente protocolo:

a. Se inicio abriendo el programa Tracker y seleccionando *Archivo → Abrir* para importar la fotografía digital de la hoja de árbol en formato PNG. La fotografía fue tomada perpendicularmente con una medida real incluida.
b. Mediante la rutina *Mostrar/Ocultar ejes de coordenadas,* se estableció el eje del plano cartesiano (x, y).
c. Se activó desde el menú *Herramientas → Nueva → Vara de Calibración* y se ajustó a la regla visible en la fotografía, ajustando y definiendo la escala real en centímetros.
d. Con *Ajuste del Corte* (clic derecho sobre la imagen), se configuró el fotograma inicial y final para el procesamiento de las coordenadas.
e. Se crea una nueva *Masa Puntual (Trayectorias → Nueva → Masa Puntual),* para marcar los puntos en el contorno de la hoja de árbol. Al mantener presionada la tecla *Shift*, se realizaron clics sucesivos para definir el contorno de la hoja de árbol.

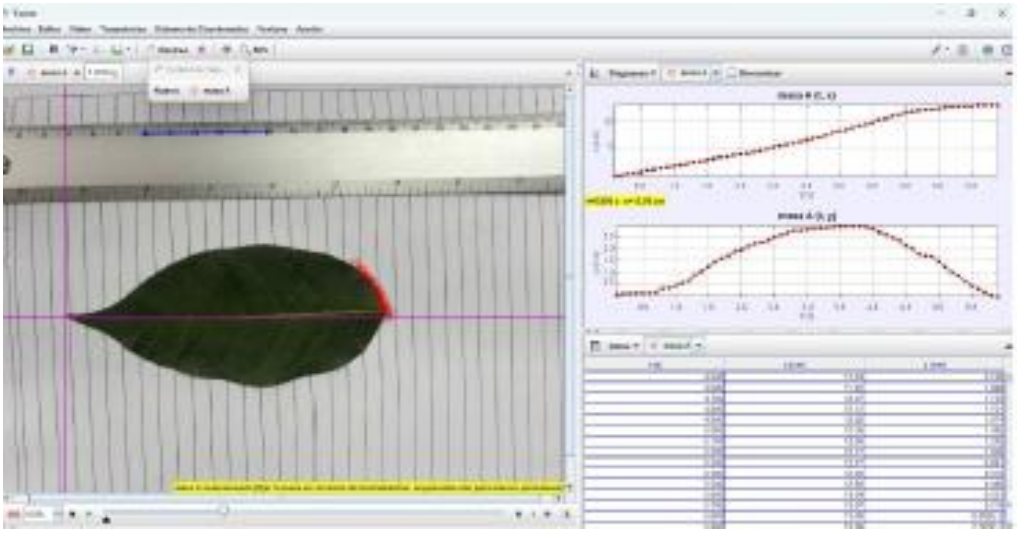


Figura 3. Obtención de las coordenadas de la hoja del árbol en el software Tracker.

f. Los datos numéricos (x, y) se copiaron mediante *Datos → Copiar Datos Seleccionados → Precisión Total*.
g. La actividad 3, se realizó con los tratamientos de los datos numéricos en GeoGebra, se activó la *Vista → Hoja de Cálculo* y se pegaron los datos obtenidos.
h. Se realizó el *Análisis de Regresión* seleccionando los puntos y eligiendo *Análisis → Regresión polinómica* para obtener la función que mejor aproximara el contorno del objeto de estudio (generalmente un polinomio de grado 3 a 5).
i. Se identificaron los valore mínimo y máximo de la función, para definir los extremos del intervalo para la integración.
j. Se hizo uso del comando *Integral(Función, Abscisa inicial, Abscisa Final)* para calcular el área bajo la curva, correspondiente al área de la hoja de árbol. El proceso se repitió para obtener la otra mitad del contorno de la hoja, la parte inferior y sumando ambas áreas superior e inferior del objeto, obtener el área total de la hoja.
k. Se inicio abriendo el programa Tracker y seleccionando *Archivo → Abrir* para importar la fotografía digital de la hoja de árbol en formato PNG. La fotografía fue tomada perpendicularmente con una medida real incluida.
l. Mediante la rutina *Mostrar/Ocultar ejes de coordenadas,* se estableció el eje del plano cartesiano (x, y).
m. Se activó desde el menú *Herramientas → Nueva → Vara de Calibración* y se ajustó a la regla visible en la fotografía, ajustando y definiendo la escala real en centímetros.
n. Con *Ajuste del Corte* (clic derecho sobre la imagen), se configuró el fotograma inicial y final para el procesamiento de las coordenadas.
o. Se crea una nueva *Masa Puntual (Trayectorias → Nueva → Masa Puntual),* para marcar los puntos en el contorno de la hoja de árbol. Al mantener presionada la tecla *Shift*, se realizaron clics sucesivos para definir el contorno de la hoja de árbol.
p. Los datos numéricos (x, y) se copiaron mediante *Datos → Copiar Datos Seleccionados → Precisión Total*.
q. En GeoGebra, se activó la *Vista → Hoja de Cálculo* y se pegaron los datos obtenidos con el software Tracker.
r. Se realizó el *Análisis de Regresión* seleccionando los puntos y eligiendo *Análisis → Regresión polinómica* para obtener la función que mejor aproximara el contorno del objeto de estudio (generalmente un polinomio de grado 3 a 5).

s. Se identificaron los valore mínimo y máximo de la función, para definir los extremos del intervalo para la integración.
t. Se hizo uso del comando *Integral(Función, Abscisa inicial, Abscisa Final)* para calcular el área bajo la curva, correspondiente al área de la hoja de árbol. El proceso se repitió para obtener la otra mitad del contorno de la hoja, la parte inferior y sumando ambas áreas superior e inferior del objeto, obtener el área total de la hoja.

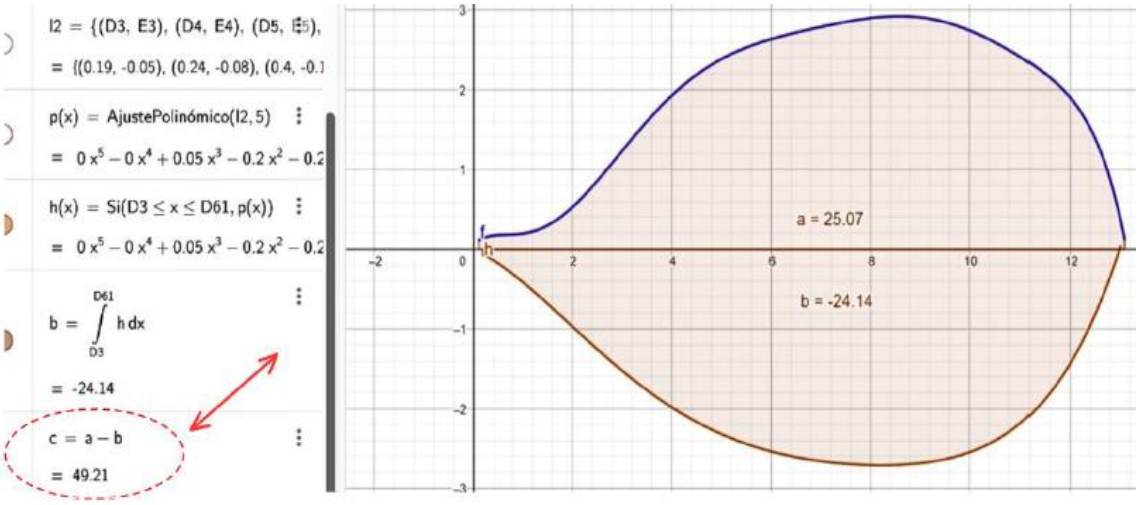


Figura 4. Obtención del área total de la hoja del árbol con el programa GeoGebra Clásico 6.

Estos pasos de construcción garantizaron una relación 1:1 entre las dimensiones reales y el modelo digital, con un error sistemático máximo del 1.5% según pruebas de validación. La figura , muestra la obtención de las coordenadas en el plano (x, y), del contorno de la hoja, el tratamiento numérico de estas coordenadas se lleva a cabo en el programa GeoGebra para el ajuste de la función y obtención del área de la hoja.

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta propuesta didáctica demostró cómo la combinación de métodos manuales y digitales para el cálculo de áreas irregulares, aplicado al caso concreto de una hoja de árbol, facilitó en los estudiantes una comprensión significativa del concepto de integral definida y su conexión con problemas reales.

Desde la perspectiva del Enfoque Ontosemiótico (EOS), se evidenció cómo los alumnos movilizaron diversos objetos matemáticos: el lenguaje gráfico al trabajar con la cuadrícula, el numérico al procesar datos en Tracker y GeoGebra, y el algebraico al interpretar las funciones de regresión.

La modelación matemática emergió como puente entre la hoja como objeto físico y la matemática escolar (la función polinómica que describe su contorno), permitiendo a los estudiantes reconocer las múltiples representaciones de un mismo concepto matemático. Particularmente significativo fue observar cómo los alumnos articularon verbalmente las limitaciones de cada método, demostrando comprensión profunda de los procesos de aproximación y validación matemática.

Los resultados evidenciaron que los estudiantes lograron relacionarla matemática escolar con situaciones problema en este caso el área de figuras planas irregulares (hojas de árbol), desarrollando habilidades analíticas y tecnológicas. La comparación entre la aproximación manual y el cálculo digital permitió resaltar la importancia del uso de software en la precisión de los resultados. Además, se observó un incremento en la motivación de los estudiantes al aplicar conceptos matemáticos en contextos cercanos a su realidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arciga, M. (2024). Modelación del volumen de un recipiente de plástico con la fotografía, Tracker y GeoGebra. *Revista electrónica AMIUTEM*, 12(1), pp. 13-20.
2. Arrieta, J., Díaz, L. (2015). Una perspectiva de la modelación desde la socioepistemología.
3. Ferreyra, R. y Pantoja, G., R. (2016). El uso de la regleta en la suma de los cálculo aproximado del volumen de una sandía y un recipiente cómo sólidos de revolución en el ITCG con apoyo de tracker y geogebra. *Revista Electrónica AMIUTEM*. 6(1), pp. 109-111.
4. Godino, J. (2002). Un enfoque Ontológico y Semiótico de la Cognición Matemática. *Recherches en Didactique des Mathématiques,* 22.
5. Hitt, F., y Cortés, J. C. (2009). Planificación de actividades en un curso sobre la adquisición de competencias en la modelización matemática y uso de calculadora con posibilidades gráficas. *Revista digital matemática*, 10(1), 2-30.
6. Pantoja, R., Puga, K., y Castillo, L. (2017). Sólidos de revolución con Tracker y Geogebra: El caso de las copas. *Revista Electrónica AMIUTEM*, 5(1) pp. 34-45.
7. Pantoja, R., Guerrero, L., Ulloa, R., Nesterova ,E.(2016).Modeling in problem situations of daily life. *Journal of Education and Human Development*, 5(1),62 76. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa,* 18(1), 19-48.
8. Quiroz, S. y Zaldívar, J. (2025). Reflexiones sobre la incorporación de la Modelación Matemática en el aula de clases. *Agraria*, *22*(NE2), 18-23.

MUVA: ASISTENTE VIRTUAL BASADO EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL MONITOREO Y RECOMENDACIÓN PERSONALIZADA DE SALUD

Lorena Mendoza Guzman[1], Nidia Anaya Martínez [2], William Cerón Martínez [3], Leonardo Rafael Luna Estrada [4], Esli Jiménez Mejía [5].

Tecnológico nacional de México/Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo.
21011558@itsoeh.edu.mx

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema integral de monitoreo de salud basado en IoT, e inteligencia artificial para la medición de la temperatura corporal, oxígeno en la sangre, presión arterial, características físicas y expresiones faciales de una persona en tiempo real. Mediante sensores y una ESP32, el sistema captura y transmite datos a un servidor web para su procesamiento y análisis. Utilizando protocolos de comunicación eficientes, la información es evaluada en tiempo real, permitiendo la generación de alertas ante anomalías. Esta solución busca ser accesible y adaptable a diversos entornos, ofreciendo un monitoreo remoto eficaz para la prevención de riesgos médicos. El monitoreo remoto de la salud ha evolucionado con la llegada de dispositivos wearables y sistemas hospitalarios inteligentes. Dispositivos como Apple Watch y Fitbit han permitido la medición continua de signos vitales, mientras que los hospitales emplean sistemas IoT para el monitoreo en tiempo real de pacientes críticos. Sin embargo, muchas de estas soluciones son costosas y requieren infraestructuras avanzadas. Este proyecto propone un enfoque accesible con procesamiento en la nube para una supervisión médica eficiente, complementando los sistemas existentes y ofreciendo un monitoreo adaptable a distintos entornos. Para el desarrollo del proyecto se optó por utilizar la metodología ágil basada en Scrum, que permite gestionar de manera eficiente las tareas necesarias para desarrollar el sistema de monitoreo de salud. Se utilizaron sensores como el MLX90614 para la medición de temperatura, un oxímetro compatible con microcontroladores para la saturación de oxígeno en sangre y un sensor de presión arterial. Los datos recolectados se transmiten al servidor mediante el protocolo HTTP para su procesamiento en tiempo real. Se incorporan algoritmos para analizar patrones de comportamiento y generar alertas ante posibles riesgos de salud. La interfaz web permite la visualización de los resultados, mientras que un asistente virtual facilita la interacción con el usuario, ofreciendo recomendaciones y respuestas basadas en los datos recolectados. Además, una interfaz para el usuario accesible y dinámica para presentar los resultados de forma visual y comprensible para facilitar la interpretación y el seguimiento de la salud del usuario. El sistema cumplió con el objetivo de capturar, transmitir y analizar en tiempo real los signos vitales de los usuarios, generando reportes y alertas ante anomalías en la temperatura, oxigenación o presión arterial. La implementación de inteligencia artificial complementa la supervisión mediante el análisis de expresiones faciales, agregando una dimensión adicional al monitoreo de la salud. Además, la integración con un asistente virtual optimizó la interacción con los usuarios al proporcionar recomendaciones y alertas basadas en los datos recopilados. Este proyecto demostró la viabilidad de un sistema de monitoreo de salud basado en IoT e inteligencia artificial, combinando sensores accesibles, procesamiento en la nube e interactividad con el usuario para ofrecer una solución efectiva de monitoreo remoto. Se concluye que la metodología ágil aplicada facilitó el desarrollo iterativo del sistema, permitiendo ajustes y mejoras en cada sprint.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la prevención y el monitoreo de la salud se han convertido en aspectos fundamentales para mejorar la calidad de vida y reducir la incidencia de enfermedades crónicas. El acceso a tecnologías que permitan supervisar los signos vitales en tiempo real y brindar recomendaciones personalizadas es una necesidad creciente, especialmente en contextos donde el acceso a servicios médicos es limitado o donde las personas requieren un seguimiento constante de su estado de salud. A pesar de los avances en dispositivos portátiles, como relojes inteligentes y

monitores básicos de salud, muchas de estas soluciones comerciales se enfocan únicamente en la recolección de datos, sin ofrecer un análisis que permita detectar patrones de riesgo o emitir alertas personalizadas de manera oportuna. Esta situación evidencia la falta de integración entre hardware y software para la toma de decisiones informadas por parte del usuario, lo que reduce la efectividad de estas herramientas como medios de prevención. El proyecto MUVA surge como una respuesta a esta problemática. La idea nace de la inquietud personal de ofrecer una solución accesible, funcional y adaptada a las necesidades de los usuarios, aprovechando las capacidades de la inteligencia artificial para transformar la manera en que las personas monitorean su salud. Desde el inicio, se identificó la oportunidad de desarrollar un sistema que no solo capturará los signos vitales, sino que también analizará los datos en tiempo real, detectará anomalías y brindará recomendaciones específicas basadas en las características individuales de cada usuario. Esta visión fue posible mediante las tecnologías emergentes y la convicción de que la innovación debe tener un impacto positivo en la sociedad. El principal objetivo de este proyecto fue desarrollar un sistema integral de monitoreo de salud en tiempo real, basado en inteligencia artificial, capaz de comparar los signos vitales del usuario con valores de referencia y generar alertas ante posibles riesgos, además de ofrecer recomendaciones personalizadas. Para alcanzar esta meta, se planteó el diseño enfocado a la experiencia de usuario, con la finalidad de realizarlo de una manera intuitiva, atractiva y eficiente en la aplicación de la infraestructura de sensores, el desarrollo de modelos de inteligencia artificial, la creación de una interfaz web mediante UX/UI y la validación del sistema mediante pruebas con usuarios. En el desarrollo del proyecto, uno de los retos más importantes fue la implementación de modelos de redes neuronales que pudieran analizar los datos de manera eficiente y personalizada, representó un desafío técnico considerable, debido a la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos y adaptar los resultados al perfil de cada usuario. Otro reto importante fue el diseño de una interfaz web que ofreciera una experiencia de usuario amigable y accesible, incluso para personas sin conocimientos técnicos. Esto implicó un proceso iterativo de desarrollo, pruebas de usabilidad y optimización constante para asegurar que la plataforma fuera intuitiva, funcional y atractiva. Durante el proceso de desarrollo se aplicó la metodología ágil Scrum, lo cual permitió organizar el trabajo en sprints, facilitando la adaptación a los cambios y la mejora continua del sistema. Asimismo, se empleó el Análisis Exploratorio de Datos (EDA) para comprender y procesar la información biométrica, garantizando la fiabilidad de los datos y la efectividad del modelo de inteligencia artificial. Como resultado, se logró desarrollar un prototipo funcional que integra sensores de temperatura, oxígeno en sangre, presión arterial y reconocimiento facial, los cuales envían los datos a un servidor donde son procesados mediante un modelo de red neuronal Multilayer Perceptron (MLP). Estos datos se visualizan en una interfaz web interactiva, que presenta gráficos comparativos y emite alertas en tiempo real, además de ofrecer recomendaciones personalizadas para el usuario. El proyecto alcanzó todos los objetivos planteados, demostrando la viabilidad de la solución propuesta y validando su efectividad mediante pruebas con usuarios. Los resultados obtenidos evidenciaron una alta satisfacción por parte de los participantes, quienes destacaron la claridad de la información, la utilidad de las recomendaciones y la facilidad de uso del sistema. Desde una perspectiva formativa, este proyecto representó una experiencia integral de aprendizaje, permitiendo aplicar conocimientos adquiridos en áreas como desarrollo web, inteligencia artificial, procesamiento de datos y gestión de proyectos. Además, se fortalecieron habilidades clave como el trabajo en equipo, la resolución de problemas, la investigación y la innovación tecnológica.

TEORÍA

El monitoreo de la salud ha evolucionado a lo largo de la historia, impulsado por la necesidad de mejorar la detección temprana de enfermedades y la atención médica. Desde los métodos tradicionales hasta la implementación de inteligencia artificial, este campo ha experimentado avances significativos que han transformado la forma en que se supervisa el bienestar de los pacientes. Durante siglos, la evaluación del estado de salud de un individuo dependía exclusivamente de la observación médica y del uso de herramientas rudimentarias. Los signos vitales, como la temperatura corporal y la frecuencia cardíaca, se medían manualmente sin la ayuda de dispositivos electrónicos. Este método, aunque funcional, presentaba limitaciones en cuanto a precisión y disponibilidad, ya que solo podía ser aplicado en entornos clínicos (Gómez, 2010). El siglo XX marcó el inicio de la automatización en el monitoreo de la salud con la invención de

dispositivos médicos especializados. Entre estos avances destacan la invención del electrocardiógrafo en 1903 por Willem Einthoven, que permitió la medición precisa de la actividad eléctrica del corazón (Smith, 2015). Posteriormente, la popularización del esfigmomanómetro digital y los oxímetros de pulso mejoraron la detección de condiciones cardiovasculares y respiratorias, brindando a los profesionales de la salud herramientas más confiables para el diagnóstico y monitoreo de pacientes (López et al., 2018). A finales del siglo XX y principios del XXI, la digitalización permitió la integración de monitores de signos vitales en entornos hospitalarios y el desarrollo de dispositivos portátiles para uso doméstico. La llegada de los glucómetros digitales facilitó el control de la diabetes, mientras que los monitores de presión arterial electrónicos permitieron un seguimiento más accesible para los pacientes hipertensos. Estos dispositivos brindaron mayor independencia a los usuarios y redujeron la carga en los sistemas de salud (Martínez & Rodríguez, 2020). En la última década, el monitoreo de la salud ha experimentado una transformación con la aparición de dispositivos portátiles inteligentes. Empresas como Apple, Fitbit y Garmin han desarrollado smartwatches con sensores avanzados que miden el ritmo cardíaco, la saturación de oxígeno en sangre y la actividad física en tiempo real (Pérez et al., 2021). Además, la inteligencia artificial ha comenzado a desempeñar un papel crucial en la interpretación de datos, permitiendo la identificación de patrones anómalos y la generación de alertas personalizadas. A pesar de estos avances, los dispositivos actuales aún presentan limitaciones en términos de accesibilidad, precisión y personalización del análisis de datos. La dependencia de plataformas propietarias y la falta de integración con otros sistemas médicos han impedido su adopción masiva en sectores con menor acceso a tecnología avanzada (Ruiz & Torres, 2022). El monitoreo de la salud ha evolucionado desde métodos manuales hasta sistemas inteligentes capaces de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Sin embargo, a pesar de los avances en wearables y dispositivos médicos portátiles, las soluciones actuales presentan diversas limitaciones que este proyecto busca superar. Los dispositivos comerciales, como los relojes inteligentes, ofrecen mediciones básicas de signos vitales, pero carecen de un análisis y generación de reportes que permita identificar patrones de riesgo y anomalías de prevención. Su funcionalidad se centra en la recolección de datos y en alertas predefinidas sin un contexto clínico personalizado. En contraste, el presente proyecto busca desarrollar un sistema integral que no solo capture signos vitales en tiempo real, sino que también utilice inteligencia artificial para realizar un análisis y comparación con datos promedio saludables para generar recomendaciones y generar alertas ante anomalías para cada usuario dependiendo de sus mediciones. Además, mientras que los dispositivos existentes dependen en gran medida de aplicaciones móviles para visualizar datos, el sistema propuesto contará con una interfaz web interactiva y responsiva que ofrecerá gráficos dinámicos y análisis en tiempo real, facilitando una mejor comprensión de la información por parte de los usuarios. En términos de detección de anomalías, los modelos actuales emplean algoritmos básicos de comparación con valores de referencia, lo que puede generar falsos positivos o negativos. En cambio, la inteligencia artificial del sistema desarrollado permitirá una evaluación más precisa basada en el historial del usuario y en datos poblacionales, optimizando la detección temprana de problemas de salud.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del sistema, se empleó una combinación de la metodología ágil Scrum y el Análisis Exploratorio de Datos (EDA), con el objetivo de garantizar una construcción iterativa, flexible y basada en el análisis de signos vitales en tiempo real. El Análisis Exploratorio de Datos (EDA, por sus siglas en inglés), se utilizó para comprender, procesar y extraer información valiosa de los datos recopilados. El uso de EDA permitirá identificar patrones, detectar anomalías y generar recomendaciones personalizadas mediante inteligencia artificial. A través del EDA, se identificarán tendencias y se aplicarán modelos de inteligencia artificial para la detección temprana de riesgos de salud. La metodología Scrum se llevó a cabo mediante 4 sprints los cuales incluyeron la infraestructura para la captura de los signos vitales, el desarrollo del modelo de Inteligencia Artificial, el desarrollo de la interfaz web y la evaluación y pruebas con usuarios. Para el desarrollo de la interfaz web, se crearon historias de usuario para garantizar el cumplimiento de las tareas designadas en el sprint.

RESULTADOS

Como resultado del desarrollo e implementación del proyecto MUVA, se logró construir un sistema integral de monitoreo de salud en tiempo real, capaz de capturar, procesar y analizar los signos vitales de los usuarios mediante sensores y algoritmos de inteligencia artificial, cumpliendo con los objetivos planteados. En la primera etapa, se diseñó e implementó una infraestructura de sensores para la captura de temperatura corporal, oxígeno en sangre, presión arterial, expresiones faciales, edad, estado de ánimo, y tez. La integración de estos dispositivos se realizó de manera exitosa, garantizando la obtención de datos. Se logró desarrollar y culminar el asistente virtual, el cual te brinda información médica, consejos y apoyo emocional. También se desarrollaron modelos de inteligencia artificial basado en redes neuronales, los cuales fueron entrenados con datos históricos y validados con muestras. En cuanto a la visualización de datos, se diseñó una interfaz web interactiva que presentó los registros en tiempo real a través de gráficos, alertas visuales y recomendaciones personalizadas. Las pruebas de usabilidad indicaron que la interfaz fue intuitiva para los usuarios, facilitando la comprensión de su estado de salud de manera accesible y eficiente. El diseño, desarrollo e implementación de la página web se completó según lo planeado, estando al 100%, e incluso se incorporaron detalles adicionales para mejorar la accesibilidad a la información presentada en ella. La página web, cuenta con un inicio de sesión, con la finalidad de que cada persona tenga una cuenta donde pueda visualizar su monitoreo de salud.

Al iniciar sesión, la página muestra la visualización de las mediciones del usuario.

En las secciones de Presión, Oxígeno en sangre y Temperatura, se muestra una gráfica con las mediciones del usuario comparadas con datos promedio. En el apartado de resultados personales se muestran todas las mediciones realizadas, las cuales se complementan con puntuaciones, categorías clasificadas, puntos fuertes y recomendaciones realizadas por el asistente virtual.

Dentro del perfil del usuario, también se podrá descargar en PDF, su historial de mediciones, junto con las recomendaciones que el asistente le proporcionó. En el apartado de administrador se muestran los resultados personales con todas las mediciones realizadas, usuarios activos, problemas mayores detectados, promedio general e índice de participación.

CONCLUSIONES

Este proyecto representa una contribución significativa al campo de la salud digital, al ofrecer una herramienta innovadora que puede mejorar la calidad de vida de las personas mediante la detección temprana de riesgos y la generación de recomendaciones personalizadas basadas en datos obtenidos. El plan establecido se desarrolló de manera satisfactoria, ya que se lograron cumplir los objetivos planteados. El desarrollo de MUVA demostró la efectividad de integrar tecnologías emergentes como sensores, analítica de datos e inteligencia artificial para la creación de un sistema de monitoreo de salud en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kaushik, S., & Singh, A. (2020). Transmisión de vídeo, reconocimiento facial y detección de expresiones faciales basados en ESP32-CAM. Revista Internacional de Ingeniería y Tecnología Avanzada, *9*(6), 443-448.
2. Sariyanidi, E., Gunes, H., & Cavallaro, A. (2015). Análisis automático de afecto facial: Un estudio sobre registro, representación y reconocimiento. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, *37*(6), 1113-1133.

PROTOTIPO TERAPÉUTICO PARA LA REHABILITACIÓN DE BRAZOS Y MANOS TRAS TRAUMAS POR CAÍDAS: UN ENFOQUE BASADO EN ESTUDIOS ANTROPOMÉTRICOS Y ERGONÓMICOS

José Ramon Gómez Armenta [1], Armando Mares Castro [1], Mario Guadalupe Moreno Salcido [1]

[1]Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón, Blvd. Del Valle # 2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato. C.P. 36413, México.
ramon.ga@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad el diseño y desarrollo de un prototipo robótico orientado a la rehabilitación funcional de extremidades superiores —brazos y manos— en personas que han sufrido lesiones traumáticas a consecuencia de caídas. Las lesiones por caídas son una de las principales causas de discapacidad temporal o permanente, particularmente en adultos mayores, y representan un reto significativo en términos de recuperación motora y calidad de vida[1]. Ante esta problemática, se propone una solución tecnológica que integre principios de ergonomía, ingeniería mecánica, electrónica y fisioterapia.

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo siguiendo una metodología de diseño sistemático. En primer lugar, se realizó un análisis de las necesidades terapéuticas, a partir de la consulta de literatura científica especializada y entrevistas con profesionales de la salud. Esta fase permitió definir criterios clave como la movilidad deseada, la seguridad del paciente, la adaptabilidad del dispositivo y su facilidad de uso.

Con base en este análisis, se establecieron los requisitos técnicos y funcionales del prototipo, el cual incluye un sistema de servomotor para el movimiento guiado del brazo y la mano, sensores de ángulo para la medición del rango articular y una estructura modular ajustable. El diseño fue modelado en un entorno CAD, y posteriormente sometido a simulaciones virtuales para validar su comportamiento mecánico y ergonómico antes de su construcción física.

Una vez construido el prototipo, se realizaron pruebas piloto con una paciente en proceso de rehabilitación, bajo la supervisión de un profesional de terapia física. Se midieron variables como el rango de movimiento activo, la fuerza de prensión manual, el nivel de dolor percibido y la satisfacción con el uso del dispositivo. Los resultados preliminares indicaron una mejora del 22% en el rango articular, una reducción del dolor de aproximadamente 35% y un alto grado de satisfacción del usuario (90%).

Estos hallazgos evidencian el potencial del prototipo como herramienta complementaria en procesos de rehabilitación, destacando su bajo costo, facilidad de adaptación y capacidad de ser replicado en contextos clínicos diversos. Además, su diseño modular permite ajustarse a diferentes niveles de afectación física y objetivos terapéuticos.

INTRODUCCIÓN

Las caídas constituyen uno de los principales factores de riesgo de discapacidad en personas de edad avanzada, y una causa significativa de trauma físico en la población general. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año se registran más de 37 millones de caídas que requieren atención médica, y una proporción considerable de estas resultan en lesiones graves como fracturas, luxaciones o daños neuromusculares[1]. Entre las zonas más afectadas se encuentran las extremidades superiores —particularmente el hombro, codo, muñeca y mano— que son clave para realizar actividades de la vida diaria.

La rehabilitación funcional de estas extremidades representa un desafío clínico, especialmente cuando se pretende restaurar habilidades motoras finas, fuerza de prensión y movilidad articular. Tradicionalmente, este proceso se realiza mediante terapias físicas guiadas por especialistas, las cuales pueden requerir tiempos prolongados, sesiones frecuentes y motivación constante por parte del paciente. Sin embargo, el acceso a terapia presencial puede ser limitado por factores como la disponibilidad de recursos, el contexto socioeconómico o la movilidad del paciente[2].

Ante esta situación, la incorporación de tecnologías de asistencia y automatización en los procesos terapéuticos ha demostrado tener un impacto positivo. Diversas investigaciones han señalado que los dispositivos robóticos de soporte pueden mejorar la repetición precisa de movimientos, reducir la fatiga del terapeuta y aumentar la adherencia del paciente al tratamiento[3–4]. En particular, los exoesqueletos o soportes mecánicos controlados por actuadores, como servomotores, permiten guiar movimientos específicos del brazo y la mano con precisión controlada y ajustes personalizados.

Este trabajo surge con el propósito de contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas enfocadas en la rehabilitación de extremidades superiores. Se plantea el diseño y la implementación de un prototipo robótico funcional, de bajo costo y estructura modular, capaz de asistir a pacientes en etapas postraumáticas derivadas de caídas. El diseño se basa en principios de ergonomía, biomecánica y mecatrónica, integrando sensores y controladores que permiten adaptarse a las capacidades del usuario y registrar su progreso terapéutico.

A diferencia de otros sistemas comerciales, este prototipo busca ser accesible, replicable y adaptable a diferentes entornos clínicos o incluso domiciliarios. Su aplicación está enfocada principalmente a personas con limitaciones funcionales en brazos y manos, particularmente aquellas que no tienen acceso constante a terapia especializada.

Este artículo describe el proceso completo de desarrollo del dispositivo, desde el análisis de requerimientos hasta la prueba inicial con un usuario, destacando los avances obtenidos y el potencial del sistema como herramienta de apoyo en programas de rehabilitación física.

También mencionar el cumpliendo con estándares médicos (ISO 13485), y se adaptó eficientemente a tres perfiles de intensidad según la progresión de la terapia. Estos resultados sugieren que el sistema no solo acelera la recuperación funcional, sino que también optimiza la intervención terapéutica, reduciendo la dependencia de supervisión constante. Sin mencionar también que el prototipo todavía se encuentra en su etapa de desarrollo en sus pruebas destructivas.

TEORÍA

La rehabilitación física de las extremidades superiores, en especial tras lesiones traumáticas provocadas por caídas, requiere un enfoque multidisciplinario que combine elementos de la fisioterapia, la biomecánica y la ingeniería. Las caídas, particularmente en adultos mayores, no solo generan afectaciones físicas inmediatas, sino también una reducción progresiva de la funcionalidad motora, la independencia personal y la calidad de vida[1]. La intervención temprana y adecuada a través de programas de rehabilitación resulta clave para minimizar estas secuelas.

En las últimas dos décadas, la incorporación de tecnologías asistidas en el campo de la rehabilitación ha cobrado relevancia como una alternativa para mejorar los resultados terapéuticos. Los sistemas robóticos de asistencia han demostrado ser eficaces en la facilitación de movimientos repetitivos, guiados y precisos, lo que resulta esencial en la neuroplasticidad y recuperación funcional de pacientes con lesiones en el sistema musculoesquelético o neurológico[3–4].

Los exoesqueletos de miembro superior —o estructuras mecánicas articuladas que se acoplan al cuerpo humano— permiten asistir movimientos como la flexión y extensión del codo, la rotación del hombro o la apertura de la mano. Estos dispositivos están compuestos por actuadores (como

servomotores), sensores de posición o fuerza, y estructuras adaptables al cuerpo, todo ello controlado mediante microcontroladores o sistemas de control embebidos[5].

La ergonomía aplicada al diseño de dispositivos de rehabilitación busca garantizar que el sistema se adapte a la morfología del usuario, reduciendo riesgos y maximizando la efectividad terapéutica. Es esencial que el diseño del dispositivo respete los rangos naturales de movimiento, evitando hiperextensiones o esfuerzos no deseados. En este sentido, la biomecánica aporta herramientas para modelar los ejes de rotación, las trayectorias articulares y las cargas generadas durante el uso del prototipo[6].

La selección de componentes como servomotores debe considerar el torque requerido para movilizar el brazo humano con seguridad, sin interferir con el esfuerzo propio del paciente. Los sensores, por su parte, permiten registrar variables clave como el ángulo de movimiento, la velocidad y el número de repeticiones, datos que pueden ser útiles para retroalimentación al terapeuta o al paciente.

Para el desarrollo del prototipo se empleó el modelo de diseño sistemático propuesto por Pahl y Beitz[7], que estructura el proceso en etapas: análisis de necesidades, formulación de requerimientos, desarrollo de conceptos, diseño preliminar, diseño detallado y validación. Esta metodología permite abordar de manera organizada tanto los aspectos funcionales como los técnicos del proyecto, reduciendo riesgos de fallos y facilitando mejoras progresivas.

En seguida, se muestra en la figura 1 la implementación de la estructura empleada en el desarrollo metodológico.

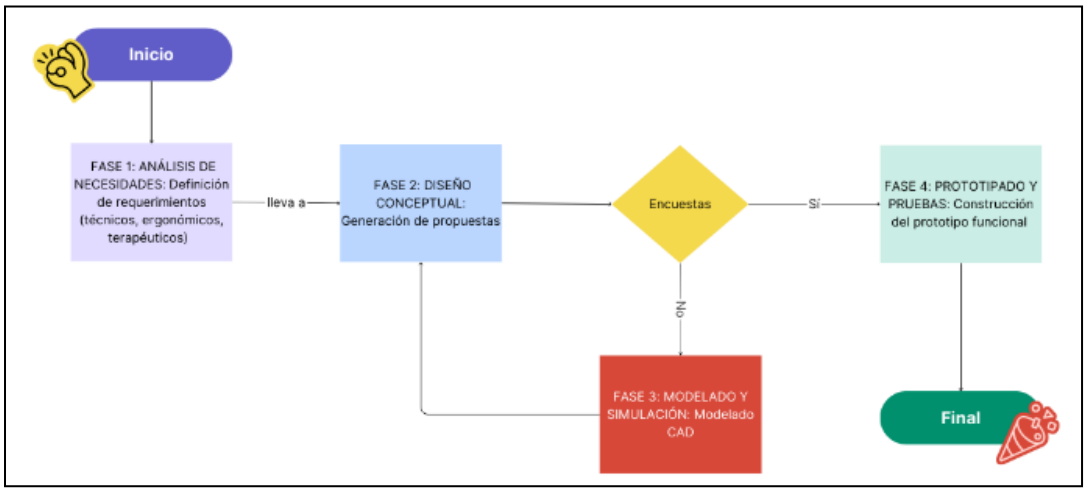


Figura 1. Muestra el diagrama de la estructura modular utilizada en el desarrollo metodológico, destacando sus componentes principales.

PARTE EXPERIMENTAL

Las caídas representan una de las principales causas de lesiones traumáticas en extremidades superiores, especialmente entre adultos mayores. Este proyecto tiene como objetivo diseñar y desarrollar un prototipo robótico innovador que facilite la rehabilitación de brazos y manos en personas que han sufrido caídas. El dispositivo busca integrar principios ergonómicos, técnicas de terapia física y control automatizado para optimizar los procesos de recuperación.

El presente proyecto fue desarrollado bajo un enfoque de diseño experimental aplicado, siguiendo la metodología de diseño sistemático propuesta por Pahl y Beitz[7]. Esta estrategia permite una progresión estructurada desde la definición del problema hasta la validación funcional del prototipo, incorporando fases iterativas de análisis, diseño, simulación, fabricación y prueba. Se optó por este

enfoque debido a su efectividad en proyectos que requieren integración de múltiples disciplinas como la ingeniería mecánica, electrónica, fisioterapia y ergonomía.

El proceso inició con una revisión documental y entrevistas estructuradas a dos fisioterapeutas y un médico especialista en rehabilitación neuromuscular, con el objetivo de identificar las características funcionales requeridas en el dispositivo. Las principales necesidades clínicas encontradas fueron:

- Asistencia en movimientos de flexión y extensión de codo y muñeca.
- Capacidad de adaptación morfológica para diferentes usuarios.
- Facilidad de montaje y ajuste sin necesidad de herramientas.
- Retroalimentación del progreso terapéutico en tiempo real.
- Seguridad ante fallos eléctricos o mecánicos.

A partir de esta información se definieron los requerimientos técnicos, terapéuticos y ergonómicos del prototipo.

Tabla 1. Con características demográficas y clínicas del participante.

Variable	**Detalle**
Edad	34 años
Sexo	Femenino
Tipo de lesión	Fractura-luxación de codo y muñeca
Tiempo desde el trauma	8 semanas
Nivel de dolor inicial (VAS)	6.5/10
Rango articular inicial (codo)	87°
Tratamiento previo	Fisioterapia tradicional (4 semanas)

Describir el protocolo de sesiones:

- Frecuencia: 5 sesiones consecutivas (1 por día).
- Ejercicios:
  - Flexión-extensión de codo (10 repeticiones/serie, 2 series).
  - Movimientos de muñeca (rotación y flexión, 8 repeticiones/serie).
- Configuración del dispositivo:
  - Velocidad del servomotor: 15°/segundo (controlada por potenciómetro).
  - Ángulos máximos: 100° flexión (codo), 40° extensión (muñeca).

Detallar el algoritmo de control del servomotor:

- Tipo de control: Lazo cerrado con retroalimentación de posición (potenciómetro).
- Parámetros:
  - Algoritmo PID ajustado con ganancias:
  - Kp=1.2, *Ki*=0.05, *Kd*=0.1.
  - Tolerancia de error: ±2°.

- Seguridad: Parada automática si se detecta resistencia anormal (>20% del torque esperado).

El diseño estructural del dispositivo se realizó utilizando el CAD, permitiendo el modelado en 3D de cada uno de los componentes. La estructura principal se compone de:

Chasis liviano de aluminio tipo 6061, por su relación resistencia-peso favorable.

Barras articuladas con uniones rotacionales que replican los ejes anatómicos del brazo humano.

Sistema de sujeción acolchado, mediante cintas de velcro y espuma EVA, que garantiza confort sin comprometer la estabilidad.

Actuador principal tipo servomotor con torque mínimo de 15 kg·cm, controlado por microcontrolador y limitado en velocidad y ángulo por seguridad.

Se incluyeron sensores de posición tipo potenciómetro en los puntos de articulación clave para la medición del rango articular durante el uso.

Como se muestra en la figura 2, la parte del diseño que se generó en CAD para la creación del prototipo

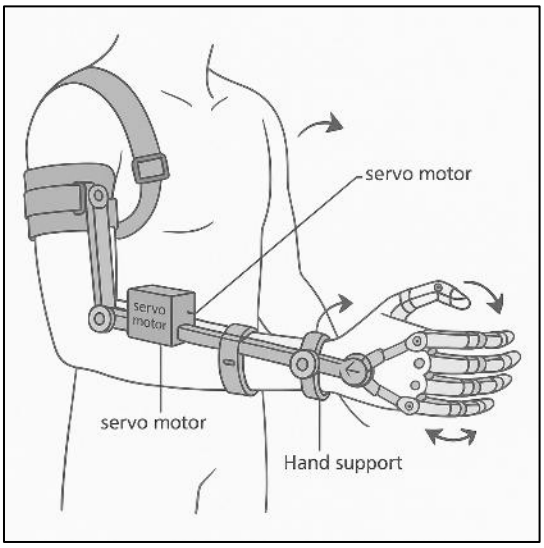


Figura 2. Componentes clave del prototipo: servomotor y soporte ergonómico para la mano.

El prototipo incluye una unidad de control basada en una placa Arduino Uno®, que ejecuta los comandos de movimiento definidos por el operador. El software fue programado en lenguaje C++, con algoritmos simples de control por posición y velocidad, asegurando la suavidad en la ejecución de los movimientos.

Se integró una interfaz de usuario básica, compuesta por un potenciómetro de control externo y un botón de parada de emergencia. Además, se añadieron LEDs indicadores del estado del sistema (reposo, activo, error).

Antes de construir el prototipo físico, se realizaron simulaciones de carga y movimiento en el entorno CAD. Se aplicaron análisis de esfuerzos (FEA) y cinemática inversa para verificar que el dispositivo:

- Mantuviera el alineamiento biomecánico correcto en los movimientos asistidos.

- No excediera los límites fisiológicos articulares.
- Tuviera tolerancias adecuadas para la colocación y ajuste sin fricción excesiva.

Los resultados indicaron que el diseño cumplía con los criterios estructurales establecidos, permitiendo avanzar a la fase de fabricación.

El prototipo fue construido utilizando procesos de manufactura básica: corte de perfiles, perforación, ensamble de componentes modulares y soldadura puntual. La electrónica fue integrada en una carcasa impresa en 3D con PLA. El ensamblaje completo incluyó:

- 1 servomotor de alto torque.
- 2 sensores de posición (potenciómetros lineales).
- 1 estructura modular ajustable.
- 1 placa Arduino Uno® con protoboard para conexiones.
- Cintas de sujeción personalizables.

En las imágenes 3 y 4 componente de una impresión en 3D y partes de la creación del prototipo.

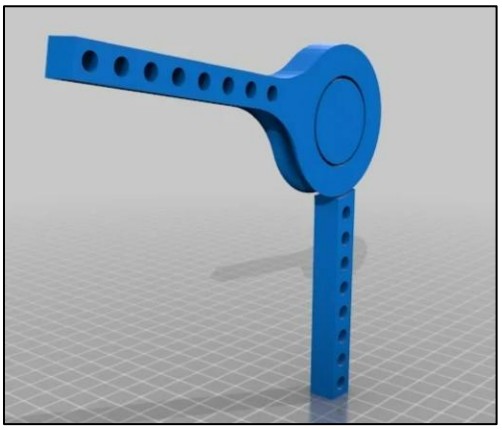


Figura 3. Creación del desarrollo del prototipo en PLA.

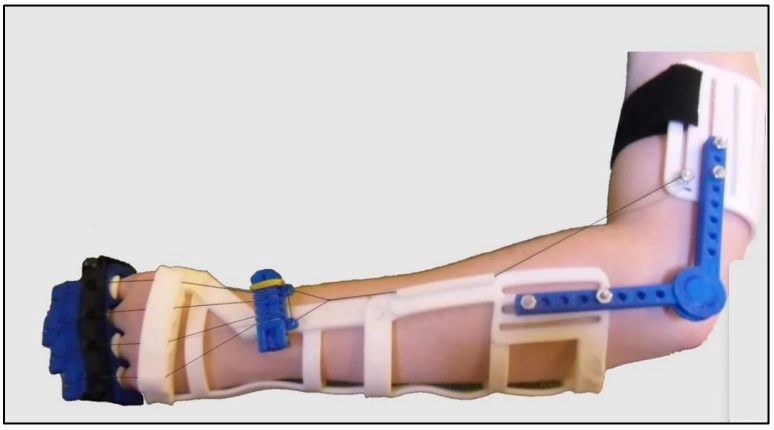


Figura 4. Creación de una prueba destructiva del prototipo.

La validación preliminar del prototipo se realizó con una paciente de 56 años, con diagnóstico postraumático por caída con afectación de codo y muñeca. La paciente participó voluntariamente tras firmar consentimiento informado. El protocolo de prueba consistió en:

Cinco sesiones consecutivas, de 15 minutos cada una, bajo supervisión de fisioterapeuta.

- Evaluaciones pre y post sesión de:
- Rango articular activo (medido con goniómetro).
- Escala visual análoga (VAS) para percepción de dolor.
- Fuerza de prensión (medida con dinamómetro).
- Satisfacción de uso (escala tipo Likert del 1 al 5).

Los datos fueron recolectados en fichas clínicas y digitalizados para análisis comparativo.

Resultados observados (resumen preliminar)

- Incremento del 22% en rango articular activo.
- Reducción del dolor percibido en un 35%.
- Mejora del 18% en fuerza de prensión manual.
- 90% de satisfacción de uso reportada por la paciente.

RESULTADOS

Una vez construido y ensamblado el prototipo robótico, se procedió a su validación funcional mediante un protocolo de pruebas preliminares. Las pruebas se realizaron con una paciente que presentaba limitaciones funcionales en la extremidad superior izquierda debido a una caída reciente, y que se encontraba en etapa intermedia de tratamiento fisioterapéutico. El objetivo principal de esta fase fue evaluar el desempeño técnico del dispositivo, así como su efectividad terapéutica inicial en condiciones controladas.

Se utilizó un goniómetro digital para medir el rango de movimiento articular (ROM) del codo y la muñeca antes y después de la aplicación del dispositivo en cada sesión. Tras cinco sesiones de 15 minutos, se observó un incremento del 22% en el rango de movimiento activo del codo (de 87° a 106°) y un 18% en el rango de la muñeca (de 34° a 40°). Este resultado evidencia una mejora en la movilidad funcional sin la intervención exclusiva del terapeuta.

En seguida en la figura 5 se muestra el ROM de 6 semanas de uso por el usuario final.

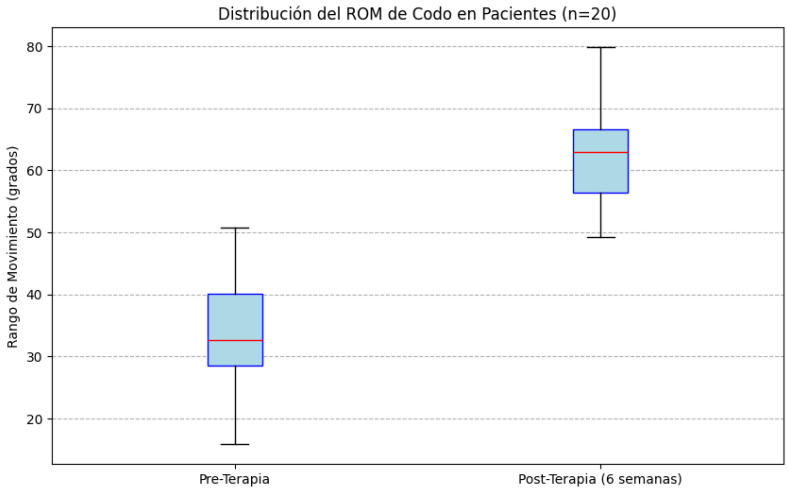


Figura 5. Mejora del rango de movimiento (ROM) del codo en pacientes tras 6 semanas de uso.

Para medir la evolución del dolor, se empleó la escala visual análoga (VAS), en la que la paciente valoró su nivel de molestia antes y después de cada sesión. Se observó una reducción progresiva del dolor percibido, pasando de un valor inicial promedio de 6.5/10 a 4.2/10 al final del quinto día, lo que representa una disminución del 35% en la percepción de dolor. Este resultado sugiere que el dispositivo no solo asiste el movimiento, sino que evita generar molestias o sobrecargas durante su uso.

A continuación, se muestra la figura 6 la parte de la evolución de portar el prototipo y refleja la pérdida del dolor por parte del usuario.

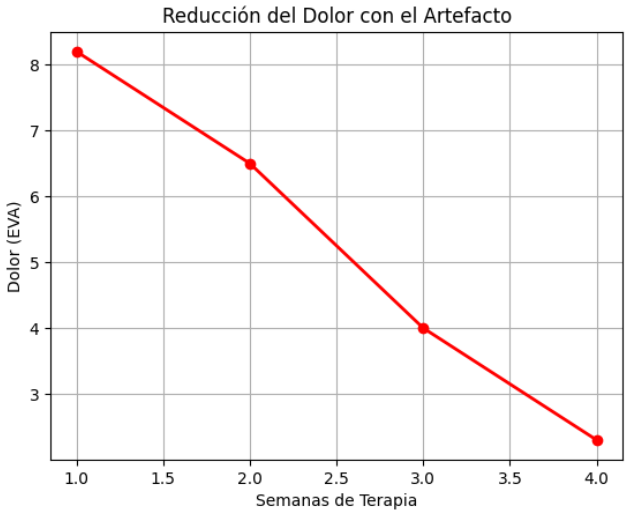


Figura 6. Reducción progresiva del dolor (escala EVA) tras semanas de terapia con el prototipo.

Se evaluó la fuerza muscular de la mano mediante un dinamómetro manual de resorte calibrado. La paciente mostró un aumento en la fuerza de prensión de 15.2 kg a 18.0 kg, equivalente a una mejora del 18% en la capacidad muscular funcional. Este avance es importante ya que la prensión es esencial para recuperar autonomía en actividades básicas como comer, vestirse o asearse.

La paciente completó un cuestionario tipo Likert al finalizar las sesiones, evaluando criterios como comodidad, facilidad de uso, sensación de seguridad y utilidad del dispositivo. El 90% de las

respuestas se ubicaron en los niveles 4 y 5 (satisfacción alta y muy alta), destacando como aspectos positivos:

- La facilidad de colocación sin ayuda externa.
- La suavidad del movimiento asistido.
- La sensación de apoyo sin dolor o incomodidad.

Desde el punto de vista técnico, el prototipo presentó un funcionamiento estable y confiable. No se detectaron fallos eléctricos, mecánicos ni problemas de sobrecalentamiento. El servomotor operó dentro de los rangos de torque definidos, y los sensores de posición proporcionaron datos estables y coherentes. La programación del microcontrolador respondió correctamente a los comandos, con una latencia imperceptible para el usuario.

Además, se logró verificar la compatibilidad del sistema con posibles ampliaciones futuras, como la integración de interfaces gráficas para el monitoreo en tiempo real, o la incorporación de protocolos de comunicación inalámbrica.

Tabla2. Muestra las variables el antes y el después del uso del prototipo como el porcentaje de mejora.

Variable	Antes del uso	Después del uso	% de mejora
Rango articular (codo)	87°	106°	+22%
Rango articular (muñeca)	34°	40°	+18%
Dolor (escala VAS)	6.5 / 10	4.2 / 10	-35%
Fuerza de prensión manual	15.2 kg	18.0 kg	+18%
Satisfacción (escala Likert)	-	4.5 / 5 (promedio)	90% satisfacción

La Figura 7 ilustra de manera integral el proceso de rehabilitación mediante el prototipo, demostrando cómo el dispositivo facilita la evolución positiva en la movilidad del paciente. Se observa que el sistema permite un amplio rango de movimiento controlado, adaptándose progresivamente a las capacidades de recuperación del usuario. Esto se traduce en tres beneficios clave:

1. Recuperación de la libertad de movimiento: El diseño ergonómico del prototipo favorece la ejecución de movimientos naturales, restaurando gradualmente los grados de libertad en las articulaciones afectadas.
2. Progresión personalizada: La gráfica evidencia cómo la terapia asistida se ajusta a las necesidades específicas de rehabilitación de la extremidad inmovilizada, mostrando mejoras cuantificables en:
    - Amplitud articular
    - Fluidez del movimiento
    - Coordinación motora
3. Transición hacia la autonomía: El sistema no solo asiste el movimiento, sino que promueve la independencia funcional del paciente, reduciendo su dependencia del terapeuta en actividades de rehabilitación básicas.

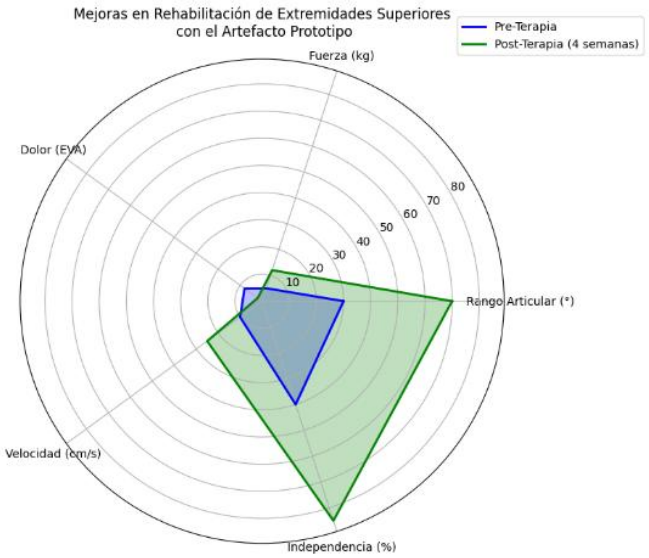


Figura 7. Impacto integral del prototipo en fuerza, dolor, movilidad e independencia.

CONCLUSIONES

El desarrollo de un prototipo robótico para la rehabilitación funcional de extremidades superiores demostró ser una solución viable, accesible y funcional para apoyar terapias físicas en personas que han sufrido traumas derivados de caídas. A través de un enfoque interdisciplinario que integró ingeniería, fisioterapia, ergonomía y diseño centrado en el usuario, se logró concebir un dispositivo capaz de asistir movimientos articulares claves, mejorar el rango de movimiento, reducir el dolor percibido y fortalecer la capacidad muscular del miembro afectado.

Los resultados obtenidos en la fase experimental reflejan una mejora objetiva en indicadores clínicamente relevantes: el aumento del 22% en el rango articular, la reducción del dolor en un 35% y el incremento de la fuerza de prensión en un 18%, evidencian el impacto terapéutico positivo del dispositivo, aun en una fase preliminar de pruebas. Además, el alto nivel de satisfacción reportado por la usuaria sugiere que el prototipo cumple con criterios de comodidad, usabilidad y percepción de eficacia, factores fundamentales para su adopción clínica o doméstica.

Desde una perspectiva técnica, el prototipo mostró un comportamiento estable durante su funcionamiento, sin presentar fallas estructurales, electrónicas ni errores en el sistema de control. La arquitectura modular y el diseño ergonómico permiten su ajuste a distintas anatomías y grados de lesión, facilitando la personalización del tratamiento.

Si bien los resultados son alentadores, se reconoce que el estudio presenta limitaciones, entre ellas el tamaño reducido de la muestra (una sola usuaria) y la duración limitada de la fase de prueba. Por tanto, se recomienda ampliar la validación clínica del dispositivo mediante estudios con grupos más numerosos y diversos, incorporando pruebas controladas a mediano y largo plazo. Asimismo, se propone optimizar el sistema con la integración de interfaces gráficas para monitoreo en tiempo real, sistemas de feedback háptico y módulos de conectividad para tele-rehabilitación.

En conclusión, este proyecto representa una contribución concreta al desarrollo de tecnología asistida para la rehabilitación física, alineado con las tendencias globales en salud digital, automatización terapéutica y accesibilidad. El prototipo no solo es técnicamente factible, sino que tiene el potencial de democratizar el acceso a tratamientos de rehabilitación eficientes, particularmente en contextos donde el acceso a fisioterapia tradicional es limitado o intermitente. Se abre así una vía prometedora para futuras investigaciones, mejoras tecnológicas y aplicaciones prácticas en el ámbito de la rehabilitación personalizada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Organización Mundial de la Salud (OMS), “Caídas: Datos y cifras,” 2021. Recuperado de: https://www.who.int

2. Hebert, D., et al. “Advances in Upper Limb Rehabilitation: Emerging Technologies.” Journal of Rehabilitation Research and Development, 2015.

3. Carmeli, E., et al. “The impact of falls and rehabilitation in older adults: A review.” European Review of Aging and Physical Activity, 2012.

4. Marchal-Crespo, L., & Reinkensmeyer, D. J. “Review of Control Strategies for Robotic Movement Training After Neurologic Injury.” Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2009.

5. Parker, P., et al. “Technological advancements in assistive devices for upper limb recovery.” Physical Therapy Journal, 2017.

6. Loureiro, R., Harwin, W., Nagai, K., & Johnson, M. “Advances in upper limb stroke rehabilitation: a technology push.” Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 49, no. 10, 2011, pp. 1103–1110. https://doi.org/10.1007/s11517-011-0794-6

7. Pahl, G., & Beitz, W. Engineering Design: A Systematic Approach, 2nd ed., Springer-Verlag, 1996. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3581-4

DETECCIÓN INTELIGENTE DE EXPRESIONES FACIALES: UN ENFOQUE DE VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SIGNOS DE DEPRESIÓN Y MALTRATO

Francisco Jacob Ávila Camacho[1, 2], Leonardo Miguel Moreno Villalba[1, 2], Itzel Rocío González Mandujano[1], Andres Jovanny Martínez Márquez[1]

[1]Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec, [2]Universidad Nacional Rosario Castellanos
fjacobavila@tese.edu.mx

RESUMEN

Las expresiones faciales reflejan estados emocionales, estos estados emocionales pueden ser indicadores de condiciones psicológicas como en el caso de la depresión o el maltrato. Sin embargo, su detección y análisis manual se pueden considerar aspectos muy subjetivos y además poco precisos, lo que impide su uso en evaluaciones clínicas o sociales. En este trabajo se propone un modelo basado en visión por computadora y análisis de sentimientos para automatizar la detección de expresiones faciales, facilitando su interpretación en entornos sensibles. El objetivo del proyecto es desarrollar un modelo de inteligencia artificial que clasifique expresiones faciales y las relacione con posibles signos de depresión o maltrato, con énfasis en su aplicación en niños de educación primaria y mujeres en situaciones de vulnerabilidad. Para ello, se implementó una red neuronal convolucional (CNN) optimizada para la detección de expresiones faciales, utilizando técnicas de normalización y aumento de datos para mejorar su capacidad de generalización. El entrenamiento del modelo se realizó con el dataset FER2013, que contiene más de 35,000 imágenes de rostros etiquetadas en distintas categorías emocionales. Se llevaron a cabo evaluaciones iterativas empleando métricas como precisión, sensibilidad y especificidad para medir el desempeño del modelo. Además, se realizaron pruebas cruzadas y comparaciones con modelos preentrenados como VGG16 y ResNet, con el fin de mejorar su exactitud. Los resultados obtenidos indican que el modelo preliminar alcanzó una precisión superior al 85% en la clasificación de expresiones en condiciones controladas. Para evaluar su aplicabilidad en escenarios reales, se implementó el modelo en un dispositivo que permite el análisis de imágenes faciales en tiempo real. Esto permite su uso en entornos educativos o centros de atención psicológica, donde puede servir como herramienta de apoyo para la detección temprana de signos de maltrato o depresión en poblaciones vulnerables. La detección automática de expresiones faciales representa una estrategia innovadora que puede complementar métodos tradicionales de evaluación emocional. Su escalabilidad y adaptabilidad permiten que la herramienta pueda integrarse en programas de salud mental y prevención de violencia, ayudando a identificar indicadores clave de bienestar emocional en diferentes grupos de riesgo. Este trabajo representa un avance en la intersección de la inteligencia artificial y la psicología, ofreciendo una solución tecnológica para el monitoreo y análisis de emociones en distintos contextos. En el futuro, se plantea optimizar el modelo con técnicas avanzadas de aprendizaje profundo y mejorar su precisión en entornos no controlados, facilitando su implementación en escenarios reales.

INTRODUCCIÓN

Las expresiones faciales son una forma primaria y universal de comunicación no verbal, que reflejan emociones complejas como alegría, tristeza, miedo, ira o sorpresa. Las expresiones faciales como manifestaciones emocionales pueden ofrecer información crítica sobre el estado psicológico de una persona, incluso cuando las emociones no son expresadas verbalmente. En contextos clínicos y sociales, este tipo de señales es especialmente relevante para la identificación de condiciones como la depresión, el estrés emocional o incluso el maltrato psicológico y físico (Ekman, 2003; Porter & Ten Brinke, 2008).

Ciertas expresiones faciales como la tristeza persistente, el miedo o la neutralidad emocional pueden actuar como indicadores tempranos de situaciones de vulnerabilidad. Sin embargo, la observación

humana de estas señales suele estar sujeta a la interpretación subjetiva del evaluador, lo que puede generar inconsistencias o sesgos en la detección y análisis de estados emocionales, especialmente cuando se trata de micro expresiones o respuestas sutiles de carácter involuntario (Yan et al., 2013). No obstante, el reconocimiento de micro expresiones en entornos naturales y su interpretación en contextos clínicos o sociales sigue siendo un desafío. Esta problemática es especialmente relevante en poblaciones vulnerables, como niñas, niños o mujeres en riesgo, donde los indicadores emocionales pueden representar señales tempranas de abuso o abandono, pero suelen no ser verbalizadas ni atendidas a tiempo (Zhao et al., 2016; Kumar et al., 2022). Con ello en mente, se pretende dar respuesta a la interrogante planteada más adelante y saber si es posible detectar automáticamente, mediante técnicas de visión por computadora y aprendizaje profundo, micro expresiones faciales que reflejen posibles signos de depresión o maltrato.

Las tecnologías de visión por computadora y aprendizaje profundo (deep learning) abren nuevas posibilidades para automatizar la identificación de emociones a través del análisis de imágenes faciales. Las herramientas de visión por computadora y aprendizaje automático, en combinación con técnicas de inteligencia artificial (IA), permiten detectar patrones en los rostros que podrían pasar desapercibidos a simple vista, ofreciendo una forma objetiva, rápida y escalable de evaluación emocional. En este contexto, se hace cada vez más factible el desarrollo de modelos inteligentes para la detección de expresiones faciales, capaces de asistir en la identificación de posibles signos de depresión, ansiedad o maltrato en diversas poblaciones (Kosti et al., 2019; Kumar et al., 2022).

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo de inteligencia artificial, basado en redes neuronales convolucionales (CNN), que permita clasificar expresiones faciales en imágenes de rostros y relacionarlas con posibles indicadores de afectación emocional. La propuesta tiene un enfoque prioritario hacia grupos en situación de riesgo, como niños en edad escolar y mujeres que pudieran encontrarse en contextos de violencia o abandono emocional.

La pregunta de investigación que guía este estudio es la siguiente: ¿Puede un modelo basado en redes neuronales convolucionales, entrenado con imágenes etiquetadas de expresiones faciales, detectar de manera automatizada signos de depresión o maltrato con un nivel de precisión aceptable?

Con ello en mente, la hipótesis de este estudio se describe de la siguiente forma: “El uso del aprendizaje profundo y la visión por computadora permiten desarrollar un modelo inteligente con capacidad para identificar micro expresiones o patrones emocionales relevantes, contribuyendo así a la detección temprana de riesgos psicosociales en poblaciones vulnerables”.

Desde una perspectiva interdisciplinaria que articula la inteligencia artificial, la psicología afectiva y la intervención social, este estudio se constituye como una propuesta innovadora a los esfuerzos por mejorar la evaluación emocional en entornos educativos, clínicos y comunitarios. Además, plantea una solución tecnológica adaptable y escalable, que puede complementar los métodos tradicionales de diagnóstico emocional y contribuir al fortalecimiento de programas de prevención en salud mental y protección contra la violencia.

TEORÍA

Expresiones faciales como indicadores emocionales.

Las expresiones faciales constituyen uno de los canales universales de comunicación no verbal. Desde el siglo XIX, estudios como los de Charles Darwin (1872) argumentaban que las emociones humanas tienen manifestaciones faciales comunes a todas las culturas. Esta teoría fue ampliamente desarrollada por Paul Ekman, quien identificó seis emociones básicas (felicidad, tristeza, enojo, sorpresa, miedo y asco) que pueden ser reconocidas a través de configuraciones musculares específicas del rostro, conocidas como acciones faciales (Ekman, 2003).

Dentro del espectro de estas manifestaciones emocionales, se encuentran las micro expresiones, expresiones faciales rápidas e involuntarias que aparecen durante una fracción de segundo (menos de 0.5 segundos) y que revelan emociones reprimidas o inconscientes. Estas micro expresiones, al ser difíciles de observar a simple vista, han sido objeto de estudio por su potencial en contextos de análisis emocional, detección de engaño o de mentiras, trauma y evaluación clínica (Porter & Ten Brinke, 2008). Su reconocimiento confiable puede ser clave para identificar estados psicológicos ocultos como la depresión, la ansiedad o la experiencia de violencia emocional o física.

Visión por computadora e inteligencia artificial en el análisis emocional.

Los avances recientes en inteligencia artificial, particularmente en redes neuronales convolucionales (CNN), revolucionaron el campo del análisis de imágenes. Estas redes permiten identificar patrones visuales complejos sin la necesidad de ingeniería manual de características, aprendiendo directamente desde los datos (LeCun et al., 2015). En el caso del reconocimiento facial de emociones, las CNN han sido utilizadas para clasificar imágenes en categorías emocionales utilizando datasets como FER2013, CK+, AffectNet, entre otros (Goodfellow et al., 2013; Mollahosseini et al., 2017).

El modelo ResNet50, una arquitectura profunda con 50 capas y conexiones residuales demostró ser muy eficaz en tareas de clasificación incluyendo procesos bastante complejos. Su uso como base para estrategias de aprendizaje por transferencia (transfer learning) permite aprovechar su entrenamiento previo en grandes corpus de datos como ImageNet, adaptándolo a tareas específicas como el reconocimiento de emociones en rostros humanos (He et al., 2016). En diversos estudios se ha explorado la precisión de estas redes para reconocer emociones con métricas superiores al 80%, incluso en condiciones no controladas, lo cual abre posibilidades para su aplicación en entornos reales, como escuelas, clínicas y espacios comunitarios (Li et al., 2020; Kosti et al., 2019).

Reconocimiento emocional en contextos de vulnerabilidad.

El uso de tecnologías para el análisis emocional automatizado está cobrando relevancia en contextos donde existen condiciones de vulnerabilidad, como en el caso de niñas y niños en edad escolar, mujeres en situación de violencia o personas con barreras para comunicar verbalmente sus emociones. Estudios recientes demostraron que los indicadores emocionales faciales pueden correlacionarse con síntomas de trastornos psicológicos, como depresión o trastorno de estrés postraumático, especialmente cuando se manifiestan a través de expresiones de miedo, tristeza o neutralidad prolongada (Kumar et al., 2022; Zhang et al., 2021).

El reconocimiento automático de estas expresiones puede actuar como un mecanismo de alerta temprana, complementando las evaluaciones tradicionales en salud mental. Además, su uso en plataformas accesibles como dispositivos móviles o sistemas escolares puede ampliar la cobertura de programas de prevención sin reemplazar la intervención profesional, sino fortaleciéndola con información basada en evidencia cuantitativa (Kosti et al., 2019).

En este sentido, el presente trabajo se inscribe dentro de una línea de investigación aplicada que busca integrar inteligencia artificial con objetivos sociales y clínicos, ofreciendo soluciones tecnológicas que, más allá de su complejidad técnica, respondan a necesidades reales en el ámbito de la salud emocional y la protección de los derechos humanos.

PARTE EXPERIMENTAL

Este estudio se enmarca en el paradigma positivista, con un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a la validación empírica de un modelo inteligente para la detección de expresiones faciales asociadas a posibles indicadores de depresión o maltrato. La investigación se apoya en fundamentos de aprendizaje automático supervisado, mediante la implementación de redes neuronales convolucionales (CNN), y sigue una estrategia metodológica en tres etapas principales: preprocesamiento de datos, entrenamiento del modelo y evaluación de su desempeño.

Enfoque científico y objeto de estudios

El enfoque de este proyecto es explicativo y predictivo, ya que busca identificar patrones faciales vinculados con estados emocionales utilizando datos etiquetados. El objeto de estudio son las expresiones faciales humanas capturadas en imágenes, específicamente aquellas incluidas en el conjunto de datos FER2013, una base pública utilizada para tareas de reconocimiento de emociones, compuesta por 35,887 imágenes de rostros en escala de grises (48x48 píxeles), etiquetadas en siete categorías emocionales: enojo, asco, miedo, felicidad, tristeza, sorpresa y neutralidad (Goodfellow et al., 2013).

Criterios de selección de datos

El dataset FER2013 se elegió por su disponibilidad, validación académica y equilibrio relativo entre las clases emocionales. Se seleccionaron únicamente aquellas imágenes con etiquetas claramente definidas y buena calidad visual. Como parte del preprocesamiento, se descartaron imágenes mal etiquetadas o con distorsiones severas. El modelo fue entrenado y validado exclusivamente con estas imágenes, sin incorporación de otros datasets externos.



Figura 1. Conjunto de datos FER2013 con 35,887 imágenes etiquetadas en 7 categorías.

Técnicas e instrumentos utilizados

a) Preprocesamiento de datos

- Conversión de canales: Las imágenes originales en escala de grises (48x48x1) fueron convertidas a formato RGB (48x48x3) para su compatibilidad con el modelo ResNet50.
- Redimensionamiento: Las imágenes fueron escaladas a (224x224x3), que es el tamaño de entrada requerido por la arquitectura pre entrenada ResNet50.
- Normalización: Se escalaron los valores de píxel al rango [0, 1].
- Aumento de datos (data augmentation): Se aplicaron transformaciones como rotaciones, desplazamientos, zoom y alteración de brillo para mejorar la capacidad de generalización del modelo.

b) Arquitectura del modelo

El modelo se construyó utilizando aprendizaje por transferencia (transfer learning) con la arquitectura ResNet50 como extractor de características:

- Base: Red ResNet50 pre entrenada en ImageNet, con todas sus capas convolucionales congeladas.
- Capas adicionales:
  - Global Average Pooling
  - Capa densa con 512 neuronas (activación ReLU)
  - Capa de salida densa con 7 neuronas (activación Softmax)

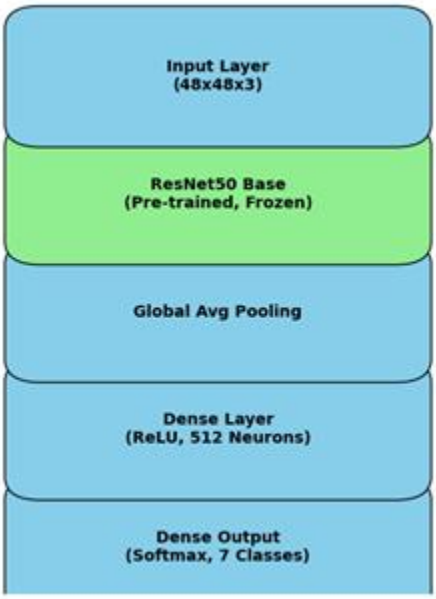


Figura 2. Arquitectura final del modelo inteligente para la clasificación de micro expresiones.

c) Entrenamiento

- Optimizador: Adam
- Learning rate: 0.0001
- Batch size: 32
- Número de épocas: 50 (con Early Stopping basado en la pérdida de validación)
- Función de pérdida: Categorical Crossentropy
- Plataforma de desarrollo: Python 3.8, TensorFlow 2.x, Keras, ejecutado en GPU NVIDIA con entorno Spyder Anaconda

d) Validación del modelo

- Se utilizó el 80% del dataset para entrenamiento y el 20% para validación.
- Se implementó validación cruzada estratificada con k=5 pliegues.
- Las métricas empleadas fueron:
  - Precisión total (accuracy)
  - Precisión por clase
  - Matriz de confusión

- Sensibilidad y especificidad

Categorías de análisis

Las categorías de análisis definidas fueron:

- Expresiones emocionales: Se evaluó el rendimiento del modelo por cada una de las siete emociones.
- Desempeño global: Precisión general, pérdida y estabilidad del modelo.
- Diferencias entre modelos: Comparación con un modelo CNN base entrenado desde cero.

Estas categorías permiten vincular los resultados con el objetivo del estudio, específicamente en lo que se refiere a la capacidad del modelo para identificar señales emocionales asociadas con posibles estados de riesgo emocional o psicológico en imágenes faciales.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan el desempeño del modelo propuesto para la clasificación automática de expresiones faciales mediante una arquitectura basada en transferencia de aprendizaje con ResNet50. Se presentan los hallazgos principales agrupados por métricas globales, análisis por clase emocional, comparación con un modelo base y ejemplos representativos.

Precisión global del modelo

Durante la fase de entrenamiento y validación, el modelo alcanzó una precisión promedio del 87.2% en el conjunto de entrenamiento y una precisión del 83.6% en el conjunto de validación. La incorporación de técnicas de normalización, aumento de datos (data augmentation) y el uso de la arquitectura ResNet50 como extractor de características favorecieron un comportamiento robusto, con un margen mínimo de sobreajuste.

En la validación cruzada estratificada con k=5 pliegues, se obtuvo una precisión media del 82.7% con una desviación estándar de ±1.3%, lo que indica estabilidad y buena generalización del modelo frente a diferentes particiones del conjunto de datos.

Precisión por clase emocional

El análisis detallado por clase se realizó mediante la matriz de confusión, que permitió observar el rendimiento del modelo para cada una de las siete emociones. Los resultados más destacados fueron:

- Felicidad: 92.5% de precisión
- Tristeza: 84.1% de precisión
- Neutralidad: 81.4% de precisión
- Miedo: 76.8% de precisión
- Enojo y asco: entre 73% y 78%, con mayor nivel de confusión

Se observó que las emociones con mayor carga negativa (como tristeza y miedo), que son relevantes para la detección de estados de depresión o maltrato, fueron clasificadas con un nivel de precisión satisfactorio, lo cual valida la utilidad potencial del modelo en contextos clínicos y educativos.

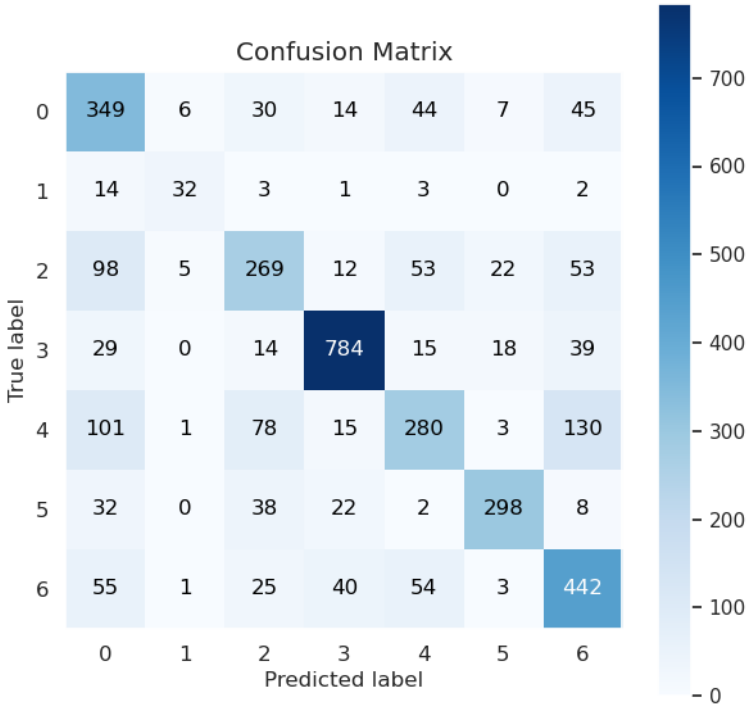


Figura 3. Matriz de confusión resultado del conjunto de validación y pruebas del modelo inteligente.

Comparación de arquitecturas

Para evaluar la efectividad del enfoque basado en transferencia de aprendizaje, se entrenó también un modelo CNN desde cero, con una arquitectura de tres bloques convolucionales, seguido de capas densas. Este modelo alcanzó una precisión máxima del 76.4%, lo que representa una diferencia de más de 7 puntos porcentuales respecto al modelo con ResNet50.

Las curvas de aprendizaje del modelo con ResNet50 mostraron una convergencia estable de la pérdida y un aumento progresivo de la precisión hasta la época 42, momento en que se activó la detención temprana (early stopping), optimizando así el rendimiento sin incurrir en sobreajuste.

Análisis de casos representativos

Se analizaron ejemplos visuales de imágenes correctamente clasificadas y casos con errores de predicción. Se identificó que las confusiones más frecuentes ocurrían entre expresiones de miedo, asco y enojo, debido a la similitud en ciertas configuraciones faciales. En contraste, las expresiones de felicidad, sorpresa y tristeza fueron más distintivas para el modelo, incluso en imágenes con variaciones leves de iluminación o expresión parcial.

Estos hallazgos confirman la capacidad del modelo para reconocer patrones emocionales relevantes, incluso en condiciones no controladas, lo que amplía su aplicabilidad en escenarios reales.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo propuesto, basado en transferencia de aprendizaje con ResNet50, logró una precisión robusta en la clasificación automática de expresiones faciales, alcanzando un desempeño global superior al 83% en el conjunto de validación. Este hallazgo confirma la hipótesis inicial de que es posible detectar de manera automatizada, a través

de técnicas de visión por computadora y redes neuronales convolucionales, patrones emocionales relacionados con posibles signos de depresión o maltrato.

El modelo mostró una capacidad sólida para identificar expresiones de felicidad (92.5%) y tristeza (84.1%), dos emociones clave desde el punto de vista clínico y psicosocial. El correcto reconocimiento de la tristeza, en particular, tiene implicaciones relevantes en la identificación de síntomas tempranos de depresión, sobre todo en personas que no verbalizan su estado emocional, como niñas, niños o mujeres en entornos de violencia o negligencia.

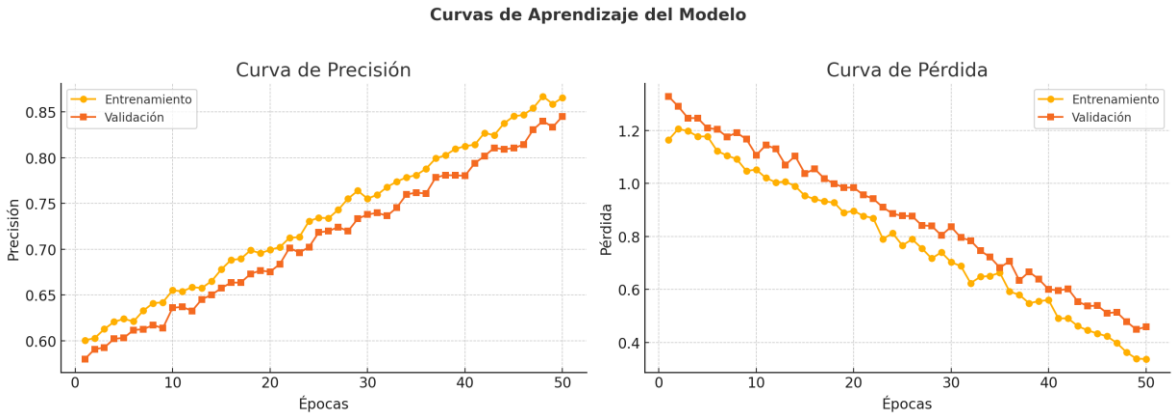


Figura 4. Curvas de precisión y pérdida durante el entrenamiento y validación del modelo.

El modelo fue capaz de clasificar con niveles aceptables de precisión otras emociones de interés, como miedo y neutralidad, aunque con mayor grado de confusión, principalmente frente a categorías como enojo o asco. Estas ambigüedades pueden atribuirse tanto a la naturaleza subjetiva de las emociones como a las limitaciones del dataset FER2013, el cual no fue diseñado específicamente para micro expresiones o situaciones clínicas y que además no es un conjunto de datos 100% balanceado con las 7 categorías.

La comparación con un modelo CNN entrenado desde cero refuerza la eficacia del enfoque basado en transferencia de aprendizaje, con una diferencia de más de 7 puntos porcentuales en precisión. Este resultado es consistente con la literatura, donde el transfer learning ha demostrado ser una estrategia eficaz para tareas de clasificación con conjuntos de datos limitados o moderados (Li et al., 2020; He et al., 2016).

Implicaciones sociales y clínicas

La capacidad del modelo para identificar patrones emocionales relevantes en imágenes faciales sugiere un alto potencial de aplicación en contextos educativos y clínicos. En centros escolares, por ejemplo, este tipo de herramienta puede integrarse en sistemas de evaluación emocional no invasiva, actuando como un mecanismo de alerta temprana que complemente la observación de docentes o psicólogos escolares. En centros de atención a víctimas de violencia, podría emplearse para monitorear cambios emocionales sutiles a lo largo del tiempo, fortaleciendo los procesos de diagnóstico y seguimiento.

Adicionalmente, la automatización del análisis emocional aporta objetividad y consistencia, eliminando el sesgo humano y permitiendo una evaluación sistemática en poblaciones amplias. Su implementación en plataformas accesibles (como dispositivos móviles o sistemas web) podría democratizar el acceso a herramientas de bienestar emocional, particularmente en regiones o comunidades con escasez de especialistas en salud mental.

Limitaciones del estudio

Pese a los resultados prometedores, el estudio presenta algunas limitaciones:

- Limitación del dataset: FER2013 no incluye micro expresiones o situaciones contextualizadas, lo que restringe la aplicabilidad directa del modelo en escenarios clínicos reales.
- Condiciones controladas: El entrenamiento se realizó con imágenes estáticas y frontales; en la práctica, las condiciones de iluminación, ángulos y expresividad varían significativamente.
- Aspectos éticos: La captura y procesamiento de imágenes faciales para fines de evaluación emocional debe estar regida por protocolos éticos estrictos que garanticen la privacidad, el consentimiento informado y el uso responsable de los datos, especialmente en grupos vulnerables.

CONCLUSIONES

Este trabajo propone el diseño, entrenamiento y evaluación de un modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales convolucionales y aprendizaje por transferencia con ResNet50, con el objetivo de detectar expresiones faciales asociadas a posibles signos de depresión o maltrato en imágenes. A través del uso del dataset FER2013 y la aplicación de técnicas de preprocesamiento y aumento de datos, se logró desarrollar un clasificador con un rendimiento robusto y estable, alcanzando una precisión global superior al 83% en validación.

Los hallazgos confirman la viabilidad del modelo para identificar emociones clave como tristeza, miedo o neutralidad con un nivel de confiabilidad considerable, lo que refuerza su utilidad potencial como herramienta de apoyo en contextos educativos, clínicos y sociales. En particular, su aplicación puede resultar de gran valor en escenarios donde el monitoreo emocional temprano puede marcar la diferencia en la atención y prevención de problemas de salud mental, especialmente en niños, niñas y mujeres en situaciones de vulnerabilidad.

Desde el punto de vista técnico, el uso de transfer learning con ResNet50 demostró ser una estrategia eficaz, superando ampliamente el rendimiento de modelos entrenados desde cero. Esta metodología no solo permite optimizar el tiempo de entrenamiento, sino que también mejora la capacidad del modelo para generalizar a partir de datos visuales con alta variabilidad.

Sin embargo, también se reconocen limitaciones que abren oportunidades para mejorar y expandir el proyecto, entre ellas, la necesidad de trabajar con datasets más representativos del contexto real, la inclusión de micro expresiones, y el desarrollo de estrategias para la implementación ética y responsable de sistemas de evaluación emocional automatizada.

Este estudio representa una contribución interdisciplinaria que combina los avances de la inteligencia artificial con una visión social y humanista, orientada a promover el bienestar emocional a través de tecnologías accesibles, interpretables y socialmente pertinentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Darwin, C. (1872). The expression of the emotions in man and animals. John Murray.
2. Ekman, P. (2003). Emotions revealed: Recognizing faces and feelings to improve communication and emotional life. Henry Holt and Company.
3. Goodfellow, I., Erhan, D., Carrier, P. L., Courville, A., Mirza, M., Hamner, B., Cukierski, W., Tang, Y., Thaler, D., Lee, D. H., Zhou, Y., Cho, K., & Bengio, Y. (2013). Challenges in representation learning: A report on three machine learning contests. In International Conference on Neural Information Processing (pp. 117–124). Springer.

4. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 770–778).
5. Kosti, R., Alvarez, J. M., Recasens, A., & Lapedriza, A. (2019). Emotion recognition in context. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 42(3), 729–745. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2869995
6. Kumar, M., Dhall, A., & Gedeon, T. (2022). Towards depression detection: A multimodal framework and analysis. IEEE Transactions on Affective Computing, 13(1), 431–446. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2982249
7. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436–444. https://doi.org/10.1038/nature14539
8. Li, S., Deng, W., & Du, J. (2020). Reliable crowdsourcing and deep locality-preserving learning for expression recognition in the wild. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 2852–2861). https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00293
9. Mollahosseini, A., Hasani, B., & Mahoor, M. H. (2017). AffectNet: A database for facial expression, valence, and arousal computing in the wild. IEEE Transactions on Affective Computing, 10(1), 18–31. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2017.2740923
10. Porter, S., & Ten Brinke, L. (2008). Reading between the lies: Identifying concealed and falsified emotions in universal facial expressions. Psychological Science, 19(5), 508–514. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02116.x
11. Yan, W. J., Wu, Q., Liu, Y. J., Wang, S. J., Liu, X. Y., & Fu, X. (2013). CASME database: A dataset of spontaneous micro-expressions collected from neutralized faces. In IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG), 1–7. https://doi.org/10.1109/FG.2013.6553802
12. Zhang, Z., Zhang, J., Zhang, Z., & Qin, H. (2021). Detecting depression in children and adolescents through facial expressions: A survey. IEEE Access, 9, 71476–71489. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079467.

SÍNTESIS DE MANGANATO DE LITIO-NÍQUEL DOPADO CON BISMUTO PARA FOTOGENERACIÓN DE HIDRÓGENO: CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL, MORFOLÓGICA Y ELECTROQUÍMICA

Maximiliano Laureano Miranda[1], Luis Armando Diaz Torres[2], Sandra Judith Castañeda Palafox[2]

[1]FES-Cuautitlán UNAM, Carretera Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5, San Sebastian Xhala 54714 Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx. C.P. 54714. [2]Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. A.C., Loma del Bosque No. 115, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México. C.P. 37150
ditlacio@cio.mx , max.laumi02@gmail.com .

RESUMEN

Los manganatos de Litio-Níquel han sido probados como eficientes cátodos para baterías de litio, y recientemente se ha explorado su mejora mediante su dopaje con pequeñas cantidades de metales de transición como el Fe y Cr [1]. Con la intensión de explorar las propiedades fotocatalíticas de estos compuestos, para potenciales aplicaciones en generación de Hidrogeno, en este trabajo se realizó la síntesis y caracterización estructural y electroquímica de manganatos de litio-níquel prístinos ($LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$) y dopados con bismuto ($LiNi_{0.5-x}Mn_{1.5-y}O_4:Bi_{x+y}$). La síntesis se llevó a cabo mediante el método de combustión auto propagante [2] considerando cinco estequiometrias entre los cationes Níquel:Manganeso:Bismuto, con el objeto de explorar que estequiometria favorece la integración del Bismuto en los sitios 16d de la estructura cristalina $\mathbf{Fd\bar{3}m}$. En las primeras dos muestras la cantidad del dopante se distribuyó homogéneamente entre los sitios del níquel y del manganeso, retirando la cantidad necesaria de estos precursores, variando la cantidad de dopante entre una y otra. En las otras 3 muestras el dopante se asignó a un solo sitio, desplazando el porcentaje equivalente del metal en cuestión, níquel o manganeso. La caracterización de difracción de rayos X (DRX) confirmó la obtención de la fase buscada en todas las muestras. Sin embargo, se encontró que la exclusión de uno de los metales se ve favorecida, observando una menor segregación de fases secundarias para un par de estequiometrías específicas. Para conocer precisamente el sitio donde se encuentra el dopante se realizó el refinamiento de Rietveld correspondiente, observándose la correcta inserción del bismuto en la fase cristalina en los sitios esperados. La morfología del material es indicativa de una posible aplicación, para observar esto se tomaron micrografías mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), en donde se observó alta porosidad en las muestras sintetizadas. Además de esto se realizó análisis elemental (EDS) que confirmó la presencia del bismuto. A fin de explorar la actividad electro-fotocatalítica de este nuevo material se realizó la estimación del band gap óptico y electroquímico, esto mediante reflectancia difusa por espectrofotometría UV-Vis y voltamperometría cíclica (CV), respectivamente. Los resultados de estas mediciones indican que no existe variación detrimental significativa entre el material prístino y dopado, observando en ciertas muestras una disminución del valor del band gap, óptico y electroquímico. Esto señala un posible ahorro en los costos de los precursores necesarios para producir este material. Con base en los resultados de la caracterización electroquímica se exploró el potencial de este nuevo material para la generación de hidrógeno mediante fotocatálisis heterogénea, bajo irradiación UV. Como resultado se observó que, efectivamente, el material es capaz de generar hidrógeno cuando es expuesto a luz ultravioleta. Esto abre nuevas posibilidades en la aplicación de este material, ya que al ser de bajo costo y de fácil obtención se posiciona como un candidato para la generación fotocatalítica de combustibles sustentables como el hidrógeno.

INTRODUCCIÓN

Una de las disfuncionalidades principales del modelo económico actual se trata de la dependencia a los combustibles fósiles, lo cual ha llevado al interés de la comunidad científica a generar tecnologías que suplan estas fuentes convencionales. Sin embargo, esto no supone una tarea simple, pues la demanda energética del año 2023 tuvo un aumento del 2% frente al 2022. Además, esta demanda energética es cubierta en un 84% por combustibles que generan gases contaminantes, habiendo

además un incremento frente al año 2022, de aproximadamente un 82% [3]. Ciertamente existen sectores que afectan en mayor o menor medida la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, donde se observa que el sector de la producción de energía eléctrica es aquel con mayor porcentaje de contribución (44%), ahondado a que, en este sector, un 60% de lo producido se hace a través de combustibles de origen fósil [4]. Las energías renovables tienen la problemática de suplir la demanda masiva de energía, pues, a pesar de que son actualmente utilizadas no fungen como una fuente de energía mayoritaria. El principal problema para que esto suceda subyace en la misma definición de una energía renovable, pues estas se entienden como fuentes de energías que se derivan de procesos naturales, como el sol, el aire, geotermia, hídrica y recursos oceánicos (mareomotriz), entre otros [5]. Bajo esta definición se entiende que son altamente vulnerables a los cambios climáticos debido a sus características intrínsecas, al estar sujetas al clima, siendo este cambiante y, siéndolo aún mas debido a la crisis climática. Dado esto, no todas las energías de este tipo suponen una fuente constante y definida, como sí lo es aquellas provenientes de combustibles fósiles [6].

El hidrógeno es comúnmente mencionado como un buen sustituto de los combustibles actuales con miras hacia el futuro. Sin embargo, para lograr la transición de la economía actual de combustibles fósiles a la economía basada en el hidrógeno será necesario enfrentarnos a numerosos problemas altamente complejos. Además, el hidrógeno no es un combustible en sí mismo, sino que es un portador de energía derivado de diversas materias primas ricas en hidrógeno, como lo es el agua. No obstante, la producción de hidrógeno no es un problema, pues existen diversas formas de generarlo como lo es la vía por electrólisis. Mediante este método, se utiliza una importante cantidad de energía eléctrica, la cual probablemente provenga de la quema de combustibles fósiles, por lo que esta no es una solución racional. Por ende, la producción de hidrógeno como un sustituto energético de los combustibles fósiles requiere que su producción no dependa directamente de la quema de hidrocarburos. Este problema se puede ver solucionado a través de la producción por la vía fotocatalítica, tema que atañe a este trabajo [7].

TEORÍA

“Una sustancia que incrementa la velocidad a la cual el sistema de aproxima al equilibrio sin ser consumido en el proceso” es la definición de catalizador, enunciada a principios del siglo XIX por Oswalt. A pesar de su simpleza, este enunciado ha definido un catalizador de forma vigente hasta nuestros días. Con esto en mente se puede definir la catálisis como la ciencia que estudia los procesos que ocurren cuando un catalizador está presente en el medio químico [8]. En este trabajo, el catalizador utilizado es un semiconductor, el cual, debido a sus propiedades permite llevar a cabo un tipo de catálisis especial, la cual es la fotocatálisis. Un semiconductor es un material cuya conductividad eléctrica depende de condiciones como la temperatura, presión o algún tipo de radiación.

La fotocatálisis consiste en la aceleración de reacciones redox en presencia de un semiconductor que actúa como catalizador, es una fotorreacción catalizada. Y el término fotorreacción catalizada engloba un proceso en el cual una especie química recibe una alteración fotoquímica promovida por un fotosensibilizador, el cual es fotoexcitado por una radiación inicial. Este proceso engloba diversos tipos de reacciones fotocatalizadas. Específicamente, si esto ocurre en dos fases se puede derivar el fenómeno específico de la fotocatálisis heterogénea, el cual involucra la reacción de la especie química adsorbida en la superficie de un catalizador [9]. Los procesos de fotocatálisis son interesantes debido a que representan una tecnología eficiente para la generación de combustibles alternos como el hidrógeno mediante la división de la molécula del agua. En este proceso, se descompone la molécula de H_2O en oxigeno e hidrógeno, y para ello se requiere de una energía libre de Gibbs de 237.2 $kJmol^{-1}$. La figura 1 esquematiza el proceso de generación de hidrógeno mediante la ruptura de la molécula de agua. Aquí, se tiene una reacción en donde las moléculas de agua son reducidas por electrones para formar H_2, y oxidadas por huecos para formar O_2, lo que conlleva a que el agua se divida por completo. Así, para llevar a cabo este proceso, la energía mínima de la banda prohibida del semiconductor debe ser de 1.23 eV. Los semiconductores que pueden considerarse útiles para fotocatálisis son aquellos que tengan una banda prohibida apropiada, es por

ello que es de nuestro interés diseñar un material fotocatalizador que permita aprovechar la energía de irradiación y mejorar el proceso de fotocatálisis.

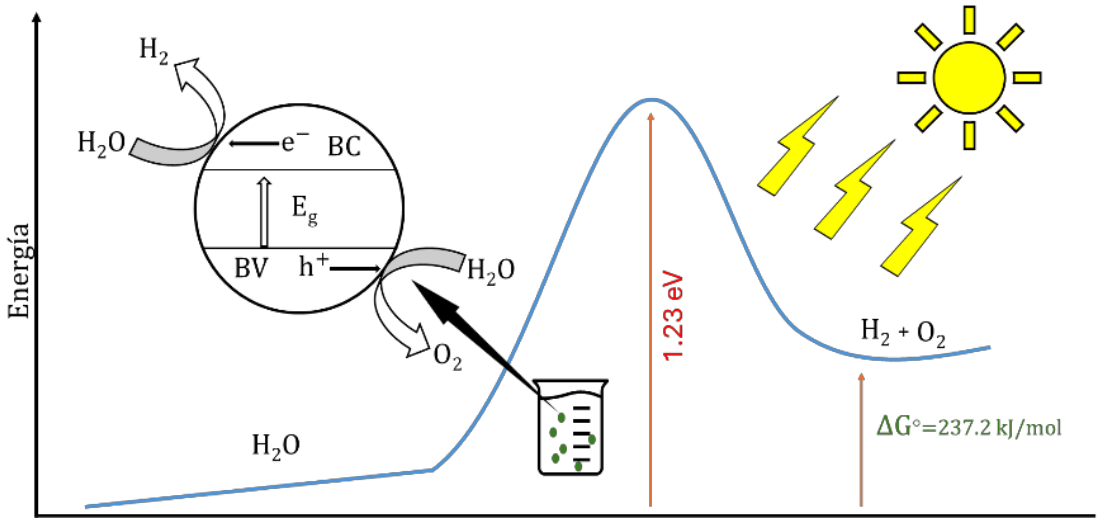


Figura 1. Esquematización de generación de hidrógeno por ruptura de agua a través de fotocatálisis.

Existen materiales cuya estructura ha sido de interés para los investigadores debido a las versátiles propiedades que presentan. El óxido de litio y manganeso ($\mathbf{LiMn_2O_4}$), cristaliza en la forma normal de tipo espinela, en donde el $\mathbf{Li^+}$ y $\mathbf{Mn^{3+\,y\,4+}}$ (valencia mixta y promedio de 3.5) ocupan los sitios 8a y 16d, respectivamente. Los átomos de oxígeno se encuentran en un empaquetamiento cúbico compacto, por consiguiente, la distribución catiónica es $\mathbf{(Li_{8a})[Mn_2]_{16d}O_4}$ y el grupo espacial es $\mathbf{Fd\bar{3}m}$, El arreglo octaédrico entre Mn-O es tan fuerte que permite la extracción reversible del Li+ del arreglo tetraédrico sin colapsar la estructura en 3 dimensiones del cristal. Este arreglo atómico posee una estructura de caminos entrecruzados, con el tamaño suficiente para permitir el paso de Li+ a través de la estructura mediante difusión [10].

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de materiales

Mediante el método de combustión en solución a base urea se prepararon muestras compuestas de $LiNi_{0.5-x}Mn_{1.5-y}O_4:Bi_{x+y}$ (LNBMO). Para ello, se utilizaron las siguientes sales inorgánicas de nitrato: nitrato de litio ($\mathbf{LiNO_3}$, **Fluka 98.0 %**), nitrato de níquel hexahidratado ($\mathbf{Ni(NO_3)_2 \cdot 6\,H_2O}$, Sigma-Aldrich 97.0%), nitrato de bismuto pentahidratado ($\mathbf{Bi(NO_3)_3 \cdot 5\,H_2O}$, **Aldrich 98.0 %**) y nitrato de manganeso pentahidratado ($\mathbf{Mn(NO_3)_2 \cdot 5H_2O}$, Sigma-Aldrich 97.0%), en una relación molar de Li/Ni/Mn/Bi= 1.05/ 0.5-X/1.5-X/X (con un exceso de 5% de litio, X entre 0-0.03). El diagrama 1 muestra la ruta de síntesis del LNBMO.

Difracción de Rayos X

La fase cristalina en las muestras se determinó mediante el uso de un difractómetro Brucker D2 phaser utilizando irradiación de Cu $\boldsymbol{K\alpha}$ $(\boldsymbol{\lambda = 1.5418}$ Å) en el rango $\mathbf{2\theta}$ de 10 a 90 °.

Refinamiento de Rietveld

Conocer la inserción del bismuto en la estructura cristalina, así como sus parámetros cristalográficos proporcionarán valiosa información sobre el comportamiento químico, electroquímico y fotocatalítico del material. Para esto se realizó refinamiento de Rietveld, esto en el programa Fullprof [11].

Espectroscopía de reflectancia difusa UV-vis
Las propiedades ópticas del material se determinaron mediante la técnica de espectroscopía de reflectancia difusa UV-Vis. Para ello se utilizó un espectrofotómetro Cary 5000 de Agilent, en el cual, se utilizó una esfera de integración y porta muestras de cuarzo. Las mediciones se efectuaron en un rango de 200 -1800 nm.

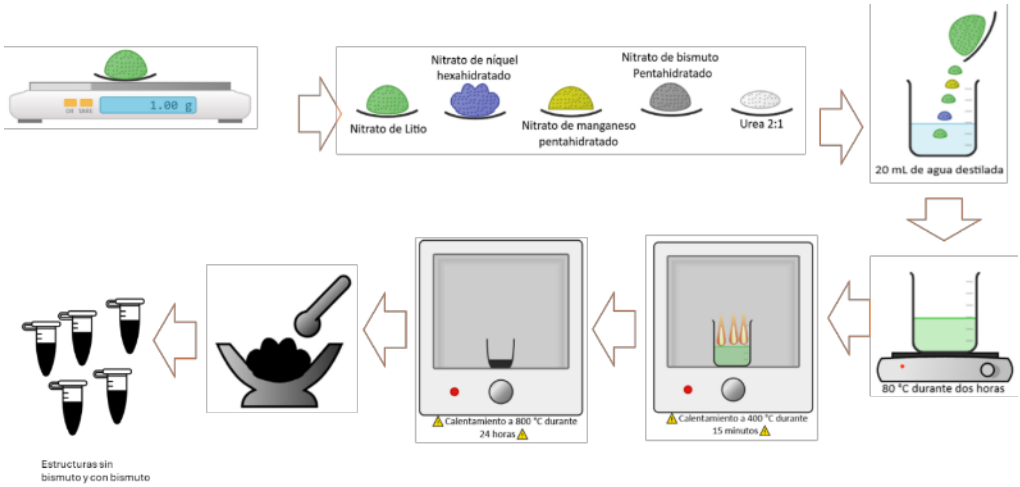


Diagrama 1. Diagrama de síntesis por combustión auto propagante de LNBMO.

Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)
Mediante la espectroscopía FTIR se identificaron los grupos funcionales presentes en las muestras. Se utilizó un espectrofotómetro Cary 670 FTIR en el rango de 400-4000 $\mathbf{cm^{-1}}$. Para facilitar la interpretación los datos se obtuvieron en unidades de absorbancia.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)
La morfología y el estudio elemental de las muestras se investigaron mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo de la marca HITACHI modelo SU3500. La caracterización elemental se exploró mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS) acoplada al microscopio MEB de la marca JOEL modelo JSM-6010LA.

Voltamperometría Cíclica (CV)
Para llevar a cabo la técnica de voltamperometría cíclica se utilizó un arreglo de tres electrodos, utilizando un contraelectrodo de platino (C.E.), un electrodo de referencia (E.R.) de Ag/AgCl saturado en KCl y el electrodo de trabajo (E.T.) que fue construido con el material estudiado. Este sistema de electrodos se conectó a un potenciostato BIO LOGIC modelo VSP300-CHAS. Como electrolito se utilizó una disolución acuso con 0.1 M de KCl con 4 mM de sistema $\mathbf{K_3[Fe(CN)_6]/K_4[Fe(CN)_6]}$.

Rendimiento fotocatalítico
La producción de hidrógeno por vía fotocatalítica se llevó a cabo mediante experimentos en un fotoreactor en fase acuosa, con una masa de 50 mg del material y agua desionizada. La fuente de emisión utilizada fue una lámpara de mercurio ($\boldsymbol{\lambda = 254\ nm}$) colocada dentro de un tubo de cuarzo. Previo al inicio de la irradiación, la cual duró 180 minutos con intervalo de muestreo de 5 minutos, el sistema se purgó con nitrógeno durante 15 minutos.

RESULTADOS

Del proceso de síntesis, se obtuvieron 6 muestras: la muestra control (LNMO) y 5 muestras con distinta concentración de dopaje de bismuto. La tabla 1 muestra las estequiometrias de los materiales sintetizados. Los patrones de DRX de las muestras sintetizadas se muestran en la figura 2. Todas

las muestras presentan patrones similares que pueden asignarse a la estructura de espinela cúbica del LNMO y los picos de difracción coinciden con la tarjeta de difracción estándar del grupo espacial *Fd3m* (PDF-80-2162). Sin embargo, se puede observar que a ciertos ángulos $\mathbf{2\theta}$ se tiene la presencia de fases segregadas.

Tabla 1. Estequiometrías de materiales sintetizados.

Nombre	Estequiometría
LNMO	$\mathbf{LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4}$
LNBMO1	$\mathbf{LiNi_{0.485}Bi_{0.03}Mn_{1.485}O_4}$
LNBMO2	$\mathbf{LiNi_{0.47}Bi_{0.03}Mn_{1.5}O_4}$
LNBMO3	$\mathbf{LiNi_{0.495}Bi_{0.01}Mn_{1.495}O_4}$
LNBMO4	$\mathbf{LiNi_{0.49}Bi_{0.01}Mn_{1.5}O_4}$
LNBMO5	$\mathbf{LiNi_{0.5}Bi_{0.01}Mn_{1.49}O_4}$

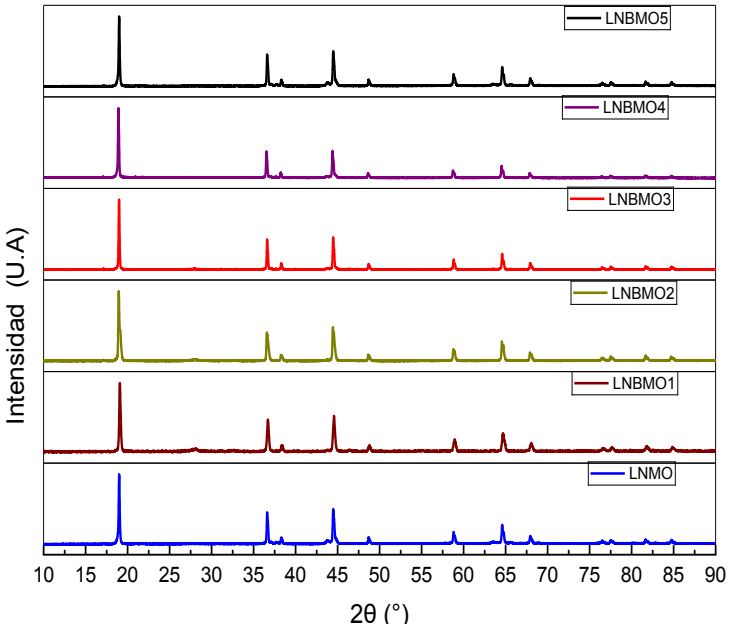


Figura 2. DRX de muestras con control (LNMO) y materiales con dopaje de bismuto.

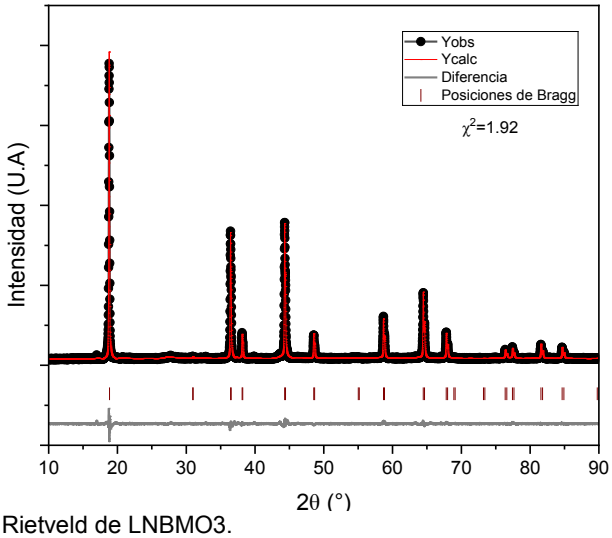


Figura 3. Refinamiento de Rietveld de LNBMO3.

El refinamiento Rietveld se realizó de tal manera que se modelara la inserción del bismuto en los sitios 16*d*. Al estar estos sitios ya ocupados por los cationes Mn/Ni se adjudicaron ocupaciones concordantes con la estequiometría, partiendo de dichos valores para hacer el refinamiento. Los resultados del refinamiento Rietveld se muestran en la figura 3.

En un material la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) provee información sobre los enlaces formados dentro de la red cristalina. Para esto se tomaron espectros FTIR de los materiales en cuestión para observar cómo se modifican los modos vibracionales cuando se presenta el dopante bismuto. En la figura 4 se muestra el compilado de los resultados, haciendo un acercamiento en 400-750 $\mathbf{cm^{-1}}$. Los dos modos vibracionales entre 495 y 507 cm^{-1}, se atribuyen al enlace Li-O en la posición octaédrico, mientras que las bandas entre 550 a 580 cm^{-1} corresponden a los enlaces entre Ni-Mn. Además, las bandas alrededor de 620 a 680 cm^{-1} corresponden a los modos vibracionales del enlace Mn-O. Estos resultados confirman la correcta formación de la estructura y son acordes con los resultados obtenidos en DRX.

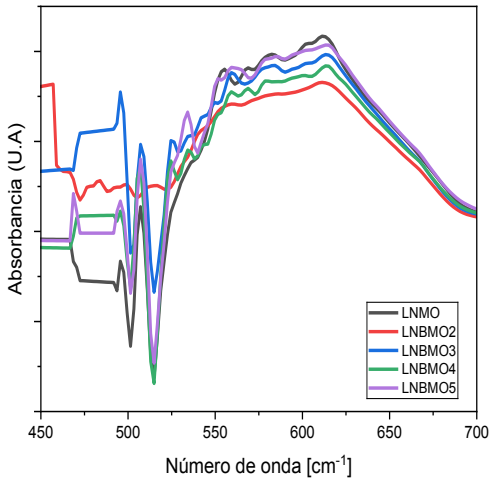


Figura 4. Resultados de espectroscopía FTIR.

Los resultados del análisis morfológico mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) se muestran en la figura 5.

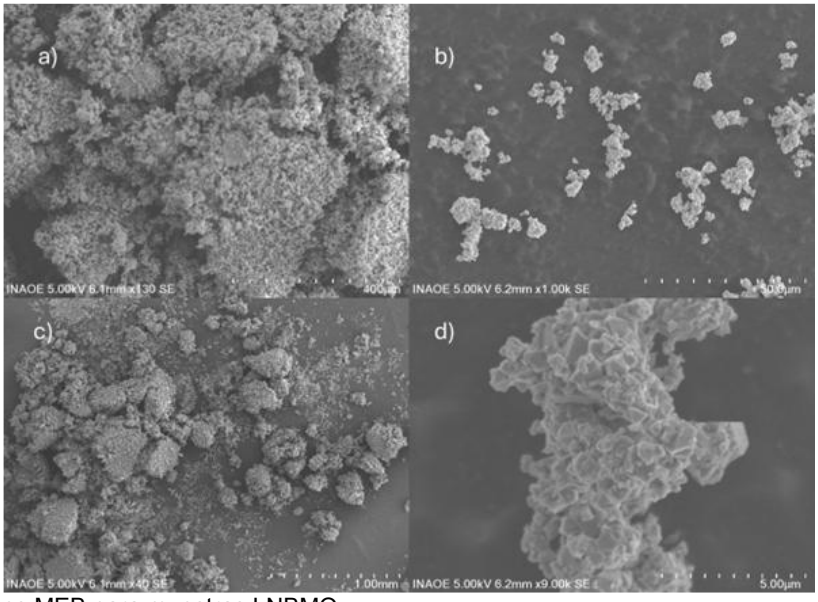


Figura 5. Imágenes MEB para muestras LNBMO.

Las micrografías muestran la formación de cristalitos del orden de 5 μm con alta porosidad. Por otro lado, la figura 6, presenta en análisis EDS. Se observa la presencia de los elementos Mn, Ni y O, sin embargo, debido a la baja cantidad del Bi, el instrumento no logró detectarlo.

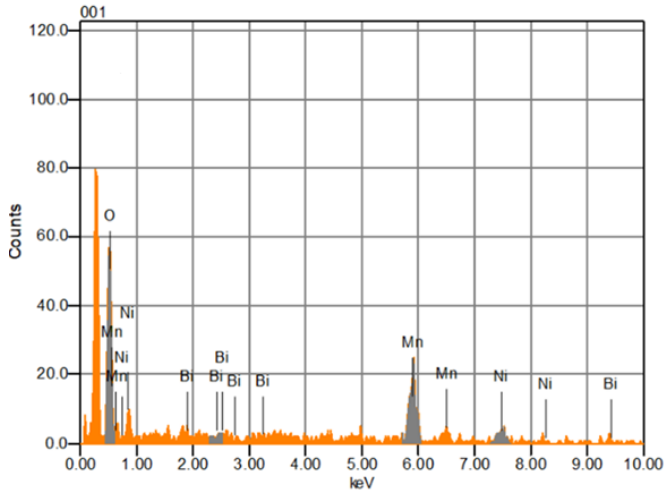


Figura 6. Espectro EDS para muestras LNBMO.

La determinación del bandgap se llevó a cabo por dos metodologías: el método óptico y el método electroquímico. En primera instancia, se tomaron mediciones de reflectancia difusa por UV-Vis de las muestras, como se muestra en la figura 7a. Partiendo de esto se utilizó la ecuación de Tauc con n=0.5, que indica una transición indirecta, comúnmente asociable a este tipo de materiales. Como segunda metodología se utilizó la voltamperometría cíclica para determinar la banda prohibida. Esta determinación consiste en la estimación de los valores de HOMO y LUMO a través del gráfico de voltamperometría cíclica, en donde el HOMO se estima con el valor del inicio de potencial de oxidación y el LUMO con el valor de inicio de potencial de reducción, véase figura 7b. .

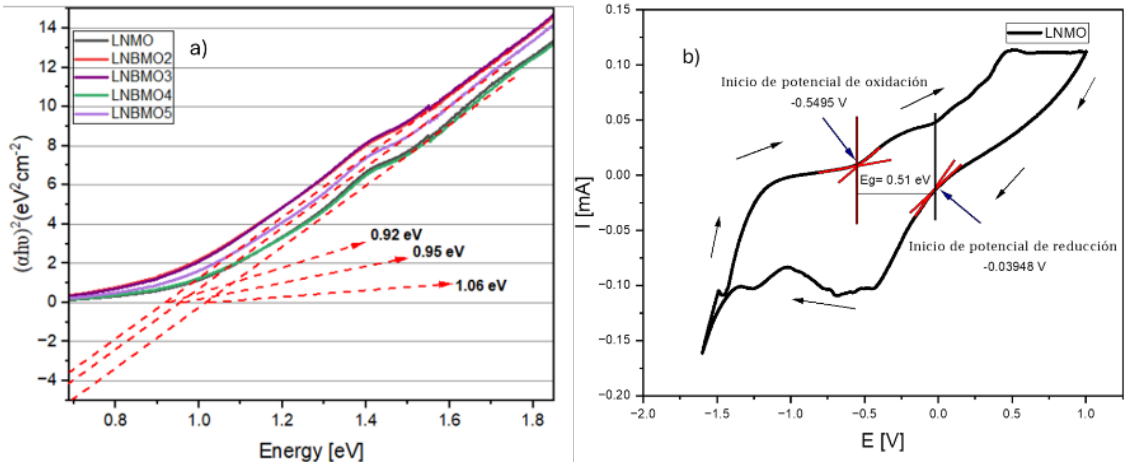


Figura 7. a) Compilado de gráficos de Tauc de los materiales sintetizados. b) Voltamperograma cíclico de LNMO.

La Tabla 2 muestra un resumen de los valores de band gap obtenidos por ambas metodologías para todas las muestras sintetizadas. Cabe notar que existe una notable diferencia. Esto se puede deber a que el método óptico reside en una estimación a partir del espectro de reflectancia y las muestras son pr naturaleza de color negro, es decir presentan una saturación de absorción base que implica una menor diferenciación en las características electrónicas del material.

Tabla 2. Resumen de valores de bandgap óptico y electroquímico

Muestra	Banda prohibida óptico [eV]	Banda prohibida electroquímico [eV]
LNMO	**1.05**	**0.51**
LNBMO2	**0.93**	**0.29**
LNBMO3	**0.94**	**0.54**
LNBMO4	**1.06**	**0.51**
LNBMO5	**1.01**	**0.51**

Los resultados del rendimiento fotocatalítico del material para la generación de hidrógeno se presentan en la figura 8. Los resultados muestran que LNMO es la muestra con mayor producción de H_2. Estos resultados pueden atribuirse a la disminución de la banda prohibida de los materiales respecto al prístino, alejándose del valor mínimo para realizar la división de la molécula de H_2O. Ya que, según la literatura, para la ruptura de la molécula del agua en fotocatálisis, se requieren potenciales de reducción y oxidación que permitan la separación del oxígeno e hidrógeno, y para ello, es necesario que la diferencia entre estos potenciales sea de al menos 1.23 eV. La tabla 3 muestra los resultados de la tasa de generación de hidrógeno para cada una de las muestras, de modo que se confirman los valores para la evolución de hidrógeno presentado en la figura 10.

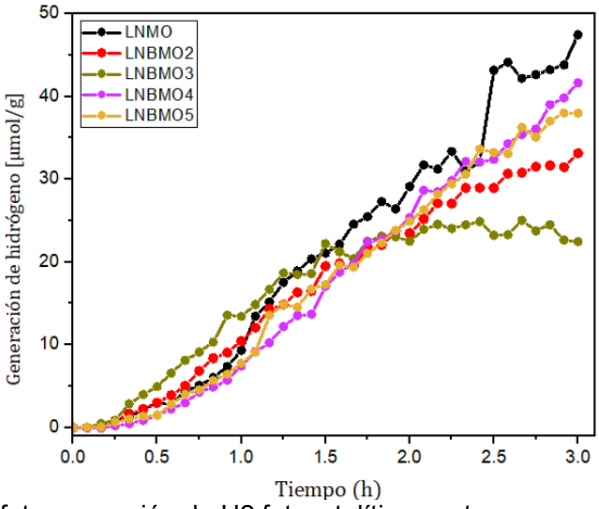


Figura 8. Resultados de fotogeneración de H2 fotocatalíticamente.

Tabla 3. Resumen de valores de generación de hidrógeno

Muestra	Tasa de generación de H_2 [µmol / gh]
LNMO	11.41
LNBMO2	9.95
LNBMO3	10.67
LNBMO4	9.25
LNBMO5	9.66

CONCLUSIONES

Mediante el método de combustión se obtuvo el material prístino y los materiales dopados; esto se justifica mediante las diversas caracterizaciones estructurales realizadas, refiriéndose principalmente al refinamiento de Rietveld, pues se encontró un modelo que determinara las características buscadas de la estructura cristalina: obtención de la fase $\mathbf{Fd\bar{3}m}$ y la inserción del bismuto en los sitios 16*d*. Seguidamente, esto se vio reforzado con la caracterización de FTIR. Las propiedades ópticas y electroquímicas encontraron también modificación debido a la presencia del bismuto, pues, ambas modalidades del valor de la banda prohibida, en la mayoría de los materiales, disminuyeron respecto al material prístino. Esto conduce a su vez a una modificación en el desempeño en la generación de hidrógeno, pues al disminuir el valor de banda prohibida frente al material prístino, también lo hace la generación de este gas, pues al alejarse del valor ideal para que la reacción fotocatalítica se lleve a cabo (1.23 eV) afecta detrimentalmente la producción.

BIBLIOGRAFÍA

1. B.E. Murdock, J. Cen, A.G. Squires, S.R. Kavanagh, D.O. Scanlon, L. Zhang y N. Tapia-Ruiz, “Li-site defects induce formation of Li-rich impurity phases: implications for changes distributions and performance of LiNi0.5-xMxMn1.5O4 cathodes (M=Fe and Mg; X=0.05-0.2)”, Advanced Materials, Vol. 36, 32, 2024; 2400343
2. C. Zhu, C. Han y T. Akiyama, “Controlled synthesis of LiNi0.5Mn0.5O4 cathode materials with superior electrochemical performance through urea-based solution combustion synthesis”, RSC Advances, Vol. 5, 65, 2015; pp. 49831-49837.
3. Statical Review of World Energy (2024) en energyinst.org (978 1 78725 408 4). Recuperado 20 de mayo de 2025 de https://www.energyinst.org/statistical-review.
4. International Energy Agency (2024). iea.org recuperado 20 de mayo de 2025 de http://www.iea.org/

5. R. Vakulchuk, I. Overland y D. Scholten, “Renewable Energy and Geopolitics: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 122, 2020; 109547.
6. P. Moriarty y D. Honnery, “What is the global potential for renewable energy?”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, 1, 2011; pp. 244-252.
7. N. Armaroli y V. Balzani, “The hydrogen issue”, Chemsuschem, Vol. 4, 1, 2010; pp. 21-36.
8. Y.M.V. Rodriguez y A.E.O., “Cálculo de parámetros de rapidez cinética química, química enzimática y catálisis heterogénea”, UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuatitlán.
9. A. Mills y S.L. Hunte, “An overview of semiconductor photocatalysis”, Journal of Photochemistry and Photobiology a Chemistry, Vol. 108, 1, 1997; pp. 1-35.
10. G. Nazri y G. Pistoia,”Lithium batteries: science and technology”, Springer ebooks
11. J. Rodriguez-Carbajal, “Fullprof suite: program for Rietveld analysis and pattern matching”, [Software] Institut Laue-Langevin, 2023. http://www.ill.eu/sites/fullprof/

ESTUDIO DE FALLAS EN PILAS DE MAMPOSTERÍA A COMPRESIÓN EMPLEANDO LA MICROMODELACIÓN Y VARIACIÓN PARAMÉTRICA

Yuliza San Juana Garcia Vázquez, Milena Mesa Lavista, José Álvarez Pérez y Jorge Humberto Chávez Gómez

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, (FIC-UANL). Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
yulizasjgarcia96@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal analizar, a través de simulaciones numéricas, la influencia de tres parámetros en la resistencia a compresión de la mampostería. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron: (1) la resistencia a compresión de los bloques huecos de concreto (BHC), (2) la resistencia del mortero y (3) la colocación del mortero. La evaluación del comportamiento estructural de la mampostería se realizó a través de prismas de BHC, empleando un modelo numérico tridimensional. La geometría del modelo corresponde a un prisma de tres bloques, cada uno con dimensiones de 397 x 197 x 147mm, unidos por juntas de mortero de 10 mm y cabeceado con azufre con un espesor de 4 mm. Se variaron las propiedades de los materiales como sigue: BHC en tres niveles de resistencia (15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa) y mortero en dos niveles de resistencia (7.50 MPa y 17.09 MPa), el material del cabeceo se manejó como una variable determinista. La forma de colocación del mortero se varió en dos niveles (en área neta y caras laterales). Para analizar el comportamiento a compresión, se realizaron simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos. Cada componente del prisma (BHC, mortero y cabeceo) fue modelado por separado y se definió una interacción de contacto general entre ellos. La calibración del modelo numérico se realizó con resultados experimentales previamente realizados [1]. Como principales resultados se obtuvo el esfuerzo máximo, la deformación, el módulo de elasticidad (E) y el tipo de falla de los prismas. Se realizó una evaluación de la falla en los prismas con una resistencia heterogénea en sus BHC, donde se observaron diferencias significativas en el tipo de falla cuando se varía la colocación del mortero. A partir de los resultados, se evidencia que, un prisma con el mortero colocado en caras laterales tiende a fallar por tensión, debido a que la concentración de esfuerzos es mayor en las áreas donde se encuentra la discontinuidad en la unión del mortero. Por otro lado, la variabilidad de la resistencia de los BHC tuvo un impacto significativo. Se encontró una diferencia del 22% en los esfuerzos máximos y el módulo de Young, así como una diferencia del 17% en la deformación última. Evidenciando que la heterogeneidad en los materiales influye en la capacidad a compresión de la mampostería.

INTRODUCCIÓN

La mampostería es un material utilizado en la construcción principalmente para resistir cargas gravitacionales. Por esta razón, se han realizado numerosas investigaciones para comprender el comportamiento a compresión de la mampostería [2, 3]. La mampostería de bloques huecos de concreto (BHC) tiene como ventaja la reducción de mano de obra en comparación con las unidades tradicionales de arcilla u otros materiales, debido a que el número de unidades a colocar es menor y simplifica los trabajos en obra. Además, los muros de mampostería con BHC requieren menos mortero, lo que implica un ahorro en mano de obra y materiales. También facilita el refuerzo de los muros y proporciona al usuario una buena resistencia térmica y acústica [4].

La literatura expone que el comportamiento ante la falla de la mampostería de BHC es completamente diferente al de la mampostería tradicional de arcilla [5]. Por lo tanto, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones [2, 6, 7] para caracterizar las propiedades mecánicas de la mampostería de BHC mediante el uso de pilas y muretes sometidos a compresión axial. Los mecanismos de falla, el comportamiento esfuerzo – deformación y los métodos para predecir la resistencia a compresión han sido establecidos en estudios experimentales y numéricos [8-12].

Algunas investigaciones sugieren que la resistencia a compresión de la unidad de mampostería es la variable principal para determinar su resistencia a compresión [7, 13, 14]. Sin embargo, son pocas las investigaciones orientadas específicamente al estudio del comportamiento físico – mecánico del BHC [5].

Con el desarrollo del método de elementos finitos, los estudios numéricos se utilizan cada vez más, y es bastante posible considerar la variación de las propiedades de los materiales de mampostería. Por otro lado, se ha detectado en investigaciones previas [6, 9], que los bloques de diferentes lotes no presentan las mismas propiedades. Por estas razones principalmente, el objetivo de la presente investigación es variar las propiedades del BHC en prismas de tres hiladas sometidos a compresión axial, utilizando la modelación numérica.

Colocación del mortero en la mampostería

Una de las tendencias actuales en las construcciones con mampostería de BHC es el tipo de colocación del mortero sobre caras laterales (*face*) Las normativas de Canadá [15] y Australia [16] especifican que cuando se utilizan bloques huecos, debe emplearse la colocación del mortero en caras laterales. Otras normas, como la mexicana [17], la americana [18] y la europea [13], indican que el mortero debe de colocarse en toda la superficie del bloque, en otras palabras, en su área neta (*full*), aunque en la práctica profesional se suele colocar únicamente en caras laterales.

Investigaciones recientes [8-11] han identificado los mecanismos de falla cuando el mortero se coloca tanto en área neta como en caras laterales, y han propuesto expresiones para calcular la resistencia a compresión en la mampostería de BHC. El inconveniente de dichas expresiones es que se basan en el método de resistencia unitaria (*USM*, por sus siglas en ingles), el cual no considera la variabilidad en la resistencia a compresión de los bloques. Por esta razón, otras investigaciones prefieren aplicar el método del ensayo de los prismas (*PTM*, por sus siglas en ingles), aunque esta presenta inconvenientes en términos de costo, tiempo e infraestructura de ensayo. Sin embargo, el PTM considera la posible variabilidad en la resistencia de los bloques dentro de la respuesta estructural y es menos conservador que el USM.

En esta investigación, el objetivo principal es obtener la resistencia a compresión de los prismas de BHC de tres hiladas utilizando el método de elementos finitos (*MEF*), considerando ambas colocaciones del mortero (área neta y caras laterales), y variando la resistencia a compresión de los bloques y del mortero. Bajo la hipótesis de que existirán diferencias significativas, los resultados serán comparados con aquellos obtenidos bajo la suposición de que los bloques del prisma tienen una misma resistencia a compresión.

METODOLOGÍA

La primer etapa de la metodología consistió en la recopilación de datos provenientes de investigaciones predecesoras [1, 19]. La recolección de datos consistió en obtener datos físico – mecánicos de los materiales y su posible variación, y modelos numéricos calibrados a partir de ensayos experimentales, asegurando la confiabilidad para los resultados de esta investigación.

Como parte de la segunda etapa, se llevó a cabo una calibración numérica de las interacciones en el modelo, para optimizar el costo computacional. Esta calibración se realizó a partir de los modelos numéricos obtenidos en la investigación de Garcia – Cedeño [1]. Para este proceso, se consideró una distribución homogénea en la resistencia de todos los BHC que conformaban el prisma de estudio. Esta etapa fue fundamental para ajustar los parámetros de interacción entre los componentes del prisma dentro del modelo numérico.

Posteriormente, se implementó una simulación paramétrica utilizando un enfoque sistemático y determinista. En esta fase, se establecieron distintas combinaciones clave de los parámetros, permitiendo analizar su influencia en la respuesta estructural del prisma de BHC. En particular, se

definieron tres niveles de resistencia para los bloques, dos tipos de resistencia en el mortero y dos configuraciones distintas en la colocación del mortero en el prisma. Esta variabilidad en los parámetros permitió evaluar el comportamiento mecánico de la mampostería sometida a carga axial.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para examinar el impacto de las diferentes combinaciones de resistencia de los BHC y su influencia en la respuesta global de la mampostería, identificando las variables influyentes en su comportamiento a compresión.

Como resultados de los análisis, se pudieron identificar siete variables de respuesta, las cuales se emplearon para caracterizar el desempeño mecánico de la mampostería:

- Esfuerzo máximo ($\boldsymbol{\sigma_{máx}}$): valor máximo de esfuerzo alcanzado antes de la falla.
- Deformación en el esfuerzo máximo ($\boldsymbol{\varepsilon}$): deformación correspondiente al punto en el que se alcanza el esfuerzo máximo.
- Deformación en la falla ($\boldsymbol{\varepsilon}$): deformación total registrada en el momento del colapso de la pila de mampostería.
- Modulo elástico ($\mathbf{E}$): relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del material.
- Deformación plástica equivalente a compresión ($\boldsymbol{PEEQ}$) en la falla: deformación plástica concentrada en la zona sometida a esfuerzos de compresión.
- Deformación plástica equivalente a tensión ($\boldsymbol{PEEQT}$) en la falla: deformación plástica concentrada en la zona sometida a esfuerzos de tensión.
- Modo falla: patrón de fractura observado en la pila de mampostería, determinado por la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura.

Este conjunto de variables permite evaluar de manera detalla el comportamiento de la mampostería BHC sometidas a carga axial, proporcionando información relevante para comprender la influencia de la variabilidad en los parámetros mecánicos de los materiales.

La metodología se divide en dos fases, la primera es referente a la recolección de datos experimentales; y la segunda fase es la definición del diseño de experimento.

- Recolección de datos experimentales

Para la realización de las simulaciones numéricas, se utilizaron materiales cuya caracterización se basó en investigaciones previas llevadas a cabo en el área metropolitana de Monterrey [1, 19]. Estos estudios proporcionaron datos experimentales sobre las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de la mampostería.

Para definir la propiedad del *Mortero 1*, se tomó como referencia el estudio realizado por Zahara [2] en el cual se siguieron las especificaciones de la norma ASTM-C-780-20 [20] diseñando un mortero con una resistencia media compresión de 7.50 MPa. Por otro lado para el *Mortero* 2, se tomó como referencia la investigación de Garcia – Cedeño [1] en la cual diseño una mezcla de mortero según las especificaciones de la norma NTC-Mampostería [17] con resistencia media a compresión de 17.09 MPa. Para la selección de la resistencia a compresión, se realizó una conversión a la resistencia equivalente en cubos de 5 cm de arista, con el fin de garantizar la uniformidad y comparabilidad de los resultados.

Las propiedades físico – mecánicas de los BHC utilizadas en el modelado de la mampostería, se tomó de trabajos precedentes [1, 19]. La geometría definida del bloque es de 39.70 cm x 19.70 cm x 14.70 cm (largo x alto x ancho). Uno de los parámetros fundamentales en la clasificación de los bloques es la relación entre el área neta y el área bruta, lo cual, en este caso, es del 56%.

Las resistencias media de los BHC fueron tomadas de la literatura [1, 2, 21] teniendo como objetivo seleccionar valores con una diferencia entre ellos inferior al 5 MPa, asegurando una variabilidad

representativa de una condición real de obra [7]. Las resistencias de los BHC son (1) baja resistencia 15.40 MPa, (2) media resistencia 18.10 MPa y (3) alta resistencia 19.80 MPa.

Posteriormente a la definición de cada uno de los materiales por separado, se procedió a determinar las dimensiones de la pila de mampostería que se modelo numéricamente. La geometría de la pila de mampostería con tres BHC de 39.70 cm x 61.10 cm x 14.70 cm (largo x alto x ancho) fue definida contemplando un espesor de 1 cm de junta de mortero. La relación de esbeltez (alto/ancho) del prisma es de 4.16, la cual representa estabilidad en el elemento estructural según la NTC – Mampostería [17].

- Definición del diseño experimental

Una vez definida las características mecánicas de los materiales a utilizar en el modelo del prisma, se realizó un análisis paramétrico considerando las variables definidas.

El diseño de experimentos fue llevado a cabo mediante el software Design Expert, así como para realizar el análisis de sensibilidad. Esto permitió establecer una metodología estructurada para la asignación de valores de resistencia dentro del modelo, garantizando que la variabilidad del material estuviera representada de manera realista en la simulación. En la Figura , se representan los factores y los niveles en que fueron variados cada uno, y que se tuvieron en cuenta para el diseño experimental.

A partir de las variables definidas y las combinaciones generadas en el diseño experimental, se obtuvieron un total de 27 combinaciones posibles para cada variación de resistencia de mortero y su colocación, llevando a un total de 108 simulaciones distintas.

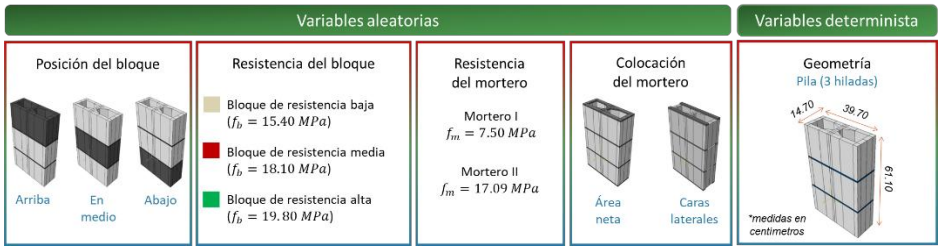


Figura 1. Variables resultantes de la investigación.

RESULTADOS

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos del estudio numérico realizado. Los resultados se organizan en distintas secciones con el objetivo de examinar de manera detallada la influencia de las variables consideradas en la presente investigación.

En primer lugar, se exponen las curvas esfuerzo – deformación, generadas a partir de las simulaciones numéricas, las cuales permiten evaluar la respuesta general de los especímenes ante cargas axiales. Posteriormente, se presentan los resultados relacionados con la Deformación Plástica Equivalente (*PEEQ* y *PEEQT*), con el fin de identificar las zonas críticas y los mecanismos de falla desarrollados en los distintos componentes de la estructura.

La tercer sección está enfocada en el análisis de la influencia de la posición del bloque hueco de concreto (BHC) dentro del ensamblaje, evaluando como su ubicación afecta la distribución de esfuerzos. Finalmente, se realiza una estimación de la resistencia de la mampostería utilizando referencias de normas internacionales y propuestas recientes en la literatura especializada, con el propósito de contrastar los resultados numéricos con criterios empíricos establecidos.

Curva Esfuerzo – deformación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las curvas esfuerzo – deformación generadas a partir de las simulaciones numéricas para cada una de las combinación de materiales. Estas curvas permiten evaluar el comportamiento general del sistema bajo cargas axiales, proporcionando información clave como el esfuerzo máximo y el módulo elástico.

De los resultados obtenidos, es importante destacar que el esfuerzo máximo registrado en cada curva corresponde al valor pico alcanzado antes del inicio de la falla estructural. Este valor representa la resistencia última de la mampostería, es decir, la capacidad máxima del sistema para resistir carga axial antes de que se generen mecanismos de inestabilidad o colapso.

En la Figura se pueden observar los resultados de la mampostería con la colocación del mortero en área neta (*full*). Se grafican múltiples curvas que representan las distintas combinaciones evaluadas, considerando las propiedades mecánicas tanto de los BHC como del mortero. Entre estas curvas, se destacan aquellas correspondientes a la mampostería con BHC de resistencia homogénea, con el objetivo de establecer una comparación clara frente a las configuraciones con resistencia heterogénea en los bloques.

En la mampostería con *Mortero 1* (ver Figura , a), el Esfuerzo Máximo presenta una variación del 17.79 % entre las distintas combinaciones analizadas. Para la mampostería con *Mortero 2* (ver Figura , b), la variación alcanza un 22.24 %. En cuanto al Módulo de Elasticidad, se observaron variaciones de 18.52 % y 18.56 % para el *Mortero 1* y *Mortero 2* respectivamente. Los resultados indican una mayor variación en la resistencia de la mampostería, cuando se utiliza un mortero con mayor desempeño en su resistencia.

Cabe destacar que el Esfuerzo Máximo está directamente influenciado por la resistencia del mortero, observándose diferencias en el intervalo de 2.10 a 3.24 MPa entre las distintas configuraciones. Este comportamiento refleja que, a medida que aumenta la resistencia de los BHC, también lo hace la variabilidad en la resistencia global de la mampostería.

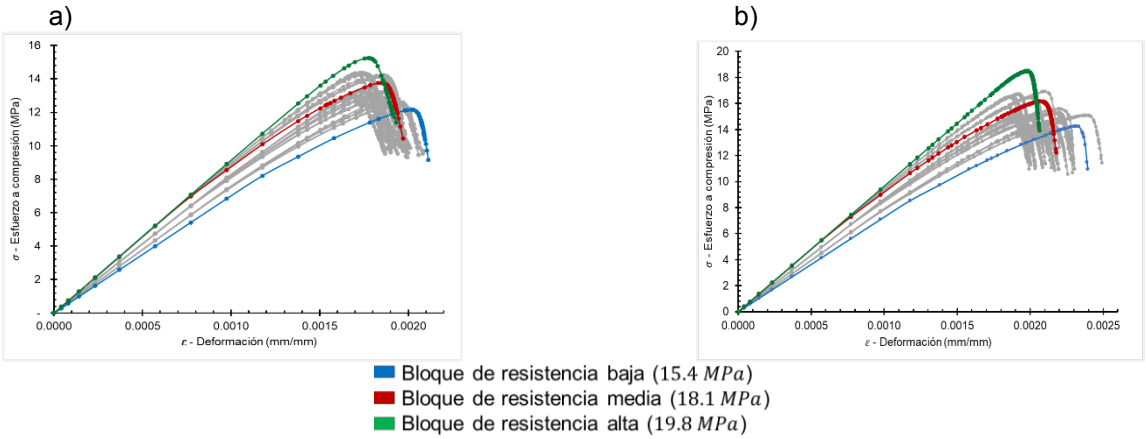


Figura 2. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en área neta (full)

Asimismo, en la Figura se presentan los resultados correspondientes a los especímenes de mampostería con la colocación del mortero en caras laterales (*face*). En la Figura (a) se ilustran los resultados obtenidos con el *Mortero 1*, donde el Esfuerzo Máximo mostró una variación del 21.09 % entre las diferentes configuraciones. En tanto, en la Figura (b), correspondiente al *Mortero 2*, dicha variación fue del 19.41 %. En lo que respecta al Módulo de Elasticidad, se registraron variaciones del 18.18 % y 19.93 % para el *Mortero 1* y el *Mortero 2*, respectivamente, lo que indica un

comportamiento relativamente constante entre ambas configuraciones del mortero (área neta y caras laterales).

Es importante resaltar que, a diferencia de los especímenes con mortero en área neta, en esta modalidad de colocación (*face*) el Esfuerzo Máximo no se ve significativamente afectado por la resistencia del mortero, ya que las diferencias observadas entre ambas resistencias fueron menores a 1 MPa. Este comportamiento sugiere que, cuando el mortero se aplica únicamente en las caras laterales, la resistencia de la mampostería depende en mayor medida de los BHC, mientras que la influencia del mortero se reduce considerablemente.

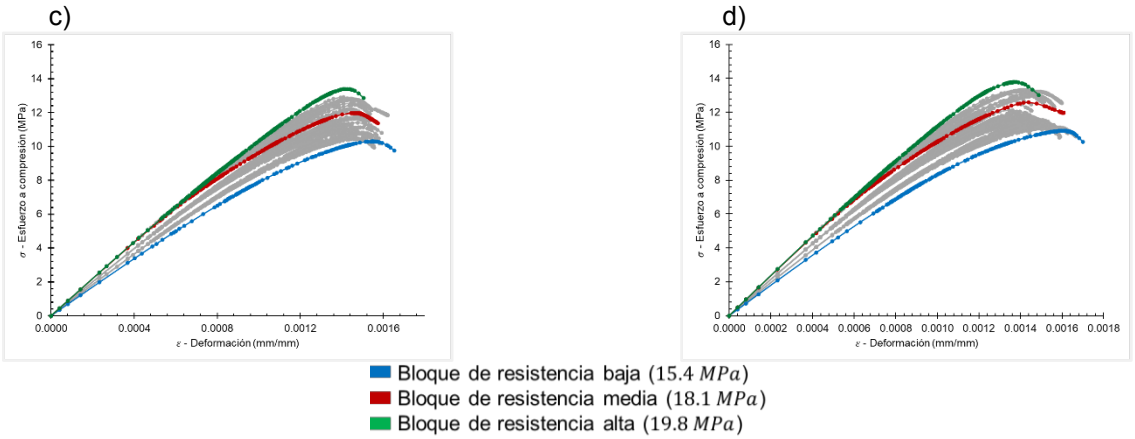


Figura 3. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en caras laterales (face)

Las variaciones más significativas en los resultados del Esfuerzo Máximo y del Módulo de Elasticidad se observaron en los especímenes que incorporan uno o dos BHC de baja resistencia (15.40 MPa) en combinación con BHC de alta resistencia (19.80 MPa). Esta configuración de resistencia heterogénea genero una mayor dispersión en la respuesta estructural del sistema. Cabe destacar que esta tendencia se presentó de forma consistente en ambas configuraciones de colocación del mortero, tanto en área neta (*full*) como en caras laterales (*face*). Estos resultados indican que la diferencia entre las propiedades mecánicas de los BHC tiene un impacto relevante en la capacidad resistente y rigidez global de la mampostería, independientemente de la forma en que se aplique el mortero.

Deformación plástica equivalente

Como parte del análisis numérico, se obtuvieron los resultados de Deformación Plástica Equivalente tanto en compresión (PEEQ) como en tensión (PEEQT). Estos resultados corresponden a un parámetro que cuantifica el grado de deformación plástica irreversible que experimenta el material bajo carga.

En los últimos años, diversas investigaciones han empleado la modelación numérica para determinar la Deformación Plástica Equivalente que indica la falla por aplastamiento ($\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$) o por agrietamiento ($\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$), para distintos materiales. Estos valores resultan fundamentales para identificar el límite de deformación a partir del cual se considera que un material ha alcanzado su estado de falla plástica. En el contexto de esta investigación, dichos valores permiten establecer los límites de deformación para los bloques huecos de concreto (BHC) y el mortero, facilitando así la evaluación del comportamiento estructural de los especímenes de mampostería.

La Tabla presenta los valores de deformación en la falla propuestos en la literatura [8] y utilizados para cada uno de los materiales considerados en esta investigación. Cabe destacar que estas

deformaciones varían en función de las propiedades mecánicas específicas de cada material, tales como su resistencia a compresión, módulo de elasticidad y ductilidad.

	Bloques huecos de concreto (BHC)			Mortero	
Resistencia a compresión	15.40 MPa	18.10 MPa	19.80 MPa	7.50 MPa	17.09 MPa
$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$	0.38 %	0.24 %	0.18 %	0.52 %	0.13 %
$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$	0.016 %	0.016 %	0.016 %	0.028 %	0.018 %

Tabla 1. Propiedades mecánicas del BHC y mortero, utilizado en esta investigación y obtenido por diferentes autores de la literatura [8].

La Figura presenta la configuración de falla observada en especímenes de mampostería con BHC de resistencia homogénea, empleando el *Mortero 1* y considerando ambas modalidades de colocación del mortero: área neta (*full*) y en caras laterales (*face*). Con el objetivo de analizar y evaluar la influencia del tipo de colocación del mortero en la configuración de la falla del sistema de mampostería.

Los resultados permiten observar que la configuración de la falla está fuertemente influenciada por el tipo de colocación del mortero. En los especímenes con mortero colocado en área neta (*full*), la falla se concentra principalmente en las caras frontales y laterales de los BHC, lo cual sugiere una distribución más uniforme de deformaciones y una interacción más integral entre bloque y mortero. En contraste, en los especímenes con mortero colocado únicamente en las caras laterales (*face*), la falla se localiza predominantemente en el alma de los BHC y en sus caras laterales, evidenciando zonas de debilidad estructural generadas por la discontinuidad en el contacto entre elementos. Esta comparación resalta la importancia de la colocación del mortero como un factor predominante en el mecanismo de falla de la mampostería.

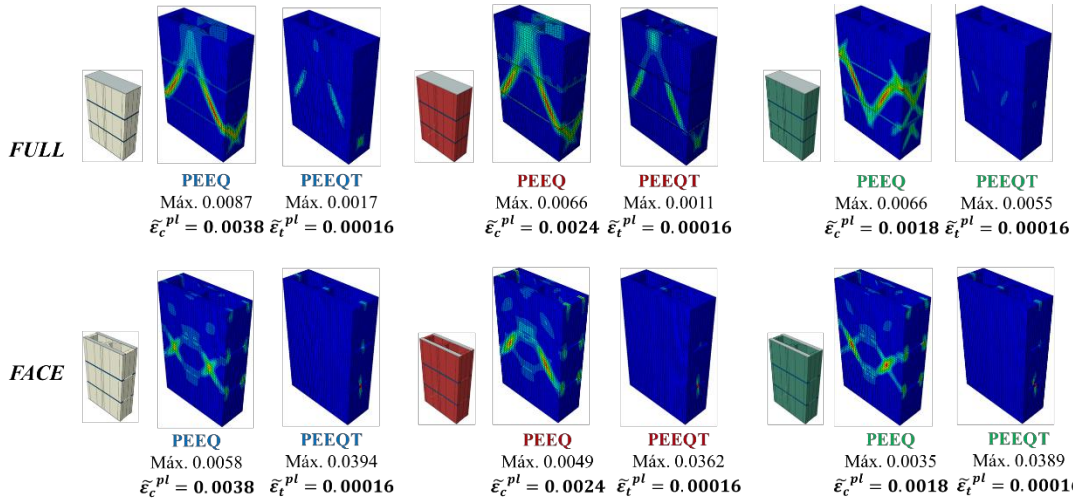


Figura 4. Configuración de falla en la mampostería con ambas colocaciones del mortero (full y face) con Mortero 1.

Así mismo, se llevó a cabo el análisis de la deformación y la configuración de falla aplicando las variables planteadas en la presente investigación. En la Figura se evaluó cada una de las piezas para poder observar el comportamiento de falla tanto en el BHC como en el mortero.

En la Figura (a) se presentan los resultados correspondientes al comportamiento de un espécimen de mampostería compuesto por bloques huecos de concreto (BHC) de distinta resistencia: un BHC de baja resistencia (15.40 MPa) colocado en la parte intermedia, y un BHC de alta resistencia (19.80 MPa) en la parte superior e inferior. El mortero empleado corresponde al *Mortero 2*, aplicado en área neta (*full*).

La variable analizada es la Deformación Plástica Equivalente a Compresión (*PEEQ*), y los resultados muestran que las mayores concentraciones de deformación plástica se localizan en las caras frontales y laterales de los BHC. Específicamente, el bloque de baja resistencia presenta deformaciones más significativas en comparación con el de alta resistencia, lo cual es consistente con su comportamiento mecánico: a menor resistencia, mayor deformación plástica.

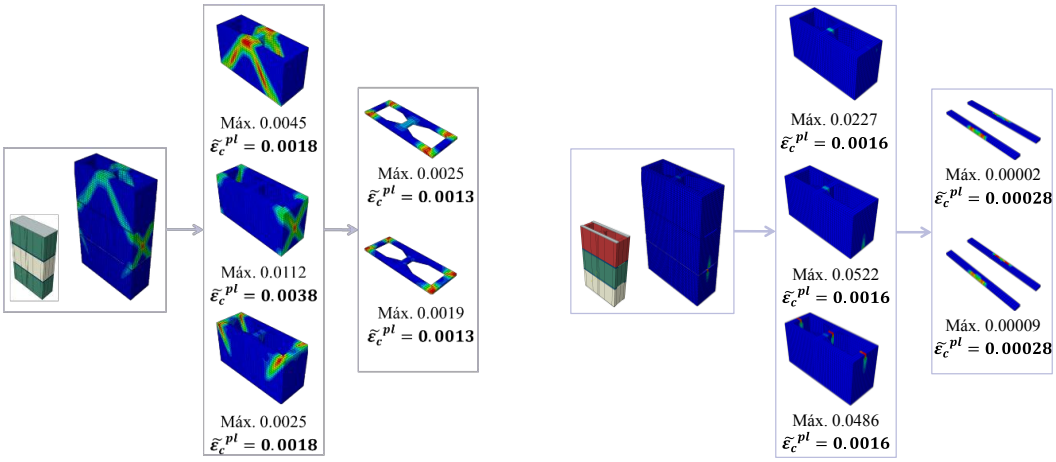
En cuanto al mortero, también se identifican zonas de falla, aunque las deformaciones en este material no exceden considerablemente el límite correspondiente a su estado de falla. Las concentraciones de deformación se ubican principalmente en las esquinas del mortero, lo que sugiere que la falla se presenta en estas zonas.

Por su parte, la Figura (b) muestra los resultados obtenidos para otro espécimen de mampostería, el cual está conformado por BHC con distintas resistencias dispuestos de la siguiente manera: un BHC de resistencia media (18.10 MPa) en la parte superior, un BHC de alta resistencia (19.80 MPa) en la zona intermedia, y un BHC de baja resistencia (15.40 MPa) en la base. En este caso, el mortero utilizado corresponde a un *Mortero 1*, aplicado en las caras laterales (*face*) de los bloques.

En este espécimen se analizó la Deformación Plástica Equivalente a Tensión (*PEEQT*). Los resultados indicaron que las mayores concentraciones de deformación plástica se presentan en el alma y en las caras laterales de los BHC, lo cual se atribuye a la discontinuidad generada por la junta de mortero, específicamente en las zonas donde no existe continuidad entre bloque a través del mortero. Es decir, las deformaciones tienden a concentrarse en las regiones donde el contacto estructural entre los bloques se ve interrumpido.

De manera interesante, el BHC que presentó mayor deformación plástica fue el de mayor resistencia, lo cual podría estar relacionado con su posición intermedia dentro de la mampostería, donde actúa como un punto de transición en la transmisión de esfuerzos.

Respecto al comportamiento del mortero, se identificó una zona de concentración de deformación localizada en el centro del material, sin que ninguna de las dos juntas alcanzara niveles de deformación plástica indicativos de agrietamiento o falla completa. Esto sugiere que, cuando el mortero se coloca únicamente en caras laterales, su falla ocurre en una etapa posterior al daño en los BHC, actuando, así como el último componente en alcanzar su límite resistente dentro del sistema de mampostería



a) b)

Figura 5. Deformación Plástica Equivalente a Compresión (*PEEQ*) y a Tensión (*PEEQT*) en la mampostería con variación en la resistencia de sus BHC.

Influencia de la posición del BHC

La influencia de la posición del bloque se analizó mediante diagramas de caja (box-plot). Un diagrama de caja muestra el rango en el que se encuentra el 50% central de los valores. La línea que divide la caja representa la mediana, mientras que los bordes inferior y superior corresponden al primer y tercer cuartil, respectivamente. Las líneas que se extienden desde la caja (llamadas "bigotes") indican los valores mínimo y máximo, excluyendo los valores atípicos. Los bigotes más largos sugieren una mayor variabilidad en los datos. Además, la simetría o asimetría de los datos puede deducirse de la posición de la caja con respecto a los bigotes.

- Análisis de resistencia

Para los bloques con una resistencia a compresión de 19.80 MPa, los diagramas de caja (Figura) muestran una mayor dispersión, lo que indica una mayor variabilidad en los valores de esfuerzo máximo. Esto sugiere que los bloques de mayor resistencia presentan una respuesta más variable, posiblemente debido a distribuciones no uniformes de esfuerzo o a una mayor sensibilidad frente a imperfecciones o condiciones de borde.

A medida que la resistencia del bloque disminuye, esta variabilidad se reduce. En los bloques de 18.10 MPa, los diagramas de caja son más pequeños, indicando una respuesta más consistente bajo carga. En los bloques de 15.40 MPa, las cajas son muy pequeñas, lo que refleja baja variabilidad en los datos. Esto sugiere que los bloques más débiles tienden a fallar de forma más uniforme, minimizando la influencia de otros factores estructurales. Una posible explicación es que los bloques más resistentes tienden a concentrar esfuerzos, mientras que los más débiles permiten una redistribución más uniforme de las cargas.

- Análisis de Módulo de Elasticidad

En el análisis del módulo de elasticidad (ver Figura), los diagramas de caja presentan una dispersión similar en todos los casos. Además, todas las distribuciones muestran una asimetría positiva, ya que la media es mayor que la mediana. Esto indica que ni la posición del bloque ni su resistencia a compresión influyen significativamente en la rigidez de los prismas.

- Análisis de deformaciones

La deformación se evaluó en el punto de esfuerzo máximo. Como se muestra en la Figura , existe una mayor variabilidad en la deformación en todas las variables analizadas. Por ejemplo, los bloques con una resistencia de 19.80 MPa presentan mayor dispersión cuando se ubican en la parte inferior que cuando están en la posición central. Esto sugiere que la deformación es más sensible a las variaciones en la posición.

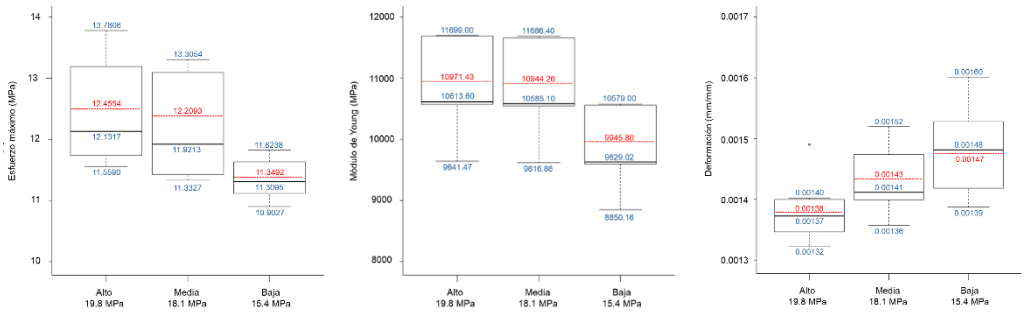


Figura 6. Graficas Blox-plot de la mampostería con Mortero 2, colocado en áreas laterales y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.

Estimación de la resistencia de la mampostería por medio de expresiones matemáticas

Para complementar los resultados obtenidos en esta investigación, se llevó a cabo un análisis de las expresiones propuestas tanto en normativas internacionales como en estudios científicos previos. El objetivo de este análisis fue comparar dichas expresiones con los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas, permitiendo así obtener el porcentaje de error asociado a cada una. Esta comparación facilita la identificación de las expresiones que presentan una mayor precisión respecto a los datos experimentales, lo cual resulta especialmente útil para su aplicación en el diseño de los elementos de mampostería en situaciones donde no se cuenta con la posibilidad de realizar ensayos experimentales.

- Discusión de expresiones propuestas por normativas internacionales

Se examinaron las fórmulas matemáticas propuestas en las normativas internacionales para el cálculo de la resistencia en la mampostería, estas resistencias fueron estimadas usando el Método de Resistencia por Unidad por sus siglas en inglés *USM*. En otras palabras, se tomó como referencia la resistencia de una pieza individual, es decir la resistencia de un *BHC*.

Para facilitar la compresión de los resultados y permitir una comparación adecuada se calculó el Error Medio Absoluto (*MAE*) permitiendo determinar el grado de concordancia tomando como valor patrón la resistencia media a la compresión, mientras que los valores estimados corresponden a los obtenidos mediante las formulaciones propuestas por las normativas evaluadas. Teniendo como objetivo identificar cuál de las alternativas proporciona una mayor seguridad estructural y un mejor ajuste a la realidad física de la estructura.

En la Figura se muestran los resultados de manera gráfica, para los casos con la colocación del mortero en área neta (*full*) y en caras laterales (*face*), respectivamente.

Los resultados demostraron que la norma mexicana (NTC-M) [17] y la australiana (AS:3800) [16] mostraron errores similares para ambas configuraciones de mortero, con valores superiores a 45 % y 25 % respectivamente. Estos valores reflejan una tendencia conservadora, ya que tienden a subestimar la resistencia real de una estructura de mampostería. Este comportamiento conservador puede ser favorable en términos de seguridad estructural, sin embargo, también implica un sobredimensionamiento de los elementos de mampostería.

En contraste, las normativas Eurocode [13] y TMS [15] mostraron un desempeño significativamente más preciso, lo que demuestra que ambas referencias son más adecuadas para el diseño estructural. En particular, bajo la configuración de área neta (*full*), la normativa estadounidense (TMS) presentó un error inferior al 5 %, lo cual indica una alta aproximación con los resultados numéricos. Por otro lado, en la configuración de caras laterales (*face*), la normativa europea (Eurocode) arrojó un error menor al 15 %, manteniéndose dentro de un rango aceptable de precisión. Estos resultados sugieren que ambas normativas pueden ser utilizadas con mayor confianza para estimar el comportamiento estructural de la mampostería, sin necesidad de recurrir a ensayos experimentales o análisis numéricos avanzados, brindando una eficiencia en tiempos y recursos.

Adicionalmente, los resultados demostraron que existen variaciones significativas entre ambas configuraciones de mortero (*full* y *face*), con diferencias que alcanzan hasta un 20 % de Error Medio Absoluto (*MAE*). Esto sugiere un mejor desempeño y aplicabilidad en la estimación de la resistencia de la mampostería cuando el mortero se coloca en caras laterales (*face*), al presentar resultado más consistentes y cercanos al valor de referencia.

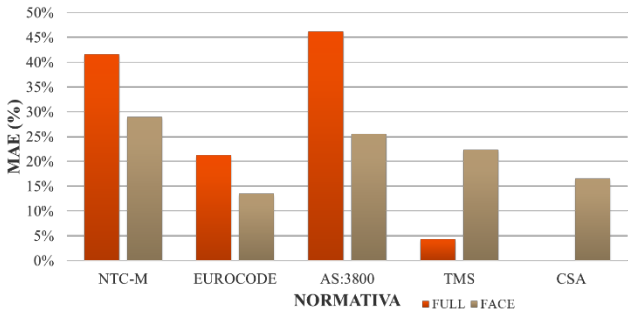


Figura 7. Error Medio Absoluto (MAE) obtenido por USM, utilizando como referencia los resultados obtenidos por el método numérico.

- Discusión de expresiones propuestas en estudios científicos previos

Se realizó un análisis comparativo de las expresiones propuestas por diferentes autores de la literatura para la estimación de la resistencia de la mampostería. Para ello, se calculó el Error Relativo (*Er*) tomando como valor patrón los resultados obtenidos por la simulación numérica. Las expresiones están limitadas a la resistencia del BHC y del mortero, así como también al tipo de colocación del mortero, por lo cual en este caso vamos a agrupar las expresiones de la estimación de resistencia de mampostería para la configuración en área neta (*full*) y caras laterales (*face*) respectivamente.

En la Figura se presentan de forma gráfica los resultados obtenidos, los cuales están señalados para ambos tipos de colocación del mortero como (a) y (b) respectivamente. Adicionalmente, se comparó la resistencia del mortero incorporado en la mampostería.

Los resultados para la configuración del mortero en área neta (Figura , a) mostraron que las expresiones de Álvarez *et al.* (2024) [8] y Sarhat and Sherwood (2014) [11] en su versión I y II, obtuvieron errores menores al 5 %, asegurando una buena aproximación a los resultas. Por otro lado, las expresiones de Fortes *et al.* (2015) [10] mostraron un error relativo del 2.40 % para el mortero con resistencia de 17.09 MPa, indicando así, que su expresión propuesta es altamente recomendable cuando se está diseñado mampostería con un mortero de resistencia elevada.

Asimismo, en los resultados para la configuración del mortero en caras laterales (Figura , b) la formulación de Álvarez *et al.* (2024) [8] presentó un mejor desempeño, con los menores valores de error, siendo inferiores al 10%. En contraste, las expresiones propuestas por Sarhat and Sherwood (2014) [11], tanto en su versión I como II, arrojaron errores significativamente más altos, alcanzado hasta un 40%, lo que sugiere una menor precisión en la estimación del comportamiento en la mampostería.

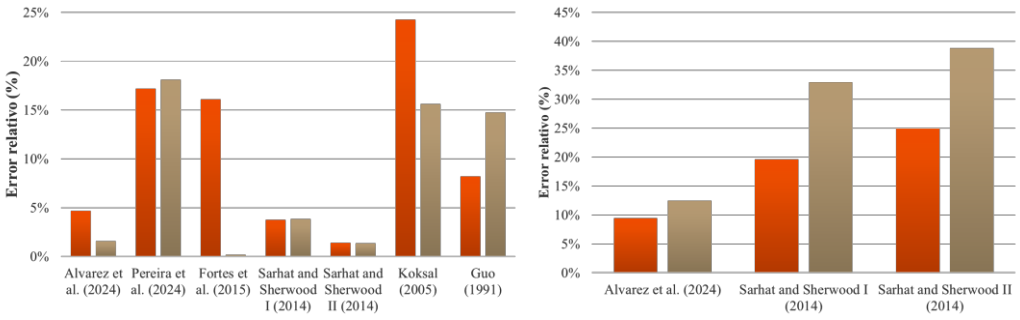


Figura 8. Error relativo obtenido con las expresiones propuestas por la literatura, utilizando como referencia los resultados obtenidos por el método numérico.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado este estudio, se derivaron las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos revelan una variabilidad entre 10 % y 22 % en el esfuerzo máximo al comparar las pilas con bloques homogéneos y heterogéneos, tanto para la colocación del mortero en full y face, como para los dos tipos de mortero. En el caso del módulo de elasticidad los errores estuvieron entre 16% y 20%.
- Las fallas observadas mostraron comportamientos diferentes en cuanto a la colocación del mortero.
- El análisis de sensibilidad demostró que la posición de los bloques con diferentes resistencias dentro del prisma afecta su comportamiento estructural. Los prismas que contienen bloques de menor resistencia contribuyen a una menor dispersión en los valores del esfuerzo máximo. En contraste, con bloques de mayor resistencia favorece una mayor estabilidad en las deformaciones obtenidas asociadas al esfuerzo máximo, mostrando resultados consistentes independientemente de su ubicación. Los módulos no mostraron variaciones significativas independientemente de la posición del bloque.
- Las normas internacionales evaluadas arrojaron un elevado porcentaje de error medio al compararse con los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos. Esto implica una subestimación de hasta 46% de la resistencia. No obstante, las normativas europea y americana se aproximaron con mayor precisión, para la evaluación en face y full respectivamente.
- Las ecuaciones propuestas por Álvarez et al. y por Sarhat y Sherwood fueron las que presentaron un porcentaje menor de error con los resultados obtenidos en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Garcia-Cedeño, R., *Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de bloques huecos de concreto* in *Department of Structures*. 2024, Universidad Autónoma de Nuevo León
2. Zahra, T., J. Thamboo, and M. Asad, *Compressive Strength and Deformation Characteristics of Concrete Block Masonry made with Different Mortars, Blocks and Mortar Beddings Types.* Journal of Building Engineering, 2021. 38: p. 102213.
3. Nalon, G., et al., *Review of recent progress on the compressive behavior of masonry prisms.* Construction and Building Materials, 2022. 320: p. 126181.
4. Estructural, S.M.d.I., *Edificaciones de mampostería/SMIE*. 2019.
5. Barbosa, C., P. Lourenco, and J. Hanai, *On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms.* Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2010. 43: p. 331-344.
6. Álvarez-Pérez, J., et al., *Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks.* 2020. 241: p. 18.
7. Zhu, F., et al., *Spatial variability and sensitivity analysis on the compressive strength of hollow concrete block masonry wallettes.* Construction and Building Materials, 2017. 140: p. 129-138.
8. Álvarez-Pérez, J., et al., *Analysis of behavior and uniaxial compression failure modes in ungrouted hollow concrete block masonry and their implication in design expressions.* 2024: p. 32.
9. Leite, M.D.L.P., E.A.P. Liberati, and G.A. Parsekian, *Estimate models of compression strength of prisms from structural masonry components.* Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2024. 17(6).
10. Fortes, E.S., G.A. Parsekian, and F.S. Fonseca, *Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units.* American Society of Civil Engineers, 2015: p. 12.
11. Sarhat, S.R. and E.G. Sherwoos, *The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry.* Elsevier, 2014: p. 11.

12. Köksal, H.O., C. Karakoç, and H. Yildirim, *Compression Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2005: p. 9.
13. Eurocode-6, *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforces and unreinforced masonry structures*. 2005. p. 125.
14. Mohamad, G., P.B. Lourenço, and H.R. Roman, *Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects.* Cement and Concrete Composites, 2007. 29(3): p. 181-192.
15. Association, C.S., *CSA S304.1-04*, in *Desing of masonry structures*. 2004. p. 148.
16. AS-3800, A.S.A., *AS 3700: Masonry Structures*. 2018.
17. NTCM, *Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. 2023: Cd. México p. 119.
18. Society, T.M., *Building code requirements and specification for masonry structures and companion commentaries*, in *TMS 402/602-ACI 530, ASCE*. 2021.
19. Balandrano-Vázquez, R., *Análisis multifactorial del comportamiento a compresión axial de pilas de mampostería elaboradas con bloques huecos de concreto*, in *Departament of Structures*. 2019, Universidad Autónoma de Nuevo León
20. ASTM, *Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry*. 2020: USA.
21. Fortes, E., et al., *Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks.* Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2017. 10: p. 1273-1319.

DAÑOS SÍSMICOS EN EDIFICIOS ORIGINADOS POR UNIR MUROS A LOS MARCOS DE CONCRETO REFORZADO EN MÉXICO

Abel Martínez Silva, José Manuel Jara Guerrero, Guillermo Martínez Ruiz, Juan Ignacio López Pérez, Eduardo Reyes Negrete

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
2132179h@umich.mx

RESUMEN

El sistema estructural formado por columnas y trabes de concreto reforzado es de los más utilizados para la construcción de edificios de vivienda, oficinas y escuelas en todo el país. Al mismo tiempo, se utilizan muros de mampostería entre las columnas de los edificios para dividir espacios, sin una separación entre ambos elementos. Cuando los muros no se consideran en el proceso de análisis y diseño estructural, las propiedades dinámicas de la edificación son muy diferentes a las reales y su comportamiento durante la ocurrencia de temblores puede ser inadecuada. En México existen fuentes sísmicas interplaca e intraplaca que generan temblores a profundidades moderadas en los estados del suroeste y también se originan temblores superficiales en el centro del país en zonas cercanas a ciudades como León o Guanajuato. La ausencia de separación entre los muros y las columnas puede generar patologías estructurales como la planta baja flexible y/o débil, columna corta y torsión en planta por asimetría en la ubicación de los muros. Este trabajo tuvo como objetivo principal analizar y cuantificar el efecto de la última patología estructural, que se presenta con bastante frecuencia en edificios localizados en la esquina de una manzana, en los daños sísmicos esperados de las edificaciones. Para ello, se desarrollaron modelos numéricos de edificios de concreto reforzado con y sin la separación entre los muros de mampostería y las columnas para determinar los cambios de la excentricidad estática, los periodos de vibrar y participación de masa con un análisis modal y las derivas de entrepiso con base en análisis dinámicos modales. La deriva de entrepiso es un parámetro que se relaciona directamente con los daños esperados. Los resultados muestran que los muros generan grandes cambios en el comportamiento esperado de las edificaciones, modifican las formas y frecuencias modales, incrementan la torsión del edificio y aumentan también la deformación lateral de las columnas más alejadas del centro de rigidez, haciendo más vulnerable a la estructura. Por ello, se concluye que cuando existen muros colocados en la planta en forma asimétrica, es fundamental separarlos de las columnas para evitar un comportamiento inadecuado de la estructura ante la acción de temblores. Adicionalmente, los muros desligados deben construirse con sujeción fuera del plano para evitar problemas de volteo.

INTRODUCCIÓN

El país se ve afectado por varias fuentes sísmicas en diferentes regiones. La zona noroeste está expuesta a temblores de transformación, la zona del bajío y centro a temblores superficiales e intraplaca y la zona sur a temblores de intraplaca y subducción. Los sismos pueden provocar desde daños estructurales y daño a equipos, hasta colapso de edificaciones.

Las normas actuales (NTC-Sismo, 2023) buscan mitigar los daños originados por la ocurrencia de temblores. Se priorizan geometrías en planta regulares, continuidad de columnas desde la cimentación hasta la azotea y regularidad de rigidez en planta y en elevación.

Cuando no se respetan las recomendaciones, pueden presentarse patologías estructurales. Específicamente, mantener unidos los muros a las columnas, cuando no están considerados en el análisis estructural, puede provocar problemas de columna corta, planta baja flexible y/o débil y torsión en planta.

La torsión en planta se genera porque hay elementos estructurales distribuidos de forma asimétrica en alguna o ambas direcciones principales del edificio, esto puede ocurrir porque la planta tiene

forma irregular, el diseño arquitectónico lo provoca o porque hay elementos considerados como no estructurales que terminan aportando a la rigidez total del entrepiso de forma asimétrica. Uno de los casos que más presentan estos problemas son los edificios con un sistema de columnas de concreto reforzado ubicado en la esquina de una manzana, debido a la colocación de muros en las caras del edificio colindantes con otros predios y espacios libres entre columnas en la caras de la fachada que provocan la asimetría en rigidez.

Los problemas de torsión en el país se identificaron desde el Terremoto del Ángel de 1957 (Orozco y Reinoso, 2007) donde el 40% de los edificios se ubicaron en la esquina de la manzana y el 50% presentaron una geometría en planta irregular. En el Terremoto de Michoacán de 1985 (Fundación ICA, 1988) se mantuvo el problema de los edificios en esquina, presentándose en el 42% del total de edificios dañados. El problema ha perdurado durante el último sismo intenso del país en 2017 con el Terremoto de Puebla (López *et al*., 2023), presentándose en el 35% de los edificios colapsados.

El centro de masa (CM) es el punto teórico que representa la concentración de la masa del entrepiso y es donde pasa la resultante de la fuerza sísmica. El centro de rigidez (CR) es el punto teórico que representa la resistencia concentrada de los elementos estructurales. Cuando se presenta un edificio simétrico en masa y rigidez, la ubicación del centro de masa y de rigidez es la misma. Si se presenta una asimetría en rigidez, el centro de rigidez se aleja del centro de masa y esa distancia se conoce como excentricidad estática (e_s). Esta excentricidad trabaja como el brazo de palanca del momento torsionante que se genera.

La torsión en los edificios se ha investigado con análisis lineales a modelos numéricos simples con excentricidad estática en una dirección en la década de los 80s (Tso y Dempsey, 1980), hasta la actualidad con análisis no lineales, modelos numéricos tridimensionales con varios niveles y excentricidades en las dos principales direcciones del edificio (Martínez *et al*., 2025).

DESCRIPCIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Se estudiaron los edificios en esquina (por su problema de torsión) que tuvieron alto riesgo de colapso y colapsos parciales o totales durante el temblor de Puebla de 2017 a partir de los reportes de daño (Redacción, 2017) y a las imágenes obtenidos de Google Earth (Google, 2022).

La información se utilizó para identificar las siguientes propiedades geométricas y materiales de los elementos estructurales que más se presentaron en los edificios estudiados: geometría en planta rectangular, sistema estructural columnas de concreto reforzado, sistema de piso de losa plana, cuatro número de crujías en la dimensión larga y tres en la dimensión corta, longitud de cada crujía de 5m, altura de entrepiso de 3m, construidos en la década de los 70s y 80s y los daños se concentraron en edificios de entre tres y ocho niveles.

El sistema de columnas de concreto reforzado con losa plana estuvo muy presente entre los edificios con mayor daño. Se diferencia con el sistema de marcos de concreto reforzado debido a la ausencia de vigas que soportan a la losa y que, a su vez, están conectadas con las columnas. Cuando la losa plana es reticular, esta se forma de nervaduras principales de mayor tamaño que se conectan con las columnas, nervaduras secundarias adyacentes a las nervaduras principales y el resto del tablero compuesto por las nervaduras terciarias de menor tamaño. Esta ausencia de vigas provoca una estructura flexible con mal comportamiento ante sismos debido al posible problema de penetración de las columna en la losa y a la poca rigidez lateral, presentando daños con más facilidad y siendo un sistema poco recomendado en los reglamentos actuales (Erberik y Elnashai, 2004).

Se crearon tres modelos numéricos de cuatro, seis y ocho niveles. Fueron diseñados con el reglamento de la Ciudad de México de 1976 (NTCS-76, 1977), utilizando el espectro de diseño con 5% de amortiguamiento y una intensidad de pseudoaceleración de 0.24g y 0.06g con el factor de comportamiento Q=1 y Q=4, respectivamente. El espectro con Q=1 se utilizó para revisar las

distorsiones y el espectro con Q=4, junto con las combinaciones gravitaciones de falla, se utilizó para el diseño de los elementos estructurales.

El concreto se consideró con una resistencia a la compresión de f'c=250 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad de Ec=158,114 kg/cm^2, el acero de refuerzo se consideró con una resistencia a la fluencia de fy=4200 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad de Es=2'000,000 kg/cm^2, el muro de mampostería se consideró con una resistencia a la compresión f*m=19 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad de Em=11,400 kg/cm^2.

La Tabla 1 muestra el resultado del diseño de los elementos estructurales que satisfacen a la demanda gravitacional y sísmica. Las columnas incrementan de sección transversal conforme aumenta el número de niveles, el acero de refuerzo fue aproximadamente de 1% y mayor al mínimo permitido de 0.5% (reglamento vigente en la época de construcción de estos edificios). Las nervaduras de la losa plana con espesor de 30cm se mantuvieron con la misma sección transversal en los tres distintos modelos numéricos, cambiando únicamente en el acero de refuerzo en la parte superior e inferior; el acero de refuerzo en la parte superior fue mayor porque presentó mayor momento negativo en el extremos de las nervaduras.

Tabla 1 Dimensión y refuerzo de elementos estructurales

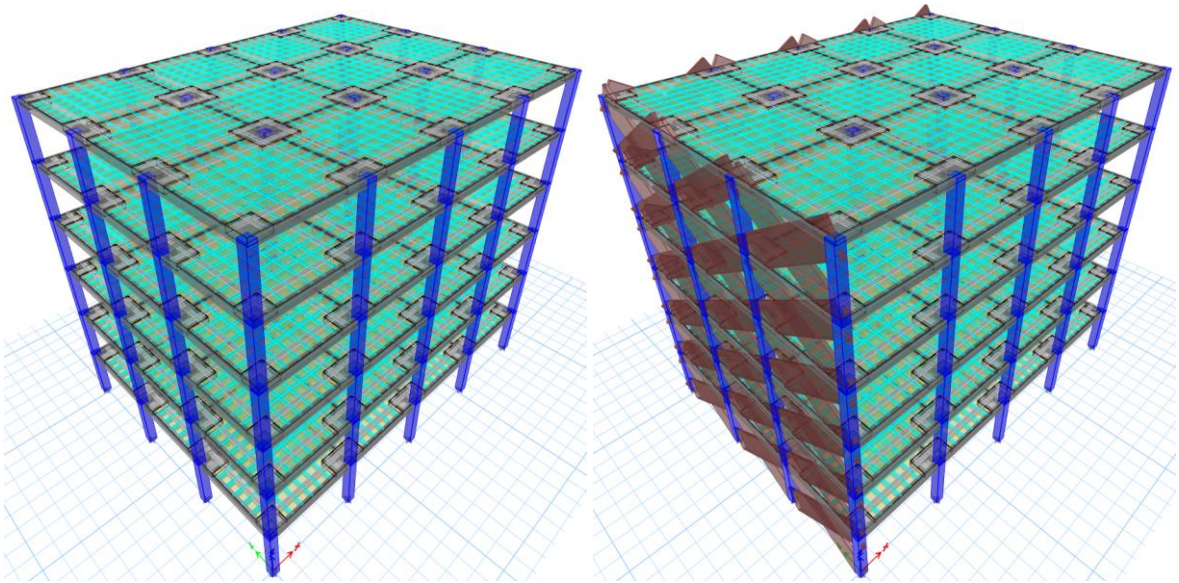
Columnas		
Edificio	**Sección transversal (m)**	**Relación de refuerzo**
Cuatro niveles	0.35x0.35	0.0124
Seis niveles	0.40x0.40	0.0148
Ocho niveles	0.50x0.50	0.0095

Nervaduras			
Edificio	**Sección transversal (m)**	**Relación de refuerzo**	
		Abajo	**Arriba**
Nervadura principal			
Cuatro niveles	0.25x0.30	0.0052	0.0084
Seis niveles		0.0052	0.0109
Ocho niveles		0.0043	0.0109
Nervadura secundaria			
Cuatro niveles	0.20x0.30	0.0051	0.0051
Seis niveles		0.0029	0.0079
Ocho niveles		0.0029	0.0079
Nervadura terciaria			
Cuatro niveles	0.10x0.30	0.0051	0.0029
Seis niveles		0.0051	0.0051
Ocho niveles		0.0029	0.0051

La Figura 1a y 1b muestra al modelo numéricos de seis niveles considerando que los muros están separados de las columnas y no aportan a la rigidez lateral y cuando no hay separación y aportan rigidez lateral, respectivamente. Los análisis y el modelo numérico se realizó con el programa Etabs (CSI Etabs, s.f.), software especializado en el análisis y diseño de edificaciones. La modelación de los muros de mampostería se realizó con diagonales equivalentes biarticulados que solo trabajan a compresión para representar correctamente el efecto de un muro diafragma (Comité de Mampostería, 2012).

Este trabajo considera tres modelos numéricos sin la aportación de los muros de mampostería en la rigidez lateral y otros tres modelos numéricos con la aportación de los muros de mampostería. Se

compararon los resultando de los análisis modales y dinámicos modales de los seis modelos numéricos.



a) b)

Figura 1 Modelos numéricos de seis niveles. a) Sin muros y b) con muros

ANÁLISIS MODAL

Este análisis se realiza para conocer las propiedades dinámicas de la estructura. Considera todos los elementos estructurales en su aportación individual en la rigidez lateral y en la ubicación de su centro de rigidez CR en cada entrepiso, también contempla el peso propio de los elementos estructurales, la sobrecarga muerta CM, la carga viva CV y la ubicación de su centro de masa CM en cada entrepiso. Estas propiedades ayudan a comprender comportamiento del edificio ante cargas dinámicas como el sismo o el viento.

La Tabla 2 muestra los tres primeros periodos de vibrar de los seis modelos numéricos. En ambas consideraciones se observa que el periodo de vibrar aumenta conforma incrementa el número de niveles, indicado que el edificio se vuelve más flexible. El sistema sin muros presenta periodos muy similares en los tres primeros modos de vibrar, mostrando que en cada modo es más flexible que el sistema con muros. El sistema con muros tiene diminuciones más pronunciadas de su periodo de vibrar entre sus modos, incrementando su diferencia con resultados del sistema sin muros con cada incremento de modo.

El periodo fundamental (modo 1) suele ser es el más observado para comprender la demanda por cargas sísmicas. Sin embargo, este periodo de los modelos numéricos sin y con muros son muy similares pero muy distintos en los otros modos, demostrando la importancia de considerar más modos de vibrar.

Otro parámetro que ayuda a comprender el comportamiento dinámico de una estructura es observar la participación de masa, principalmente en las dos direcciones horizontales (UX y UY) y la rotación sobre el eje vertical (RZ). Los reglamentos actuales destacan su importancia para comprobar que la estructura este correctamente modelada y obliga una participación de masa acumulada mayor o igual al 90% en todas las direcciones y rotaciones entre todos los modos de vibrar considerados en el análisis modal para obtener resultados adecuados para el análisis dinámico modal.

La Tabla 3 muestra la participación de masa en las dos direcciones horizontales (UX y UY) y en la rotación sobre el eje vertical (RZ) en los tres primeros modos de vibrar de los modelos numéricos sin

y con muros. Los modelos numéricos sin muros presentan una participación de masa idealizada, el primer modo destaca en la dirección más flexible Y, el segundo modo en la dirección más rígida X y

Tabla 2 Periodos de los tres primeros modos de vibrar

Modo	Periodo (s)sin muros	Periodo (s)con muros	Diferencia
Cuatro niveles			
1	0.953	0.91	-5%
2	0.948	0.599	-37%
3	0.841	0.37	-56%
Seis niveles			
1	1.255	1.203	-4%
2	1.246	0.843	-32%
3	1.131	0.536	-53%
Ocho niveles			
1	1.471	1.415	-4%
2	1.458	1.059	-27%
3	1.345	0.704	-48%

Tabla 3 Participación de masa de los tres primeros modos de vibrar

Modo	UXsin muros	UXcon muros	Diferencia	UYsin muros	UYcon muros	Diferencia
Cuatro niveles						
1	0%	22%	8067%	85%	41%	-51%
2	85%	51%	-40%	0%	35%	11866%
3	0%	13%	9300%	0%	10%	3727%
Seis niveles						
1	0%	21%	5049%	81%	40%	-51%
2	82%	49%	-40%	0%	34%	6881%
3	0%	13%	4041%	1%	10%	1419%
Ocho niveles						
1	0%	20%	13447%	79%	39%	-51%
2	80%	48%	-40%	0%	32%	16130%
3	0%	13%	3195%	1%	9%	885%

Modo	RZsin muros	RZcon muros	Diferencia
Cuatro niveles			
1	0%	22%	7410%
2	0%	1%	575%
3	84%	65%	-23%
Seis niveles			
1	1%	21%	2949%
2	0%	1%	242%
3	81%	62%	-23%
Ocho niveles			
1	1%	21%	1974%

2	0%	1%	171%
3	79%	60%	-23%

el tercer modo presenta rotación alrededor del eje Z. Los modelos numéricos con muros presentan participaciones de masa combinadas, pero destacando ligeramente las direcciones y rotaciones como se presentaron en los modelos numéricos sin muros en cada modo.

Se observa una disminución de participación de masa conforme incrementa el número de niveles, esto se debe a que incrementa la flexibilidad y los grados de libertad del sistema estructural. Por esta razón es importante considerar más modos de vibrar cuando se presente muchos niveles o muchos grados de libertad.

La participación de masa es fundamental para entender el comportamiento dinámico del edificio ante cargas sísmicas. La dirección de movimiento predominante de cada modo, principalmente de los primeros modos, es la misma dirección que tendrá durante el sismo. La Tabla 4 muestra la dirección de movimiento de los modelos numéricos considerados, resaltando las consecuencias que genera los muros cuando no se separan de las columnas. Estos cambios son resultado del alejamiento del centro de rigidez CR con respecto al centro de masa.

Tabla 4 Movimiento de los primeros tres modos de vibrar

Modo	Dirección de movimientosin muros	Dirección de movimientocon muros
Cuatro niveles		
1	traslación Y	traslación Y con rotación Z
2	traslación X	traslación X con traslación Y
3	rotación Z	rotación Z con traslación X
Seis niveles		
1	traslación Y	traslación Y con rotación Z
2	traslación X	traslación X con traslación Y
3	rotación Z	rotación Z con traslación X
Ocho niveles		
1	traslación Y	traslación Y con rotación Z
2	traslación X	traslación X con traslación Y
3	rotación Z	rotación Z con traslación X

La Figura 2 muestra la ubicación del centro de masa (CM) y centro de rigidez (CR) en el nivel 2 del modelo numérico de seis niveles con los muros ligados a las columnas. Se observa que los muros ubicados en el borde izquierdo y superior de la figura desplaza el centro de rigidez a una ubicación

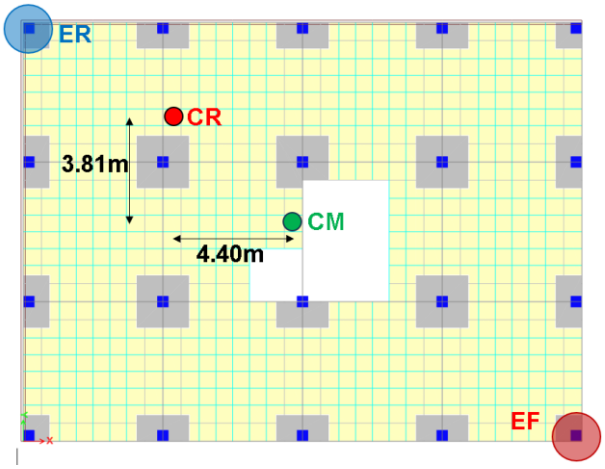


Figura 2 Ubicación del centro de masa (CM) y centro de rigidez (CR) en el nivel 2 del modelo numérico de seis niveles con muros

cercana a ellos una excentricidad estática de 4.40m en la dirección X y 3.81m en la dirección Y, provocando excentricidad estática en ambas direcciones.

La Figura 3 muestra la excentricidad estática en las dos direcciones horizontales para cada entrepiso de los modelos numéricos con cuatro, seis y ocho niveles. Se observa una gran diferencia cuando se comparan los resultados de los modelos numéricos sin y con muros, la poca excentricidad que presentan los modelos numéricos sin muros se debe al espacio vacío que ocupan las escaleras y el elevador y al peso de los muros de mampostería.

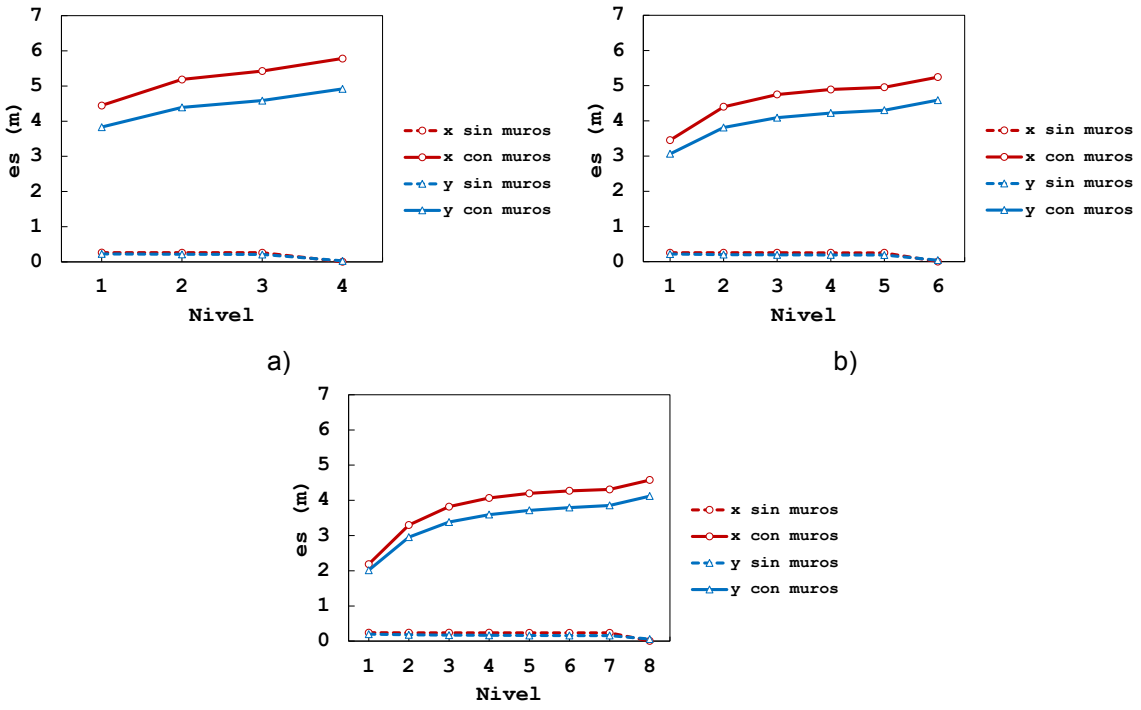


Figura 3 Excentricidad estática (e_s) en ambas direcciones de cada nivel de los modelos numéricos. a) Cuatro niveles, b) seis niveles y c) ocho niveles

Los muros producen casi toda la excentricidad estática presente, disminuyendo su efecto conforme incrementa el número de niveles. Esto ocurre porque los edificios de mayor altura requieren columnas de mayor tamaño y rigidez lateral, mientras que la rigidez lateral que aportan los muros se mantiene igual y aporta cada vez menos en la rigidez lateral total cada vez que incrementa el número de niveles del edificio.

ANÁLISIS DINÁMICO MODAL

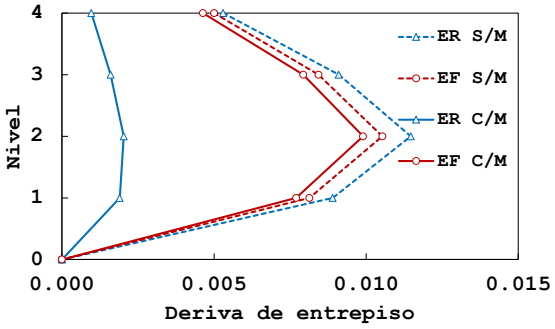
Se determinaron las demandas sísmicas con base en un análisis dinámico modal espectral. Para ello se utilizó un espectro de diseño de la zona de terreno blando de la ciudad de México. Con ello se determinó la demanda de deformación, parámetro relacionado directamente con el posible daño obtenido.

Como es distinta la ubicación del centro de masa (CM) y el centro de rigidez (CR), la deformación global del edificio tendrá torsión cuando se presente un sismo. La torsión produce que la deformación de los elementos estructurales verticales sea distinta, siendo menor cuando el elemento estructural se ubique cerca del centro de rigidez y mayor conforme se va alejando de este.

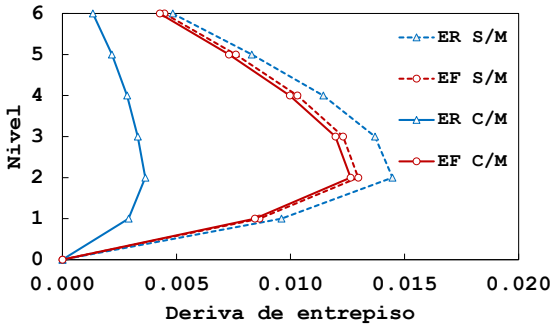
La Figura 2 identifica al extremo rígido (ER) como el extremo donde se interceptan los dos ejes externos del edificio que tienen muros de mampostería ligados a las columnas, cercano al centro de rigidez. Se identifica al extremo flexible (EF) como el extremo donde se interceptan los dos ejes externos del edificio que no tienen muros de mampostería, extremo más alejado al centro de rigidez.

La deriva es la deformación unitaria de un elemento vertical, se obtiene de dividir la deformación relativa de un elemento o sistema estructural entre su longitud. El parámetro más utilizado es la deriva de entrepiso que divide su deformación por la altura de su entrepiso.

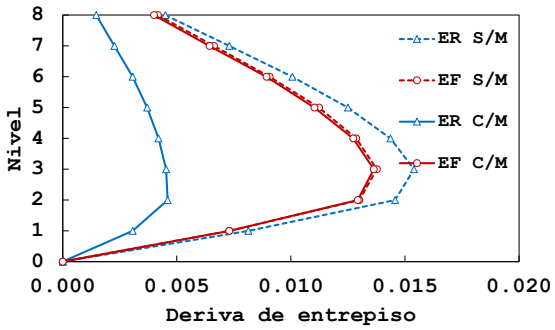
La Figura 4 muestra la deriva de entrepiso del extremo rígido (ER) y del extremo flexible (EF) de los modelos numéricos sin muros (S/M) y con muros (C/M). Se observa que las mayores deformaciones-daños se concentran principalmente en el segundo nivel de los modelos numéricos de cuatro y seis niveles y en el tercer nivel de los modelos numéricos de ocho niveles. Las derivas son muy similares en ambos extremos cuando los muros se encuentran separados de las columnas (S/M), obteniendo un comportamiento regular que permite disipar la energía uniformemente distribuida entre todos sus elementos estructurales. Se observa una ligera disminución en el extremo flexible y una gran disminución en el extremo rígido cuando están unidas las columnas y los muros, concentrando las deformaciones-daños en los elementos más alejados al centro de rigidez.



c)



b)



c)

Figura 4 Deriva de entrepiso del extremo rígido (ER) y del extremo flexible (EF) de los modelos numéricos sin muros (S/M) y con muros (C/M). a) Cuatro niveles, b) seis niveles, c) ocho niveles

Aunque los muros ligados a las columnas disminuyan la deformación de las columnas, dando la impresión que son beneficiosos para el edificio. Esto provoca que la disipación de energía se concentre en pocos elementos estructurales, aumentando el riesgo de presentarse un colapso parcial o total del edificio.

CONCLUSIONES

Del análisis modal se obtiene bastante información acerca del comportamiento dinámico de una estructura en el intervalo de comportamiento elástico, útil para conocer su demanda ante el sismo o el viento. El análisis dinámico modal obtiene excelentes resultados a partir de un espectro de diseño, especialmente cuando el edificio es flexible o tenga una participación de masa mixta en sus modos de vibrar.

Tener ligados a los muros y las columnas generan que el centro de rigidez (CR) se aleje del centro de masa (CM) y provocando que esa excentricidad funcione como brazo de palanca del momento torsionante que producirá el sismo.

La torsión provoca que las columnas sufran distintas deformaciones, agravándose conforme se alejan del centro de rigidez. Esto genera que la disipación de energía se concentre en pocos elementos estructurales y aumenten el riesgo de presentarse un colapso parcial-total.

La separación entre los muros de mampostería y las columnas es lo adecuado cuando los muros no fueron considerandos durante la etapa del análisis y diseño del edificio, cuidando que los muros que si hayan sido considerados estén distribuidos simétricamente en planta. Los muros que se encuentren separados deberán de restringirse ante el volteo fuera de su plano, la primera opción para garantizarlo es colocando perfiles de acero (ángulos) conectados a las vigas del edificio y a la cadera del muro, la segunda opción es conectarlos mediante redondos lisos de acero ahogados entre la viga del edificio y la cadena del muro.

BIBLIOGRAFÍA

1. NTC-Sismo, “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2023.
2. V. Orozco, E. Reinoso, “Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la Ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica”, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 76, 2007, pp. 61-87. Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807604
3. Fundación ICA, “Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985”, Ciudad de México: Limusa, 1988.

4. J. I. López, J. M. Jara, B. A. Olmos, H. Varum, “Estadísticas de los edificios colapsados y en alto riesgo de colapso en la Ciudad de México debido al sismo de Puebla-Morelos en 2017, con enfoque en los edificios de esquina”, XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 2023.
5. W. K. Tso, K.M. Dempsey, “Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, 1980, pp. 275-289. Obtenido de https://doi.org/10.1002/eqe.4290080307
6. A Martínez, J. M. Jara, J. I. López, B. A. Olmos, H. Varum, Lampropoulos, “Assessment of Damage Progression in Corner Buildings with InfillWalls During an Intraplate Earthquake in Mexico”, Buildings, Vol. 15, 5, 2025, pp. 745. Obtenido de https://doi.org/10.3390/buildings15050745
7. Redacción, “En imágenes: todas las zonas colapsadas de la CDMX y su impacto económico”, El Financiero, 2017. Obtenido de http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/19s-asi-fue-el-impacto-economico-en-zonas-colapsadas-de-la-cdmx (recuperado: Mayo de 2022).
8. Google, Imágenes tomadas de Google Earth de edificios de la Ciudad de México que se dañaron durante el sismo del 19 de septiembre del 2017, 2022.
9. M. A. Erberik, A. S. Elnashai, “Fragility analysis of flat-slab structures”, Engineering Structures, vol. 26, 7, 2004, pp. 937-948. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.02.012
10. NTCS-76, “Normas técnicas complementarias para diseño por sismo”, Departamento del Distrito Federal, 1977.
11. CSI ETABS, “Computer and Structures Inc.” Berkeley.
12. Comité de Mampostería, “Guía para el análisis de estructuras de mampostería”, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y Fondo Sectorial de la Comisión Nacional para el Fomento de la Vivienda (CONAFOVI), 2012.

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA PLANTACIÓN DE SEMILLAS

Humberto Rodríguez Bravo[1], Carlos Arturo Anguiano Luna[2], Silvia Alejandra Hernández Ramirez[3], Gerardo Trejo Caballero[4].

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato.
humberto.rb@irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

Actualmente el desarrollo tecnológico ha impulsado mejoras significativamente en diversos sectores, incluyendo la agricultura, donde la automatización juega un papel clave en la optimización de procesos. El sector agrícola en México es fundamental para la economía y desarrollo social, representando una fuente clave de empleo y producción de alimentos. En regiones como Irapuato, conocida por su producción agrícola, especialmente de fresa y otros cultivos como maíz, trigo y sorgo, la modernización de siembra se ha convertido en una necesidad para aumentar la eficiencia y rentabilidad. Sin embargo, muchos pequeños y medianos productores aun dependen de métodos tradicionales que son poco eficientes y demandan un alto esfuerzo físico.

En el presente sistema propuesto ante esta situación, se diseña y simula un sistema automatizado para la plantación de semillas, con el objetivo de mejorar la precisión, reducir costos operativos y ayudar a los trabajadores en el sector agrícola de la región. El sistema consiste en una plataforma móvil basada en los dispensadores de productos y equipada con llantas todo terreno, permitiendo su desplazamiento en distintos tipos de suelo. El mecanismo emplea servomotores de 180° y motores, lo que facilita la regulación de la caída de las semillas y el control de la profundidad de siembra de manera automatizada por un mecanismo piñón-cremallera.

Para evaluar la viabilidad del sistema, se implementó una metodología estructurada. Primero, un análisis de las condiciones agrícolas de Irapuato, considerando factores como la composición del suelo, los cultivos más comunes y técnicas de siembra. Posteriormente, se diseña un prototipo en software de modelado 3D (SolidWorks), lo que permitió visualizar y ajustar la distribución de los componentes para posteriormente someterlo a simulaciones de análisis, evaluación del rendimiento y eficiencia. Los resultados de las simulaciones indicaron que el sistema es capaz de distribuir semillas de manera uniforme. En comparación con los métodos tradicionales, la automatización permite una mayor consistencia en la siembra y aumento de productividad de los cultivos. Además, los análisis estructurales demuestran puntos críticos en el diseño, de tal manera que, se realizaron cambios para su mejora.

La automatización mediante un diseño practica y simulación de dicho sistema ofrece una alternativa viable para la modernización de la agricultura en México, particularmente en regiones como Irapuato. La integración de tecnología en el sector agrícola demuestra un alto potencial para la optimización del uso de recursos, costos y rendimiento de cultivos. Aunque el presente proyecto se centra en la simulación del sistema, su desarrollo y prueba en condiciones reales podría validar su aplicación al campo, ofreciendo una solución innovadora para agricultores locales. Con mejoras adicionales este sistema podría presentar un paso importante hacia la agricultura actual solucionando problemas como el calentamiento, el esfuerzo laboral, salud y economía.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se diseña un modelo 3D en el software SOLIDWORKS de un sistema automatizado para la plantación de semillas en el sector agrícola con el objetivo de resolver e identificar problemáticas en el proceso de siembra tradicional. Además, presenta una solución a la mejora de calidad de vida de los trabajadores dentro del sector agrícola, donde la mayor parte del tiempo laboral se exponen constantemente a los rayos ultravioleta del sol llegando a causar daños

en la piel, quemaduras e incluso aumentar el riesgo de padecer cáncer de piel. Sin embargo, el presente sistema propuesto, se diseña una herramienta como una alternativa accesible, eficaz y resistente con el fin de no solo disminuir los problemas principales de salud, pues el tiempo de siembra y ganancias en siembra son puntos que abarcan el objetivo principal del proyecto. Por lo tanto, se busca plasmar una idea de automatización y mejora en el campo agrícola, principalmente en Irapuato brindando un apoyo a los trabajadores.

En el documento presente se desarrollan puntos con hincapié al sector agrícola y el proyecto, desarrollando un análisis sobre el sector agrícola y datos necesarios que forman parte del proceso del diseño e implementación del mismo en condiciones favorables al sector. Por otra parte, se detallan análisis de cargas a las que se expone el modelo implicando técnicas de simulación a través de un modelo computacional con el uso de CAD (Diseño Asistido por Computadora) y CAE (Ingeniería Asistida por Computadora).

TEORÍA

El sector agrícola ha presentado un papel muy importante a lo largo de los años y actualmente se considera uno de los más interesantes y necesarios no solo para la economía sino también como un sector de implementación tecnológico bastante amplio en el que áreas como mecatrónica, biotecnología y agroindustria pueden aportar nuevos implementos y tecnologías con el objetivo de aumentar las estadísticas en dicho sector.

México cuenta con una diversidad de territorios con suelos, climas y ecosistemas con condiciones aptos para la siembra y representando una producción indispensable para gran parte de la economía de los ciudadanos que residen en el país. La superficie de México es de 196.4 millones de ha., la superficie dedicada a la agricultura de 21 millones de ha., aproximadamente (10,5% del total de la superficie); de los cuales 6.5 millones son de agricultura de riego y 14.5 millones de ha., son de agricultura que se practica bajo condiciones de temporal: es decir, cerca del 70% de la superficie agrícola es de temporal, INEGI (2017) [3]. Además, la secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRICULTURA) informa que las actividades primarias presentaron un aumento de 7.8% trimestral y 6.7% anual, de acuerdo con el informe del Producto Interno Bruto (PIB) del primer trimestre de 2025 [2].

Por otro lado, el cambio climático representa un impacto global a los resultados de siembra e incluso la salud del personal con alteraciones significativas donde los pobladores con menos recursos económicos resultan totalmente afectados. Para ello se implementa el proyecto presentado ante tales situaciones, sin embargo, es necesario comprender conceptos para lograr un correcto entendimiento del tema y el objetivo del proyecto.

Siembra de semillas

El factor de la siembra de semillas es uno de los puntos más importantes en la siembra de cualquier alimento, pues dentro del concepto de siembra se derivan las diferentes etapas para el desarrollo del proyecto desde el modelo de referencia hasta la manera en que la semilla necesita de profundidad.

En base a la semilla, se desarrolla un concepto ideal y funcional para su correcta siembra en un terreno con irregularidades y condiciones no aptas para cualquier material y diseño. La semilla es la estructura total o parcial destinada a la reproducción vegetativa utilizada en la siembra o propagación vegetativa [4], la semilla representa el medio principal que lleva a la cosecha, la fuente de alimento, la economía y claramente el objetivo del proyecto. Cada semilla presenta un tamaño diferente a comparación de otras, por ejemplo, en la tabla 1 se muestran tamaños estándar de diferentes semillas.

A razón de este concepto surge un punto a considerar y es la distribución de esta, es decir, la manera en la que cada semilla será distribuida a lo largo del terreno a sembrar sin necesidad de la

intervención del personal. En base a la idea de un dosificador es que la problemática se resuelve; un dosificador es un dispositivo que funciona como un sistema de medición para dispensar cierta cantidad específica ya sea de líquido, solido o producto en general.

Tabla 1. Pesos y tamaños de semillas.

Tipo de Semilla	Peso	Tamaño	Profundidad
Fresa	0.035g (peso de 100 semillas)	0.8mm -1mm	Corona por encima del suelo
Maíz	0.15g - 0.50g (peso de una semilla)	5mm - 8mm	4-5 cm
Trigo	25g – 40g (peso de 1000 semillas)	2.65mm	3-5 cm
Sorgo	2.256g (peso de 100 semillas)	5mm	2-4 cm
Frijol	19.3g (peso de 100 semillas)	4mm	2-4 cm

Los dosificadores de semillas son placas con ranuras donde las semillas se colocan para su siembra como una forma de distribución ordenada dependiendo de las dimensiones de las ranuras, ya que entre más grande la ranura mayor será el número de semillas que se colocaran al momento de dosificar. Un ejemplo es tomando como referencia un dosificador mecánico con ranuras (Figura 1) donde se ve la función principal e interacción con semillas de maíz.



Figura 1. Placa ranurada de dosificador mecánico [5].

Esfuerzo y deformación

El concepto de esfuerzo-deformación es un tema fundamental para el desarrollo del presente proyecto, sobre todo por los elementos mecánicos que forman parte del sistema. Además, es necesario considerar las cargas o fuerzas a las que esta sometidos los elementos con el entorno en el que se trabaja.

El esfuerzo se encuentra asociado con la resistencia del material del que está hecho el cuerpo [6], en otras palabras, cada material tiene una resistencia distinta debido a sus propiedades, pero al aplicarse una carga externa sobre dicho material genera una fuerza interna en el área aplicada. La fórmula establecida para el cálculo del esfuerzo está dada por la ecuación 1:

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{1}$$

El esfuerzo puede definirse en 4 diferentes cargas:

- Esfuerzo normal: Fuerza que actúa de manera perpendicular al área aplicad, tienden a jalar o empujar sobre dos segmentado del cuerpo.
- Esfuerzo cortante: Fuerza que actúa en paralelo al área aplicada, tienden a deslizarse uno sobre otro.
- Esfuerzo flexionante: Momento causado por cargas que tienden a flexionar el material respecto a un eje.
- Esfuerzo de torsión: Cuando el material es sometido a un momento de torque causando una rotación.

Al aplicar una fuerza a un cuerpo, esta tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo [7], esto se le conoce como deformación. Cuando se aplica dicha fuerza el material se deforma hasta cierto límite dependiendo del material aplicado, es decir, según las propiedades del material o elemento la deformación será más visible o no. Para calcular la deformación se utiliza la ecuación 2:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \tag{2}$$

En la figura 2, se muestra el diagrama de esfuerzo-deformación para el acero estructural común en tensión, proporcionando una representación mediante una recta donde el límite del material está en proporción al esfuerzo aplicado.

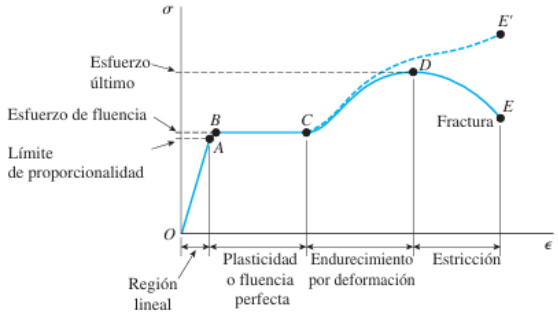


Figura 2. Diagrama de esfuerzo-deformación de acero estructural [7].

Software de diseño

SolidWorks es un software diseñado para realizar modelos 3D por medio del CAD (Diseño Asistido por Computadora). Se trata de un programa en el cual se permite realizar un proceso completo de diseños mecánicos, partiendo desde una idea por el diseñador, en este caso, el ingeniero encargado del proyecto. SolidWorks cuenta con una interfaz intuitiva y fácil de usar para principiantes en el que sus herramientas nos permiten desde diseñar hasta realizar ensambles o planos modelando en tres dimensiones.

El uso de software en el diseño en ingeniería es muy fundamental para optimizar procesos y aumentar la eficiencia en el modelado. SolidWorks representa una herramienta fundamental en al ámbito de la ingeniería. Gracias a su módulo SolidWorks Simulation, el software nos aporta complementos y herramientas de simulación con los que permite al diseñador someter sus diseños a las mismas condiciones a las que expondrán en el mundo real, permitiendo mejorar la calidad de sus productos, optimizar las geometría y materiales, y además reducir costos tanto en tiempo como ahorro para las pruebas reales [8].

Para el desarrollo de una simulación de esfuerzos SolidWorks cuenta con una herramienta de análisis por el método de elementos finitos (FEA), la cual se basa en un proceso llamado mallado que permite dividir el modelo en pequeños elementos conectados por nodos. Este proceso es fundamental para realizar el análisis numérico pues si se utiliza un mallado más fino el número de elementos aumentará, pero la precisión y el tiempo de cálculo de los resultados también lo hará. Para comprenderlo mejor se muestra una imagen de referencia sobre los elementos finitos (Figura 3).

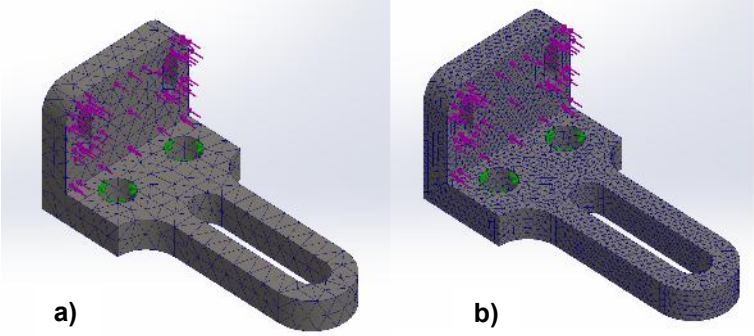


Figura 3. Mallado, elemento y nodo de una pieza a) Mallado grueso b) Mallado fino.

Mallado: Subdivisión del modelo en pequeñas partes denominadas elementos finitos garantiza precisión y estabilidad numérica de los resultados. Entre más fino y refinamiento local en regiones con alta concentración de esfuerzos o discontinuidades geométricas y elementos se busca un equilibrio entre la calidad de los resultas y tiempo de computo.

Elemento finito: Unidades geométricas que componen la malla que pueden ser representados por elementos 1D (líneas o barras), 2D (triángulos o cuadriláteros) y 3D (tetraedros).

Nodos: Puntos donde se conectan los elementos y se calculan las propiedades del modelo.

Análisis estático

El análisis estático es una técnica fundamental en la ingeniería estructural que permite evaluar cómo responden los componentes a cargas aplicadas de manera constante en el tiempo (Figura 4). Este tipo de análisis es esencial para garantizar que los diseños puedan soportar las condiciones operativas sin fallar. La función principal de la simulación es determinar distribuciones de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en el modelo bajo condiciones a partir del método de los elementos finitos. Para el desarrollo de un estudio generalmente se siguen una serie de pasos:

1. Asignación de material: Es esencial definir el material de cada componente, ya que las propiedades de este influyen en los resultados.

2. Interacción entre componentes: Definir cómo interactúan las piezas entre sí (en caso de ser un ensamble).

3. Aplicación de restricciones: Se establecen condiciones que simulan como el modelo contiene partes fijadas restringiendo su movimiento.

4. Cargas aplicadas: Aplicación de fuerzas, presiones, momentos o cargas externas que actúan sobre el modelo.

5. Mallado: Se genera el método de los elementos finitos para proporcionar resultados por el cálculo dependiendo del tipo de malla que se realiza.

6. Ejecución y evaluación de resultados: Se resuelven las ecuaciones para proporcionar resultados como distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, entre otros. Se analizan para identificar áreas críticas en el modelo permitiendo tomar decisiones a cambios (si son necesarios).

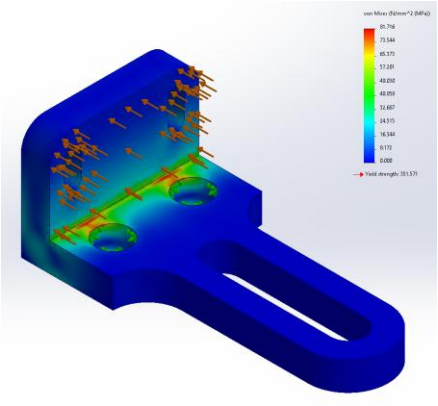


Figura 4. Análisis de tensiones de una pieza a la que se le aplica una fuerza.

Concepto de diseño de un sistema automatizado para plantación de semillas

El diseño del proyecto es un modelo creado a partir de la idea de sembradoras convencionales e incluso de precisión que se utilizan actualmente en el área de la agricultura. El desarrollo del presente proyecto se basa en un diseño ya realizado y publicado con anterioridad [9], en base a un modelo establecido se reajustaron ciertos cambios respecto a su función.

Tras evaluar el concepto anterior (Figura 5), se tomó en cuenta un sistema que permite una mayor eficiencia al momento de trabajar y que se considera necesaria para evitar el desgaste y posible falla en el tubo semillero.

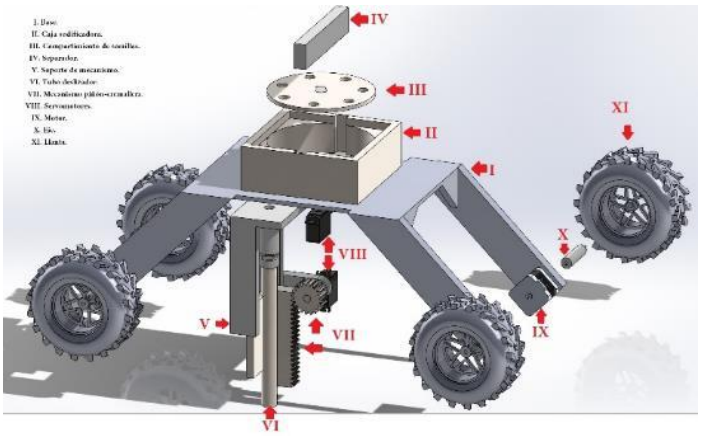


Figura 5. Diseño de prototipo y sus partes [9].

De acuerdo con la Tabla 1, las semillas muestran diferentes tamaños y a su vez una profundidad de siembra aproximada con el fin de generar las ganancias esperadas en el proceso. En base a esto, el modelo implementa componentes con la función de un dosificador con discos que pueden cambiar dependiendo del tipo de semilla que se necesite utilizar. Esta caja dosificadora almacena un compartimiento de discos semillero en los cuales las semillas se colocan en los agujeros y por medio de un servomotor se regula la velocidad en la que gira el disco (Figura 6).

La caja dosificadora cuenta con un separador con la función de dividir el dosificador, En una parte se almacenan las semillas y en la otra solo la semilla sale distribuida en la ranura, esto con el fin de evitar que las semillas se lleguen a distribuir de manera uniforme y con cantidades desiguales al momento de sembrar.

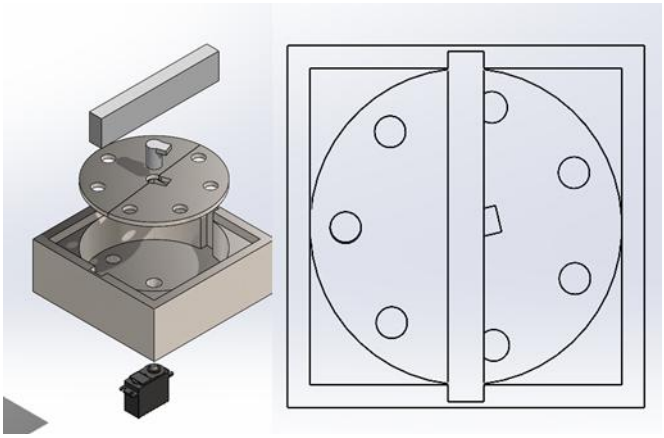


Figura 6. Vista explosionada y vista superior de caja dosificadora.

Para la implementación del posicionamiento para la profundidad, el sistema cuenta con un mecanismo importante que permite el posicionamiento del tubo semillero dependiendo del requisito del trabajador, pero primero se debe tomar en cuenta el nuevo diseño implementado. En la (Figura 7), se muestra el nuevo modelo CAD.

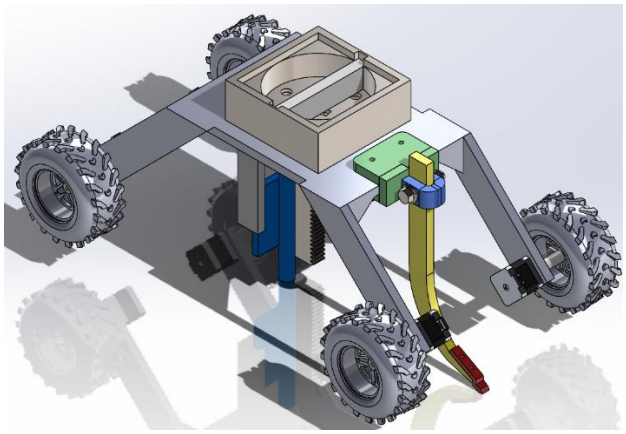


Figura 7. Modelo CAD del proyecto en SolidWorks.

El diseño cumple con una función de arrastre en el suelo donde se deja caer por gravedad la semilla dosificada dependiendo de la velocidad en la que se maneje, para ello un timón es necesario. El timón cumple con la función clave para el correcto trabajo del equipo en campo que conecta mediante un enganche y transmite la fuerza de arrastre principal para que el sistema avance en el terreno, además, ayuda a mantener alineada la estructura durante el trabajo evitando que se desplace lateralmente en terrenos irregulares y distribuye las cargas generadas por la resistencia del suelo y el peso de todo el sistema completo.

El timón y el tubo semillero son piezas que tienen contacto directo con el suelo en el que se trabaja y ambos cumplen con funciones distintas pero importantes. En el caso del tubo semillero nos permite el colocar la semilla lo más cerca a la profundidad deseada sin comprometer la falta de precisión

entre distancia de semillas por todo el surco, es decir, si el tubo está en una posición alta la semilla puede presentar un rebote al caer a la tierra y comenzar a dejar distancias muy irregulares en la siembra. Por otra parte, el timón permite que el tubo semillero no se someta a cargas máximas por la resistencia del suelo y la fuerza de arrastre. Por esta razón el timón se posiciona antes del sistema de colocación de la semilla, tal y como se muestra en la (Figura 8).

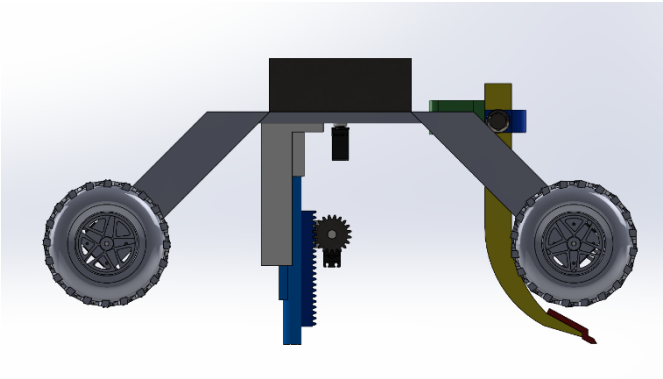


Figura 8. Posición de tubo semillero y timón.

Para el correcto posicionamiento de la profundidad de la semilla se implementa un mecanismo de piñón-cremallera que funciona como un sistema de elevación y descenso del tubo semillero. Por ejemplo, en la (Figura 9) se simula la posición de como el sistema se comportaría en el suelo.

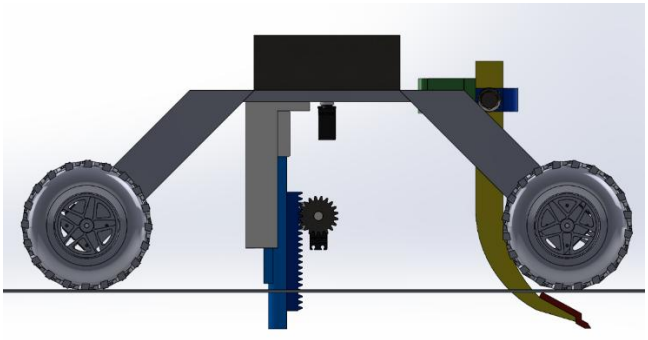


Figura 9. Profundidad de timón y tubo semillero.

La implementación del mecanismo piñón-cremallera funciona por un servomotor que controla la profundidad según la necesidad de producción requerida (Figura 10).

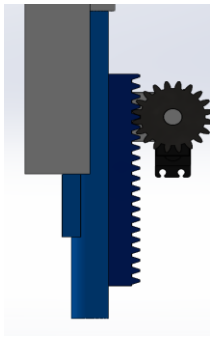
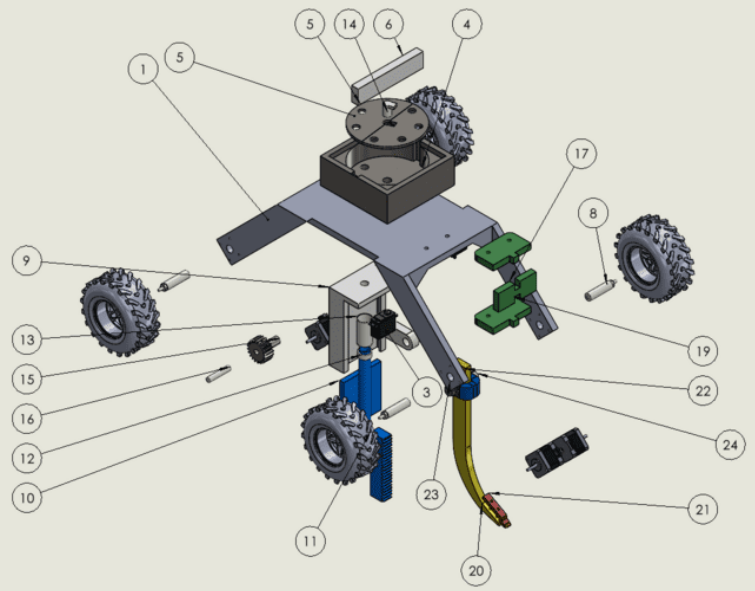


Figura 10. Mecanismo piñón-cremallera.

De acuerdo con la (Figura 13), los componentes se someten a una fuerza de arrastre por lo que el material se considera en base a estos parámetros y el ambiente en el que se desarrolla. El acero inoxidable es un material recomendado para la oxidación de la pieza al estar en contacto con la humedad y la tierra, pero su costo es algo elevado por lo que el acero A36 es perfecto para utilizar para las estructuras principales del sistema.

El acero A36 contiene propiedades que con un recubrimiento de carbono o pintura debido a sus propiedades únicas que lo hacen ideal para aplicaciones dentro del sector agrícola. Por lo tanto, la mayoría de los componentes del sistema se componen de este (Figura 11).



No.	PIEZA	QTY.
1	Base	1
2	Rueda	4
3	Servomotor	2
4	Caja sodificadora	1
5	Compartimiento de la caja	1
6	Separador	1
7	Motor Nema 17	4
8	Eje	4
9	Soporte	1
10	deslizador	1
11	Cremallera	1
12	Encaje	1
13	Encaje2	1
14	Eje de servomotor	1
15	Piñon	1
16	Segundo eje de servomotor	1
17	Bracket1_timon	1
18	Suelo	1
19	Bracket2_timon	2
20	Timon1	1
21	Punta de timon	1
22	Abrazadera	1
23	Tornillo	1
24	Tuerca	1

Figura 11. Elementos del diseño.

RESULTADOS

En el presente apartado, se exponen los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto abarcando análisis del diseño.

Condiciones del análisis estructural

Se consideran muchas condiciones para el análisis del diseño propuesto, entre ellas las sujeciones y cargas al que está expuesto. En el caso de las restricciones o sujeciones fijas se aplican a ciertas partes que permanecerán inmóviles durante el análisis (Figura 12).

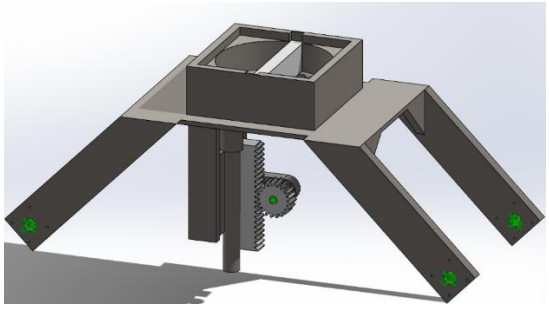


Figura 12. Geometría fija del sistema.

Después de determinar las sujeciones, se consideran todas las cargas externas a las que se somete el modelo. Considerando la gravedad (flecha azul) como primera carga universal se aplica 9.81 m/s^2 en un plano, la segunda bajo una presión de 1MPa (flechas rojas) aplicado a solo la mitad de la caja dosificadora donde tendrá una mayor presión por la cantidad de semillas que se colocan en el área (Figura 13).

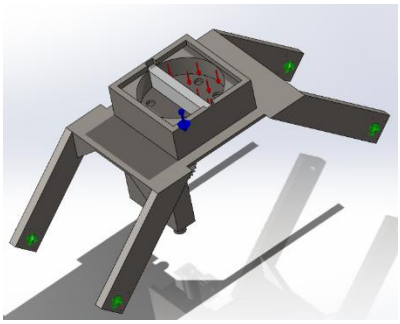


Figura 13. Cargas aplicadas (gravedad y presión a mitad del plato semillero).

Finalmente, se aplica una fuerza de arrastre de 2000 N en el tubo semillero, esto con el fin de demostrar la carga a la que se somete dicho elemento. En la (Figura 14) se observa la forma en que dicha fuerza se aplica al modelo.

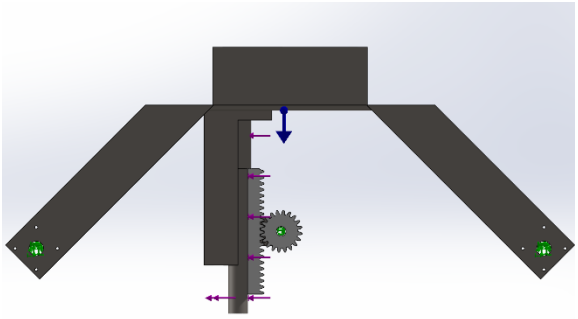


Figura 14. Fuerza de 2000 N.

Una vez aplicadas las condiciones del análisis, se prosigue con el mallado por el método de los elementos finitos. Se utilizan mallados finos basados en la curvatura combinada (Figura 15) debido a la estructura del modelo. Recordemos que entre más fina la malla, mayor es la precisión en los resultados.

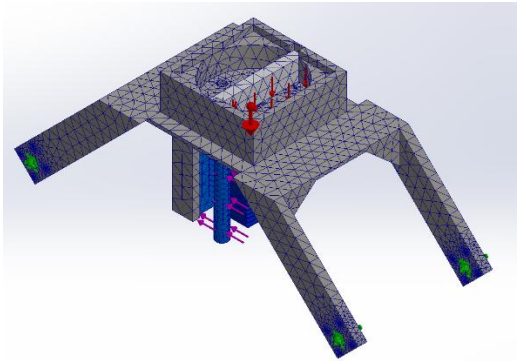


Figura 15. Mallado basado en la curvatura combinada.

Análisis de tensiones

Al realizar el análisis de tensiones, se tomaron dos comparaciones según el comportamiento de los componentes principales.

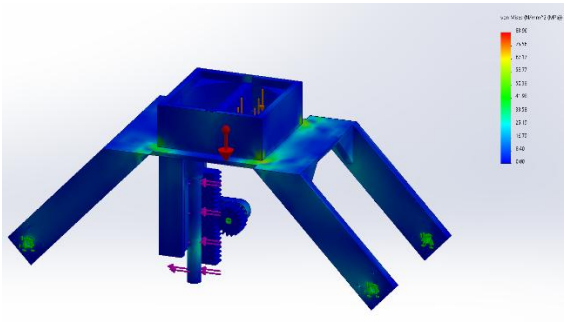


Figura 16. Distribución de tensiones.

Si se utiliza una posición de 4 cm en el tubo semillero; sin considerar el timón, el tubo se somete a la fuerza de arrastre del sistema con 82.3 MPa. Sin embargo, el tubo siendo un elemento principal se necesita evitar llegar al límite del material pues con la carga de arrastre en el suelo llega desgastarse y deformarse (Figura 17).

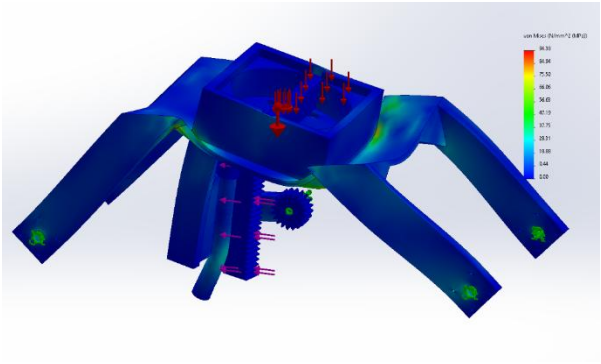


Figura 17. Esfuerzo y deformación por fuerza de arrastre en tubo semillero.

De acuerdo con la Figura 16 y 17, se muestran tensiones en zonas críticas como el tubo semillero y la base debido a la presión ejercida y el arrastre en el suelo. Sin embargo, con el timón se puede reducir es carga a la que se somete y pasar a tener el timón como un elemento para reducir daños y mejorar el modelo de siembra.

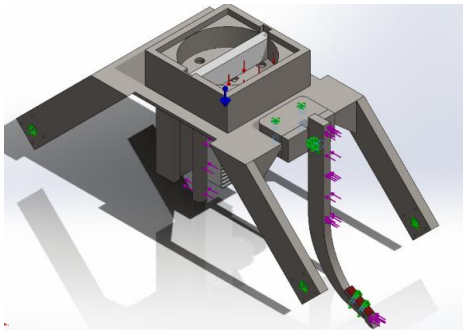


Figura 18. Cargas aplicadas al timón.

De acuerdo con la (Figura 18), la fuerza mayor va aplicada al timón como principal elemento de arrastre. Se somete a las mismas cargas anteriores, pero con sujeciones y una fuerza de 250 kgf en el timón cambiando el comportamiento del sistema anterior. En la (Figura 19), se muestra ahora una mayor tensión en el acoplamiento del timón, pues al tener un arrastre en el suelo la punta del timón resulta sometida a toda la fuerza aplicada y teniendo un valor de 103.89 MPa.

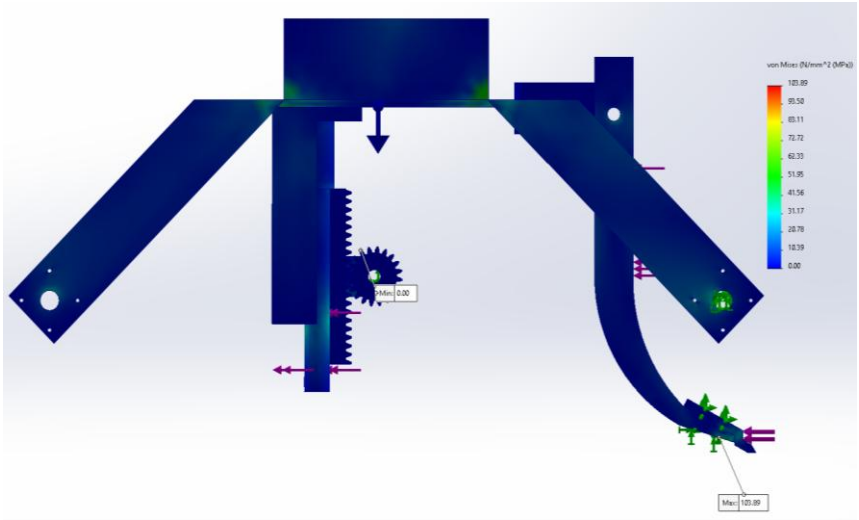


Figura 19. distribución de tensiones en timón.

Se aplica justamente en la punta porque es la pieza que se desplazara sobre la tierra consiguiendo abrir el suelo para la siembra y por esa razón debe considerarse una mayor carga externa a diferencia del tubo semillero. En la (Figura 20) se observa la forma en que dicha fuerza se aplica a la punta del timón.

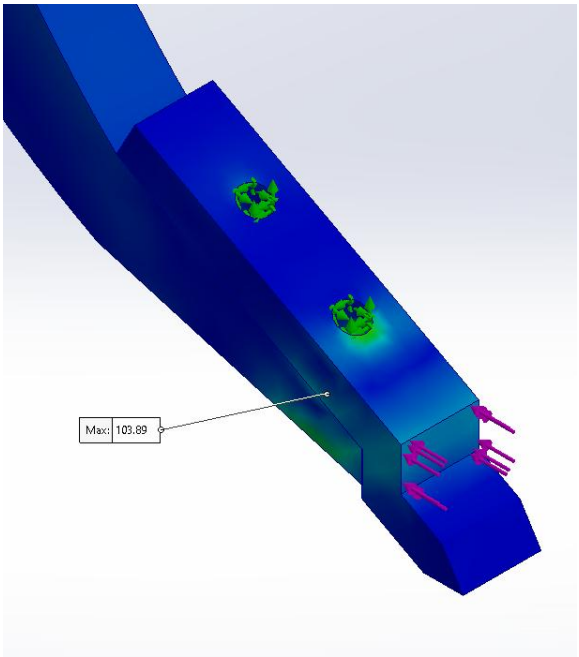


Figura 20. Fuerza aplicada a punta del timón.

Si comparamos los resultados incluso se observa que los valores aumentan hacia la punta del timón (Figura 21).

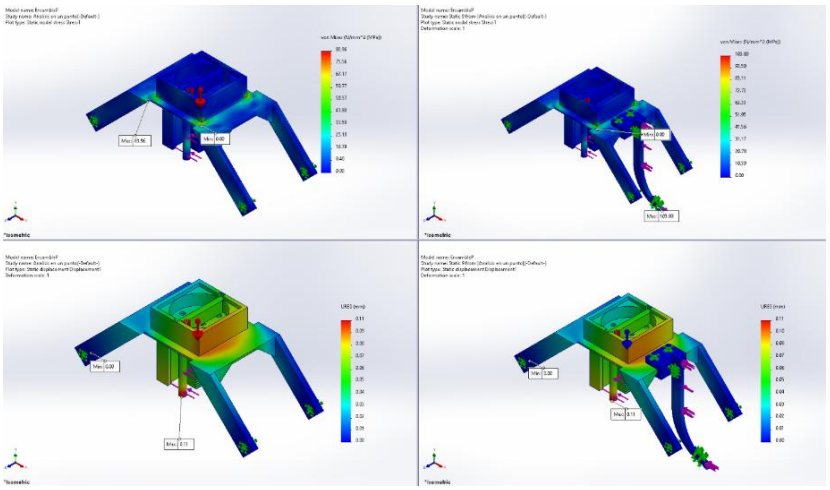


Figura 21. Comparación de resultados en tensiones y desplazamientos.

El factor se seguridad es un parámetro igual de importante, pues se comprueba que tan calificado está el modelo para soportar la carga sin fallar en las circunstancias pensadas. Para el cálculo del factor de seguridad basta con utilizar la ecuación 3:

$$\boldsymbol{n = \frac{\sigma_{material}}{\sigma_{diseño}}} \tag{3}$$

Si el factor de seguridad es mayor a 1 (n>1) nuestro material es el adecuado para soportar las cargas externas aplicadas y un análisis bueno dentro de los límites establecidos.

En el caso de este modelo el factor de seguridad es mayor a 1. En la (Figura 22c) se muestra el factor de seguridad cuando esta sin el timón y con un factor de seguridad de 2.98 con su respectivo análisis de tensiones (Figura 22a), mientras que la (Figura 22d) el factor de seguridad es un de 2.41 mostrando las tensiones con el timón (Figura 22b).

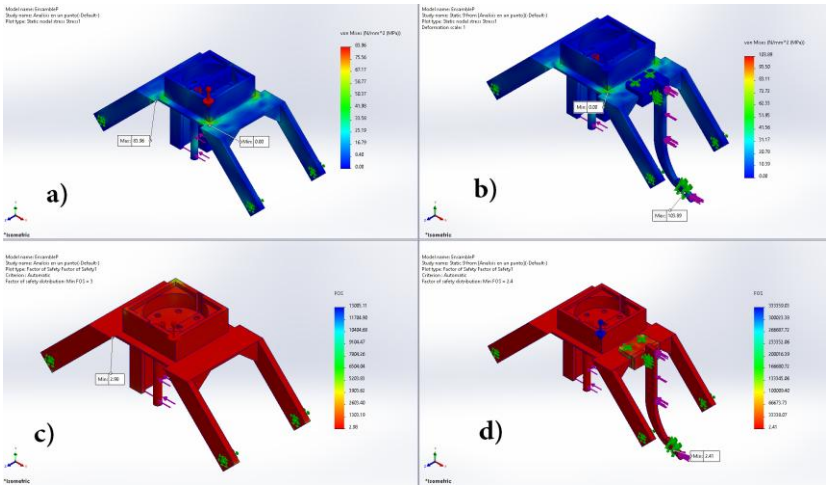


Figura 22. Comparación de factor de seguridad.

CONCLUSIONES

El diseño propuesto al someterse a cargas y fuerzas se ven afectados por el comportamiento al que se expone, por el hecho de trabajar en terrenos donde se ve afectado por suelos irregulares, condiciones ambientales y fuerzas de arrastre. Sin embargo, el realizar un análisis de esfuerzos con un software como SOLISDWORKS se puede evitar problemas en costos e incluso sugerir un cambio de diseño.

Según las condiciones en las que se trabaje cambian los esfuerzos, es decir, cada condición con la que se relaciona ya sea de contacto, ambiental, material y diseño aplican una modificación al proyecto y resultados que llegan a dar un cambio drástico. En los resultados se muestran análisis en diferentes condiciones del uso del modelo, tanto como se comporta con y sin el timón, con el objetivo de mostrar la función del timón como un sistema de arrastre y evitar un posible daño a todos los elementos del tubo semillero. Además, reducimos la inestabilidad en el soporte o estructura base y no comprometer el diseño a una pérdida total por no soportar la carga aplicada y la presión que está presente. Gracias al análisis se pueden reducir costos y analizar el modelo completo de manera precisa para cumplir con un resultado efectivo antes de realizar la construcción final. Nuestro modelo cumple con un factor mayor a 1, dándonos un resultado prometedor por los materiales que conforman el proyecto capaz de soportar las cargas externas aplicadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cano, J. E. S. (2014). La política agrícola en México, impactos y retos. Revista mexicana de agronegocios, 35, 946-956.
2. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025, mayo 16). Agricultura: El sector primario registra su mayor repunte en 14 años durante el primer trimestre de 2025. Gobierno de México. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/agricultura-el-sector-primario-registra-su-mayor-repunte-en-14-anos-durante-el-primer-trimestre-de-2025.
3. Hernández, S. C., & Carral, G. T. Capítulo i. Cambio climático y agricultura en México. Nueva educación, bioética y ruralidad alterna, 17.
4. Instituto para la Economía Popular, Manejo Agronómico de los Cultivos. Venezuela: INCE, 2005.
5. Maroni, J. R., & Fernández Asenjo, C. (2006). Novedoso dispositivo dosificador monograno de semillas.
6. Hibbeler, R. Mecánica de materiales. México: PEARSON EDUCACION, 2006.
7. Gere, J. M. MECANICA DE MATERIALES. MEXICO: THOMSON, 2014.
8. Vidal, C. R. (2016). Diseño mecánico con SolidWorks 2015. Ra-Ma Editorial.
9. Rodríguez Bravo, H., Anguiano Luna, C. A., Contreras Vargas, J. Á., Nieto Rangel, J. de J., & Hernández Ramírez, S. A. (2024). Diseño y construcción de prototipo para implantación de semillas. Avances científicos y tecnológicos en México I: Tomo VI – Ingenierías (pp. 232–237). Temacilli Editorial.
10. Herrera López, M. J., Medina Chaverria, J., & Quintero Riaza, H. F. “DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA EL EMPAQUE DE FORRAJE DE MAÍZ PARA ENSILAJE: DOSIFICACIÓN Y COMPACTACIÓN”. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 61, no. 2, pp. 4676-4685, 2008.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEMBRANAS DE CELULOSA/QUITOSANA CON Y SIN MWCNTS

Alheli Hernández Pérez, Nelly Flores Ramírez, Salomón Ramiro Vásquez García, Lada Domratcheva Lvova, Francisco Gabriel Granados Martínez, David Ricardo Poiré de la Cruz.

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
2220186g@umich.mx.

RESUMEN

Se obtuvieron y caracterizaron membranas de biopolímeros compuestas por celulosa (Cell), quitosana (Qt) y alcohol polivinílico (PVA), con y sin la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple MWCNTs al 1% y 3% con la intención de analizar y comparar el efecto de los MWCNTs en las propiedades morfológicas, mecánicas y de humectabilidad de las membranas. Las membranas se obtuvieron mediante el proceso de electrohilado, utilizando PVA como vehículo de ensamble en una proporción 2:1:1 (50% PVA, 25% Cell, 25% Qt). Se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), dureza Shore A y mediciones del ángulo de contacto.

La MEB reveló que las membranas sin incorporación de MWCNTs presentan fibras delgadas y homogéneas. La adición de MWCNTs, tanto al 1% como al 3%, provocó un engrosamiento de las fibras. Sin embargo, las membranas con concentración del 3% generaron algunos cúmulos, indicando una dispersión menos homogénea, atribuida a la tendencia de los nanotubos a aglomerarse[1]. La incorporación de MWCNTs al 1% no reveló diferencia significativa en comparación con la membrana prístina (Cell/Qt/PVA) en la determinación del ángulo de contacto, presentando una ligera disminución en la humectabilidad. En contraste, las membranas con concentración del 3% mostraron ser más hidrofílicas incluso en comparación con la membrana prístina. Este cambio se atribuye al impacto que produce el aumento de la concentración de MWCNTs en la humectabilidad superficial de las membranas reportado anteriormente[2].

Los MWCNTs mejoraron las propiedades mecánicas de las membranas, especialmente al 1% de concentración, actuando como refuerzos estructurales, aumentando la dureza sin comprometer la elasticidad[1], destacándose como un material prometedor para su aplicación en ingeniería de tejidos. En general, la adición de MWCNTs al 1% en las membranas mejora sus propiedades mecánicas sin modificar significativamente la morfología ni la humectabilidad por lo que las membranas obtenidas pueden ser aplicadas como una opción sustentable para sustituir el uso de algunos plásticos utilizados actualmente.

INTRODUCCIÓN

Las membranas nanoestructuradas compuestas por fibras poliméricas han demostrado poseer propiedades de biocompatibilidad y biodegradabilidad. Esto las convierte en una alternativa prometedora en el campo biomédico y de ingeniería de tejidos, así como en el desarrollo de hemostáticos[3]. Estas aplicaciones demandan características específicas en las fibras, tales como diámetros reducidos, alta porosidad, tensión superficial adecuada y propiedades conductoras, entre otras.

El electrohilado es un método eficaz para generar micro y nanofibras, esta técnica utiliza fuerzas eléctricas para producir fibras poliméricas. Al combinar las propiedades intrínsecas de cada biopolímero con las ventajas que ofrecen las fibras, es posible crear materiales con funcionalidades mejoradas[3]. En la fabricación de scaffolds (andamios), las nanofibras de polímeros naturales se han utilizado ampliamente gracias a su biocompatibilidad, biodegradabilidad, propiedades mecánicas favorables y bajos costos[3].

La quitosana es un biopolímero eficaz y sostenible derivado de la quitina, que además es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa.[3] La celulosa, por su parte, es un recurso abundante y renovable, lo que los convierte en una materia prima accesible para diversas aplicaciones[4].

Las nanoestructuras electrohiladas a base de celulosa y quitosana presentan un gran potencial para aplicaciones farmacéuticas. No obstante, exhiben deficiencias en sus propiedades mecánicas y eléctricas. Para mitigar estas limitaciones, se propone el uso de materiales de refuerzo, como los MWCNTs[5]. En este trabajo de investigación, se plantea el desarrollo de membranas nanoestructuradas a partir de celulosa y quitosana con y sin adición de MWCNTs utilizando la técnica de electrohilado, con el fin de realizar una comparación de las propiedades que presentan las membranas prístinas de Cell/Qt/PVA con las membranas que poseen MWCNTs incorporadas, comprobando si la incorporación de MWCNTs genera mejoras en cuanto a sus propiedades mecánicas y eléctricas.

TEORÍA

Antecedentes

La biocompatibilidad entre el quitosano y el alcohol polivinílico permite la inserción de nanoestructuras de carbono. En uno de sus estudios, Shokrgozar y colaboradores utilizaron el electrohilado para crear nanofibras de quitosano/PVA reforzadas con nanotubos de carbono de pared simple (CNTs-CL/PVA) para ingeniería de tejidos neuronales. Los resultados indicaron que los CNTs mejoran la morfología y las propiedades estructurales de los compuestos de nanofibras CL/PVA, beneficiando la proliferación celular. Las células mantuvieron su morfología normal al integrarse con las fibras, y las nanofibras fueron reabsorbidas sin una respuesta inmunitaria grave, lo que confirma el potencial de los nanocompuestos de CNT-CL/PVA como andamiaje para la ingeniería del tejido neural[6].

Por otro lado, Osorio-Delgado y colaboradores obtuvieron matrices nanocompuestas de alcohol polivinílico/celulosa bacteriana (PVA/CB) biocompatibles para el tratamiento de quemaduras y úlceras cutáneas, donde la celulosa mantuvo sus propiedades intrínsecas[7].

Además, se han fabricado también compuestos de lignocelulosa y quitosano reticulados con glutaraldehído y nanotubos de carbono de pared múltiple, mejorando la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y la resistencia al fuego. El compuesto nombrado LC/GC/MWCNT demostró ser un candidato prometedor para compuestos ecológicos a base de madera[8].

La ingeniería de tejidos promueve la elaboración de andamios con el propósito de ser aplicados para la regeneración de tejidos dañados o perdidos. Anteriormente se han realizado estudios que demuestran que los nanomateriales de carbono actúan reforzando las propiedades mecánicas, térmicas y antimicrobianas de los andamios. Ruiz et al[9]., utilizó quitosano, alcohol polivinílico y nano-iones de carbono oxidado (CS/PVA/ox-CNO) para crear andamios de tejido a largo plazo, las pruebas in vivo de 90 días, implantadas de forma subdérmica en ratas mostraron una buena biocompatibilidad (sin reacciones alérgicas ni formación de pus) y el contenido de ox-CNO aumentó la estabilidad de los nanocompuestos. Shokrgozar et al[6]., crearon nanotubos de carbono biocompatibles que coincidían con la conductividad eléctrica del corazón, estos tejidos artificiales lograron velocidades de conducción de excitación similares al tejido miocárdico nativo (22±9 cm/s).
De acuerdo con lo reportado anteriormente por Shokrgozar et al[6]., se puede asumir que otra de las muchas aplicaciones de las nanoestructuras de carbono, es su potencial aplicación como conductores eléctricos, facilitando la transferencia de energía eléctrica a los tejidos, actuando como "nanopuentes" entre los cardiomiocitos, acoplándose al latido sincrónico y la función del corazón.
En general el electrohilado es un método prometedor para crear andamios a base de nano-fibras con aplicación en la ingeniería de tejidos y se ha comprobado que los nanomateriales de carbono mejoran estos andamios, dando como resultado nanocompuestos prometedores debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y conductividad eléctrica[10].

Compositos y andamiaje en la biomédica

En la actualidad, los biopolímeros naturales tienen una gran demanda en el campo médico debido a sus características únicas, que los convierten en candidatos ideales para aplicaciones dentro del cuerpo humano. Su versatilidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad los hacen adecuados para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo: material médico, empaques, cosméticos, aditivos alimentarios, fabricación de ropa, tratamiento de agua, plásticos industriales, materiales absorbentes, biosensores y almacenamiento de datos.

La Ingeniería tisular se enfoca en desarrollar materiales que faciliten la regeneración o el reemplazo de tejido enfermo. En el reemplazo, se crea un tejido "base" in vitro (andamio) para su implantación en el tejido dañado, donde es colonizado por las células.

Los andamios son fabricados generalmente con materiales biodegradables para facilitar su integración y absorción por el cuerpo; su biodegradabilidad permite el reemplazo gradual del andamio por tejido funcional y previene respuestas adversas; estos pueden diseñarse para liberar agentes biológicos activos en el tejido blanco, los biopolímeros o activos en los andamios pueden tener actividad biológica intrínseca, promoviendo la migración o proliferación celular específica.

Este tipo de nuevos materiales compuestos se muestran como una alternativa atractiva para la industria del plástico, provenientes de recursos renovables, que pueden procesarse mediante tecnologías convencionales (extrusión, inyección, soplado) y se clasifican en polímeros basados en recursos renovables (almidón, celulosa), polímeros biodegradables basados en monómeros bioderivados como aceites vegetales, ácido láctico y por biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos)[11].

La gran demanda en el campo médico por sus características únicas, versatilidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad los hacen adecuados para: material médico, empaques, cosméticos, aditivos alimentarios, ropa, tratamiento de agua, plásticos industriales, materiales absorbentes, biosensores y almacenamiento de datos.

Biopolímeros en andamios

Los biopolímeros son sintetizados por organismos vivos (plantas, animales o microorganismos) mediante enzimas que unen componentes básicos como azúcares, aminoácidos o ácidos grasos hidroxilados para formar moléculas de alto peso molecular. Su biocompatibilidad se debe a que se degradan dentro del cuerpo mediante enzimas y procesos naturales, siendo reabsorbidos sin generar efectos secundarios en los sistemas biológicos. Estas propiedades son aprovechadas por el campo médico para la administración de fármacos y la ingeniería de tejidos[12].

Métodos de andamiaje

Algunas de las características más importantes de un andamio eficiente son alta porosidad, máxima área superficial, rigidez superficial, forma tridimensional específica, biodegradabilidad; además, deben presentar una estructura porosa que facilite la migración celular, la capilaridad y la interacción celular, teniendo en cuenta que el material debe ser compatible con el tejido para lograr una adhesión celular que guíe el crecimiento del tejido[13].

Las principales técnicas de obtención de andamios son la unión de cadenas, separación de fases y moldeo por fusión. La unión de cadenas consiste en una alineación de fibras impregnadas en una solución polimérica, tras la evaporación del solvente y la fusión del polímero, se elimina la matriz, limitando el control de la porosidad[13].

La técnica de separación de fases consiste en la disolución del polímero a baja temperatura y luego se induce la separación de fases, la fase sólida se elimina, creando un andamio poroso que permite la incorporación de moléculas bioactivas sin afectar su actividad. El moldeo por fusión utiliza una mezcla de polímero en polvo, microesferas y moldes en los cuales se vierte la mezcla y se lleva a la temperatura de transición vítrea del polímero[14].

Los andamios de polímeros biodegradables se fabrican como nanofibras y se mezclan con nanomateriales para mejorar sus propiedades, los nanotubos de carbono se consideran una carga ideal debido a sus características mecánicas, térmicas y conductoras. La elección de la técnica de fabricación depende de las propiedades deseadas del andamio y de la aplicación específica, la ingeniería de tejidos avanza hacia andamios más sofisticados que imiten mejor la complejidad de los tejidos nativos[15].

Proceso de electrohilado

El electrohilado concede ventajas en cuanto a su proceso, una de ellas es que esta técnica es ecológica y a partir de esta es posible obtener microfibrillas con un amplio abanico de aplicaciones, superando a otras técnicas gracias a su elevada relación superficie-área-volumen, lo que potencia la disponibilidad de sus propiedades intrínsecas y posee un alto potencial para el desarrollo de materiales ecológicos que sustituyan a los sintéticos convencionales. Esta técnica utiliza un campo eléctrico como fuerza motriz para el proceso de hilado[16].

Instrumentación y equipo de electrohilado

El electrohilado de micro y nanofibras poliméricas se basa en la aplicación de un campo eléctrico de alto voltaje a una solución polimérica[16].

El proceso consiste en la formación de un campo eléctrico de alto voltaje generado entre la boquilla de un dosificador y un colector, este campo eléctrico supera la tensión superficial de la solución cargada, provocando la expulsión de finos chorros de solución desde el capilar hacia el colector. El chorro de solución polimérica se alarga debido a fuerzas externas e internas mientras se desplaza hacia el colector, el solvente se evapora durante la trayectoria y los segmentos de fibra resultantes se depositan de forma aleatoria o controlada sobre el colector, que suele ser una lámina metálica; así es como la acumulación de fibras crea una membrana porosa con una estructura de red.

La fuente de alta tensión proporciona la tensión eléctrica continua en kilovoltios mientras que la punta de aguja o pipeta extruye la solución polimérica y el colector conectado a tierra actúa como punto de deposición para las fibras. En la figura 1 se puede observar una representación esquemática de este proceso[16].

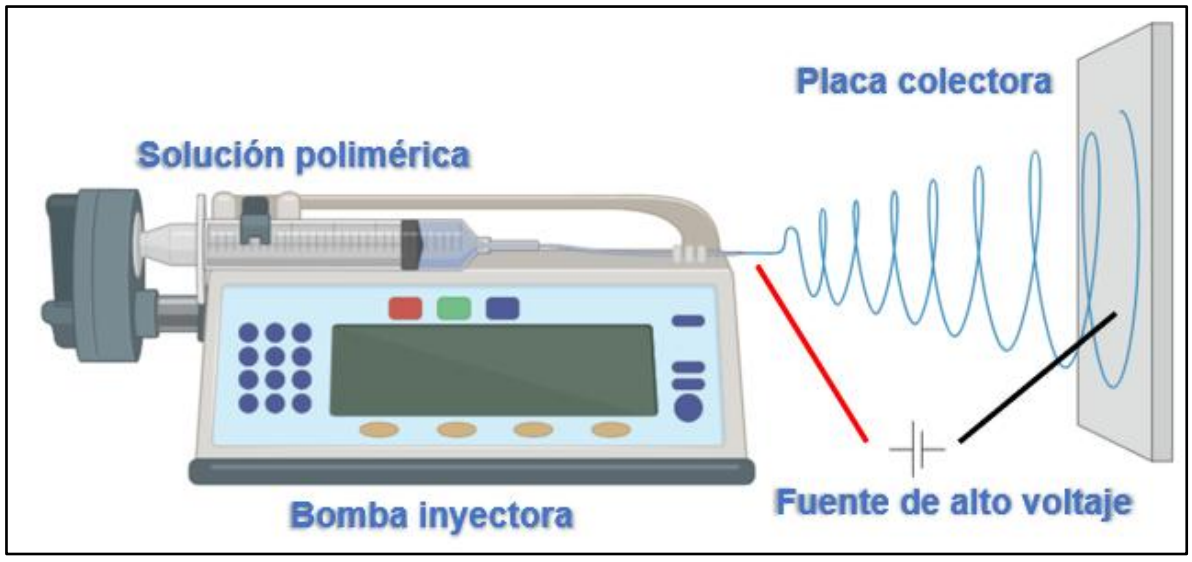


Figura 1 Representación esquemática del equipo de electrohilado.

El éxito del electrohilado y las características finales de las fibras obtenidas dependen de un conjunto de parámetros cruciales (Figura 2) que pueden agruparse en dos categorías principales:

Parámetros de la solución

- Concentración: La cantidad de polímero presente en la solución influye directamente en la viscosidad y, por ende, en la formación del chorro y el diámetro de las fibras.
- Peso Molecular: Un mayor peso molecular del polímero generalmente se traduce en una mayor viscosidad de la solución, lo que puede afectar la estabilidad del proceso.
- Viscosidad: Es un factor determinante en la formación del chorro y la evaporación del solvente, afectando directamente la morfología de las fibras.
- Tensión Superficial: Influye en la formación de la gota en la punta de la hilera y en la estabilidad del chorro durante el proceso.
- Conductividad: Una conductividad adecuada de la solución es esencial para la correcta aplicación del campo eléctrico y la formación de las fibras.

Parámetros ambientales

- Humedad: la humedad relativa del entorno puede afectar la tasa de evaporación del solvente, influyendo en la morfología y las propiedades de las fibras.
- Temperatura: la temperatura del ambiente también juega un papel importante en la evaporación del solvente y puede afectar la viscosidad de la solución.

El control preciso de estos parámetros, tanto de la solución como ambientales, es fundamental para obtener fibras con la morfología y el diámetro deseados[16].

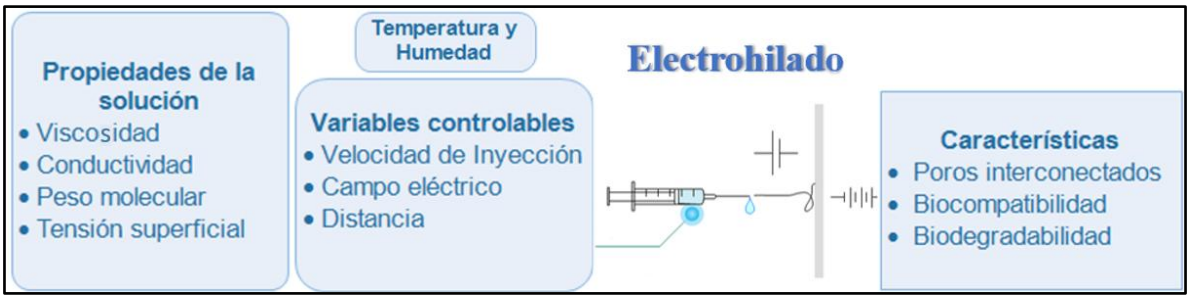


Figura 2 Factores y características importantes para la obtención de andamios funcionales a partir del proceso de electrohilado.

Celulosa

La celulosa es un polímero natural extraído de las paredes celulares de plantas, madera y fibras naturales, con enlaces 1,4-ß glucosídicos ($C_6H_{10}O_5$), que le confieren una estructura semicristalina, las cadenas de celulosa se unen mediante puentes de hidrógeno, formando una estructura resistente y fibrosa[4].

La celulosa microcristalina (MCC) es un derivado de la celulosa que se obtiene despolimerizando y purificando parcialmente plantas fibrosas, es la fracción sólida de la celulosa y mantiene un bajo peso molecular ya que es resistente a la hidrólisis de la celulosa. Se presenta como un polvo blanco e inodoro que al transformarse en fibras utilizando el proceso de electrohilado posee propiedades como alta área superficial y porosidad, retención de humedad, dureza y rápida degradación.

La MCC se puede obtener de plantas fibrosas como lo son el algodón, el bambú, la cáscara de trigo, papeles de desecho, cáscaras de nuez y bagazos de caña de azúcar o de algún tipo de agave.
El proceso de obtención de MCC comienza con la separación de la celulosa alfa (nativa) de las fracciones beta y gamma, con la hidrólisis con ácido clorhídrico en un reactor a 100°C durante 60 minutos, continúa con la neutralización y lavado de agua destilada hasta lograr un pH neutro, por último, la celulosa se lleva a secado a 55-60°C y es molida hasta obtener el tamaño de partícula deseada[17].

Las propiedades de la celulosa microcristalina la hacen adecuada para diversas aplicaciones. Su grado de polimerización oscila entre los 220 y 340 unidades de glucosa, considerablemente menor que la celulosa natural de (300-15000 unidades)[17].

En la industria farmacéutica la celulosa microcristalina se utiliza principalmente como agente de control reológico regulando la viscosidad y flujo de formulaciones líquidas, como aglutinante permitiendo la formación de comprimidos y cápsulas, como excipiente actuando como sustancia inactiva en la fabricación de medicamentos. Entre sus aplicaciones terapéuticas se encuentran tratamiento de la absorción de ácidos biliares y tratamiento de la gastritis alcalina[17].

La celulosa microcristalina es un biopolímero versátil con diversas aplicaciones, especialmente en la industria farmacéutica. Su obtención a partir de fuentes renovables y su biocompatibilidad la convierten en un material prometedor para el desarrollo de productos innovadores y sostenibles[17].

Electrohilado de celulosa

Las fibras electrohiladas a base de celulosa y sus derivados son candidatas potenciales para aplicaciones farmacéuticas debido a sus propiedades de disolución y liberación controlada de fármacos[4]. La celulosa forma fibras con elevadas propiedades mecánicas debido a sus extensos enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares, además de que posee numerosos grupos reactivos que facilitan la formación de enlaces cruzados entre las cadenas poliméricas, promoviendo la interacción con otros polímeros[4].

La celulosa presenta alta estabilidad térmica y resistencia química en comparación con otros biopolímeros, además es capaz de disolverse en NaOH/urea, un solvente económico y eficiente sometido a bajas temperaturas[18].

Quitosana

La quitosana es un biopolímero natural obtenido por desacetilación de quitina, un polisacárido abundante en el exoesqueleto de crustáceos, algas y hongos. La quitosana es un polímero biodegradable, no tóxico y biocompatible, adecuado para diversas aplicaciones industriales, formado por N-acetil-D-glucosamina y N-amino-D-glucosamina. Los grupos amino que presenta en su estructura son los principales sitios para modificaciones químicas que le permiten ajustar las propiedades según la aplicación. El grado de desacetilación de la quitosana define la relación entre N-amino-D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina, influyendo en las propiedades del biopolímero[3].

Electrohilado de quitosana

El electrohilado de quitosana es prometedor para el desarrollo de materiales ecológicos con posibles aplicaciones en biomedicina y protección ambiental. Las nanofibras de quitosana pueden actuar como andamios tridimensionales para el crecimiento celular y la regeneración de tejidos siendo ideales para la creación de apósitos para heridas, el encapsulamiento y liberación de fármacos de forma controlada[3].

El proceso de electrohilado consiste en disolver la quitosana en ácido acético añadiendo algún otro polímero que le otorgue flexibilidad y homogeneidad para la formación de las fibras como el PVA, ya que, por su estructura, su tendencia al encapsulamiento no permite la formación de fibras por sí misma. Al someter la mezcla polimérica al electrohilado se espera que el disolvente se evapore, solidificando las nanofibras en el colector[19].

Alcohol polivinílico

El alcohol polivinílico es un polímero sintético biodegradable y soluble en agua con la fórmula química general $(C_2H_4O)_n$, ampliamente utilizado en diversas industrias, como la biotecnología, la medicina, la alimentaria, la farmacéutica, la cosmética y la tecnología de envases y es un elemento clave en la producción de plásticos más sostenibles. Se obtiene a través de la hidrólisis del acetato de polivinilo, es un polímero altamente polar, químicamente resistente, soluble en agua y se mezcla eficientemente con otros polímeros naturales como la celulosa y la quitosana[20].

Actualmente el PVA se utiliza para la síntesis de materiales compuestos. La obtención de nanocompuestos de la mezcla de grafeno con PVA ha demostrado mejorar sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, ampliando así las aplicaciones del PVA en campos como la electrónica, energía y catálisis[20].

Celulosa/quitosana

La combinación de quitosana y celulosa en recubrimientos y películas mejora sus propiedades mecánicas y la actividad bactericida, esta sinergia impulsa la creación de nanofibras híbridas con propiedades prometedoras, la disolución de ambos polímeros en un sistema común no es tarea fácil. Sin embargo, se han fabricado nanofibras híbridas de quitosana y celulosa mediante electrohilado. Este proceso permite que ambos polímeros logren mezclarse en una solución utilizando un polímero de anclaje como lo es el PVA, la combinación de quitosana con celulosa mejora la estabilidad hidrolítica y las propiedades mecánicas de las fibras[8].

Fracción metanólica

Durante la destilación de productos de fermentación de caña azúcar para la producción de ron, se obtiene una fracción metanólica como subproducto. Esta fracción es una mezcla de productos de fermentación de materia prima que están unidos entre sí por enlaces de puentes de hidrogeno. La fracción metanólica se caracteriza por su falta de pureza y está compuesta aproximadamente por 60% de metanol, 30% de etanol (alcohol etílico) presente en menor proporción y 10% de un contenido acuoso residual. Además de estos componentes principales, la fracción metanólica también contiene otros compuestos residuales del proceso de destilación, como azúcares e impurezas[21].

Nanoestructuras de carbono

El carbono es un elemento único debido a su capacidad de formar una amplia variedad de estructuras, un fenómeno conocido como alotropía. Esta diversidad se manifiesta en la forma y propiedades de sus diferentes alótropos. Entre los nanomateriales de carbono, se encuentran:

- Fullerenos: estructuras esféricas y elipsoidales.
- Nanotubos de carbono: estructuras cilíndricas.
- Diamante: estructura cristalina tridimensional.
- Grafeno: estructura bidimensional de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal.

Estudios recientes han demostrado que la adición de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs) a mezclas poliméricas de celulosa y quitosana mejora las propiedades mecánicas y estructurales en comparación con el electrohilado de biopolímeros sin SWCNTs. La hidrofobicidad inherente a los SWCNTs puede dificultar su dispersión y miscibilidad con otros materiales. No obstante, la funcionalización de los SWCNTs con grupos hidrófilos como -OH y -COOH mejora su solubilidad e interacción con otro tipo de materiales[10].

Los SWCNTs funcionalizados actúan con la quitosana que al ser un biopolímero hidrofílico con grupos amino, hidroxilo primario y secundario, puede formar enlaces de hidrógeno con los grupos carboxilo e hidroxilo de los SWCNTs funcionalizados y por su parte con las celulosa también puede formar enlaces con sus grupos hidroxilo. Esta compatibilidad y posible interacción mejoran la dispersión, la adhesión interfacial y las propiedades mecánicas del material resultante[10].

Métodos de síntesis de nanoestructuras de carbono

Existen varios métodos de obtención de nanoestructuras de carbono (CNSs) los cuales se basan en someter la materia prima con alto contenido de carbono a altas temperaturas, resultando en la síntesis de diferentes nanomateriales que muestran diferentes morfologías y propiedades[22]. Algunos de los métodos más utilizados para sintetizar nanoestructuras carbono son:

- Método de descarga de arco eléctrico.
- Método por electrólisis.
- Método de ablación láser.
- Método de deposición química de vapor.

Deposición química de vapor

La deposición química de vapor (CVD) se posiciona como una técnica esencial en la producción de nanoestructuras de carbono. La continua investigación en este campo se centra en optimizar el proceso, explorar nuevos precursores y desarrollar aplicaciones innovadoras, siempre con un enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental[23].

La deposición química de vapor es un proceso químico ampliamente utilizado para la producción de nanoestructuras de carbono de alta pureza y rendimiento. Este método ofrece versatilidad en la síntesis de nanotubos de carbono de una o varias paredes, grafeno, fullerenos y nanoesferas[23].
En un proceso CVD un sustrato se expone a precursores en forma de vapor que generalmente a altas temperaturas reaccionan o se descomponen en su superficie, resultando en el depósito deseado. Este proceso procede en atmosfera inerte o al vacío y en algunos casos en presencia de un catalizador. Los subproductos volátiles generados se eliminan mediante un flujo de gas inerte o una bomba de vacío según sea el caso. Las características de las nanoestructuras obtenidas por CVD dependen de varios factores, como el precursor, el gas de arrastre, la presión del flujo, la temperatura del horno, la forma de la cámara de reactor y el tipo de colectores[23]. Aunque la síntesis suele usar productos petroquímicos, se busca aplicar la química verde para minimizar el impacto ambiental, explorando precursores alternativos y procesos más sostenibles.

Caracterización

Estas técnicas proporcionan información crucial sobre las características y propiedades de los nuevos materiales, basándose en la evaluación y análisis de muestras cuidadosamente preparadas.

Microscopia electrónica de barrido

El MEB es una técnica de caracterización ampliamente utilizada en diferentes campos de la investigación y la industria, la técnica consiste en hacer incidir un haz de electrones sobre la muestra barriendo la superficie mediante lentes electromagnéticos. La interacción del haz con la muestra genera diversas señales como: electrones secundarios, retrodispersados, rayos X, etc. Los cuales son captadas por un sensor que las transforman y genera una imagen de la superficie de la muestra. Estas señales permiten obtener una morfología detallada del material. Usualmente el cañón de electrones es un filamento de tungsteno que actúa como cátodo que, al aplicarle un alto voltaje, lo que resulta en la liberación de electrones dirigidas hacia el ánodo donde se coloca la muestra, generando diversas señales en su superficie[25].

Evaluación de dureza

La dureza Shore es un método rápido y sencillo para evaluar la dureza, especialmente en materiales blandos y flexibles que se basa en las normas ASTM D2240 e ISO 868 y proporciona lecturas en una escala de 0 a 100 Shore, el ensayo implica aplicar un durómetro con un indentador específico sobre la superficie del material y medir la profundidad de penetración del indentador, que se traduce en una lectura de dureza, para realizar la prueba, se utiliza una probeta con un espesor mínimo de 6 mm, y se realizan al menos 5 mediciones en diferentes puntos de la muestra, manteniendo una distancia mínima de 6 mm entre cada punto de medición. La fuerza aplicada en esta escala Shore A es de 8.050 N utilizando un indentador cónico truncado con un ángulo de 35°, el rango de medición típico es de 10 a 90 Shore A, con una precisión de ± 20 Shore A[26].

Evaluación de hidrofobicidad

El ángulo de contacto es una técnica fundamental para comprender y controlar la interacción entre líquidos y superficies sólidas, la humectabilidad de una superficie es su capacidad para ser mojada por un líquido. La medición del ángulo de contacto implica depositar una gota de líquido sobre una superficie y capturar una imagen de la gota. El goniómetro mide el ángulo entre la tangente a la gota en el punto de contacto trifásico (líquido-sólido-aire) y la superficie, este ángulo depende de la interacción entre el líquido y la superficie. Un ángulo de contacto bajo (0° a 90°) indica una superficie hidrofílica, donde la gota se extiende mientras que un ángulo alto (mayor a 90°) sugiere una superficie hidrofóbica, donde la gota minimiza el contacto y adopta una forma esférica[27].

Diseño experimental

Una vez recolectados los datos, se procede con su procesamiento, la interpretación de los datos consiste en dar significado a los datos numéricos obtenidos, sintetizar y simplificar la información, organizar los datos en categorías relevantes y la elaboración de gráficos que permitan representar visualmente los resultados para facilitar su comprensión. Finalmente, se realiza un análisis descriptivo y comparativo de los datos para obtener conclusiones significativas y responder al objetivo de la investigación[24].

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de nanotubos de carbono

Los MWCNTs se sintetizaron mediante CVD, utilizando la fracción metanólica derivada de la fermentación de la caña de azúcar como precursor sostenible, utilizando la metodología descrita por Arroyo et al[21]. El proceso que describe es un método común para la síntesis de nanoestructuras de carbono mediante pirólisis.

La obtención de los MWCNTs se llevó a cabo mediante un proceso de CVD (Figura 3), utilizando como precursor 20 ml de fracción metanólica en ebullición que se piroliza en el reactor. Se utiliza argón con un flujo de 30-35 ml/min como gas de arrastre para transportar el precursor vaporizado al reactor y para evitar la probabilidad de reacciones de oxidación secundarias del precursor. Como reactor se usó un tubo de cuarzo dentro de un horno tubular a 750°C utilizando una barra de acero inoxidable como catalizador. A la salida del reactor, se instaló un condensador y una trampa de acetona para capturar los vapores y gases residuales.

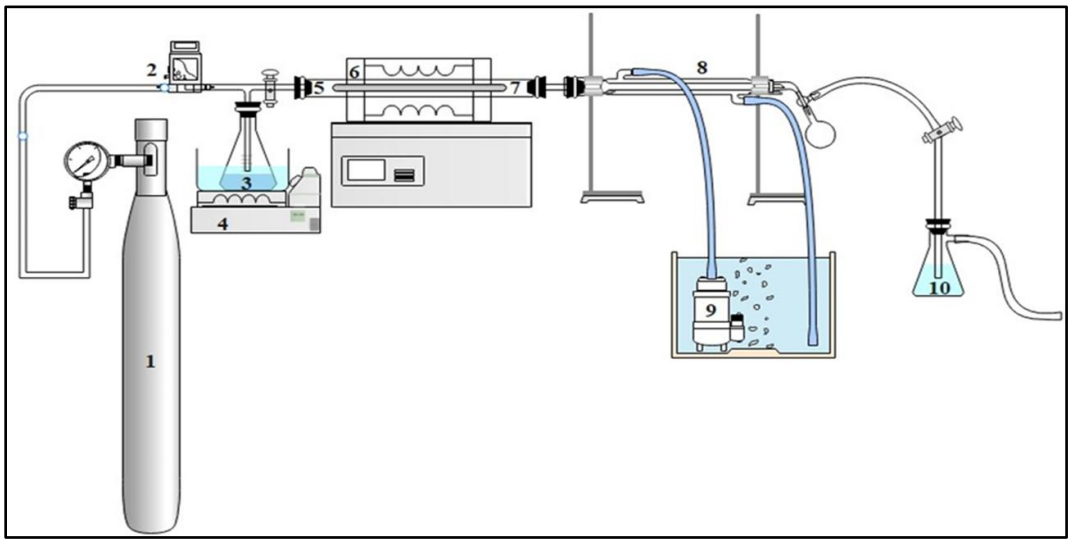
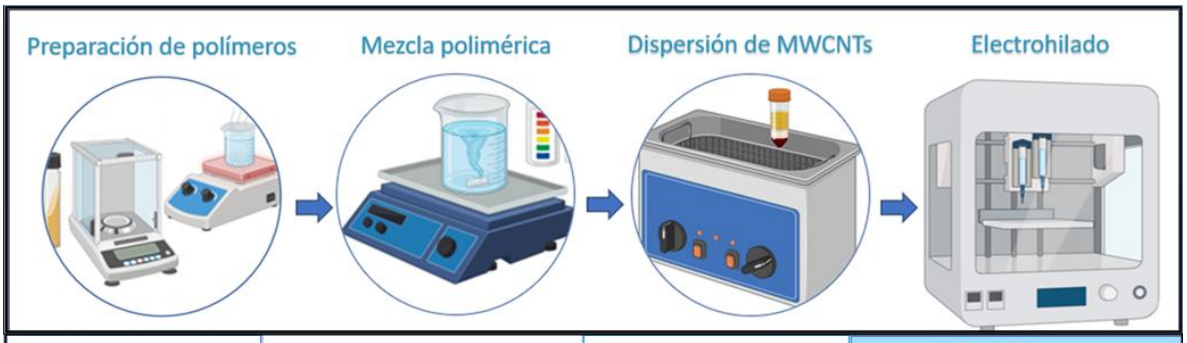


Figura 3 Representación ilustrativa del equipo CVD: 1) argón, 2) flujómetro, 3) matraz con fracción metanólica, 4) placa de calentamiento, 5) tubo de cuarzo, 6) horno tubular, 7) barra de acero inoxidable, 8) condensador, 9) bomba de agua, 10) trampa de acetona.

Electrohilado

El objetivo principal en la preparación de las soluciones para electrohilado fue obtener los productos deseados en solución pura. Para ello, se controlaron rigurosamente las proporciones de los reactivos Qt, Cell y PVA, y se ajustaron las cantidades de cada polímero. Cada reactivo se disolvió en su solvente específico: ácido acético para Qt, hidróxido de sodio con urea para Cell, y agua destilada para PVA, manteniendo las proporciones constantes en todas las mezclas.

Se disolvió Cell a una concentración de 0.3 M en una solución de NaOH/urea 0.1 M y 0.2 M respectivamente, la solución de Qt se obtuvo a una concentración de 0.3 M en una solución de CH_3COOH al 0.4 M y la solución de PVA se preparó a una concentración de 0.2 M en agua destilada. La obtención de las membranas se llevó a cabo utilizando una proporción equimolar (1:1:2) de la mezcla de polímeros Cell/Qt/PVA, a dicha mezcla se le incorporaron MWCNTs, al 1% y 3% en peso, por último, se sometió a electrohilado utilizando un equipo HZ 12, bajo las condiciones descritas por Mombini et al[28]. Las condiciones de electrohilado utilizadas fueron: una velocidad de dosificación de 0.005 a 0.010 ml/min, un voltaje aplicado de 20 a 25 kV, y una distancia de 20 a 22 cm entre la unidad de dosificación y el colector como se puede observar en la figura 4.



Disolución de los polímeros Cell Qt y PVA en sus respectivos solventes.	Cell/Qt/PVA Cell/Qt/PVA/MWCNTs 1% Cell/Qt/MWCNTs 3%	Incorporación de MWCNTS al 1% y 3% p/p con 0.1 ml de etanol durante 30 min.	**Condiciones** **Velocidad de dosificación:** 0.005-0.010 ml/min **Voltaje aplicado:** 20-25 Kv **Distancia:** 20-22 cm **Tiempo:** 6 h

Figura 4 Proceso de obtención de las membranas por electrohilado.

Análisis y procesamiento de los datos

El diámetro de las fibras de las membranas Cell/Qt/PVA, con y sin MWCNTs, se midieron en nanómetros y los datos se registraron basándose en la fórmula de muestra infinita, con un intervalo de confianza del 95% y un margen de error de 0.05.

Se utilizó el programa Image J para capturar y realizar mediciones precisas de las imágenes MEB de las membranas, así como las dimensiones del ángulo de contacto con Drop, Analysis LB ADSA. Se utilizo también el software estadístico STATISTICA 7 con el fin de realizar un análisis tipo ANOVA, que dio como resultado una tabla de registro de parámetros que evalúa si existe diferencia estadística o no. Considerando la cantidad de unidades observadas en las micrografías (n), se tomó como "muestra infinita"[28] para determinar los parámetros estadísticos de las fibras utilizando la formula siguiente:

$n = (Z\infty 2)\ (p)\ (q)\ /\ (e^2)$

El margen de error representa la información del rango de variación aceptable en los resultados, reconociendo que los datos recopilados no son perfectamente precisos, controlar este margen es crucial para asegurar la confiabilidad de las conclusiones.

Se selecciono una muestra aleatoria de la población minimizando sesgos y aumentando la representatividad de los datos. En este trabajo, se optó por someter los datos a un nivel de confianza del 95% donde:
$Z\infty$ = estadístico dependiente del nivel de confianza (1.96^2).
p = probabilidad de ocurrencia del evento (0.95).
q = probabilidad de ocurrencia del evento (0.05^2).
e = margen de error (estimación de error Max aceptado)

Al sustituir los valores en la ecuación se obtuvo el tamaño de muestra (n) para el numero de diámetros de fibras necesarios (74) para su análisis estadístico. Respecto a esta información obtenida considerando que q = 0.05 (σ) para calcular el margen de error en cada una de las pruebas de ángulo de contacto, dureza y diámetro de las fibras.

Se utilizo la ecuación:
$X \pm t\ \sigma/2\ S/\sqrt{n}$
Donde:
X = media
σ/2 = 0.025 (el valor se tomó de la tabla del libro escrito por Levin & Rubin, et al[29]., para conseguir el valor de t "grado de libertad" n-1)
$t\ \sigma/2\ S/\sqrt{n}$ = margen de error
se despeja $S/\sqrt{n}$

Donde:
S = desviación estándar
n = tamaño de la muestra (obtenido en la ecuación de "muestra infinita")
este resultado se multiplico por t σ/2 y por cada promedio de medida de las diferentes muestras se determinó el rango de variación.

RESULTADOS

MEB

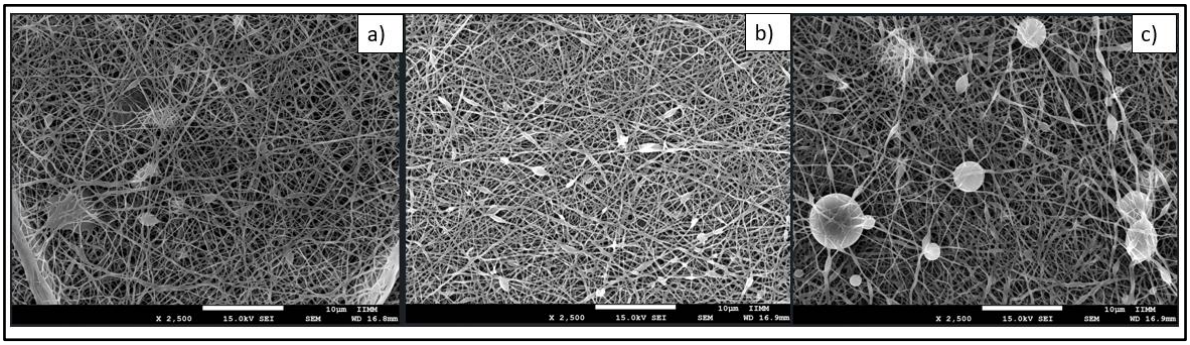


Figura 5 Micrografías de las membranas de a) Cell/Qt/PVA, b) Cell/Qt/PVA/MWCNTs 1% y c) Cell/Qt/PVA/MWCNTs 3%.

Las micrografías MEB muestran diferencias morfológicas entre las fibras electrohiladas de Cell/Qt/PVA con y sin MWCNTs al 1% y 3% relación peso/peso. Las fibras sin MWCNTs presentan una estructura delgada y homogénea lo que sugiere una distribución uniforme de los polímeros base, aunque exhiben un aumento en el diámetro en ciertas partes de las fibras, mantienen una estructura relativamente uniforme. Esta uniformidad relativa podría ser un indicativo de una interacción eficiente entre los componentes en esta formulación. Por otro lado, las membranas obtenidas con la incorporación de MWCNTs al 1% y al 3% presentan una estructura de fibras uniformes en ambas concentraciones, sin embargo, se puede observar la presencia de cúmulos muy pronunciados en las membranas con MWCNTs al 3%, lo que sugiere que la dispersión a esta concentración de MWCNTs es menos homogénea en comparación con la concentración al 1%. Este aumento de cúmulos podría

deberse a dos factores, a la aglomeración de los MWCNTs por su tendencia a formar redes entre ellos a concentraciones elevadas y a la acumulación de la mezcla polimérica que no alcanzo a adquirir la forma de fibra durante el proceso de electrohilado, lo que puede resultar en un efecto sobre las propiedades mecánicas de las membranas.

La incorporación MWCNTs en las matrices poliméricas puede intervenir con el tamaño y la formación de los poros en las membranas, la funcionalización que presentan los nanomateriales de carbono también puede desempeñar un papel importante en la manera en la que se interconectan los poros al actuar como puentes de anclaje consiguiendo una estructura diferente en comparación con las membranas sin MWCNTs.

Se utilizó el método de ANOVA[30] para la comparación múltiple, con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) en STATISTICA 7.

Este análisis permitió determinar si existía diferencia estadística significativa entre los diámetros de las fibras en función de su composición, en la tabla 1 se muestran los resultados y se señala si existe diferencia estadística entre ellas.

Tabla 1 Datos estadísticos descriptivos del diámetro de las fibras.

Diámetro de las fibras en (nm), número de muestra (n=74), (promedio ± margen de error)

Fibras	Diámetro
Cell/Qt/PVA[a]	109.0 ± 10.0
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 1%[a]	139.2 ± 20.9
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 3% [b]	238.9 ± 35.9

Las membranas de Cell/Qt/PVA con MWCNTs al 1% y 3% p/p presentan diámetros de fibra mayores en comparación con las membranas prístinas de Cell/Qt/PVA sin incorporación de MWCNTs. Este aumento en el diámetro de las fibras sugiere que la interacción de los biopolímeros, el PVA y los grupos funcionales de los MWCNTs podría ser responsable del engrosamiento observado en las fibras. Los MWCNTs, pudieron averse adherido a la pared de las fibras y entre los poros. A pesar del aumento en el diámetro de las fibras observado al incorporar los MWCNTs, solo el diámetro de las fibras en las membranas con MWCNTs al 3% incremento significativamente. Sin embargo, los datos obtenidos en este trabajo en comparación con los reportados por algunos investigadores como Mombini et al[31]., cumplen con el promedio ideal para aplicaciones biomédicas que es de entre 100 y 200 nm.

Angulo de contacto

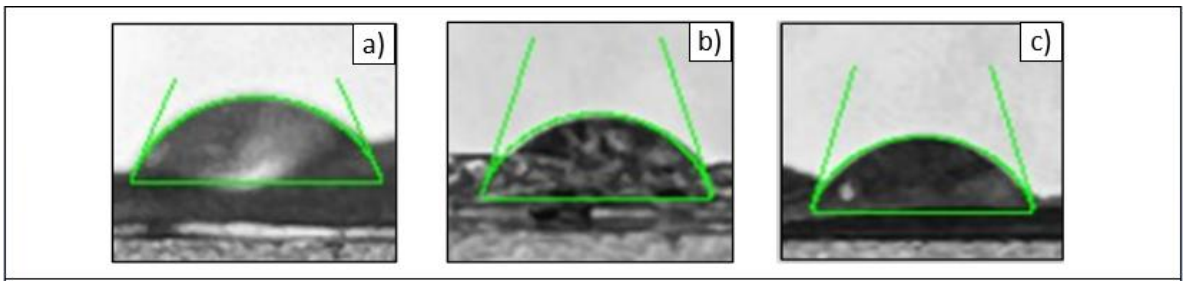


Figura 6 Angulo de contacto con Image J Drop, Analysis LB ADSA a) Cell/Qt/PVA b) Cell/Qt/PVA/MWCNTs al 1% p/p c) Cell/Qt/PVA b) Cell/Qt/PVA/MWCNTs al 3% p/p.

Tabla 2 Datos específicos del ensayo de ángulo de contacto de las membranas.

Membranas	volumen de la gota mm^3	superficie de contacto mm^2	superficie de la gota mm^2
Cell/Qt/PVA	1.97E-02	2.49E-01	3.15E-01
Cell/Qt/PVA/MWCNTs al 1% p/p	2.18E-02	2.65E-01	3.37E-01
Cell/Qt/PVA/MWCNTs al 3% p/p	2.30E-02	1.99E-01	3.17E-01

Los resultados demostraron que las membranas poseen una superficie hidrofílica, aunque el ángulo de contacto varía según la composición de las membranas ya que la incorporación de los MWCNTs puede intervenir en el tamaño de los poros de las membranas.

Tabla 3 *Datos estadísticos descriptivos del ángulo de contacto de las membranas.*

Ángulo en grados (°), número de muestra (n=3), (promedio ± margen de error)

Membranas	Angulo de Contacto
Cell/Qt/PVA[a]	64.8 ± 6.8
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 1%[a]	61.3 ± 4.7
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 3%[b]	71.4 ± 6.7

La adición de MWCNTs al 1% a las membranas de Cell/Qt/PVA no generó un cambio significativo en la hidrofobicidad de las membranas. Sin embargo, se observó una ligera tendencia a presentar un mayor ángulo de contacto en las membranas con incorporación MWCNTs, lo que sugiere una leve disminución en la humectabilidad de la superficie. Las membranas de Cell/Qt/PVA con MWCNTs al 3% presentaron un ángulo de contacto notablemente mayor siendo más hidrofóbicas que las membranas con un 1% de MWCNTs o sin ellos, esto indica que una mayor concentración de MWCNTs podría influir en el aumento de la hidrofobicidad ya que los nanotubos de carbono pueden mejorar la permeabilidad de las membranas debido a sus propiedades estructurales y de superficie únicas. Los MWCNTs en altas concentraciones, tienden a aglomerarse (aun y cuando se logró una dispersión durante el proceso de obtención), creando zonas menos hidrofílicas disminuyendo la humectabilidad en las membranas. Por el contrario, en bajas concentraciones, los MWCNTs pueden actuar como puentes entre la membrana y el agua, disminuyendo la tensión interfacial y favoreciendo la humectabilidad[32].

Dureza

Tabla 4 Datos estadísticos descriptivos de la dureza Shore A de *las* membran*as.*

Dureza (Shore A), número de muestra (n=5), (promedio ± margen de error)

Membranas	Dureza Shore A
Cell/Qt/PVA[a]	46.2 ± 0.4
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 1%[b]	50.2 ± 0.4
Cell/Qt/PVA/MWCNTs 3%[a]	46.8 ± 0.9

Las pruebas de dureza revelaron que la adición de MWCNTs mejoró las propiedades mecánicas de las membranas. especialmente en las formulaciones con un 1% de nanotubos. Las membranas reforzadas con MWCNTs mostraron mayor resistencia en comparación con las membranas prístinas de Cell/Qt/PVA, lo que sugiere que los nanotubos actuaron como refuerzos estructurales efectivos, aumentando la dureza sin comprometer la elasticidad del material[31]. No obstante las membranas de Cell/Qt/PVA con MWCNTs al 3% presentaron menor dureza siendo menos duras que las membranas

con un 1% de MWCNTs o incluso sin ellos. En relación con las pruebas de ángulo de contacto, la aglomeración de los MWCNTs en altas concentraciones puede ser un factor de cambio debilitando algunas de las zonas.

CONCLUSIONES

Se sintetizaron membranas compuestas de celulosa, quitosana y PVA, con y sin MWCNTs, mediante electrohilado, las micrografías MEB mostraron fibras homogéneas y uniformes en las membranas sin MWCNTs. En contraste en las membranas con MWCNTs, la morfología varió, con cúmulos a concentraciones altas. La adición de 1% y 3% de MWCNTs además aumentó el diámetro de las fibras.

La adición de MWCNTs mejoró la dureza de las membranas, especialmente las membranas reforzadas con 1% MWCNTs mostraron mayor resistencia, donde los MWCNTs actuaron como refuerzos estructurales.

Las membranas reforzadas con MWCNTs obtenidas en este trabajo presentan características prometedoras para su aplicación en ingeniería de tejidos. La estructura de fibras proporciona un soporte adecuado para la proliferación celular, entre otras aplicaciones. En particular, las membranas de Cell/Qt/PVA/MWCNTs al 1% mostraron un buen equilibrio entre propiedades físico-mecánicas lo que las convierte en candidatas prometedoras para futuras investigaciones en el desarrollo de andamios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Z. Wang, et al., “Lignocellulose-chitosan-multiwalled carbon nanotube composites with improved mechanical strength, dimensional stability and fire retardancy” Vol. 10, 3, 2018. pp. 341.
2. S. Smith, et al. “Carbon-based nanomaterials for removal of chemical and biological contaminants from water”, Review of mechanisms and applications, Vol. 91, 2015. pp. 122-143.
3. W. G. Malette, et al., “Chitosan: a new hemostatic”, W. G. J. T. A. o. t. s. Vol. 36, 1, 1983. pp. 55-58.
4. M. W. J. P. R. Frey, et al., “Electrospinning cellulose and cellulose derivatives”, Vol. 48, 2, 2008. pp. 378-391.
5. A. G. Sanchez, et al., “Chitosan-hydroxyapatite nanocomposites: Effect of interfacial layer on mechanical and dielectric properties”, Materials Chemistry and Physics, Vol. 217, 2018. pp.151-159.
6. M. A. Shokrgozar, et al., “Fabrication of porous chitosan/poly (vinyl alcohol) reinforced single-walled carbon nanotube nanocomposites for neural tissue engineering”, M. J. J. o. b. n. Vol. 7, 2, 2011. pp. 276-284.
7. M. A. Osorio-Delgado, “et al. Aplicaciones biomédicas de biomateriales poliméricos”. C. I. J. D. Vol. 84, 201, 2017. pp. 241-252.
8. Z. Wang, et al., “Lignocellulose-chitosan-multiwalled carbon nanotube composites with improved mechanical strength dimensional stability and fire retardancy”, Vol. 10, 3, 2018. pp. 341.
9. S. Ruiz, et al., “Antimicrobial films based on nanocomposites of chitosan/poly (vinyl alcohol)/graphene oxide for biomedical applications”, Biomolecules, Vol. 9, 3, 2019. pp. 109.
10. J. Zhou, et al., “A conductive and highly deformable all-pseudocapacitive composite paper as a supercapacitor electrode with improved areal and volumetric capacitance”, Vol. 14, 51, 2018. pp. 180-3786.
11. Jr. Patrick, et al., “Prospectus of tissue engineering. In Frontiers in tissue engineering”, Elsevier, 1998. pp. 3-11.

12. M. G. Rojas Cortés, et al., “Los biopolímeros como materiales para el desarrollo de productos en aplicaciones farmacéuticas y de uso biomédico”, J. E. J. I. e. I. , Vol. 28, 1, 2008. pp. 57-71.
13. H. P. Wiesmann, et al., “Scaffold structure and fabrication. In Fundamentals of Tissue Engineering and Regenerative Medicine”, Springer, 2009. pp. 539-549
14. D. W. Hutmacher, et al., “Scaffold design and fabrication technologies for engineering tissues: state of the art and future perspectives”, Polymer Edition, Vol. 12, 1, 2001. pp. 107-124.
15. N. A. Peppas, & R. J. S. Langer, “New challenges in biomaterials”, Vol. 263, 5154, 1994. pp. 1715-1720.
16. Ahmadi Bonakdar, et al., “Electrospinning: Processes, structures, and materials”. Macro-mol, Vol. 4, 1, 2024. pp. 58-103.
17. Oliveira, Rafael, et al., “Synthesis and characterization of microcrystalline cellulose produced from bacterial cellulose”, Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, Vol. 106, 3, 2011.
18. J. Cai & L. Zhang, “Rapid dissolution of cellulose in Li OH/urea and NaOH/urea aqueous solutions”. Macromolecular bioscience, Vol. 5,6, 2005. pp. 539-548.
19. N. D. Tien, “Recent developments in chitosan-based micro/nanofibers for sustainable food packaging, smart textiles, cosmeceuticals, and biomedical applications”. Vol. 26, 9, 2021. pp. 2683.
20. H. K. F. Cheng, “Poly (vinyl alcohol) nanocomposites filled with poly (vinyl alcohol)-grafted graphene oxide”, ACS applied materials & interfaces, Vol. 4, 5, 2012. pp. 2387-2394.
21. C. Arroyo-Arroyo, et al., “Recycling of the methanolic fraction obtained from rum distillation for carbon nanostructures synthesis”, MRS Advances, 2022. pp. 1185-1188.
22. S. C. Smith, & Rodrigues, “Carbon-based nanomaterials for removal of chemical and biological contaminants from water: A review of mechanisms and applications”, Vol. 91, 2015. pp. 122-143.
23. C. J. Gutiérrez-García, “Synthesis of carbon spheres by atmospheric pressure chemical vapor deposition from a series of aromatic hydrocarbon precursors”, Nanostructures, Vol. 112, 2019. pp. 78-85.
24. J. P. Kleijnen, “Design of experiments: overview”, In *2008 Winter Simulation Conference,* 2008. pp. 479-488.
25. G. M. González et al., “Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos”. UNAM, Facultad de Química, 2024.
26. Alexandra Ileana; “Exploring Shore D Hardness Variations Under Different Printing Conditions and Post-processing Treatments”, *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, Vol. 18, 2, 2024.
27. T. Huhtamäki, “Surface-wetting characterization using contact-angle measurements”. Vol. 13, 7, 2018. pp. 1521-1538
28. P. López, et al.,” Población muestra y muestreo”. Vol. 9, 08, 2004. pp. 69-74.
29. Levin, Richard, and David S., “Estadística para administración y economía”, Pearson educación, 2004.
30. H. Keselman, & J. Rogan, (1977). “The Tukey multiple comparison test: 1953–1976”. Vol. 84, 5, pp. 1050.
31. S. Mombini, “Chitosan-PVA-CNT nanofibers as electrically conductive scaffolds for cardiovascular tissue engineering”. Vol. 140, 2019. pp. 278-287.
32. E. E. P. Ramírez. et al., “Los nanomateriales de carbono: una alternativa prometedora para la remoción de colorantes del agua mediante adsorción.” Tendencias en energías renovables y sustentabilidad, Vol. 3, 1, 2024. pp. 159-165

INFLUENCIA DEL FACTOR DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN LA RESPUESTA SÍSMICA ESPERADA DE PUENTES

Alma R Sánchez, Manuel Aburto, José M Jara

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

RESUMEN

La filosofía de diseño actual para puentes en México utiliza factores de comportamiento sísmico (Q) para reducir las fuerzas de diseño. El diseño sísmico de puentes carece de una normativa específica que establezca valores para el factor de comportamiento sísmico, lo que ha llevado a que la red carretera nacional tenga puentes construidos con diversos valores de Q y por ello, diferentes resistencias. En contraste, los reglamentos para diseñar edificios especifican los valores de Q que dependen del material y de la estructuración del edificio. Para evaluar el comportamiento sísmico esperado de los puentes como función de Q, se crearon modelos numéricos de puentes de concreto reforzado representativos de los existentes en México. Las estructuras se diseñaron de acuerdo con la reglamentación vigente utilizando diferentes valores de Q. Posteriormente se realizaron análisis no lineales de historia en el tiempo considerando a las columnas como los únicos elementos estructurales con comportamiento no lineal. La superestructura compuesta por trabes y losas se consideró con comportamiento elástico. Los resultados mostraron que a medida que el valor de Q aumenta, los desplazamientos en la estructura también se incrementan. Se identificó que ciertos valores de Q pueden llevar a una reducción excesiva de la capacidad resistente de los elementos estructurales, con incremento importante de la demanda de desplazamiento lateral, comprometiendo la estabilidad del puente. También se determinó el intervalo de valores de Q que conduce a diseños más eficientes sin exceder los límites de seguridad estructural. El estudio demuestra la importancia de establecer un criterio normativo para la selección del factor de comportamiento sísmico en el diseño de puentes en México. Adicionalmente, se recomienda elegir Q como función de la tipología de puente para un diseño más eficiente y seguro.

INTRODUCCIÓN

El diseño sísmico de puentes en México se basa en la reducción de fuerzas sísmicas de diseño mediante el uso del factor de comportamiento sísmico (Q), el cual permite incorporar la capacidad de disipación de energía de la estructura durante un evento sísmico. No obstante, a diferencia de los reglamentos para edificaciones, que establecen valores específicos de Q de acuerdo con el tipo de material y la configuración estructural, en el caso de los puentes no existe una normativa que defina este parámetro de manera clara y uniforme. Como resultado, muchos puentes que conforman la red carretera nacional han sido diseñados con distintos valores de Q, generando una amplia variedad de estructuras con diferente capacidad estructural.

Ante este panorama, se vuelve indispensable desarrollar y adoptar lineamientos técnicos que orienten de manera más precisa la selección del factor de comportamiento sísmico en el diseño de puentes, considerando las particularidades estructurales y funcionales de cada caso.

DEMANDAS SÍSMICAS

Para esta investigación, se obtuvieron registros sísmicos de la base de datos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, considerando únicamente aquellos que cumplían con criterios específicos. El primer filtro consistió en descartar registros sísmicos de temblores con magnitud inferior a 6.0. La base de datos abarca registros desde 1960 hasta 2020, con un total de 112 eventos sísmicos y aproximadamente 3,700 registros.

Se aplicaron filtros adicionales basados en el tipo de suelo y de mecanismo de falla, así como en la aceleración máxima y distancia epicentral (menor a 50 km, entre 50 y 150 km, y mayor a 150 km). Se priorizaron también los registros sísmicos de estaciones localizadas en suelos duros o roca, con aceleraciones significativas en periodos cortos (0.1-0.5 segundos).

Este proceso redujo la base de datos en aproximadamente un 97%, resultando en un total de 87 registros seleccionados, de los cuales 42 corresponden a eventos de subducción (siete con distancia epicentral mayor a 150 km, 14 entre 50 y 150 km, y 21 menores a 50 km).

Las siguientes tablas presentan los registros seleccionados para ambos las fuentes sísmicas de subducción y fallamiento normal, clasificados según la zona de intensidad sísmica.

Tabla 1. Registros seleccionados de a) subducción y b) fallamiento normal.

a)

	CLAVE DE REGISTRO
BAJA SISMICIDAD	AZIH8509.191
	OMTP9909.301
	OXBJ2006.232
	OXLC2006.232
	PAPN8509.191
	PARS8509.211
	VIGA9909.301
MEDIA SISMICIDAD	COYC1308.211
	COYQ0704.131
	JAMI1203.202
	JAMI9909.301
	NILT1709.233
	OCTT8904.251
	PAPN8509.211
	PETA9412.101
	SJLL1006.301
	SJLL1802.162
	SMLC2006.232
	TAMA2006.232
	TAMA9909.301
	UNIO8509.191
ALTA SISMICIDAD	ACP21308.211
	AZIH8509.211
	BALC9412.101
	CALE8509.191
	CALE9701.111
	COPL9310.241
	COYC0110.081
	JAMI1006.301
	JAMI1605.081
	JAMI1802.198
	JAMI1802.161
	OXJM1709.232
	PAPN9607.151
	PET21404.182

b)

	CLAVE DE REGISTRO
BAJA SISMICIDAD	COMD1709.191
	HUAM1709.081
	JAMI1709.081
	LANE1709.081
	NILT1407.292
	NILT1709.081
	OXBJ1709.081
	OXJM1709.081
	OXLC1709.081
	PANG1709.081
	SCCB1709.081
	SCRU1709.081
	SJLL1709.081
	SJLL1709.191
	SMLC1709.081
	TAMA1709.081
	TEJU1709.191
MEDIA SISMICIDAD	ATYC1112.111
	CHFL1709.191
	COMD1112.111
	COYQ1112.111
	COYQ1211.151
	COYQ9906.211
	CSER9906.151
	CUP51709.191
	HMTT1709.191
	PET29906.211
	PET29912.291
	POZU1112.111
	PZPU1709.191
	RABO9906.151
	SXPU1709.191
	SXPU8010.241
	TEJU1112.111
	TEJU1211.151
	THEZ1709.191

	RIOG9909.301
	SCRU1709.234
	SJLL1203.202
	SJLL1204.0213
	SLU21404.182
	VIGA8904.251
	VIGA9310.241

	TNLP0007.211
	TNLP1112.111
	TNLP1709.191
ALTA	CHFL9906.151
	COMD1211.151
	RABO1709

A continuación, los registros seleccionados fueron escalados utilizando el método de Intensidad de Aceleración Espectral (ASI), empleando como referencia el espectro de peligro uniforme para Tr=475 años, correspondiente a cada una de las zonas estudiadas: Tlalnepantla, Morelos (zona de baja sismicidad), Apatzingán, Michoacán (zona de sismicidad media) y Lázaro Cárdenas (zona de alta sismicidad).

Finalmente, para reducir la duración de las señales sísmicas, se calculó la intensidad de Arias con el fin de identificar la fase de mayor intensidad. Con base en esto, se recortó el inicio y el final de cada acelerograma, dejando únicamente la duración correspondiente al intervalo entre el 5% y 95% de la intensidad.

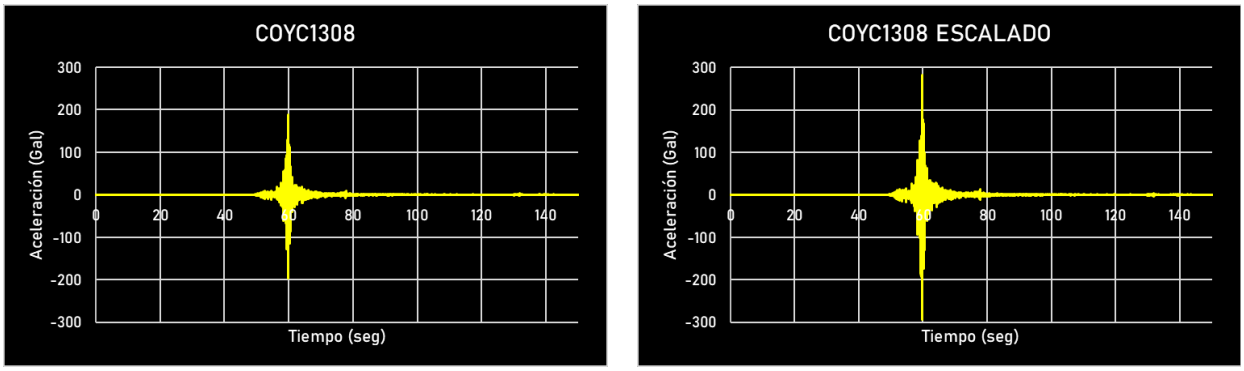


Figura 1. Registros antes y después del escalamiento. a) Registro COYC1308 antes del escalamiento; b) COYC1308 después del escalamiento después del escalamiento.

TIPOLOGÍAS Y MODELADO DE PUENTES

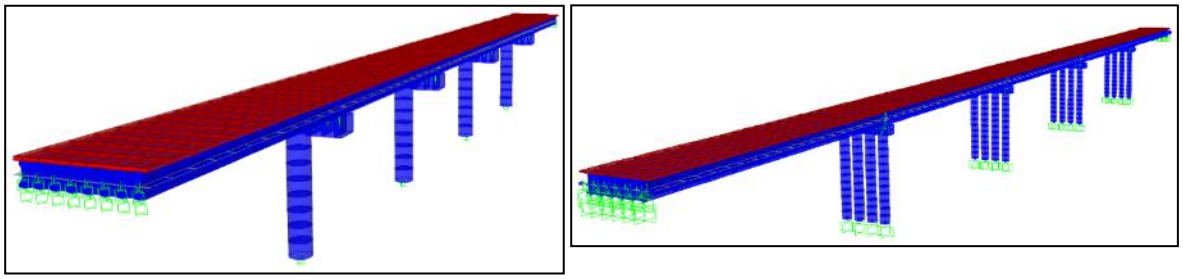
Las tipologías de puentes consideradas en este estudio corresponden a las más comunes en la red carretera de México. La mayoría de ellos están construidos con concreto reforzado y son del tipo simplemente apoyados. Su sistema estructural se basa en vigas longitudinales de concreto presforzado que, junto con la losa de concreto, la superficie de rodamiento, las vigas diafragma y los parapeto, conforman la superestructura del puente.

La subestructura está se compuesta por pilas, que a su vez incluyen cabezal, topes sísmicos, apoyos de neopreno y columnas. Se analizaron cuatro tipologías principales:

- Subestructura tipo cantiléver de una sola columna.
- Subestructura tipo marco con cuatro columnas.

Cada una de estas configuraciones fue evaluada con claros de 30 y 50 metros entre pilas, y con variaciones en la altura de las pilas: 5, 10, 15 y 20 metros.

Los modelos fueron desarrollados en un software especializado para análisis y diseño de estructuras. En la figura siguiente se presentan representaciones gráficas de las dos tipologías principales modeladas.



a) **b)**

Figura 2. Modelos de puentes con pilas de: a) una sola columna y b) cuatro columnas.

DISEÑO DE LOS PUENTES

El siguiente paso de la investigación consistió en el diseño estructural de los puentes. En total, se diseñaron 144 modelos, resultado de combinar las cuatro tipologías estructurales descritas previamente, con diferentes alturas de pila (5, 10, 15 y 20 m), tres zonas sísmicas (baja, media y alta) y tres valores del factor de comportamiento sísmico (Q = 2, 3 y 4).

El diseño se llevó a cabo conforme a la normativa vigente, incluyendo:

- Las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (NTC 2023),
- El Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (CFE, 2015), y
- Las especificaciones AASHTO-LRFD 2020.

De la normativa AASHTO-LRFD se adoptaron las combinaciones de carga correspondientes a los estados límite de Resistencia y Evento Extremo I. En el caso de Resistencia I, las combinaciones incluyen un factor dependiente de la ductilidad del sistema, por lo que varían según el valor de Q utilizado en el diseño:

Combinaciones de carga:

Resistencia I:

- Q = 2

$$QRES\ I = 1.1025[1.25(DC + DW) + 1.75(1.33LL)] \quad (1)$$

- Q = 3

$$QRES\ I = 1.05[1.25(DC + DW) + 1.75(1.33LL)] \quad (2)$$

- Q = 4

$$QRES\ I = 0.9975[1.25(DC + DW) + 1.75(1.33LL)] \quad (3)$$

En cambio, las combinaciones del estado límite de Evento Extremo I no dependen de la ductilidad, por lo que se aplican de manera uniforme para todos los valores de Q:

Combinaciones de carga:

Evento Extremo I:

$$QEEx\ I = 1.25(DC + DW) + 0.5(1.33LL) + EQx + 0.30EQy \quad (4)$$

$$QEEy\ I = 1.25(DC + DW) + 0.5(1.33LL) + 0.30EQx + EQy \quad (5)$$

Las cargas consideradas en las combinaciones anteriores son:

- Cargas permanentes (DC + DW): peso propio de los elementos estructurales, carpeta asfáltica y parapetos.
- Cargas vehiculares (LL): tráfico esperado sobre el puente.
- Cargas sísmicas (EQ): obtenidas a partir del espectro de diseño generado con el programa PRODISIS (CFE) para cada zona sísmica.

Estas últimas se reducen durante el proceso de diseño mediante el factor de comportamiento sísmico Q. A mayor valor de Q, mayor reducción de las fuerzas sísmicas aplicadas. Los espectros de diseño con sus respectivas reducciones se muestran en la figura 3.

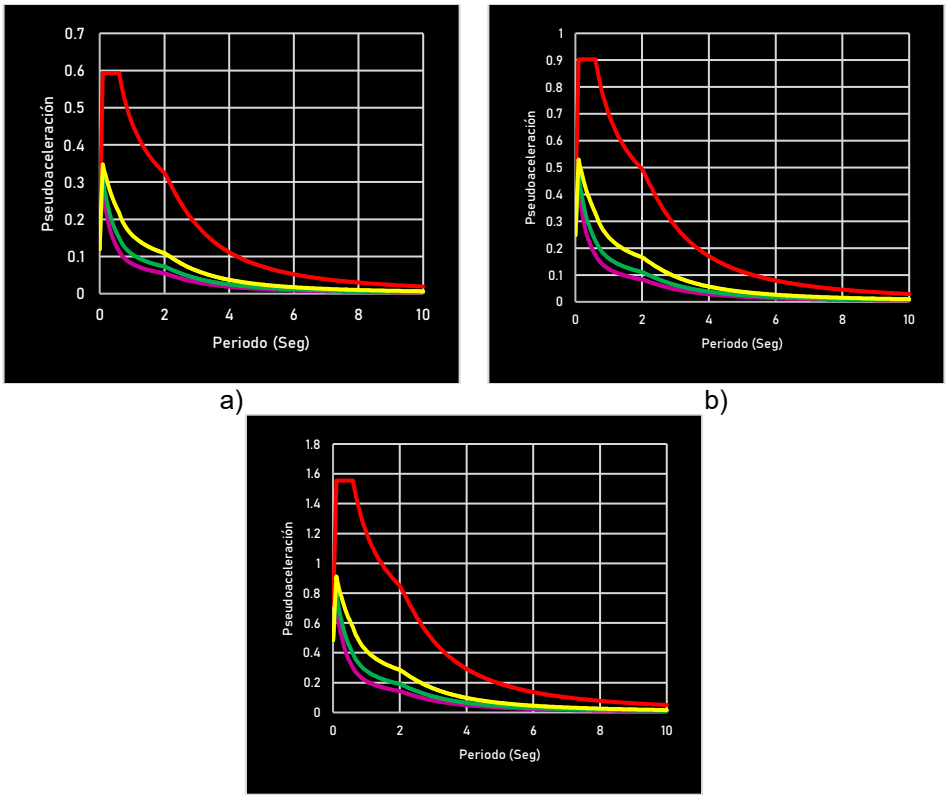


Figura 3. Espectros de diseño y sus reducciones para Q = 2, 3 y 4 de a) Tlalnepantla, b) Apatzingán y c) Lázaro Cárdenas.

Una vez definidas las distintas combinaciones de carga de diseño, se procedió al diseño estructural de las pilas utilizando un software especializado. Los resultados mostraron que, al incrementar el valor del factor de comportamiento sísmico (Q), las dimensiones de la sección transversal de las pilas tienden a disminuir, debido a la reducción en las fuerzas sísmicas de diseño.

En las tablas 2-4 se muestra el resumen del diseño de las pilas de concreto reforzado de todos los puentes incluidos en este trabajo.

- Resultados del diseño de los puentes con Q = 2

Tabla 2. Armado de pilas de puentes diseñados con Q = 2.

Longitud del claro (m)	Altura de pila (m)	Zona	Diámetro columna (m)	Ancho (m)	No#Var	% acero	#Var@cm	Puente
30	5	Tlalnepantla	0.85	1.25	34 # 8	3.01	4 @ 14	M30P05-1
		Apatzingán	1.00	1.4	50 # 8	3.17	4 @ 12	M30P05-2
		Lázaro C	1.25	1.65	46 # 10	2.93	5 @ 15	M30P05-3
50		Tlalnepantla	0.95	1.35	42 # 8	2.97	4 @ 13	M50P05-1
		Apatzingán	1.10	1.5	54 # 8	2.85	4 @ 11	M50P05-2
		Lázaro C	1.30	1.7	48 # 10	2.84	5 @ 15	M50P05-3
30	5	Tlalnepantla	1.50	1.9	50 # 12	3.18	6 @ 18	C30P05-1
		Apatzingán	1.75	2.15	62 # 12	2.91	6 @ 16	C30P05-2
		Lázaro C	2.15	2.55	79 # 12	2.47	6 @ 10	C30P05-3
50		Tlalnepantla	1.65	2.05	56 # 12	2.97	6 @ 17	C50P05-1
		Apatzingán	1.85	2.25	70 # 12	2.93	6 @ 15	C50P05-2
		Lázaro C	2.25	2.65	85 # 12	2.41	6 @ 10	C50P05-3
30	10	Tlalnepantla	0.95	1.35	41 # 8	2.89	4 @ 13	M30P10-1
		Apatzingán	1.10	1.5	54 # 8	2.86	4 @ 11	M30P10-2
		Lázaro C	1.50	1.9	64 # 10	2.85	5 @ 13	M30P10-3
50		Tlalnepantla	1.00	1.4	51 # 8	3.28	4 @ 12	M50P10-1
		Apatzingán	1.20	1.6	45 # 10	3.13	5 @ 16	M50P10-2
		Lázaro C	1.55	1.95	71 # 10	2.96	5 @ 12	M50P10-3
30	10	Tlalnepantla	1.75	2.15	57 # 12	2.7	6 @ 16	C30P10-1
		Apatzingán	2.15	2.55	79 # 12	2.47	6 @ 13	C30P10-2
		Lázaro C	2.75	3.15	## # 12	1.95	6 @ 10	C30P10-3
50		Tlalnepantla	1.90	2.3	67 # 12	2.69	6 @ 15	C50P10-1
		Apatzingán	2.25	2.65	85 # 12	2.41	6 @ 12	C50P10-2
		Lázaro C	2.80	3.2	## # 12	1.94	6 @ 9	C50P10-3
30	15	Tlalnepantla	1.10	1.5	51 # 8	2.71	4 @ 11	M30P15-1
		Apatzingán	1.20	1.6	49 # 10	3.37	5 @ 16	M30P15-2
		Lázaro C	1.60	2	51 # 12	2.89	6 @ 17	M30P15-3
50		Tlalnepantla	1.15	1.55	61 # 8	2.96	4 @ 11	M50P15-1
		Apatzingán	1.30	1.7	47 # 10	2.75	5 @ 15	M50P15-2
		Lázaro C	1.75	2.15	60 # 12	2.81	6 @ 16	M50P15-3
30	15	Tlalnepantla	1.90	2.3	70 # 12	2.8	6 @ 15	C30P15-1
		Apatzingán	2.25	2.65	## # 12	2.9	6 @ 12	C30P15-2
		Lázaro C	2.80	3.2	## # 12	3.06	6 @ 10	C30P15-3
50		Tlalnepantla	1.90	2.3	72 # 12	2.89	6 @ 15	C50P15-1
		Apatzingán	2.30	2.7	## # 12	2.94	6 @ 12	C50P15-2
		Lázaro C	2.90	3.3	## # 12	2.84	6 @ 10	C50P15-3
30	20	Tlalnepantla	1.20	1.6	47 # 10	3.28	5 @ 16	M30P20-1
		Apatzingán	1.40	1.8	56 # 10	2.84	5 @ 14	M30P20-2
		Lázaro C	1.70	2.1	57 # 12	2.86	6 @ 16	M30P20-3
50		Tlalnepantla	1.30	1.7	48 # 10	2.83	5 @ 15	M50P20-1
		Apatzingán	1.45	1.85	60 # 10	2.87	5 @ 13	M50P20-2
		Lázaro C	1.80	2.2	64 # 12	2.83	6 @ 15	M50P20-3
30	20	Tlalnepantla	2.00	2.4	80 # 12	2.88	6 @ 14	C30P20-1
		Apatzingán	2.30	2.7	111 # 12	3.03	6 @ 12	C30P20-2
		Lázaro C	3.10	3.5	191 # 12	2.88	6 @ 9	C30P20-3
50		Tlalnepantla	1.90	2.3	70 # 12	2.81	6 @ 15	C50P20-1
		Apatzingán	2.40	2.8	111 # 12	2.79	6 @ 12	C50P20-2
		Lázaro C	3.15	3.55	## # 12	2.86	6 @ 9	C50P20-3

- Resultados del diseño de los puentes con Q = 3

Tabla 3. Armado de pilas de puentes diseñados con Q = 3.

Longitud del claro (m)	Altura de pila (m)	Zona	Diámetro columna (m)	Cabezal	Longitudinal		Transversal	
				Ancho (m)	No#Var	% acero	#Var@cm	Puente
30	5	Tlalnepantla	0.70	1.1	25 # 8	3.17	4 @ 17	M30P05-1
		Apatzingán	0.85	2.1	36 # 8	3.15	4 @ 14	M30P05-2
		Lázaro C	1.05	3.1	36 # 10	3.28	5 @ 18	M30P05-3
50		Tlalnepantla	0.80	4.1	34 # 8	3.41	4 @ 15	M50P05-1
		Apatzingán	0.95	5.1	43 # 8	3.07	4 @ 13	M50P05-2
		Lázaro C	1.15	6.1	59 # 8	2.84	4 @ 11	M50P05-3
30	5	Tlalnepantla	1.30	8.1	55 # 10	3.28	5 @ 15	C30P05-1
		Apatzingán	1.55	9.1	69 # 10	2.87	5 @ 12	C30P05-2
		Lázaro C	1.85	10.1	67 # 12	2.8	6 @ 15	C30P05-3
50		Tlalnepantla	1.50	11.1	64 # 10	2.84	5 @ 13	C50P05-1
		Apatzingán	1.65	12.1	58 # 12	3.05	6 @ 17	C50P05-2
		Lázaro C	1.95	13.1	73 # 12	2.75	6 @ 13	C50P05-3
30	10	Tlalnepantla	0.85	15.1	34 # 8	3.03	4 @ 13	M30P10-1
		Apatzingán	0.95	16.1	42 # 8	2.99	4 @ 13	M30P10-2
		Lázaro C	1.20	17.1	41 # 10	2.87	5 @ 16	M30P10-3
50		Tlalnepantla	0.95	18.1	35 # 8	2.45	4 @ 13	M50P10-1
		Apatzingán	1.00	19.1	53 # 8	3.4	4 @ 11	M50P10-2
		Lázaro C	1.35	20.1	50 # 10	2.73	5 @ 14	M50P10-3
30	10	Tlalnepantla	1.45	22.1	62 # 10	2.93	5 @ 13	C30P10-1
		Apatzingán	1.75	23.1	59 # 12	2.77	6 @ 16	C30P10-2
		Lázaro C	2.30	24.1	87 # 12	2.38	6 @ 12	C30P10-3
50		Tlalnepantla	1.60	25.1	52 # 12	2.94	6 @ 17	C50P10-1
		Apatzingán	1.90	26.1	69 # 12	2.76	6 @ 15	C50P10-2
		Lázaro C	2.30	27.1	99 # 12	2.7	6 @ 12	C50P10-3
30	15	Tlalnepantla	1.00	29.1	40 # 8	2.54	4 @ 12	M30P15-1
		Apatzingán	1.10	30.1	53 # 8	2.8	4 @ 11	M30P15-2
		Lázaro C	1.30	31.1	48 # 10	2.83	5 @ 15	M30P15-3
50		Tlalnepantla	1.05	32.1	52 # 8	3.04	4 @ 12	M50P15-1
		Apatzingán	1.15	33.1	63 # 8	3.05	4 @ 11	M50P15-2
		Lázaro C	1.35	34.1	51 # 10	2.82	5 @ 14	M50P15-3
30	15	Tlalnepantla	1.45	36.1	59 # 10	2.81	5 @ 13	C30P15-1
		Apatzingán	1.90	37.1	69 # 12	2.75	6 @ 15	C30P15-2
		Lázaro C	2.35	38.1	118 # 12	3.09	6 @ 12	C30P15-3
50		Tlalnepantla	1.60	39.1	53 # 12	2.97	6 @ 17	C50P15-1
		Apatzingán	1.90	40.1	74 # 12	2.95	6 @ 15	C50P15-2
		Lázaro C	2.40	41.1	124 # 12	3.1	6 @ 12	C50P15-3
30	20	Tlalnepantla	1.10	43.1	55 # 8	2.93	4 @ 11	M30P20-1
		Apatzingán	1.20	44.1	49 # 10	3.39	5 @ 16	M30P20-2
		Lázaro C	1.45	45.1	63 # 10	2.98	5 @ 13	M30P20-3
50		Tlalnepantla	1.20	46.1	61 # 8	2.7	4 @ 10	M50P20-1
		Apatzingán	1.30	47.1	76 # 8	2.9	4 @ 10	M50P20-2
		Lázaro C	1.50	48.1	67 # 10	2.98	5 @ 13	M50P20-3
30	20	Tlalnepantla	1.45	50.1	64 # 10	3.05	5 @ 13	C30P20-1
		Apatzingán	1.70	51.1	57 # 12	2.82	6 @ 16	C30P20-2
		Lázaro C	2.50	52.1	135 # 12	3.12	6 @ 11	C30P20-3
50		Tlalnepantla	1.65	53.1	61 # 12	3.24	6 @ 17	C50P20-1
		Apatzingán	1.90	54.1	72 # 12	2.87	6 @ 15	C50P20-2
		Lázaro C	2.50	55.1	129 # 12	2.98	6 @ 11	C50P20-3

- Resultados del diseño de los puentes con Q = 4

Tabla 4. Armado de pilas de puentes diseñados con Q = 4

				Cabezal	Longitudinal		Transversal	
Longitud del claro (m)	Altura de pila (m)	Zona	Diámetro columna (m)	Ancho (m)	No#Var	% acero	#Var@cm	Puente
30	5	Tlalnepantla	0.65	1.05	35 # 6	2.96	3 @ 11	M30P05-1
		Apatzingán	0.75	1.15	49 # 6	3.1	3 @ 9	M30P05-2
		Lázaro C	0.95	1.35	44 # 8	3.14	4 @ 13	M30P05-3
50		Tlalnepantla	0.75	1.15	25 # 8	2.85	4 @ 16	M50P05-1
		Apatzingán	0.85	1.25	37 # 8	3.27	4 @ 14	M50P05-2
		Lázaro C	1.05	1.45	50 # 8	2.87	4 @ 12	M50P05-3
30	5	Tlalnepantla	1.20	1.6	44 # 10	3.07	5 @ 16	C30P05-1
		Apatzingán	1.40	1.8	57 # 10	2.91	5 @ 14	C30P05-2
		Lázaro C	1.65	2.05	59 # 12	3.14	6 @ 17	C30P05-3
50		Tlalnepantla	1.40	1.8	55 # 10	2.8	5 @ 14	C50P05-1
		Apatzingán	1.55	1.95	69 # 10	2.87	5 @ 12	C50P05-2
		Lázaro C	1.80	2.2	63 # 12	2.79	6 @ 15	C50P05-3
30	10	Tlalnepantla	0.80	1.2	30 # 8	2.95	4 @ 15	M30P10-1
		Apatzingán	0.90	1.3	34 # 8	2.65	4 @ 14	M30P10-2
		Lázaro C	1.05	1.45	46 # 8	2.67	4 @ 12	M30P10-3
50		Tlalnepantla	0.90	1.3	30 # 8	2.36	4 @ 14	M50P10-1
		Apatzingán	0.95	1.35	43 # 8	3.03	4 @ 13	M50P10-2
		Lázaro C	1.15	1.55	59 # 8	2.84	4 @ 11	M50P10-3
30	10	Tlalnepantla	1.25	1.65	49 # 10	3.12	5 @ 15	C30P10-1
		Apatzingán	1.50	1.9	71 # 10	3.14	5 @ 13	C30P10-2
		Lázaro C	1.95	2.35	73 # 12	2.76	6 @ 14	C30P10-3
50		Tlalnepantla	1.45	1.85	61 # 10	2.92	5 @ 13	C50P10-1
		Apatzingán	1.70	2.1	57 # 12	2.82	6 @ 16	C50P10-2
		Lázaro C	2.05	2.45	84 # 12	2.89	6 @ 13	C50P10-3
30	15	Tlalnepantla	0.95	1.35	51 # 6	2.04	3 @ 8	M30P15-1
		Apatzingán	1.00	1.4	46 # 8	2.94	4 @ 12	M30P15-2
		Lázaro C	1.25	1.65	54 # 10	3.42	5 @ 19	M30P15-3
50		Tlalnepantla	1.00	1.4	47 # 8	3.02	4 @ 12	M50P15-1
		Apatzingán	1.10	1.5	46 # 8	2.44	4 @ 12	M50P15-2
		Lázaro C	1.25	1.65	43 # 10	2.75	5 @ 15	M50P15-3
30	15	Tlalnepantla	1.30	1.7	50 # 10	2.95	5 @ 15	C30P15-1
		Apatzingán	1.55	1.95	68 # 10	2.83	5 @ 12	C30P15-2
		Lázaro C	2.00	2.4	94 # 12	3.41	6 @ 13	C30P15-3
50		Tlalnepantla	1.50	1.9	64 # 10	2.83	5 @ 13	C50P15-1
		Apatzingán	1.65	2.05	60 # 12	3.17	6 @ 17	C50P15-2
		Lázaro C	2.10	2.5	97 # 12	3.19	6 @ 13	C50P15-3
30	20	Tlalnepantla	1.05	1.45	45 # 8	2.62	4 @ 12	M30P20-1
		Apatzingán	1.15	1.55	57 # 8	2.78	4 @ 11	M30P20-2
		Lázaro C	1.30	1.7	55 # 10	3.25	5 @ 15	M30P20-3
50		Tlalnepantla	1.15	1.55	53 # 8	2.58	4 @ 11	M50P20-1
		Apatzingán	1.20	1.6	77 # 8	3.42	4 @ 10	M50P20-2
		Lázaro C	1.40	1.8	55 # 10	2.79	5 @ 14	M50P20-3
30	20	Tlalnepantla	1.40	1.8	55 # 10	2.81	5 @ 14	C30P20-1
		Apatzingán	1.50	1.9	67 # 10	2.97	5 @ 13	C30P20-2
		Lázaro C	2.05	2.45	121 # 10	2.89	5 @ 10	C30P20-3
50		Tlalnepantla	1.60	2	51 # 12	2.86	6 @ 17	C50P20-1
		Apatzingán	1.70	2.1	64 # 12	3.18	6 @ 16	C50P20-2
		Lázaro C	2.10	2.5	93 # 12	3.06	6 @ 13	C50P20-3

ANÁLISIS NO LINEALES EN LA HISTORIA DEL TIEMPO

Los modelos numéricos de los 144 puentes fueron sometidos a los registros sísmicos seleccionados en la sección correspondiente a demandas sísmicas y se realizaron análisis dinámicos no lineales en la historia del tiempo.

Los resultados obtenidos se enfocaron en la demanda de desplazamientos, los cuales fueron medidos en dos nodos específicos dentro de cada modelo. En la siguiente figura se muestran ejemplos de dos puentes modelados, junto con la ubicación de los nodos desde los cuales se extrajeron los desplazamientos.

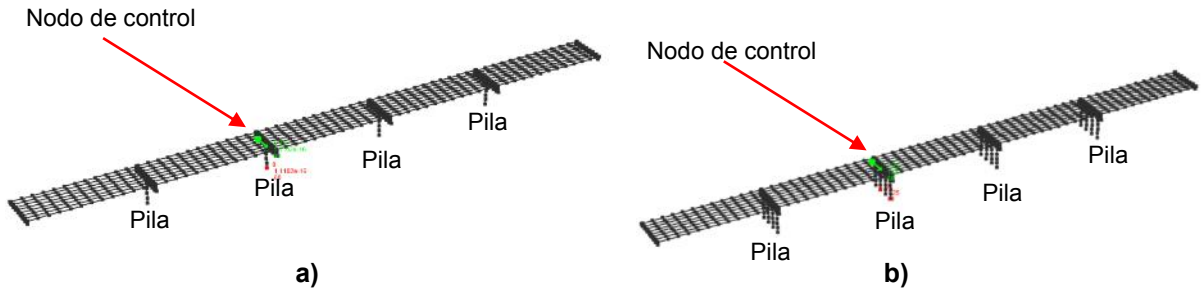


Figura 4. Nodos de control para la obtención de resultados en modelos con a) una sola columna y b) cuatro columnas.

Una vez realizados los análisis, se obtuvieron los resultados correspondientes. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento registrado en un nodo de control de un puente con una sola columna y claro de 50 metros, a lo largo del tiempo durante un sismo. Además, se presenta la variación del desplazamiento para cada uno de los valores de Q utilizados en el diseño.

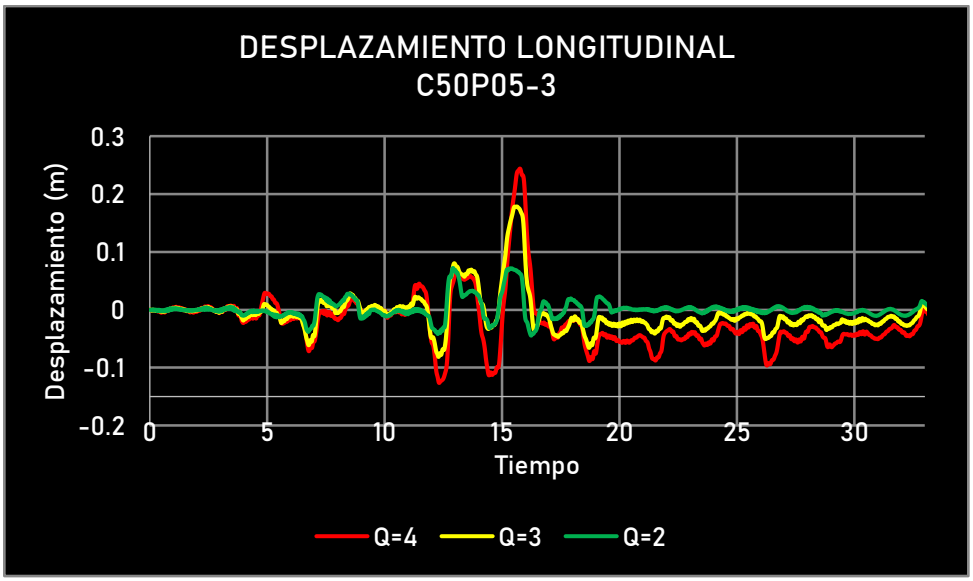
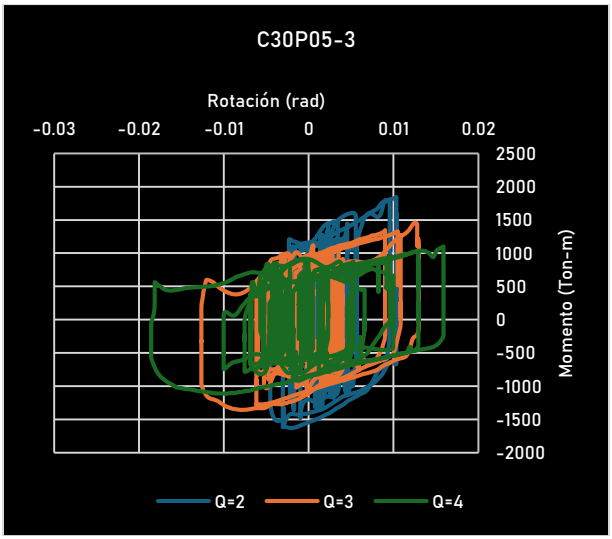


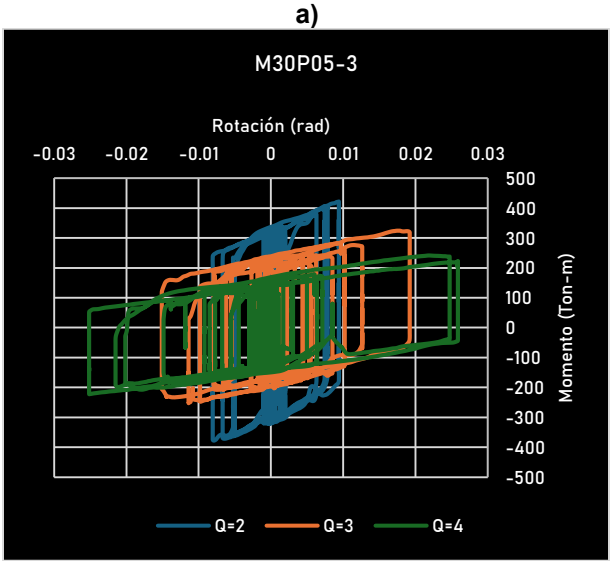
Figura 5. Historia de desplazamientos del modelo C50P05-3 con diseño para Q = 2, 3 y 4, bajo el registro CALE8509 en la dirección longitudinal.

La figura 5 muestra un aumento evidente en los desplazamientos a medida que el valor de Q incrementa. Esto se debe a la reducción de las dimensiones de la sección transversal de las columnas y al aumento de la demanda ductilidad en cada diseño.

Asimismo, se aprecia una tendencia creciente en la energía inelástica disipada conforme el valor de Q aumenta. Esta energía es representada por los ciclos histeréticos generados en las articulaciones plásticas de cada columna. La figura 6 presenta dichos ciclos y su variación conforme se modifica el valor de Q.



a)



b)

Figura 6. Ciclos de histéresis y su variación conforme el cambio del valor de Q de puente a) C30P05-3 Y b) M30P05-3

RESULTADOS

Una vez obtenidos los parámetros previamente mencionados (demanda de desplazamientos y energía inelástica disipada), se calcularon promedios entre los resultados de cada registro para poder obtener un valor representativo por cada modelo de puente.

Para visualizar e interpretar mejor estos resultados, se calcularon índices de daño, los cuales integran de manera directa los parámetros mencionados. Estos índices se basan en el modelo de daño propuesto por Park y Ang (1985), ampliamente reconocido por su capacidad para cuantificar el estado de daño en estructuras de concreto armado sometidas a cargas dinámicas.

El modelo de daño de Park y Ang es uno de los más utilizados para evaluar el daño acumulado en elementos estructuras y se expresa mediante una combinación lineal de la demanda de desplazamiento y la energía histerética disipada. El índice de daño local se calcula como (ecuación 6):

$$ID_l = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_u} + \beta \frac{E_h}{F_y \Delta_u} \tag{6}$$

Donde:

ID_l:	Índice de daño local.
Δ_{max}:	Desplazamiento máximo durante el sismo.
Δ_u:	Capacidad última de desplazamiento bajo carga monotónica (obtenida mediante análisis pushover).
β:	Coeficiente empírico que calibra la influencia de la energía histerética disipada (valores típicos entre 0.05 y 0.15).
E_h:	Energía histerética disipada por el elemento durante el sismo.
F_y:	Fuerza de fluencia del elemento.

Este índice se calcula de manera local (por elemento). Para evaluar el estado general de la estructura, es necesario calcular un índice de daño global mediante un promedio ponderado por la energía histerética disipada de cada elemento:

$$ID_g = \frac{\sum_{i=1}^{n} ID_{li} E_{hi}}{\sum_{i=1}^{n} E_{hi}} \tag{7}$$

Donde:

ID_g:	Índice de daño global
ID_l:	Índice de daño local del elemento i
E_h:	Energía histerética disipada por el elemento i

El índice de daño se encuentra típicamente en un rango de 0 a 1, donde:

- Valores cercanos a 0 indican bajo nivel de daño
- Un valor de 1 o mayor indica el colapso del elemento

Para facilitar su interpretación, Park, Ang y Wen (1985) propusieron una clasificación de los niveles de daño estructural basadas en los valores del índice de daño:

Tabla 5 Niveles e índices de daño.

NIVEL DE DAÑO	Rango de ID	Estado de daño	Daño en estructura
I	ID<0.1	Sin daño	Pequeñas grietas localizadas
II	0.1<ID<0.25	Daño menor	Grietas ligeras distribuidas en el elemento
III	0.25<ID<0.40	Daño moderado	Grietas severo y desprendimientos localizados de concreto
IV	0.4<ID<1	Daño severo	Aplastamiento del concreto, exposición del acero de refuerzo
V	ID>1	Colapso	Colapso total del elemento o de la estructura

Una vez completados los aproximadamente 8,000 análisis, se observó que los puentes con subestructura de una sola columna son más sensibles al incremento del valor de Q en términos de daño estructural, en comparación con aquellos que cuentan con marcos de cuatro columnas. Asimismo, se identificó una disminución progresiva del daño conforme aumenta la altura de las pilas, siendo las más afectadas las de 5 metros de altura.

CONCLUSIONES

Para establecer conclusiones precisas de esta investigación, es fundamental considerar el contexto en el que fue desarrollada. El estudio se centró en puentes carreteros de mediana longitud (claros de 30 y 50 metros), construidos en concreto reforzado, con aturas de pila variables (5, 10. 15 y 20 metros), ubicados sobre terreno rocoso. En este tipo de suelo, las mayores aceleraciones espectrales se concentran en periodos cortos (0.1 a 0.5 segundos).

Las conclusiones se organizan según la zona sísmica donde se localizan los puentes y, dentro de cada zona, por tipología estructural. El análisis se presenta en el siguiente orden: zona de alta sismicidad, media sismicidad y baja sismicidad.

Zona de alta sismicidad

Los resultados muestran que los mayores niveles de daño se generan bajo registros de sísmicos de subducción, especialmente en pila de 5 metros de altura. La tipología más afectada es la de una sola columna, la cual presenta daño severo incluso con un diseño sísmico con Q = 3. En cambio, las estructuras con marcos de cuatro columnas solo muestran daño severo cuando el diseño se realiza con Q = 4, en registros escalados para un sismo con periodo de retorno de 475 años.

Estos hallazgos sugieren que, en puentes con subestructura de una sola columna que requieran una vida útil prolongada, no se recomienda emplear valores de Q iguales o superiores a 3, ya que inducen niveles de daño estructural severo. Para marcos de cuatro columnas, un valor de Q = 3 puede ser admisible, manteniéndose el daño dentro de un intervalo moderado. Esta recomendación aplica para pilas de 5 y 10 metros, donde el incremento en la altura no reduce significativamente los daños. Sin embargo, para pilas de 15 y 20 metros, es factible incrementar el valor de Q, ya que las demandas de desplazamientos y los niveles de daño disminuyen considerablemente.

Zona de media sismicidad

En esta zona, los niveles de daño son menores respecto a la zona de alta sismicidad debido a la menor intensidad sísmica asociada a su ubicación geográfica. En este caso, los sismos de fallamiento normal generan mayores daños que los de subducción, con un comportamiento relativamente uniforme en todas las tipologías.

Los puentes con subestructura de una sola columna continúan presentando mayores niveles de daño en todas las alturas de pila, mientras que los marcos de cuatro columnas, si bien también presentan daños moderados en pilas de 5 metros, reducen su vulnerabilidad significativamente a medida que la altura aumenta. En estos casos, resulta viable utilizar Q = 4 a partir de los 10 metros de altura, manteniéndose los daños dentro de niveles aceptables.

Zona de baja sismicidad

En esta zona, los niveles de daño y las demandas de desplazamientos son similares bajo ambos tipos de sismo (subducción y fallamiento normal). En ningún caso se superó el nivel de daño “menor”, incluso en pilas de 5 metros, sin importar la tipología estructural. Por lo tanto, es posible incrementar el valor de Q sin inducir daños significativos, tanto en sismos de diseño como en eventos con un periodo de retorno de 475 años.

Esta tendencia de bajo daño estructural se mantiene también para pilas de mayor altura, lo cual permite el uso seguro de valores elevados de Q en zonas de baja sismicidad.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). LRFD Bridge Design Specifications (8th ed.).

CALTRANS. (2019). Seismic Design Criteria (Version 2.0). California Department of Transportation.

CFE. (2015). Manual de Obras Civiles. Diseño por Sismo. Comisión Federal de Electricidad.

Computers and Structures, Inc. (2023). Perform3D (Versión 9) [Software]. https://www.csiamerica.com/products/perform-3d

Computers and Structures, Inc. (2024). SAP2000 (Versión 24) [Software]. https://www.csiamerica.com/products/sap2000

Normas Técnicas Complementarias (NTC). (2023). Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras. Gobierno de la Ciudad de México.

Ordaz, M., & Pérez-Rocha, L. E. (1998). Estimación de espectros de diseño sísmico a partir de espectros elásticos y características del sitio. Revista Ingeniería Sísmica, (58), 25–44.

Park, Y. J., & Ang, A. H.-S. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. Journal of Structural Engineering, 111(4), 722–739. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722)

Sánchez Ibarra, A. R. (2019). La sobrerresistencia en puentes mexicanos de concreto reforzado [Tesis doctoral, Universidad de Porto].

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2022). Datos de la Red Nacional de Caminos y puentes. https://www.gob.mx/sct

UNAM. (s.f.). Departamento de Sismología y Geofísica – Dr. Singh, S. K. [Cita de opinión técnica]. Universidad Nacional Autónoma de México.

INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE MORELIA

Juan Luis Calderón Fuentes, José M Jara Guerrero, Bertha A Olmos Navarrete

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
1542114h@umich.mx

RESUMEN

Morelia se localiza en la zona sísmica C donde se pueden presentar sismos con intensidades moderadas a altas, con potencial de provocar daños importantes en las construcciones existentes como consecuencia de las amplificaciones del movimiento, debidas a las características de los estratos de suelo. Recientemente se han propuesto metodologías para cuantificar la relación de la vulnerabilidad sísmica con la amplitud esperada y el periodo dominante del sitio. El principal objetivo del presente trabajo fue obtener la distribución espacial de los factores de amplificación del movimiento, y de los niveles de vulnerabilidad en la zona de estudio con la aplicación de un sistema de información geográfica. La metodología usada consiste en obtener el índice de vulnerabilidad del suelo (K_g), usando los factores de amplificación asociados a las frecuencias predominantes de vibrar del suelo, y los periodos típicos de las estructuras de Morelia. De esta manera, se identifican las zonas con mayor probabilidad de daño. El factor de amplificación se obtuvo a partir de la estratigrafía de sondeos de estudios de mecánica de suelos y estaciones de medición de vibración ambiental, con los que se determinaron los cocientes de espectros de respuesta y los cocientes H/V. Con la interpolación de los índices obtenidos en los puntos distribuidos en Morelia, se crearon mapas con escalas de colores que muestran como resultado que, al poniente de la ciudad, se tiene un nivel de vulnerabilidad muy alto correlacionado con las características del suelo, reflejado en que se tienen los factores de amplificación más altos. Además, se encontró que las zonas cuyos niveles de vulnerabilidad son altos a muy altos, siguen el patrón del sistema de fallas local.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la vulnerabilidad como función de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de una zona de estudio, así como su relación con las características típicas de las estructuras existentes sirven en la estimación de los daños esperados ante la ocurrencia de eventos sísmicos de alta intensidad.

La distribución de los niveles de vulnerabilidad del suelo de la zona metropolitana de Morelia se obtuvo a partir de los índices (K_g) estimados en 82 sitios distribuidos en la zona de estudios, los cuales corresponden a las estaciones de la Red Sísmica Nicolaita (RSN), estaciones de medición de vibración ambiental (MVA) y sondeos de estudios de mecánica de suelos (EMS), cuyos resultados fueron interpolados y se generaron un conjunto de mapas mediante la implementación de un sistema de información geográfica (SIG).

TEORÍA

Nakamura (1997) propuso la ecuación 1, para determinar el índice de vulnerabilidad del suelo, K_g, en la cual se consideran las propiedades dinámicas del suelo mediante la estimación de la amplificación del movimiento en suelo blando respecto al terreno firme, así como la frecuencia fundamental de vibración del sitio.

$$\boldsymbol{K_g = \frac{A_g^2}{F_g}} \quad (1)$$

Donde:
K_g=Índice de vulnerabilidad del suelo.
A_g=Factor de amplificación o cociente espectral.

F_g=Frecuencia dominante del sitio.

Akkaya (2020) estimó la vulnerabilidad del suelo y su relación con los daños en edificaciones producto del sismo Mw=7.1 del 23 de octubre de 2011 con epicentro en Van, en el este de Turquía. El estudio constó de un total de 200 estaciones distribuidas dentro de la zona de estudio con las que se obtuvieron señales producto de mediciones de vibración ambiental. Posteriormente se calcularon los cocientes H/V a partir de los cocientes de los espectros de Fourier de las señales de las componentes horizontales y la vertical. De los espectros de los cocientes H/V de identificaron las amplificaciones máximas y las frecuencias fundamentales de los sitios, así como se calcularon los índices de vulnerabilidad K_g. Además, se realizó un levantamiento donde se tomó una muestra de 188 edificios, los cuales fueron clasificados por tipologías de acuerdo con el número de niveles (dos a nueve), el nivel de daño y las irregularidades en planta y elevación observadas. Del total de edificios, se observó que 94 no tuvieron daño, 26 tuvieron daño moderado, 58 fuerte y 10 colapsaron. Akkaya (2020) concluyó que los edificios con mayores daños presentados se localizaron en sitios donde el índice K_g>10 que corresponde a un nivel de vulnerabilidad del suelo muy alto, y que en su mayoría contaban con planta baja flexible, por lo que es de suma importancia considerar los efectos de sitio y las características de las estructuras en el estudio de la vulnerabilidad de una zona urbana.

METODOLOGÍA

Se utilizó como unidad de mallado un total de 82 puntos, conformados por 38 sondeos de estudios de mecánica de suelos (EMS), las 11 estaciones de la Red Sísmica Nicolaita (RSN) y 33 estaciones de medición de vibración ambiental (MVA). Se aplicó la ecuación 1 donde, el factor de amplificación se obtuvo a partir del método de los cocientes de espectros de respuesta y las relaciones H/V. Además, se consideraron las frecuencias de vibración del suelo de Fg=1000, 10, 5, 2, 1 y 0.667 Hz que corresponden a los periodos estructurales típicos de las estructuras de la zona de estudio (Tn=0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 1.5 s). Asimismo, la amplificación y frecuencia predominante se identificaron como los valores máximos de los espectros de los cocientes espectrales.

Los niveles de vulnerabilidad del suelo, según el índice Kg, fueron definidos de acuerdo con la clasificación propuesta por Akkaya (2020) y que se muestran a continuación.

Tabla 1: Niveles de vulnerabilidad del suelo de acuerdo con el índice K_g. Fuente: Modificado de Akkaya (2020).

Niveles de vulnerabilidad de acuerdo con K_g			
Escala de colores	Nivel de vulnerabilidad	Límites de K_g	
		De	A
	Baja	0	3
	Moderada	3	5
	Alta	5	10
	Muy Alta	10	-

Implementación de los cocientes espectrales

Figueroa-Soto (2024) y colaboradores llevaron a acabo una campaña de medición de vibración ambiental en la ciudad de Morelia en un total de 33 sitios, usando sismómetros compactos móviles. Con los registros realizaron espectros de Fourier de las componentes horizontales y vertical, con los cuales obtuvieron los espectros H/V. A partir de estos últimos, la ecuación 1 fue modificada como:

$$K_g = \frac{A_{g_{H/V}}^2}{F_g} \quad (2)$$

Donde:
K_g=Índice de vulnerabilidad del suelo.
A_g=Factor de amplificación (cociente espectral H/V).
F_g=Frecuencia dominante del sitio.

Se utilizaron también los espectros de los cocientes espectrales de Jara et al. (2025). Por otro lado, los factores de amplificación de los 49 sondeos de los EMS se estimaron a partir de un conjunto de señales sísmicas registradas en terreno firme y que fueron transmitidas a superficie libre a través de las propiedades estratigráficas de los suelos (velocidad de ondas de corte, densidad, amortiguamiento, espesor de los estratos) con el software SeismoSoil v1.3 (2). Con las señales transferidas, se calcularon los espectros de respuesta de superficie libre de PSA con el método de Newmark de aceleración lineal para sistemas de 1GDL, mismos que fueron normalizados respecto al espectro de respuesta promedio de terreno firme, que corresponde al sitio donde se encuentra la estación sísmica de INIRENA, ya que, históricamente, es la que menor amplificación e intensidad sísmica ha presentado en la ciudad de Morelia. Por lo tanto, para obtener el K_g, la ecuación 1 se modificó como:

$$K_g = \frac{\left(\frac{ER_{SL}}{ER_{TF}}\right)^2}{\frac{1}{T_n}} = \frac{A_{g_{CE}}^2}{F_g} \quad (3)$$

Donde:
K_g=Índice de vulnerabilidad del suelo.
ER_{SL}=Espectro de respuesta en superficie libre.
ER_{TF}=Espectro de respuesta en terreno firme.
T_n=Periodo natural de vibración del sistema de 1 GDL.
A_g=Factor de amplificación (cociente de los espectros de respuesta).
F_g=Frecuencia dominante del sitio.

RESULTADOS

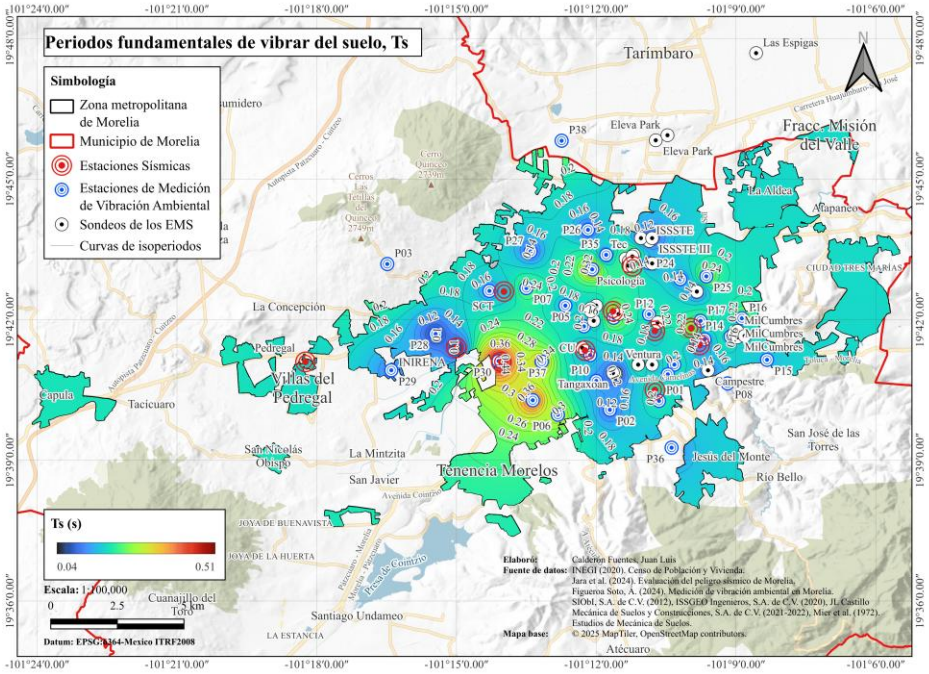
Periodos fundamentales de vibración del suelo

Se identificaron las amplificaciones o picos máximos en los espectros de los cocientes espectrales y H/V de la malla, resultados que fueron interpolados en QGIS para generar el mapa de iso-periodos que se muestra en la figura 1.

En la zona metropolitana, los periodos de vibración del suelo (T_s) oscilan entre 0.06 s y 0.51 s, destacando la zona centro con periodos intermedios con valores entre 0.10 y 0.30 s. En la periferia se tienen T_s<0.20 s.

Los periodos máximos se ubican al poniente de la ciudad de Morelia, que oscila en valores de T_s=0.36 s a T_s=0.51 s, siendo este último el periodo más alto dentro de la zona de estudio y que corresponde al sitio donde se ubica la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción delegación Michoacán (CMIC). Por el contrario, el periodo mínimo corresponde al sitio de la estación sísmica de INIRENA con T_s=0.06 s.

Figura 1: Mapa de distribución de los periodos de vibración del suelo de la zona metropolitana de Morelia para $T_n=T_s$.



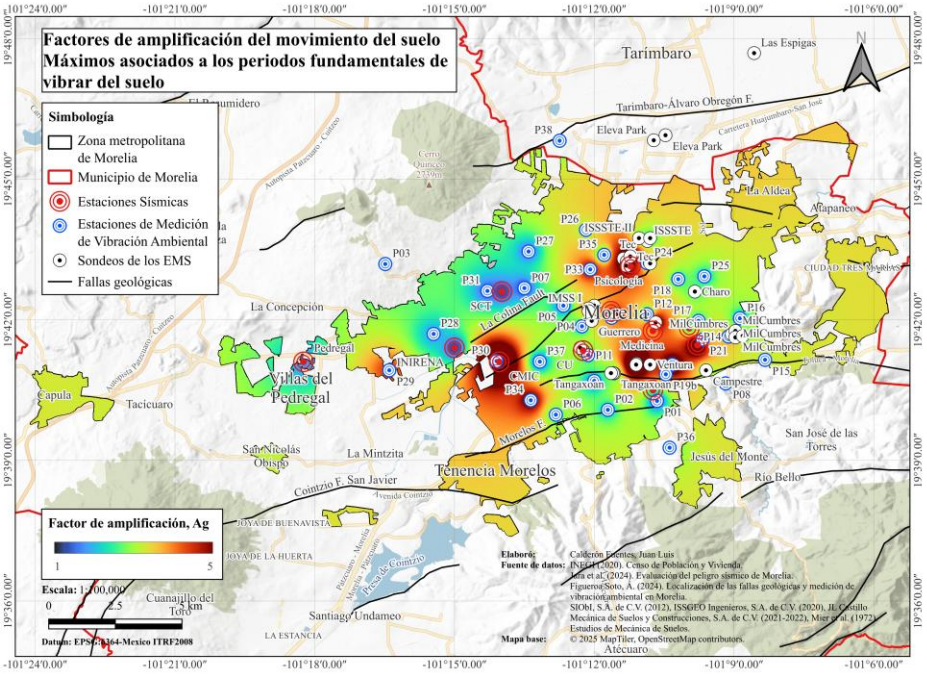
Factores de amplificación del movimiento

Con los factores de amplificación identificados se construyeron mapas para los periodos característicos de T_n con una escala de valores de 1 a 5 para visualizar de mejor manera los resultados interpolados.

En general, en todos los T_n, las amplificaciones máximas ocurren al poniente de la ciudad de Morelia. En el centro histórico se tienen valores de A_g intermedios y en la periferia amplificaciones mínimas o casi nulas. En periodos T_n<1.0 s se observaron factores de amplificación mayores que 3 al poniente, poniente-sur y centro-oriente de la ciudad de Morelia. Por otro lado, cuando T_n>1.0, el máximo A_g corresponde al sitio de CMIC con A_g>2.5 y en el resto de la zona de estudio las amplificaciones son mínimas (A_g<2.5).

En la figura 2 se muestran los factores de amplificación máximos asociados a los periodos fundamentales de vibración del suelo (T_s). Destaca que las zonas con A_g>5 se presentan paralelamente al principio y final del sistema de fallas geológicas que se encuentran dentro de la ciudad de Morelia. Transversalmente a las fallas de La Colina, Central Camionera y La Paloma, se encuentran amplificaciones bajas a intermedias. En la periferia oriente se tienen A_g entre 2 y 3, lo contrario al poniente-norte, donde la amplificación es mínima (A_g<2).

Figura 2: Mapa de distribución de los factores de amplificación del movimiento del suelo en la zona metropolitana de Morelia para $T_n=T_s$.



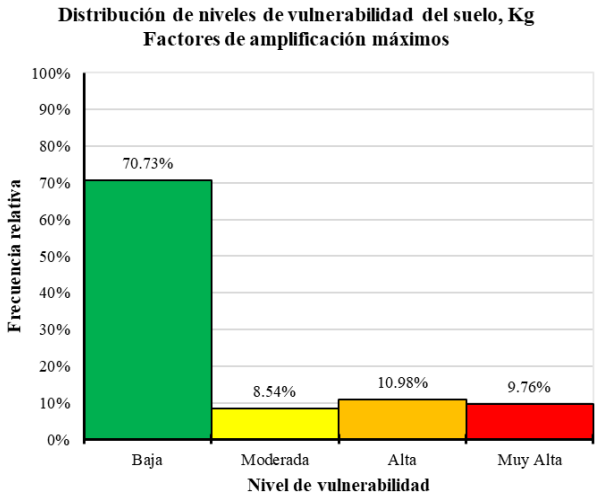
Vulnerabilidad del suelo

Los índices de vulnerabilidad del suelo se calcularon con base en las ecuaciones 2 y 3, para los periodos estructurales característicos y los niveles fueron clasificados de acuerdo con la tabla 1. Se obtuvo que para $T_n<0.5$ s, la mayor parte de la zona metropolitana es poco vulnerable, a excepción del sitio de CMIC, que cuenta con una vulnerabilidad moderada. En el $T_n=0.5$ s, el centro y oriente tienen niveles de vulnerabilidad moderados a muy altos, siendo el área circundante a la CMIC la de mayor vulnerabilidad, así como en la zona centro-norte, donde se localiza la estación sísmica de Psicología, se encontraron niveles moderados a altos. Cuando $T_n=1.0$ s, la mayoría del área de la zona de estudio es moderadamente vulnerable, a excepción de los sitios donde se localizan las estaciones sísmicas de Villas del Pedregal, INIRENA y SCT, lugares que cuentan con baja vulnerabilidad. Además, en $T_n=1.5$ s, la zona metropolitana es altamente vulnerable, contrastado con el poniente-norte, con niveles bajos a moderados.

De acuerdo con las zonificaciones determinadas para cada periodo T_n, estructuras con 1.0 a 1.5 s son altamente vulnerables. Mientras que edificios de mediana altura con periodos entre 0.2 y 0.5 s, pueden alcanzar niveles de vulnerabilidad moderada a muy alta en la zona centro-norte, comprendida por la Salida a Salamanca y la facultad de Psicología de la UMSNH.

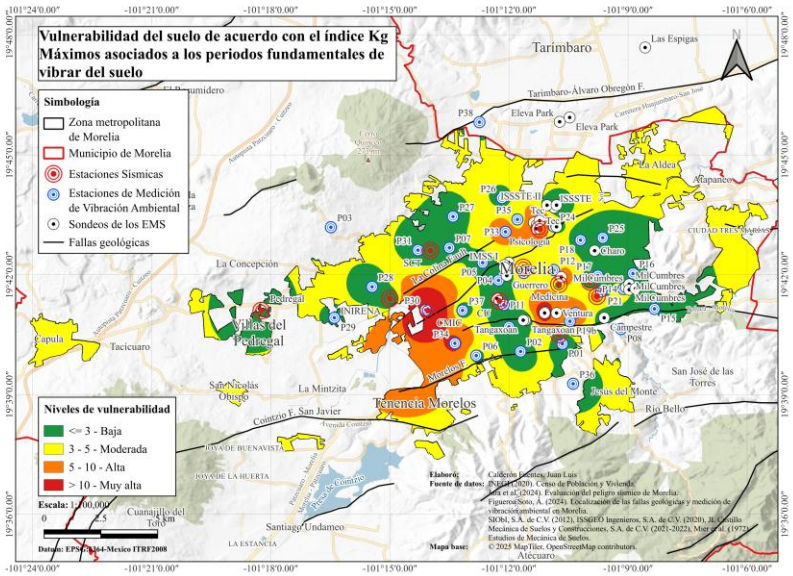
Al considerar los factores de amplificación máximos, asociados a las frecuencias y periodos fundamentales de vibración del suelo, para estimar el índice K_g, el 70.73% de los sitios de la malla son poco vulnerables, 8.54% tienen un nivel de vulnerabilidad moderada, 10.98% alta y 9.76% muy alta (figura 3). El nivel promedio de vulnerabilidad del suelo de la zona de estudio es moderado con un $K_g=3.76$.

Figura 3: Distribución de frecuencias de los niveles de vulnerabilidad del suelo en la malla de análisis para T_n=T_s.



Como se observa en el mapa de la figura 4, la zona más altamente vulnerable, se localiza en el sitio de CMIC, al poniente de la ciudad de Morelia, que a su vez se asocia con ser el lugar con las máximas amplificaciones y periodo de vibración de la zona de estudio y que se puede atribuir a la localización de estratos de suelos blandos o con alto contenido de humedad. Las áreas con mayores niveles de vulnerabilidad siguen la trayectoria longitudinal de la ubicación de las fallas geológicas de la Central Camionera, La Colina, y La Paloma, siendo las dos últimas, consideradas como sísmicamente activas (Garduño-Monroy et al. 2001).

Figura 4: Mapa de distribución de los niveles de vulnerabilidad del suelo de la zona metropolitana de Morelia para T_n=T_s.



CONCLUSIONES

Al considerar las características físicas de los suelos de la zona metropolitana de Morelia a través de los sondeos de los EMS y las mediciones de vibración ambiental, se observó que los mayores niveles de vulnerabilidad, periodos y amplificaciones del movimiento del suelo ocurren en el poniente de la ciudad, donde, ante un evento sísmico, se presentarán mayores intensidades sísmicas que pueden generar daños importantes en la infraestructura ahí localizada.

Por lo tanto, se sugiere realizar campañas de exploración de suelos en la zona metropolitana para obtener un análisis más detallado sobre las condiciones del sitio, de tal manera que se puedan generar nuevas medidas de prevención y mitigación ante la ocurrencia de sismos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Akkaya I., “Availability of seismic vulnerability index (Kg) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey”, Earth. Eng. Eng. Vib., Vol. 19, 1, 2020, pp. 189-204.
2. Asimaki D., Shi J., “SeismoSoil User Manual, v1.3”, 2017.
3. Nakamura Y., “Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor”, Presented at: World Congress on Railway Research, 1997.
4. Figueroa-Soto Á., “Medición de vibración ambiental en la ciudad de Morelia”, Comunicación personal, 2024.
5. Jara J.M., Estrada A., Gaytán R., Olmos B.A., Martínez G., “Effect of the seismic source on the probabilistic hazard assessment in a heritage city in Mexico: A case study of Morelia”, Nat Hazards Rev., Vol. 26, 2, 2025.

EVALUACIÓN DEL DESBALANCE DE VOLTAJE EN EL ENLACE DE CD DE UN INVERSOR NPC

Miguel Javier Martínez Aguilar, Diana Geraldine Castañeda Rubalcaba, Jorge Isaac Tafoya Ortiz, José Miguel Sosa Zúñiga, Mario Alberto Juárez Balderas, José Juan Alfaro Rodríguez

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
migueljavier.mtz30@gmail.com, lis22110152@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Los inversores multinivel son convertidores de electrónica de potencia que convierten corriente continua, CD, en corriente alterna, CA, utilizados en aplicaciones como el control de motores, energías renovables y electromovilidad. A diferencia de los inversores convencionales, ofrecen ventajas como una mejor calidad en la forma de onda de CA y menor estrés eléctrico en los componentes. El voltaje de CD de un inversor multinivel proviene de varias fuentes de voltaje dispuestas en diferentes configuraciones, dependiendo del tipo de inversor, y se le conoce como enlace de CD. La forma de onda de voltaje de CA resultante está compuesta de múltiples niveles, cada uno generado por combinaciones de los voltajes del enlace de CD.

Una configuración común para el enlace de CD es conectar fuentes de voltaje en serie, como en las topologías NPC, Neutral Point Clamped, ANPC, Active Neutral Point Clamped, y el inversor Tipo-T. Sin embargo, en muchas aplicaciones no es común disponer de múltiples fuentes de voltaje iguales y reguladas. En estos casos, se utilizan capacitores conectados en serie, con los extremos conectados a un único generador de voltaje de CD. Bajo condiciones de carga y descarga iguales, y en estado estacionario, todos los capacitores tienen el mismo voltaje, y su suma es igual al voltaje total del generador de CD.

Sin embargo, cuando los capacitores se usan para proporcionar diferentes niveles de voltaje, pueden tener tasas de carga y descarga distintas, lo que genera diferencias entre sus voltajes. A esto se conoce como desbalance de los capacitores del enlace de CD. El desbalance también puede verse afectado por la degradación de los capacitores, que modifica su capacitancia y resistencia interna.
En el inversor NPC, el desbalance de voltaje surge por un desequilibrio en la conexión del punto neutro, lo que genera una componente de CD y ondulación de CA. En este trabajo se analiza un inversor NPC de siete niveles de voltaje en lazo abierto para evaluar el desbalance de voltaje en el enlace de CD mediante simulaciones numéricas. El inversor está compuesto por una fuente de voltaje de CD, tres capacitores en serie, dos ramas de un inversor NPC, y una carga RL. Cada rama se compone de seis interruptores de potencia controlados y cuatro diodos de potencia.

Se usa un esquema de modulación que compara dos señales sinusoidales moduladoras desplazadas 180 grados entre sí, con tres señales portadoras en fase, desplazadas en nivel y con la misma amplitud. El desbalance del enlace de CD se evalúa en dos escenarios: primero, con capacitores de diferentes capacitancias, y segundo, con capacitancias iguales, pero con tasas de carga y descarga distintas. Los resultados muestran un desbalance de voltaje en el enlace de CD, lo que produce distorsión armónica y una componente de CD en el lado de CA. Este desbalance puede corregirse mediante circuitos de balance activo, estrategias de modulación o control de lazo cerrado.

INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel se utilizan ampliamente en aplicaciones como los sistemas de energías renovables, los accionamientos de motores eléctricos, tanto en el ámbito industrial como en la electromovilidad, y en la distribución de la energía eléctrica [1]. Estos dispositivos funcionan como convertidores que transforman la energía eléctrica de corriente directa (CD) en corriente alterna (CA).

A diferencia de los inversores de dos niveles, los inversores multinivel pueden generar formas de onda de voltaje de salida que se aproximan más a una forma de onda sinusoidal, a partir de múltiples niveles discretos de voltaje. Esto permite reducir la distorsión armónica total, disminuir las pérdidas por conmutación y aumentar la eficiencia del sistema.

Un elemento esencial en la topología de los inversores multinivel es el enlace de CD, que actúa como una etapa intermedia entre el generador de CD y el inversor. Su función principal es almacenar y suministrar energía eléctrica en forma de CD, además de definir los niveles de voltaje que conforman la forma de onda de salida, según la topología específica del inversor.

En las distintas topologías de inversores multinivel, idealmente cada nivel de voltaje de salida está determinado por generadores de voltaje constante, independientes y regulados conectados en el enlace de CD. Sin embargo, en muchas aplicaciones esto no es viable, ya que las fuentes disponibles, como paneles fotovoltaicos, bancos de baterías u otras fuentes de energía eléctrica, no garantizan niveles de voltaje regulados. Por esta razón, es común que los distintos niveles de voltaje se obtengan a partir de capacitores cargados de una única fuente de energía eléctrica, cuya conexión depende de la topología del inversor [2].

En los inversores multinivel tipo NPC (Neutral Point Clamped) [3], ANPC (Active Neutral Point Clamped) [3] o tipo T [4], es común usar un enlace de CD compuesto de una única fuente de voltaje y varios capacitores conectados en serie, cuyos extremos se conectan al generador de CD. Bajo condiciones ideales, el uso de capacitores con exactamente mismas características, y procesos equitativos de carga-descarga en cada uno de los capacitores, el voltaje en cada capacitor en estado estacionario es el mismo.

Sin embargo, los capacitores pueden presentar tasas de carga y descarga diferentes, lo que provoca que los voltajes entre ellos no sean iguales. Esto se conoce como desbalance de voltaje en el enlace de CD. Este desbalance puede deberse al uso de capacitores con características diferentes o a una degradación desigual a lo largo del tiempo, lo que altera tanto su capacitancia como su resistencia interna. En algunas topologías de inversores multinivel, el desbalance de voltaje puede ser causado por la propia estrategia de conmutación utilizada para generar la forma de onda de voltaje de salida de CA, ya que esta determina cómo se usan los distintos niveles de voltaje disponibles en el enlace de CD. Además, asimetrías en la impedancia asociada a cargas de CA desbalanceadas en la salida del inversor, pueden contribuir a que exista desbalance. El desbalance de voltaje resulta en el deterioro en la calidad de la forma de onda de salida. En el inversor NPC, el desbalance de voltaje se relaciona con un desequilibrio en el punto neutro, lo que genera ondulación de CA en el enlace de CD y una componente de CD no deseada en el voltaje de salida.

En este trabajo se evalúa el desbalance de voltaje en el enlace de CD de un inversor multinivel tipo NPC. Se considera que el enlace de CD está compuesto por tres capacitores conectados en serie, y cuyos extremos se conectan a un único generador de CD. La evaluación considera la operación en lazo abierto de un inversor NPC de dos ramas, capaz de generar siete niveles de voltaje en la salida. La evaluación del desbalance se realiza mediante simulaciones numéricas, considerando tanto el desbalance intrínseco de la topología como diferentes tasas de carga y descarga de los capacitores.

TEORÍA

El inversor NPC que se estudia en este trabajo está compuesto por dos ramas, denotadas como A y B. Cada rama está compuesta por seis interruptores de potencia controlados y cuatro diodos de potencia, como se observa en la Figura 1 [5]. Cada rama puede generar cuatro niveles de voltaje. Se obtienen siete niveles de voltaje considerando el voltaje de salida como el voltaje diferencial medido entre el punto medio de la rama A y el punto medio de la rama B.

El enlace de CD está formado por una única fuente de voltaje V_{DC}, conectada a un arreglo de tres capacitores en serie con capacitancias C_1, C_2 y C_3. Los voltajes V_{C1}, V_{C2} y V_{C3}, correspondientes a

cada capacitor, constituyen los niveles que pueden usarse para generar la forma de onda de CA en la salida del inversor. Mediante la conmutación controlada de los interruptores de potencia, es posible seleccionar distintas combinaciones de estos voltajes permitiendo sintetizar la forma de onda de CA a la salida del inversor.

Los interruptores de potencia superiores de cada rama del inversor, denotados como S_{1i}, S_{2i}, S_{3i}, para i=A, B, pueden estar en estado de conducción o activación (estado 1) o en estado de no conducción (estado 0). Los interruptores inferiores de cada rama, S_{4i}, S_{5i}, S_{6i}, son complementarios operan de manera complementaria a los interruptores superiores, es decir S_{4i} es complementario a S_{1i}, S_{5i} es complementario a S_{2i}, y S_{6i} es complementario a S_{3i}. Esto resulta en 2^6=64 combinaciones posibles de estados de conmutación en las ramas del inversor.

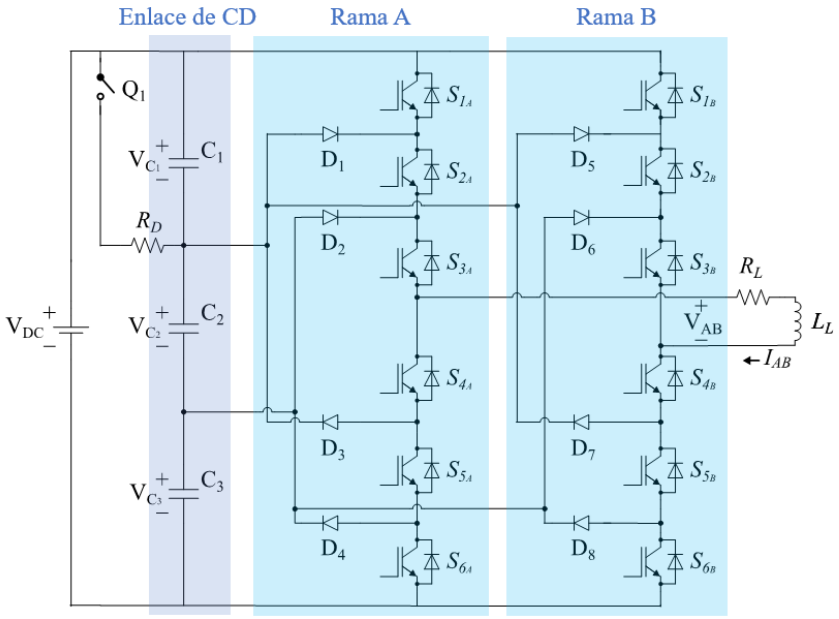


Figura 1. Inversor NPC de siete niveles de voltaje y dos ramas.

Cada combinación puede producir un voltajes diferencial distinto en los puntos intermedios de las ramas A y B. Sin embargo, algunas de estas combinaciones son redundantes, es decir, pueden generar el mismo nivel de voltaje en la salida. Otras combinaciones no son viables, ya que generan cortocircuitos en el en el enlace de CD. En la Tabla 1 se enlistan las combinaciones de conmutación viables en la operación del inversor.

Tabla 1. Secuencias de conmutación de los interruptores del inversor NPC.

S_{1A}	S_{2A}	S_{3A}	S_{4A}	S_{5A}	S_{6A}	S_{1B}	S_{2B}	S_{3B}	S_{4B}	S_{5B}	S_{6B}	V_{AB}
0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	$-2V_{DC}/3$
0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	$-V_{DC}$
0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	$-V_{DC}/3$
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	$-2V_{DC}/3$
0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	$2V_{DC}/3$
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	$V_{DC}/3$

0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	V_{DC}
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	$2V_{DC}/3$

Las señales de conmutación de los interruptores de potencia en el inversor tipo NPC se generan, típicamente, mediante esquemas de modulación. Entre los métodos más utilizados se encuentran la modulación vectorial [6], [7] y los esquemas basados en modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM, por sus siglas en inglés) [8] [9]. Entre ellos, el esquema de modulación PDLS-PWM (Phase Disposition and Level Shifted PWM) compara una señal moduladora sinusoidal con n-1 señales portadoras en fase, desplazadas en nivel y con la misma amplitud, en donde n es número de niveles de voltaje de salida del inversor.

RESULTADOS NUMÉRICOS

En esta sección se presentan los resultados de simulación numérica del inversor NPC operando en lazo abierto, usando el esquema de modulación en el PDLS-PWM, que se muestra en la Figura 2.

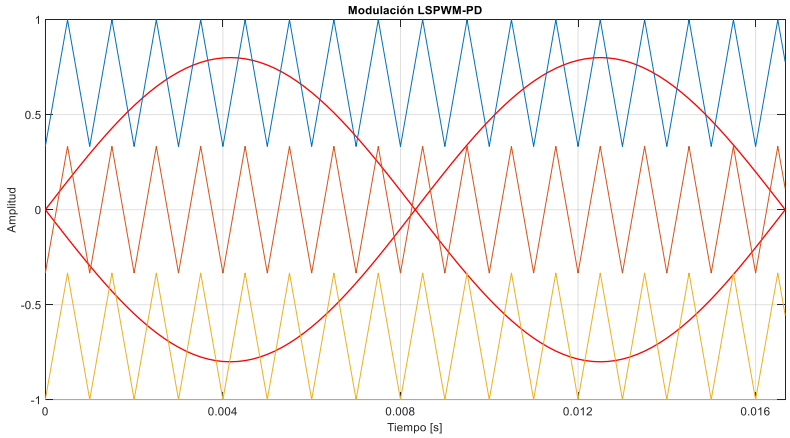


Figura 2. Modulación PDLS-PWM.

Las señales de conmutación se generan comparando dos señales moduladoras sinusoidales de 60 Hz de frecuencia y de amplitud de 0.8, desfasadas 180 grados entre sí, con tres señales portadoras triangulares de 10 kHz, en fase, con amplitud de 0.67 y desplazadas en nivel. Los resultados de simulación resultados se evalúan considerando la respuesta de la topología y generando un desbalance en el enlace de CD usando los parámetros de la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del inversor.

Componente	Valor
V_{DC}	120 V
$C_1 = C_2 = C_3$	2.2 mF
R_L	16 Ω
L_L	2.0 mH
R_D	12 Ω

La respuesta intrínseca del inversor se evalúa bajo dos condiciones principales. En primer lugar, se considera un enlace de CD compuesto por generadores de voltajes iguales y regulados conectados en serie. Posteriormente, se analiza el comportamiento del inversor utilizando una única fuente de voltaje junto con un enlace de CD formado por tres capacitores en serie, con iguales capacitancias $C_1 = C_2 = C_3$. Además, se evalúa el desbalance de voltaje bajo dos condiciones diferentes en el

enlace de CD. Primero con capacitores con capacitancias diferentes $C_2 = C_3$ y $C_1 = C_2/2$, y después con capacitores con capacitancias iguales $C_1 = C_2 = C_3$, pero con diferentes tasas de descarga, forzando una descarga más rápida en C_1 mediante la conexión de una resistencia R_D en paralelo.

En la Figura 3 se muestran las gráficas obtenidas al usar generadores de voltaje de CD en el enlace de CD. El voltaje de cada generador de voltaje se fija en $V_{DC}/3$, de esta manera el voltaje en el enlace de CD se mantiene constante. El voltaje de salida del inversor mantiene siete niveles de voltaje simétricos y no presenta distorsión la corriente de salida.

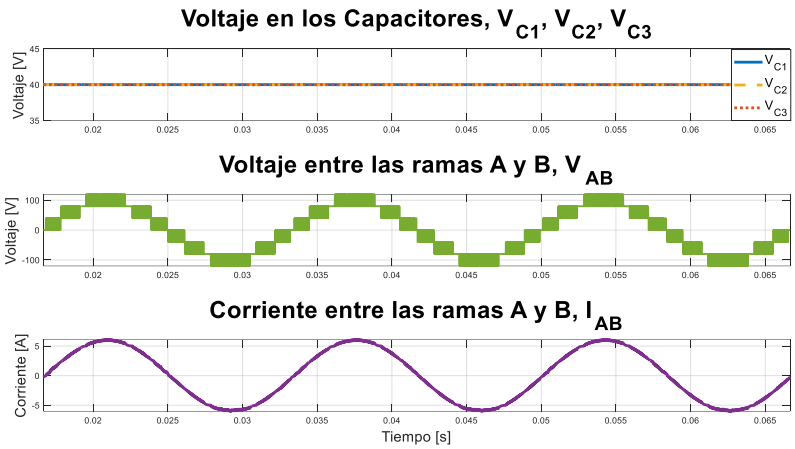


Figura 3. Resultados de simulación considerando tres capacitores de igual capacitancia en el enlace de CD. (De arriba hacia abajo) Voltaje en los capacitores del enlace de CD, Voltaje y corriente entre las ramas A y B.

En la Figura 4 se evalúa la operación del inversor considerando en el enlace de CD formado por tres capacitores conectados en serie y $C_1 = C_2 = C_3$ conectados a una única fuente de voltaje. Se observa que el voltaje del capacitor C_2 converge a 0 V, mientras que, los voltajes en C_1 y C_3 aumentan simétricamente hasta alcanzar una magnitud de $V_{DC}/2$. Este desbalance provoca una reducción en la cantidad de niveles de voltaje disponibles en la salida del inversor, pasando de siete niveles a cinco niveles. Además, la pérdida de simetría en los niveles de voltaje introduce distorsión en la forma de onda de la corriente de salida.

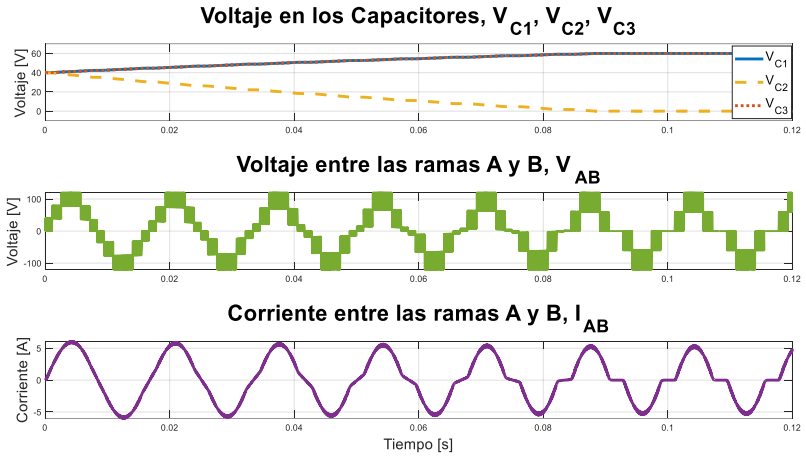


Figura 4. Resultados de simulación considerando tres capacitores de misma capacitancia en el enlace de CD. (De arriba hacia abajo) Voltaje en los capacitores del enlace de CD, Voltaje y corriente entre las ramas A y B.

En la Figura 5 se evalúa el comportamiento del sistema cuando el enlace de CD está formado por capacitores de diferentes valores, con $C_2 = C_3$ y $C_1 = C_2/2$. Al igual que en el caso anterior, se observa que el voltaje en el capacitor C_2 converge a cero. Dado que C_1 tiene una capacitancia mentor, su voltaje es menor que el de C_3, lo que genera asimetría y distorsión en el voltaje y la corriente de salida.

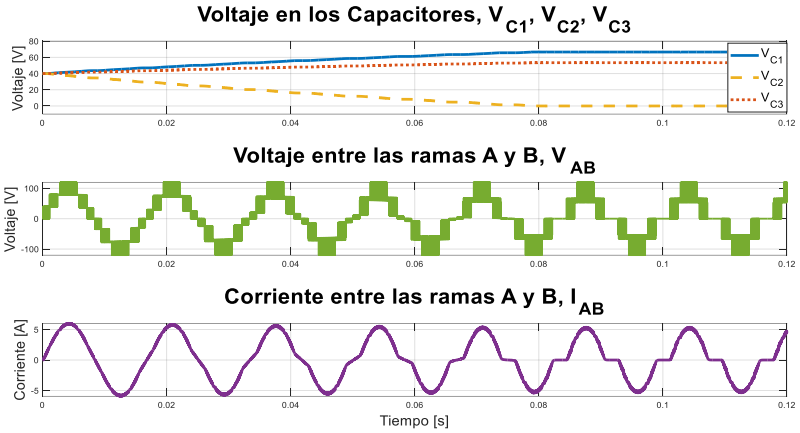


Figura 5. Resultados de simulación considerando tres capacitores de distinta capacitancia en el enlace de CD. (De arriba hacia abajo) Voltaje en los capacitores del enlace de CD, Voltaje y corriente entre las ramas A y B.

En la Figura 6 se evalúa la operación del inversor considerando capacitores con la misma capacitancia $C_1 = C_2 = C_3$, pero con tasas de carga y descarga distintas. Para inducir esta diferencia, se conecta una resistencia, R_D, en paralelo con el capacitor C_1. Como resultado, los voltajes en los tres capacitores convergen a 0 V, aunque con distintas tasas de descarga. Esta descarga de los capacitores provoca que tanto el voltaje como la corriente de salida del inversor también converjan a cero.

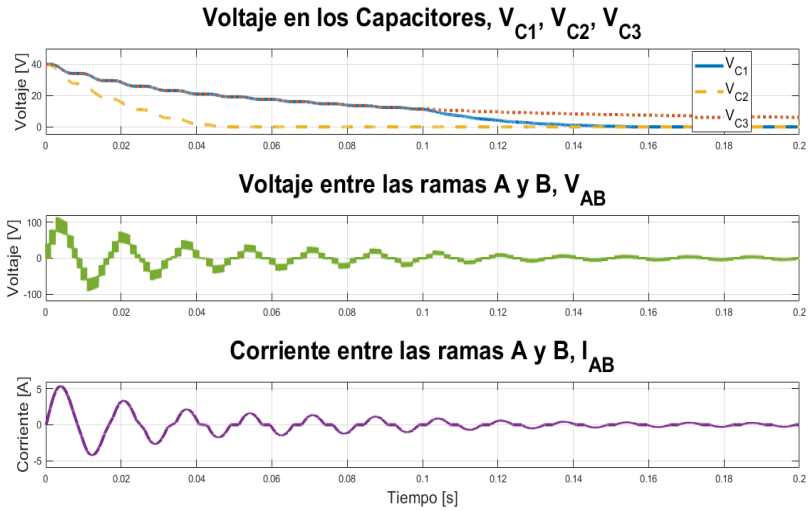


Figura 6. Resultados de simulación considerando tres capacitores de misma capacitancia en el enlace de CD, pero con tasas de carga/descargas distintas. (De arriba hacia abajo) Voltaje en los capacitores del enlace de CD, Voltaje y corriente entre las ramas A y B.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante simulación numérica muestran que el inversor NPC de dos ramas, con tres capacitores en el enlace de CD y siete niveles de voltaje en la salida, presenta un

desbalance intrínseco en los voltajes de los capacitores usando el esquema de modulación presentado. Este desbalance se debe a que la forma de onda de salida de CA se genera a partir de la conexión y desconexión de los voltajes de los capacitores a la carga de CA durante un ciclo de la componente fundamental de CA, siendo el capacitor C_2 el que más se usa. Sin embargo, el desbalance se ve mayormente afectado cuando se modifica la tasa de descarga de C_1, por ejemplo, al conectar una resistencia en paralelo. Los resultados muestran que la implementación de circuitos de balance activo, esquemas avanzados de modulación o estrategias de control en lazo cerrado que mitigar este desbalance y mantener la simetría de voltaje en el enlace de CD son necesarias en la aplicación de este inversor.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
2. M. Trabelsi, H. Vahedi and H. Abu-Rub, "Review on Single-DC-Source Multilevel Inverters: Topologies, Challenges, Industrial Applications, and Recommendations," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 112-127, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2021.3054666.
3. J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer and I. E. Lizama, "A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2219-2230, July 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2032430.
4. M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 2, pp. 899-907, Feb. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2203151.
5. A. Taghvaie, M. E. Haque, S. Saha and M. A. Mahmud, "A New Step-Up Switched-Capacitor Voltage Balancing Converter for NPC Multilevel Inverter-Based Solar PV System," in IEEE Access, vol. 8, pp. 83940-83952, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992093.
6. Y. Jiao, F. C. Lee and S. Lu, "Space Vector Modulation for Three-Level NPC Converter With Neutral Point Voltage Balance and Switching Loss Reduction," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 10, pp. 5579-5591, Oct. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2294274.
7. V. Jayakumar, B. Chokkalingam and J. L. Munda, "A Comprehensive Review on Space Vector Modulation Techniques for Neutral Point Clamped Multi-Level Inverters," in IEEE Access, vol. 9, pp. 112104-112144, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100346.
8. I. López et al., "Modulation Strategy for Multiphase Neutral-Point-Clamped Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 2, pp. 928-941, Feb. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2416911.
9. S. Xu, J. Zhang, G. Ma, Z. Sun, K. Liu and C. Yao, "Operation of a Seven-Level T-Type Active Neutral-Point-Clamped Converter With Modified Level-Shifted PWM," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 11, pp. 10970-10981, Nov. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3038067.

ANÁLISIS BIOMECÁNICO DEL MANEJO MANUAL DE CARGAS A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO Y CON BASE EN LA NOM-036-1-STPS-2018

Roberto Abdiel Sánchez Negrete, Luis Ángel Ortiz Lango, Israel Miguel Andrés, Javier Yañez Mendiola, Paola Hernández Gandarillas, Juan Carlos García Valadez, José Alberto Valdez López y Andrés Emiliano Macías Vázquez

Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC).
rsanchez@ciatec.mx

RESUMEN

El manejo y manipulación de cargas representa un riesgo implícito para la columna vertebral. Las cargas que no se encuentran completamente alineadas al eje corporal producirán un momento de flexión (momento Nm) en la columna vertebral que podría producir una lesión a mediano o largo plazo. Actualmente existe un elevado número de lesiones en la región lumbar en trabajadores mexicanos, por lo que el cumplimiento de normativas como la NOM-036-1-STPS-2018 es esencial para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores. El objetivo de este estudio es evaluar el movimiento de un grupo de personas levantando un peso de 10kg y poder conocer y caracterizar el nivel de riesgo que presentan principalmente en la región lumbar y de las rodillas, con base en lo establecido en la Norma Oficial Mexicana. Los equipos utilizados para medir el movimiento fue el sistema de captura de movimiento optoelectrónico VICON. Se consideró una muestra de 20 participantes (10 hombres y 10 mujeres), con una edad promedio de 26.5 ±5.2 años y masa promedio de 72.83 ± 9.59 kg. Los criterios de inclusión de los participantes en el estudio fueron que no presentaran antecedentes de problemas musculoesqueléticos y/o fracturas en miembros inferiores. Los resultados obtenidos demostraron que hay una alta variación de torsión y flexión entre los participantes, teniendo mayoritariamente torsión de medio a alto riesgo en la zona lumbar, mientras que una flexión distribuida equitativamente entre riesgo bajo y medio en la zona de rodillas. Se concluye entonces que, con base en la NOM 036, la manipulación de cargas u objetos pesados del grupo de trabajo tiende a no entrar en las consideradas como “riesgo bajo” por la norma, por lo cual se deben tomar medidas de prevención y corrección como lo son el acompañamiento del gesto con un equipo de apoyo (como fajas lumbares) y un adecuado adiestramiento o capacitación para el manejo manual de cargas.

INTRODUCCIÓN

El manejo manual de cargas es una actividad frecuente en diversos sectores laborales, particularmente en la industria manufacturera, la construcción, y el comercio. Esta práctica, cuando no se realiza adecuadamente, puede representar un riesgo significativo para la salud musculoesquelética de los trabajadores. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), los trastornos musculoesqueléticos (TME) son una de las principales causas de ausentismo laboral y discapacidad laboral temporal o permanente.

Conforme a lo estipulado por la NOM-036-1-STPS-2018, esta actividad se entiende como “la acción que realizan uno o varios trabajadores al levantar, descender, empujar, arrastrar, cargar o acomodar objetos utilizando su fuerza física, con o sin ayuda de equipo auxiliar... cuando la masa del objeto es igual o superior a 3 kilogramos”. [1]

Por implicar un esfuerzo físico considerable y repetitivo, el manejo manual de cargas se considera una tarea con potencial de riesgo, ya que puede ocasionar lesiones o enfermedades laborales si no se lleva a cabo bajo condiciones seguras y controladas. En el contexto legal mexicano, la Ley Federal del Trabajo, en su artículo 475, define la enfermedad de trabajo como “toda alteración patológica provocada por la exposición continua a una causa relacionada directamente con la actividad desempeñada o con el ambiente laboral”. [2]

El presente estudio se enfoca en evaluar el riesgo biomecánico en un grupo de trabajadores simulados al realizar levantamiento de una carga estándar de 10 kg. La investigación se basa en la captura y análisis del movimiento corporal mediante un sistema optoelectrónico, con el objetivo de identificar posturas y gestos que podrían representar un riesgo, particularmente en la zona lumbar y de las rodillas.

TEORÍA

El levantamiento de cargas genera fuerzas de compresión, cizallamiento y momentos de flexión sobre la columna vertebral. Cuando la carga no está alineada al eje corporal o se levanta sin técnica adecuada, se produce un momento de flexión (Nm), principalmente en la zona lumbar (L4-L5), que puede derivar en hernias discales, esguinces y lesiones crónicas [3].

Según Waters et al. (1993) [4], el riesgo de lesión se incrementa con el peso de la carga, la distancia horizontal desde el cuerpo, la frecuencia del levantamiento y la postura adoptada. Por esta razón, las guías ergonómicas recomiendan levantar con la espalda recta, manteniendo la carga cerca del cuerpo y utilizando principalmente las piernas para generar fuerza.

La NOM-036-1-STPS-2018 establece los factores de riesgo asociados al manejo manual de cargas: el peso del objeto, la frecuencia y duración del levantamiento, las condiciones del entorno y la postura del trabajador. Determina que una tarea será considerada de “riesgo bajo” si cumple con ciertos límites biomecánicos, incluyendo la torsión del tronco interpretándose como menor a 20°, flexión menor a 30°, y carga no mayor a 25 kg para hombres o 15 kg para mujeres en situaciones específicas [1].

PARTE EXPERIMENTAL

El presente estudio consistió en examinar la actividad de levantar y bajar un peso de 10 kilogramos con agarradera desde nivel de piso. Esto con el propósito de poder conocer y caracterizar el efecto que genera la carga sobre el movimiento de la estructura corporal, principalmente en la región del torso y de las rodillas y poder analizarlo con las herramientas ergonómicas actuales

En el presente trabajo de investigación se consideró una muestra de 20 participantes (10 hombres y 10 mujeres), con una edad promedio de 26.5 ±5.2 años. El rango de edades fue de 20 a 36 años. El peso y la altura de los participantes fue de 72.83 ± 9.59 kg y 1.66 ± 0.07 m, respectivamente. Los criterios de inclusión de los participantes en el estudio fueron que no presentaran antecedentes de problemas músculo-esqueléticos, fracturas en miembros inferiores y que fueran diestros.

Se utilizó un sistema de captura de movimiento VICON [5], el cual emplea cámaras infrarrojas para registrar con alta precisión el desplazamiento tridimensional de marcadores reflectivos colocados en puntos anatómicos clave (hombros, caderas, rodillas, tobillos y vértebras lumbares). Los participantes realizaron cinco repeticiones de levantamiento de una caja de 10 kg desde el suelo hasta la altura del abdomen aproximadamente, como se puede ver en la figura 1.

Se emplearon un total de 39 marcadores distribuidos en toda la estructura corporal para poder medir la inclinación del torso y el movimiento de flexión-extensión de las rodillas. Se clasificaron los movimientos con base en los umbrales establecidos en la NOM-036-1-STPS-2018 para identificar niveles de riesgo en posturas laborales.



a) b)

Figura 1 Participantes preparados para evaluar los movimientos en el sistema de captura de movimiento VICON:
a) Participante femenino y b) Participante masculino

El grado de inclinación del torso con respecto a la vertical fue calculado con la ayuda de los marcadores de la cervical 7 (C7) y el marcador de la columna (T10). El grado de inclinación del vector producido (C7-T10) fue calculado con la ayuda de cosenos directores. Para la rotación de las rodillas, se midió el ángulo posterior de la rodilla en el cual se utilizaron los marcadores laterales del muslo (RTHI), rodilla (RKNE) y la pierna (RTIB). Para el cálculo del ángulo de la rodilla se obtuvo a través de del triángulo formado por los tres marcadores y utilizando la ley de cosenos.

RESULTADOS

Los resultados muestran una gran variabilidad en la técnica de levantamiento entre los participantes, tanto en inclinación de torso como en flexión de rodilla. Las figuras 2 y 3 muestran los ángulos de inclinación del torso de 20 participantes durante un gesto de levantamiento de una carga de 10 kg desde el suelo.

La Figura 2 presenta los datos individuales de los participantes con ángulos que oscilan entre aproximadamente 50° y 125°, y varios sujetos superando los 90°. La inclinación promedio de los participantes fue de 78.52 grados. Los datos cuentan con una máxima de 124.89 grados y una mínima 48.72 de grados. La figura 3 muestra una desviación estándar que también sugiere una alta variabilidad.

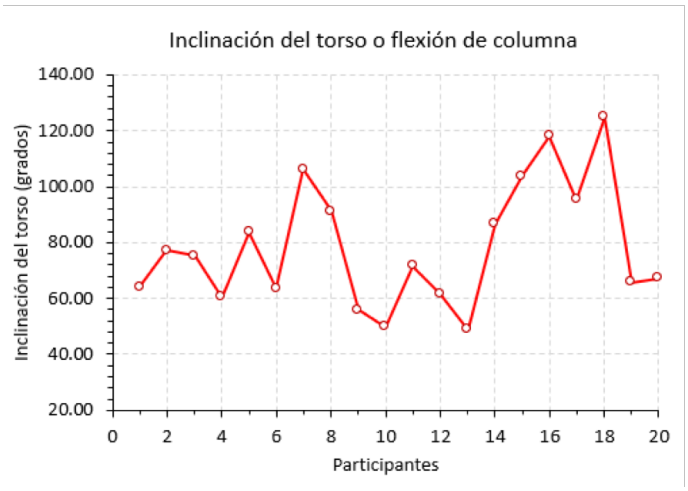


Figura 2 Inclinación del torso de los 20 individuos

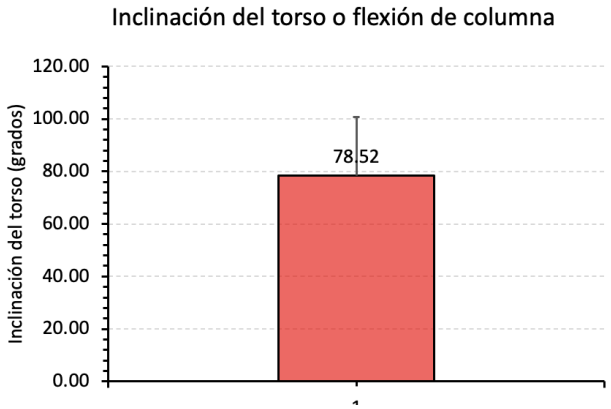


Figura 3 Promedio y desviación de inclinación del torso de los 20 individuos

Para la flexión de rodillas, las figuras 4 y 5 muestran el promedio de los ángulos de flexión de 20 participantes durante el mismo gesto de levantamiento de una carga de 10 kg desde el suelo. Para la flexión de rodilla.

En la figura 4 se observa una amplia variabilidad en el promedio la flexión de ambas rodillas entre los sujetos, con valores que van desde los 40° hasta más de 140°, indicando distintas estrategias posturales al ejecutar la tarea. El promedio de flexión de la rodilla fue de 90.70 grados. La inclinación promedio de los participantes fue de 78.52 grados. Los datos cuentan con una máxima de 142.97 grados y una mínima de 37.4 grados. La figura 5 muestra el valor promedio de flexión de rodilla, que es de una desviación estándar considerable, reflejando nuevamente la variabilidad entre participantes.

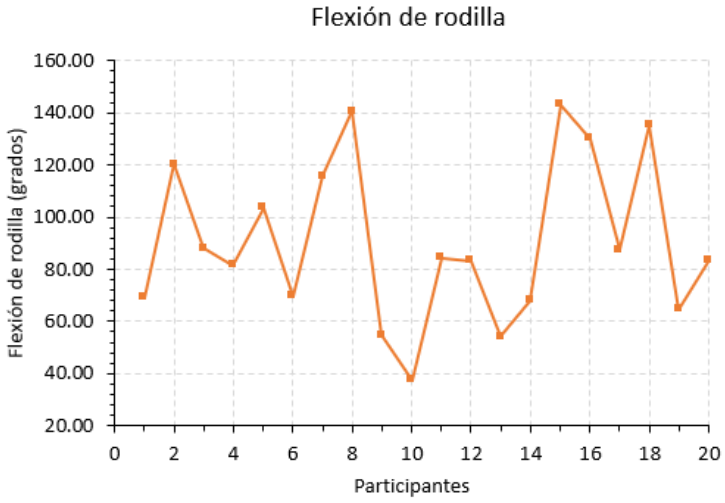


Figura 4 Flexión de rodilla de los 20 individuos

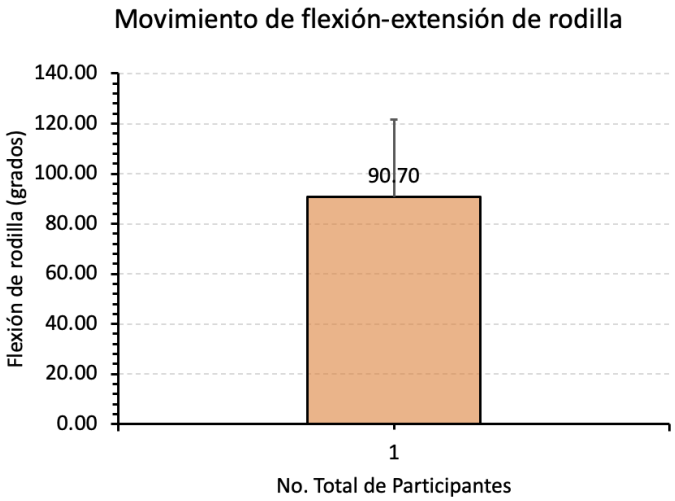


Figura 5 Promedio y desviación de flexión de rodilla de los 20 individuos

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demostraron que hay una alta variación de inclinación de torso y flexión de rodillas entre los participantes, teniendo mayoritariamente inclinación de torso de medio a alto riesgo en la zona lumbar, mientras que una flexión de rodilla distribuida equitativamente entre riesgo bajo y medio en la zona de rodillas.

Utilizando la NOM-036-STPS-2018, se puede interpretar que una flexión del tronco superior a 60° en el levantamiento manual de cargas representa un riesgo ergonómico alto. Además, herramientas de evaluación como RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [6] considerarían posturas con inclinaciones superiores a 60° como riesgos ergonómicos significativos.

De igual forma, se puede interpretar que una flexión profunda de rodillas (superior a 90°) durante esfuerzos físicos, como el levantamiento de cargas, puede implicar riesgo ergonómico moderado a alto, sobre todo si se mantiene durante periodos prolongados o si se repite con frecuencia. La herramienta RULA también considera la flexión de rodilla: flexiones por encima de 90° pueden aumentar la puntuación en el análisis postural, lo que representa una mayor exposición al riesgo, especialmente si no se realiza una distribución adecuada de la carga.

Se concluye entonces que, para el cumplimiento de la NOM 036, la manipulación de cargas u objetos pesados del grupo de trabajo tiende a no entrar en las consideradas como “riesgo bajo” por la norma, por lo cual se deben tomar medidas de prevención y corrección como lo son el acompañamiento del gesto con un equipo de apoyo (como fajas lumbares) y un adecuado adiestramiento o capacitación para el manejo manual de cargas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Secretaría del Trabajo y Previsión Social, Seguridad y Salud en el Trabajo en México: Avances, retos y desafíos. 2017.
2. D.O.F., “Ley Federal del Trabajo,” Diario Oficial de la Federación.
3. A. Covarrubias-Gómez, “Lumbalgia: un problema de salud pública,” Anestesiología, vol.33, no. 1, pp. 106–109, 2010.
4. Waters, T., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. Ergonomics, 36(7), 749-776.
5. V. M. System, “System Reference. Vicon MX Hardware.,” Oxford UK. Los Angeles USA, 2006.

6. Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). Applied Ergonomics, 31(2), 201-205.

OPTIMIZACIÓN DEL CONTROLADOR TB6600 PARA SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE ALTA PRECISIÓN

Juan Pablo Araíz Aguilar, Judith Marisela Gómez Tapia,
José Juan Vázquez Martínez, Gerardo Trejo Caballero

Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato Gto.
jose.vm@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta el rediseño y optimización del controlador de motor a pasos TB6600 para su implementación en sistemas de automatización de alta precisión, con especial énfasis en brazos robóticos de seis grados de libertad. La propuesta busca mejorar la eficiencia térmica, la estabilidad de la señal de control y la integración del módulo en entornos de automatización avanzada. Por medio del software Altium Desinger, se diseñó el prototipo, debido que es una herramienta interactiva en el diseño de armado de tarjetas PCB, así como un ambiente amigable para el usuario. Organizando los componentes que integran el controlador y sus conexiones para una identificación de terminales del motor, microcontrolador y fuente de voltaje. Se realizó pruebas por motores a pasos NEMA 23 para el análisis de rendimiento térmico y estabilidad de la señal del control. Los resultados indican que la nueva configuración permite una mejor disipación de calor y facilita la instalación y mantenimiento del sistema. Además, se identificó que esta estructura es adaptable a otras aplicaciones, como maquinas CNC y sistemas de automatización avanzado. Se concluye que el rendimiento del TB6600 mejora su funcionalidad y aplicabilidad en sistemas mecatrónicos como automatización avanzada, robótica, principios de maquinaría CNC, y otras aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

El diseño de circuitos impresos (PCB), por sus siglas en inglés corresponden a placa de circuito impreso ("printed circuit board"), y se define como un circuito cuyos componentes y conductores están contenidos dentro de una estructura mecánica [3]. Es una etapa crítica en el desarrollo de sistemas electrónicos, ya que impacta directamente en la eficiencia térmica, la estabilidad de señal y la integridad general del dispositivo. En este estudio, se presenta el rediseño del controlador de motor a pasos TB6600, con el objetivo de crear un prototipo para observar su desempeño para aplicaciones de automatización avanzada, particularmente en brazos robóticos de seis grados de libertad y sistemas CNC.

Altium Designer se basa en la Plataforma de Integración X2, que integra los diversos editores y motores de software de Altium Designer y proporciona una interfaz de usuario uniforme en todas las herramientas y editores. Toda esta funcionalidad se proporciona y todo el proceso de diseño se realiza en un único *Entorno de Diseño Unificado*, único en su tipo, diseñado para optimizar la productividad [1]. Por lo tanto, el rediseño se llevó a cabo en el software Altium Designer, seleccionado por su entorno de trabajo integrado, herramientas de diseño esquemático y de layout, así como sus capacidades de verificación de reglas eléctricas. Estas características permiten mejorar la distribución de los componentes, optimizar rutas de señal crítica y garantizar una disipación térmica más eficiente.

El enfoque metodológico incluye la elaboración de un nuevo prototipo de PCB, considerando las necesidades de robustez, modularidad e integración en sistemas mecatrónicos. Se plantean posteriormente pruebas de validación utilizando motores a pasos NEMA 23 para evaluar el impacto de las modificaciones sobre la eficiencia térmica y la estabilidad de control. Los resultados esperados apuntan a una mejora significativa en la funcionalidad del TB6600 y su adaptabilidad a diversos entornos industriales.

MARCO TEÓRICO

La tecnología de componentes eléctricos hace referencia que la elaboración de PCB´s ha facilitado el diseño de circuitos más compactos, Los circuitos se conforman de componentes electrónicos que proporcionan la información o carga necesaria para funcionar y se clasifican en dos grupos según la forma en que se montan a la placa:

SMT/SMD: el terminó SMT significa Surface-Mount Technology (Tecnología de Montaje Superficial) y el término SMD significa Surface-Mount Device (Dispositivo de Montaje Superficial), este tipo de componentes pueden ser activos o pasivos, estos componentes son más pequeños que los componentes THT y para poder conectarlos se hace por medio de contactos planos en la PCB.
THT: el terminó THT significa Through-Hole Technology (Tecnología de Agujeros Pasante) este tipo usa los agujeros que se encuentran en las PCB´s para poder montar los diferentes componentes que son diseñados para esta tecnología.

El diseño de tarjetas PCB es el proceso de organizar componentes y conexiones eléctricas en una placa de circuito impreso, transformando los esquemas en una representación gráfica detallada para su implementación física. Este proceso implica convertir esquemas de circuitos en una representación gráfica de cada componente y rastrearlos en la PCB. El diseño determina cómo se organizan espacialmente los componentes en la placa y cómo se conectan eléctricamente, lo que afecta el rendimiento general, la confiabilidad y la capacidad de fabricación del producto final [3]. Para diseñar una PCB de manera profesional llega a tomar muchos puntos que se deben de cumplir estos referentes a distintas normas que rigen sobre el proceso de la construcción de estas. La placa de circuito impreso está construida por capas que se alternan de cobre conductor con capas de material aislante no conductor. Durante la fabricación de la PCB, se graban las capas de cobre internas dejando trazas de cobre intencionadas para conectar los componentes de circuito. Una vez laminado el material de aislamiento este es grabado a las capas de cobre y así sucesivamente, hasta que la placa de circuito impreso esté completa. Los componentes se agregan a las capas externas de la placa de circuito impreso o PCB cuando todas las capas se han grabado y laminado juntas. Las partes de montaje superficial se aplican automáticamente con robots y las partes con orificio pasante se colocan manualmente. Una vez hecho esto, todas las partes se sueldan en la placa utilizando técnicas tales como reflujo o soldadura por ola. El montaje final se chapa después de aplicar la máscara de soldadura y la pantalla de impresión de la leyenda. En resumen, como se muestra en la Figura 1, una PCB o placa de circuito impreso se define como un circuito cuyos componentes y conductores están contenidos dentro de una estructura mecánica.

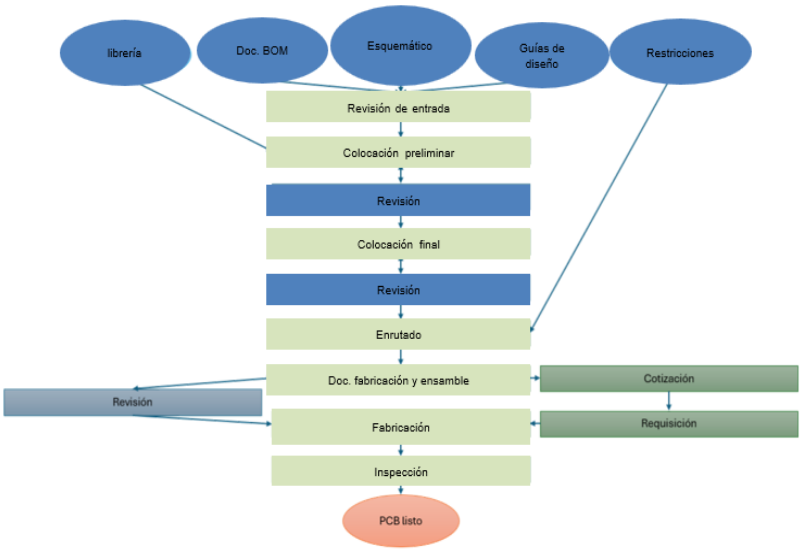


Figura 1. Diseño general de una PCB

A continuación, en la parte correspondiente al desarrollo experimental, se sigue de manera ordenada y sistemática todos los pasos importantes previamente establecidos en el diseño de la PCB. Este procedimiento tiene como objetivo asegurar que la ejecución sea rigurosa, coherente y alineada con los objetivos planteados en la etapa de planificación, permitiendo así obtener resultados válidos y confiables.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El diseño de una placa de circuito impreso es un proceso meticuloso que requiere una planificación estructurada y el uso de herramientas especializadas (Altium Designer). Es importante contar con una biblioteca de símbolos esquemáticos que representen gráficamente cada componente en el diagrama eléctrico En esta fase, se optimiza la colocación de componentes y se enrutan las conexiones eléctricas siguiendo las reglas de diseño establecidas. Se verifica la ausencia de conflictos y se asegura la conformidad con los requisitos eléctricos y mecánicos del proyecto.

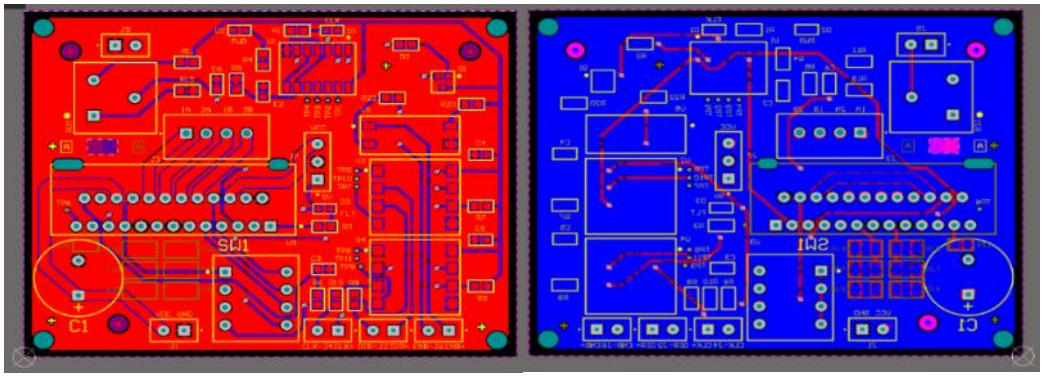


Figura 2. Vista 2D de la placa

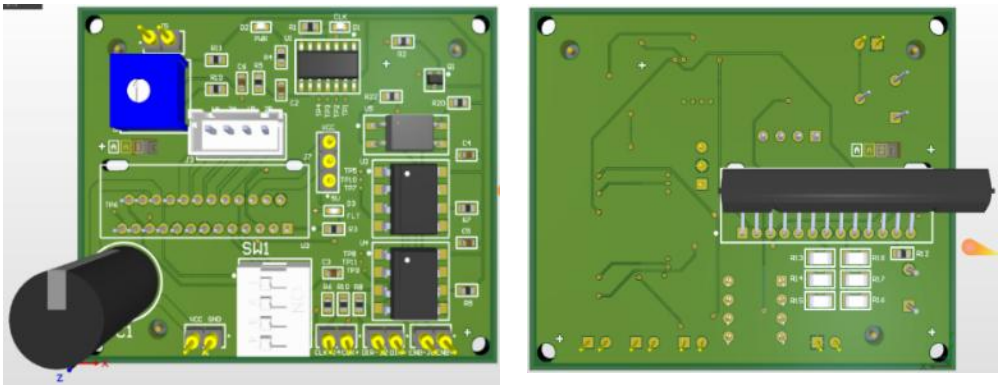


Figura 3. Vista 3D de la placa

Como podemos ver en las Figura 2 y 3, el diseño final de la tarjeta de circuito impreso (PCB) fue realizado utilizando la herramienta profesional Altium Designer, permitiendo una integración eficiente entre el esquema eléctrico y el diseño físico. El objetivo principal del diseño fue garantizar una disposición lógica y funcional de los componentes, asegurando tanto la integridad eléctrica como la optimización del espacio en la tarjeta.

Especificaciones generales del diseño: i) Dimensiones de la PCB: 49.53 mm x 60.96 mm, ii) Número de capas: 2 capas, iii) Tipo de material: FR4, 1.6 mm de espesor, iv) Espesor de cobre: 1 oz y v) Tecnología de montaje: SMD y THT.

Aspectos clave del diseño:

- Ubicación de componentes: se priorizó la disposición de componentes de alta frecuencia o sensibilidad en zonas de baja interferencia, y la agrupación de bloques funcionales
- Ruteo de señales: las pistas fueron trazadas considerando el ancho adecuado para la corriente que transportan, minimizando cruces y evitando bucles de masa
- Reglas de diseño (DRC): Se configuraron y validaron las reglas de diseño conforme a las especificaciones del fabricante de PCBs y los estándares IPC, incluyendo separación mínima entre pistas, tamaño de pads, y anchos de pista
- Generación de archivos Gerber: Una vez completado el diseño, se generaron los archivos Gerber, junto con el archivo de taladrado (NC Drill), BOM (Bill of Materials) y Pick & Place para la fabricación y ensamblaje del PCB.

Generación de Documentos de Fabricación

Finalmente, se generan los archivos necesarios para la fabricación de la PCB, como los archivos Gerber, listas de taladros, dibujos de ensamblaje y especificaciones técnicas. Estos documentos deben ser precisos y completos para garantizar una producción exitosa. La Figura 4 ilustra el entorno de trabajo en Altium Designer, mostrando el proyecto desarrollado que culminó en la fabricación de la PCB.

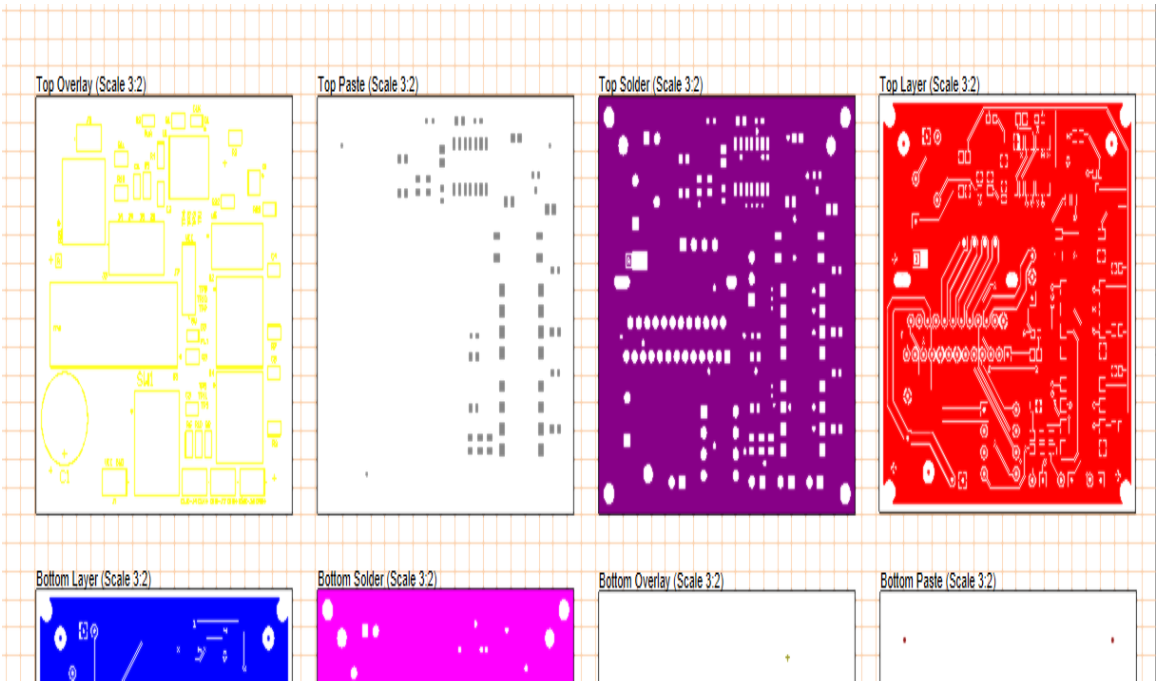


Figura 4. Layer para cada capa top overlay, top paste, top solder, top layer, bottom layer, bottom solder, bottom overlay, botton paste y board outline

Los planos que se generaron, los planos técnicos son necesarios para la fabricación de la PCB, tales como los archivos Gerber, las listas de taladros, los dibujos de ensamblaje y las especificaciones técnicas. Altium Designer, como herramienta avanzada de diseño electrónico, permite crear estos documentos de manera precisa y detallada, asegurando que todos los aspectos del diseño sean correctamente representados y listos para ser ejecutados por el fabricante. La correcta generación y exportación de estos archivos es crucial, ya que cualquier error en su preparación puede afectar negativamente la calidad del producto final, retrasar el proceso de fabricación o generar costos adicionales debidos a correcciones inesperadas. Además, la plataforma permite una revisión exhaustiva de todos los detalles técnicos, facilitando la integración de cambios y mejorando la trazabilidad durante el proceso de diseño. Así, con una documentación adecuada y precisa

generada desde Altium Designer, se asegura una producción exitosa, optimizando los tiempos de fabricación y garantizando la calidad y funcionalidad de los componentes.

RESULTADOS

Al comparar el controlador diseñado (Figura 5) con un modelo comercial (Figura 6), se observa que el nuevo diseño presenta una notable reducción en sus dimensiones, resultado de un proceso de optimización. Aunque a primera vista el controlador comercial podría parecer una opción más económica, es importante destacar que la calidad de sus componentes suele ser inferior. Este tipo de productos, generalmente construidos sobre PCB genéricas, no utilizan componentes originales, lo que puede comprometer su desempeño y durabilidad.

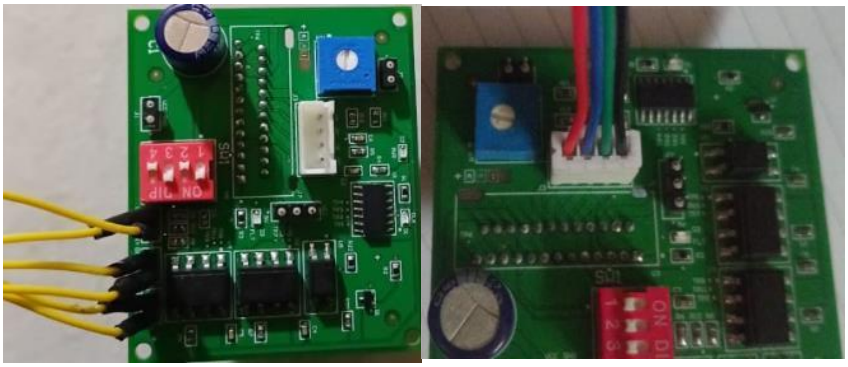


Figura 5. Controlador rediseñado. Dimensiones de la PCB: 49.53 mm × 60.96 mm. Número de capas: 2. Material: FR4 con un espesor de 1.6 mm. Espesor del cobre: 1 oz. Costo estimado: $259.



Figura 6. Controlador genérico. Dimensiones de la PCB: 50.3 mm × 80.0 mm. Número de capas: 2. Material: FR4 con un espesor de 1.6 mm. Espesor del cobre: 1 oz. Costo estimado: $160.

A continuación, en la Tabla 1 y 2 se muestran los resultados adquiridos de las pruebas del consumo de voltaje y corriente que consume del controlador mientras el motor Gira 360° se detiene y gira nuevamente 360°.

Tabla 1. Consumo de voltaje (en volts).

Motor Nema 17	Propuesta	Comercial
Motor sin energizar	0	0
Motor eléctrico energizado sin movimiento	10.5	11
Motor eléctrico energizado con movimiento	10.9	10.4
Motor eléctrico energizado sin movimiento	10.5	11.1
Motor eléctrico energizado con movimiento	10.7	10.2

Tabla 2. Consumo de corriente (en amperes).

Motor Nema 17	Propuesta	Comercial
Motor sin energizar	0	0
Motor eléctrico energizado sin movimiento	1.7	1.5
Motor eléctrico energizado con movimiento	1.2	2
Motor eléctrico energizado sin movimiento	1.73	1.9
Motor eléctrico energizado con movimiento	1.21	2

Como se puede observar tanto el voltaje como la corriente sufren un cambio significativo, para una mejor visualización de lo que ocurre con nuestras magnitudes de energía lo podemos observar en las Figura 7 y 8.

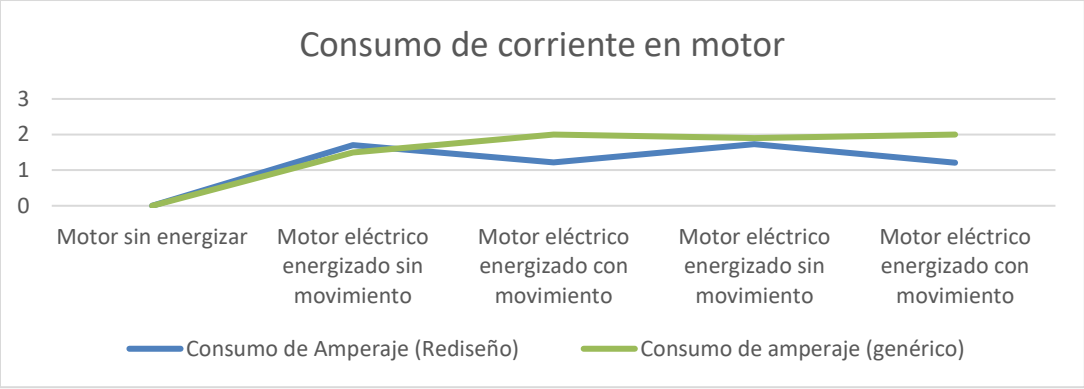


Figura 7. Variación de corriente mientras el motor gira 360° y luego se detiene por 500 milisegundos

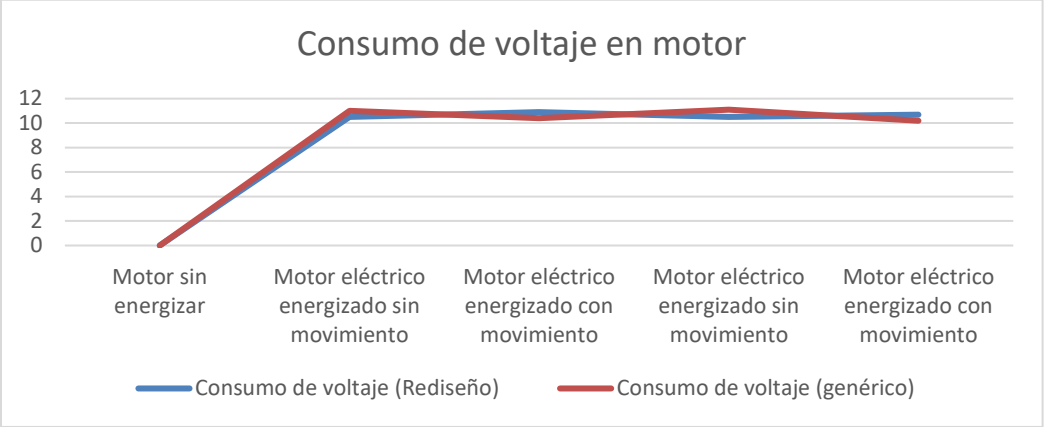


Figura 8. Variación del voltaje mientras el motor gira 360° y luego se detiene por 500 milisegundos

En las gráficas presentadas, se observa que el motor permanece en movimiento mientras el consumo de corriente oscila entre 1.1 A y 1.3 A. Cuando el motor se mantiene en reposo, la corriente aumenta ligeramente, situándose entre 1.6 A y 1.8 A. En comparación, el controlador genérico presenta un comportamiento menos estable: el consumo de corriente varía entre 1 A y 3 A durante el movimiento, y se mantiene entre 1.4 A y 2 A cuando el motor está detenido. Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 7.

Asimismo, se observa que el voltaje en el controlador rediseñado varía entre 10.9 V y 10.7 V durante el movimiento del motor, y entre 10.4 V y 10.6 V cuando se encuentra detenido. Aunque la variación de voltaje no es significativa en ninguno de los dos controladores, la diferencia más notable radica en la estabilidad de la corriente: mientras el controlador rediseñado mantiene un consumo estable, el genérico presenta fluctuaciones que se traducen en ligeras vibraciones durante el funcionamiento.

El rediseño del controlador permitió reducir las dimensiones de la PCB en aproximadamente 2 cm de alto y 1 cm de ancho. Además, se optimizó el conector de las bobinas del motor (Figura 5), lo que facilita y agiliza el proceso de conexión. El nuevo controlador opera de manera eficiente, sin problemas de sobrecalentamiento, y garantiza un movimiento suave del motor. Los resultados obtenidos y graficados demuestran la estabilidad del controlador rediseñado y la eficacia del proceso de optimización. En contraste, el modelo genérico, aunque más económico, presenta vibraciones indeseadas, ocupa mayor espacio y utiliza componentes de menor calidad, lo cual compromete su idoneidad para aplicaciones industriales exigentes.

CONCLUSIÓN

El rediseño del controlador TB6600, realizado mediante el software Altium Designer, permitió mejoras significativas en la disposición de componentes, la optimización de las rutas de señal y la gestión térmica. Estos aspectos son fundamentales para aplicaciones de automatización avanzada, como brazos robóticos y sistemas CNC.

El nuevo diseño resultó en una solución más compacta, eficiente y funcional. La reducción en las dimensiones de la PCB, junto con una mejor distribución de los componentes y la sustitución del conector de las bobinas del motor, facilitaron tanto el ensamblaje como el mantenimiento del sistema. Estas mejoras contribuyen directamente a la viabilidad del controlador para aplicaciones prácticas, al reducir los tiempos de instalación y aumentar el rendimiento general del conjunto motor-controlador.

No obstante, a pesar de los avances obtenidos, el diseño aún presenta oportunidades de mejora. En particular, el aislamiento térmico podría optimizarse para garantizar un desempeño más robusto y confiable. Con estas mejoras, el sistema estaría en condiciones de alcanzar estándares más

elevados de eficiencia, durabilidad y facilidad de uso, acercándose a las exigencias de productos industriales de alto rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Altium. (24 de Mayo de 2024). Altium. Obtenido de Documentación de Altium Designer: https://www.altium.com/documentation/altium-designer.
2. Lee, A. (07 de Febrero de 2025). Global Well PCBA. Obtenido de Diseño de PCB: una guía completa: https://www.globalwellpcba.com/es/diseno-de-pcb-una-guia-completa/
3. Peterson, Z. (05 de Octubre de 2020). Altium . Obtenido de ¿Qué es un PCB o Placa de Circuito Impreso?: https://resources.altium.com/es/p/what-is-a-pcb.
4. Proto-Electronics . (s.f.). Proto-Electronics. Obtenido de Técnicas para el diseño de PCB con limitaciones de espacio: https://www.proto-electronics.com/es/blog/tt%C3%A9cnicas-para-el-dise%C3%B1o-de-pcb-con-limitaciones-de-espacio.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MONTURAS ÓPTICAS PERSONALIZADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN BÁSICA

Alma R. Jacinto Martínez, Herminio A. Soto González, José A. García Hernández, Nuria A. Vargas Vargas, Ana Karen Reyes, Germán Reséndiz López y Noel-Ivan Toto-Arellano

Universidad Tecnológica de Tulancingo
1723110210@utectulancingo.edu.mx; anakaren.reyes@utectulancingo.edu.mx ; noel.toto@utectulancingo.edu.mx

RESUMEN

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, ha revolucionado múltiples áreas de la ingeniería y la investigación científica debido a su capacidad para fabricar componentes personalizados con costos reducidos y tiempos de producción optimizados. En este proyecto, se propone el uso de esta tecnología para la fabricación de monturas ópticas personalizadas, con el objetivo de facilitar la configuración y adaptación de disposiciones experimentales en laboratorios de óptica y fotónica. Específicamente, se diseñó e implementó una montura para la colocación de polarizadores, que permitiera un ajuste del eje de polarización. El diseño de la montura fue realizado mediante el software CAD SolidWorks, asegurando una estructura robusta y ergonómica capaz de soportar polarizadores en diferentes ángulos sin comprometer la estabilidad mecánica del sistema.

Posteriormente, el modelo digital fue procesado en el software Ultimaker CURA, donde se llevaron a cabo ajustes en los parámetros de impresión, tales como la resolución de capa 0.12mm, el porcentaje de relleno 30% y la generación de soportes. Asimismo, se realizó un análisis detallado del tiempo de fabricación el cual fue de 5 horas 17 minutos y del consumo de material 7.88 metros de PLA con el propósito de optimizar recursos y evaluar la viabilidad del proceso en comparación con opciones comerciales. Los resultados obtenidos muestran que la montura fabricada mediante impresión 3D fue implementada exitosamente en el Laboratorio de Óptica y Fotónica de la Universidad Tecnológica de Tulancingo, permitiendo la alineación y el posicionamiento preciso de polarizadores en experimentos de interferometría y caracterización óptica [1].

La flexibilidad en el diseño posibilitó adaptaciones específicas a los requerimientos experimentales, algo que resultaría difícil de lograr con monturas comerciales predefinidas. La reducción en los costos de manufactura fue significativa, ya que el precio aproximado de impresión es $318.00 lo cual es considerablemente menor que el de monturas adquiridas en empresas especializadas en instrumentación óptica, este ahorro de costos resulta especialmente relevante en entornos de investigación con recursos limitados, donde la optimización del presupuesto es un factor determinante para la viabilidad de proyectos experimentales. Finalmente, la manufactura aditiva se posiciona como una herramienta clave en la fabricación de componentes ópticos personalizados, ofreciendo ventajas en términos de flexibilidad, reducción de costos y accesibilidad [2-4].

La capacidad de diseñar y producir monturas a medida permite a los investigadores optimizar sus configuraciones experimentales sin depender de productos comerciales estandarizados, lo que contribuye a la innovación y desarrollo en el ámbito de la óptica aplicada. Este trabajo enfatiza la importancia de adoptar tecnologías emergentes en la investigación científica, destacando cómo la impresión 3D facilita la obtención de resultados experimentales de calidad [5-7].

INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la óptica, la disposición precisa de lentes, filtros, polarizadores y detectores es esencial para garantizar mediciones confiables y repetibles, pues cualquier desalineación puede inducir errores sistemáticos en los experimentos [5-7], los sistemas de montura comercialmente disponibles, si bien ofrecen rigidez y estabilidad, suelen requerir procesos de mecanizado o

ensamblaje sofisticados que incrementan los tiempos de entrega y los costos de adquisición [4-8]. Estos costos hacen especialmente crítica su en laboratorios académicos e industriales de pequeña escala, donde la disponibilidad de recursos financieros y de infraestructura restringe el acceso a instrumentación óptica de alta gama.

Actualmente la manufactura aditiva (impresión 3D) ha emergido como una tecnología disruptiva en la ingeniería industrial, permitiendo fabricar geometrías complejas bajo demanda sin necesidad de moldes ni herramientas especiales, lo cual reduce drásticamente los costos de preparación y habilita ciclos de desarrollo más cortos, en estudios recientes se ha documentado que los tiempos de prototipado pueden disminuir de semanas a horas, acelerando notablemente la fase de validación de diseños en proyectos de ingeniería [9-11]. Adicionalmente la capacidad de producir piezas personalizadas “on-demand” contribuye a un modelo de fabricación distribuida, en el que los componentes se imprimen localmente a partir de planos digitales, minimizando inventarios y riesgos de suministro [6-7].

En el campo de la óptica y la fotónica, la adopción de técnicas aditivas ha permitido la creación de monturas, bancadas ópticas y microcomponentes con resolución de submicrón, utilizando tecnologías como estereolitografía de PLA sensibles a luz visible o láseres de dos fotones [12], por ejemplo, se han logrado fabricar lentes asféricas y guías de onda integradas mediante impresión vat-photopolymerization[13], alcanzando superficies ópticamente lisas que compiten con las obtenidas por pulido mecánico tradicional, investigaciones publicadas en Óptica han demostrado montajes impresos 3D capaces de alinear polarizadores y espejos con resolución angular mejor de 0.1°[13-14], manteniendo la rigidez mecánica necesaria para aplicaciones de interferometría y espectroscopia [12,13-18].

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la incorporación de la manufactura aditiva en líneas de producción híbridas que combinan procesos sustractivos y aditivos, ha mostrado mejoras en productividad y costos totales de hasta un 30 % al eliminar operaciones de ajuste y rectificado, mientras se conserva la calidad dimensional requerida. Asimismo, el uso de polímeros de alta resistencia, como PLA reforzado con fibras de carbono, y aleaciones metálicas para impresión DMLS, ha ampliado el rango de aplicaciones hasta componentes que soportan cargas elevadas y ambientes hostiles.

En el contexto de la docencia, disponer de monturas y accesorios ópticos impresos in situ facilita la enseñanza de principios de fotónica y laboratorio, pues los estudiantes pueden experimentar con diseños propios, iterar sobre prototipos y comprender de manera práctica el ciclo de diseño-manufactura-evaluación [6-8]. Esta capacidad formativa promueve una visión integrada de la ingeniería, donde convergen habilidades en CAD, materiales y metrología óptica.

Finalmente, el presente trabajo documenta el diseño y la optimización de una serie de monturas personalizadas para recrear un interferómetro de Michelson y una montura para polarizadores con ajuste angular controlado, fabricados íntegramente mediante manufactura aditiva. Se exploran las ventajas en términos de flexibilidad de diseño, reducción de costos y mejora de los tiempos de entrega, contribuyendo con ello a la democratización de herramientas avanzadas en investigación básica y docencia en óptica y fotónica[1].

POLARIZACIÓN DE LA LUZ

La luz es una onda electromagnética transversal, compuesta por campos eléctricos y magnéticos oscilando en planos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. La polarización se refiere a la dirección de oscilación del campo eléctrico. Para una onda electromagnética que se propaga en la dirección z, el campo eléctrico puede representarse como [19-21]:

$$\boldsymbol{E}(z,t) = E_{0x}\cos(kz - \omega t)\,\hat{\imath} + E_{0y}\cos(kz - \omega t + \delta)\,\hat{\jmath} \qquad (1)$$

donde E_{0x} y E_{0Y} son las amplitudes en las direcciones x e y respectivamente, k es el número de onda, ω es la frecuencia angular y δ es la diferencia de fase. Si δ = 0 o δ = π, la onda está linealmente polarizada; si δ = ±π/2 y $E_{0x} = E_{0Y}$, se obtiene una onda circularmente polarizada; en el caso general (δ ≠ 0, π y $E_{0x} \neq E_{0Y}$), se obtiene polarización elíptica. La luz no polarizada, proveniente de fuentes térmicas como el sol o una lámpara incandescente, se caracteriza por una distribución aleatoria en las direcciones de oscilación del campo eléctrico.

Un polarizador óptico es un dispositivo que filtra la componente del campo eléctrico, permitiendo el paso de la componente alineada con su eje de transmisión y bloqueando la perpendicular. Ejemplos comunes de polarizadores incluyen películas de polivinilo con cristales de yodo, y prismas birrefringentes de calcita. Cuando una onda de luz polarizada incide sobre un polarizador lineal, la intensidad de la luz transmitida depende del ángulo θ entre la dirección de polarización de la luz incidente y el eje del polarizador. Esta relación está descrita por la Ley de Malus:

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \tag{2}$$

donde I_0 es la intensidad inicial de la luz incidente. Si la luz incidente es no polarizada, el polarizador transmitirá en promedio la mitad de la intensidad:

$$I = \tfrac{1}{2} I_0 \tag{3}$$

Los polarizadores birrefringentes, como los prismas de Nicol o Wollaston, separan un rayo incidente en dos componentes polarizadas ortogonalmente, conocidas como rayos ordinario y extraordinario, permitiendo aplicaciones en interferometría, microscopía y caracterización óptica avanzada [20-21].

INTERFEROMETRÍA Y POLARIZACIÓN

La interferometría de corrimiento de fase por polarización se basa en la generación simultánea de interferogramas con diferentes estados de polarización, cada uno asociado a un corrimiento de fase definido, para lograrlo, se utilizan polarizadores dispuestos en orientaciones angulares precisas, generando retardos relativos entre componentes ortogonales. La intensidad resultante sobre el detector para un sistema de corrimientos de fase conocidos puede expresarse como [1,12]:

$$I_k(x,y) = I_0(x,y) + Ic(x,y) \cdot \cos[\varphi(x,y) + \delta_k] \tag{4}$$

donde I_k es la intensidad registrada en el k-ésimo paso, φ(x,y) es la fase óptica buscada y δ_k es el corrimiento de fase inducido por el ángulo del polarizador.

Dada la necesidad de precisión angular en la orientación de los polarizadores [22], las monturas ópticas deben permitir ajustes finos y ser mecánicamente estables. La implementación de estas monturas mediante impresión 3D ha demostrado ser viable, permitiendo desarrollar configuraciones personalizadas de bajo costo, con resoluciones angulares menores a 0.1°, como se ha reportado recientemente [13-14].

En montajes experimentales convencionales, se emplean mecanismos de ajuste fino que incluyen tornillos diferenciales, ejes micrométricos y escalas de vernier, los cuales permiten la rotación precisa del elemento polarizador alrededor de su eje óptico. Por ejemplo, muchos sistemas de laboratorio están equipados con escalas giratorias marcadas en grados y mecanismos de lectura vernier capaces de ofrecer resoluciones angulares de hasta 0.01°, lo cual es fundamental para evitar errores sistemáticos en la codificación de fase inducida por polarización.

Asimismo, para que estas mediciones sean confiables, es imprescindible que las monturas tengan una alta estabilidad mecánica, de modo que los ajustes no generen desplazamientos laterales ni vibraciones que afecten la precisión interferométrica. En este contexto, las monturas ópticas comerciales están fabricadas típicamente en aluminio anodizado o acero inoxidable, materiales seleccionados por su elevada rigidez, bajo coeficiente de expansión térmica y buena respuesta ante cambios ambientales.

Un ejemplo representativo lo constituyen las monturas cinemáticas fabricadas por marcas como Standa o Thorlabs, las cuales utilizan sistemas de tres puntos de contacto, tornillos de ajuste de alta precisión y mecanismos de bloqueo angular. Los modelos más sofisticados integran engranajes helicoidales o actuadores piezoeléctricos para rotación motorizada, facilitando la automatización en aplicaciones de laboratorio avanzado. No obstante, este tipo de soluciones puede resultar costoso: un rotador manual de alta precisión para elementos ópticos de 25.4 mm (1") puede tener un precio de mercado superior a los 350 USD, mientras que las versiones motorizadas o especializadas (por ejemplo, con mecanismos de flexión u operación criogénica) pueden superar fácilmente los 1000 USD por unidad.

Ante este panorama, la impresión 3D de monturas ópticas personalizadas representa una alternativa viable y económica, particularmente en contextos donde se requieran múltiples polarizadores rotados con precisión angular moderada (por ejemplo, en esquemas de corrimiento de fase de tres o cuatro pasos). La manufactura aditiva permite diseñar sistemas modulares, integrando escalas angulares impresas, topes mecánicos, anillos de rotación o incluso engranajes plásticos, optimizados para necesidades específicas del montaje interferométrico. Si bien las soluciones impresas en PLA o resina no alcanzan la precisión micrométrica de los sistemas industriales, sí ofrecen una relación costo-beneficio altamente favorable, especialmente en entornos de docencia, prototipado o investigación experimental con presupuestos limitados.

MANUFACTURA E INGENIERÍA EN EL DISEÑO DE MONTURAS ÓPTICAS

La impresión 3D de polímeros permite crear monturas ópticas a bajo costo y con gran flexibilidad de diseño debido a que el PLA (ácido poliláctico) es un polímero muy usado gracias a su facilidad de impresión, ya que es termoplástico derivado de recursos renovables, reciclable y con baja toxicidad de impresión[3-5], requiere bajas temperaturas de extrusión (190–220 °C) y a menudo no necesita cama caliente, lo que simplifica su uso[3-4].

El PLA impreso presenta buena rigidez (módulo de ~3.6 GPa) y resistencia moderada (tensión ~60 MPa) en piezas 100% solidas, sin embargo, su resistencia térmica es baja, ya que comienza a ablandarse alrededor de 50–60 °C y su deformación térmica es apreciable[3-6]. Bajo calor moderado, las piezas de PLA pueden perder precisión geométrica, además, el PLA impreso suele ser frágil (baja elongación al rompimiento) y anisotrópico (menor resistencia a la tracción en la dirección de la capa), lo que se refleja en propiedades mecánicas hasta 30% menores en algunas direcciones. Ópticamente, los montajes de PLA no son transparentes y las superficies impresas dispersan la luz, por lo que no son aptos como elementos ópticos, aunque sí sirven de soporte.

Las ventajas del PLA son su bajo costo (filamento económico), rapidez de prototipado, y personalización, ya que se puede fabricar un prototipo de montura en horas, y sus limitaciones son su baja tenacidad y estabilidad térmica.

Para montajes que soporten cargas mayores o que operen cerca del calor ambiente, se prefieren materiales más resistentes (por ejemplo ABS, PETG o polímeros técnicos), por lo que el PLA es útil para pruebas y montajes de baja exigencia, pero no sustituye a metales en sistemas críticos.

Desde el punto de vista de manufactura, el diseño de una montura óptica requiere especificar tolerancias, método de producción y ensamblaje, las tolerancias dimensionales dependientes de la función requieren precisiones de decenas de micras para garantizar alineación[7], la manufactura convencional de monturas suele ser por inyección de plástico mecanizado de metales, lo cual ofrece tolerancias típicas de ±0.1 mm (y hasta ±0.025 mm en aplicaciones médicas). En cambio, la impresión FDM aporta tolerancias habituales ~0.1–0.2 mm, suficientes para prototipos pero poco precisas para un producto final de alta gama.

El ciclo de desarrollo típicamente involucra: diseño asistido por ordenador (CAD), prototipos rápidos (impresión 3D para verificar forma y ajuste), iteraciones, y finalmente fabricación en serie (por

ejemplo con molde o CNC). La impresión 3D acorta drásticamente el tiempo de prototipado frente al moldeo por inyección, mientras un molde convencional requiere semanas/meses para fabricar, la impresión entrega un prototipo en horas, esto permite validar rápidamente diseños de monturas ópticas y adaptarlos fácilmente.

En la etapa de ensamblaje, se considera la fijación de la óptica (usualmente con anillos de sujeción o tornillos de punta plástica para no dañar el elemento) y la integración en sistemas más grandes. El diseño debe prever tolerancias de interferencia adecuadas, espacios para herramientas de ajuste y posible modularidad para personalización. La viabilidad económica depende del volumen, para pocos cientos de piezas, la impresión 3D es rentable por evitar moldes costosos, en volúmenes mayores (miles de unidades) conviene la inyección, cuyo costo unitario baja significativamente pese al alto costo inicial del molde.

RESULTADOS

El diseño inicial de la montura fue realizado en SolidWorks, considerando una geometría cilíndrica con cavidades interiores para alojar un polarizador circular de 2 pulgadas de diámetro. Se integró una base plana con orificios para sujeción al banco óptico y un sistema de ranura que permite el giro manual del polarizador, con un tope mecánico que limita el ángulo de rotación para mantener la precisión del montaje.

Una vez completado el diseño CAD, el modelo fue exportado en formato STL y procesado en el software Ultimaker CURA para preparar la impresión. Los parámetros utilizados incluyeron: resolución de capa de 0.12 mm, relleno estructural al 30 %, velocidad de impresión de 50 mm/s, y generación de soportes automáticos. El material empleado fue PLA de 1.75 mm de diámetro. La impresión fue realizada con una impresora modelo Ender 3 Pro.

El tiempo total de impresión fue de 5 horas y 17 minutos, y el consumo total de filamento fue de 7.88 metros, correspondiente a aproximadamente 120 gramos de material. El costo estimado del filamento fue de $318.00 MXN, significativamente menor en comparación con monturas comerciales cuyo precio oscila entre $1,200.00 y $2,500.00 MXN. La montura impresa fue implementada exitosamente en prácticas de laboratorio del curso de Óptica, así como en experimentos de interferometría en el Laboratorio de Óptica y Fotónica, la funcionalidad del dispositivo fue validada mediante pruebas de alineación con láser y polarizadores cruzados, observando una estabilidad angular adecuada y una buena fijación del elemento óptico.

En comparación con dispositivos comerciales, la montura presentó un comportamiento mecánico satisfactorio para fines docentes e investigativos, permitiendo ajustes rápidos y seguros, y la posibilidad de modificar el diseño digital en función de nuevas necesidades experimentales ofrece una ventaja importante frente a las opciones estándar del mercado. Para el diseño y evaluación de las monturas utilizadas en los polarizadores, se empleó una metodología iterativa de diseño, modelado y prueba. En una primera etapa, se desarrollaron modelos digitales utilizando software CAD (como Fusion 360) para crear prototipos tridimensionales de las monturas que permiten la rotación de los filtros polarizadores.

Las monturas fueron diseñadas con un enfoque en la facilidad de rotación, la estabilidad del filtro, y la integración con el módulo de visión del sistema. Posteriormente, se fabricaron mediante impresión 3D utilizando PLA en una impresora Creality K1C, lo cual permitió obtener piezas con alta resolución y precisión dimensional.

Se ensamblaron tres configuraciones de monturas, diferenciadas por el sistema de rotación:

1. Montura sin engranaje, para rotación manual.
2. Montura con engranajes impresos, para control mecánico.
3. Montura con anillo móvil (tipo "ring"), inspirada en diseños ópticos profesionales.

Cada una fue evaluada en términos de:

1. Suavidad de rotación.
2. Estabilidad del filtro.
3. Precisión angular.
4. Comodidad de uso.

Las pruebas se realizaron en condiciones controladas de iluminación, usando luz polarizada y evaluando la respuesta visual obtenida a través de la cámara del sistema. Se obtuvieron los siguientes resultados relevantes sobre las monturas de los polarizadores:

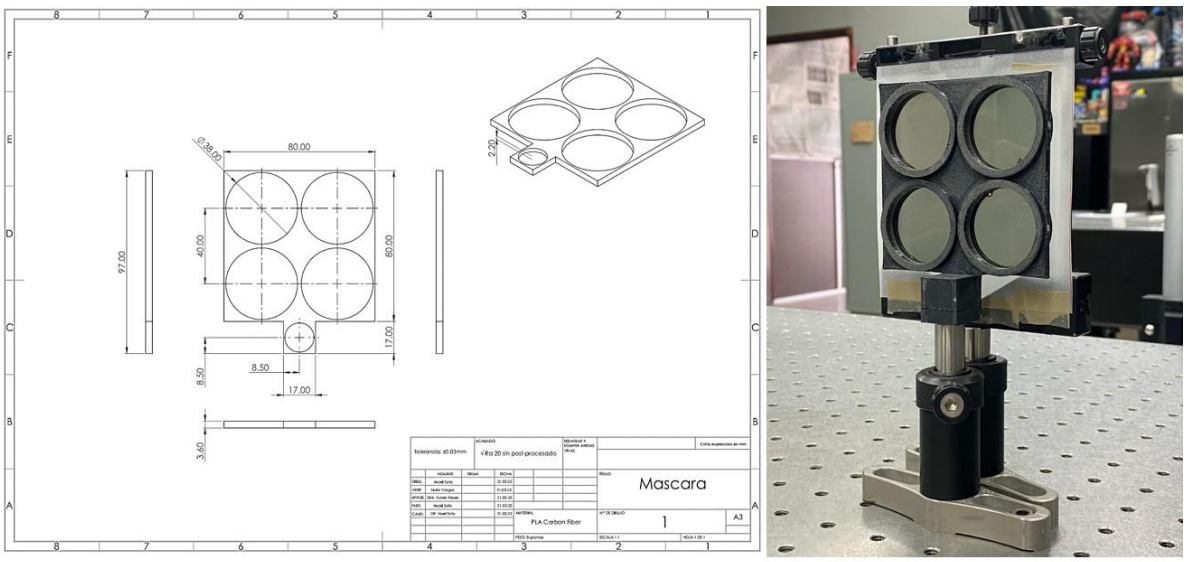
Montura sin engranaje. Este diseño resultó ser el más simple, pero también el menos eficiente. La rotación del polarizador era inconsistente y carecía de un sistema de sujeción firme, lo que provocaba desalineaciones frecuentes del filtro. Además, la manipulación directa podía introducir vibraciones en el sistema. Montura con engranajes impresos. Esta configuración permitió una rotación más precisa del polarizador. Sin embargo, la fricción entre los engranajes impresos en PLA generó desgaste temprano y ruido mecánico. También se observaron problemas de holgura, lo que redujo la precisión angular después de varios usos.

Montura tipo anillo móvil. Este diseño fue el más exitoso. Permitió una rotación fluida y precisa del polarizador, manteniéndolo firmemente alineado. El anillo proporcionó un control suave y continuo, similar al funcionamiento de polarizadores profesionales para cámaras fotográficas. También facilitó ajustes finos sin perturbar la posición del sistema óptico.

En general, la montura tipo anillo mostró mejor desempeño en todas las métricas evaluadas, además de un diseño más compacto y ergonómico. Tal como se muestra en la Fig. 1, la máscara presenta un diseño cuadrado de 8x8 cm, con orificios circulares que alojan las monturas individuales para cada polarizador, estos orificios están dispuestos simétricamente sobre la base e incluyen una escala angular graduada, lo cual permite ajustar y visualizar el ángulo de orientación de cada polarizador con relación a un eje de referencia común.

Uno de los principales aciertos del diseño fue la incorporación de un mecanismo de rotación suave, que permite al usuario girar manualmente cada polarizador sin necesidad de herramientas adicionales, manteniendo la estabilidad del montaje, esta funcionalidad fue fundamental para facilitar la alineación precisa del eje de polarización en los experimentos realizados.

La estabilidad durante el uso fue confirmada mediante observación directa y pruebas de funcionamiento óptico en condiciones de laboratorio, en la Fig. 1 se muestra el plano técnico de la máscara (a) y el producto final (b), donde se aprecian los detalles del diseño de los orificios de montaje, la base de soporte y las dimensiones precisas del conjunto. Este plano sirvió como referencia para el proceso de impresión 3D y para futuras reproducciones o mejoras del modelo.



(a) (b)

Figura 1. Máscara de polarizadores. (a) Plano de máscara (b) Mascara impresas en 3D

La máscara está compuesta por varias partes ensamblables (tapa, contratapa, base magnética), como se observa también en las Figuras 2-4, lo que facilita su mantenimiento, transporte e integración con otros componentes ópticos del kit educativo.

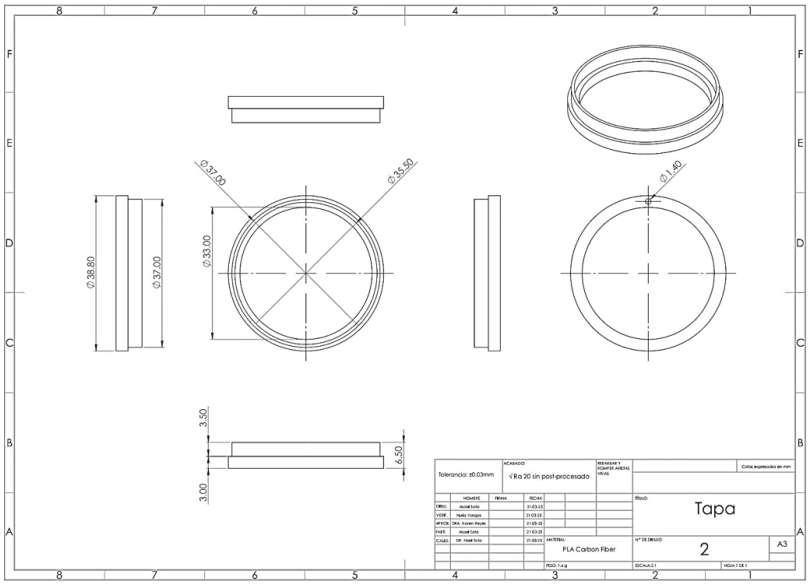


Figura 2. Plano de la tapa.

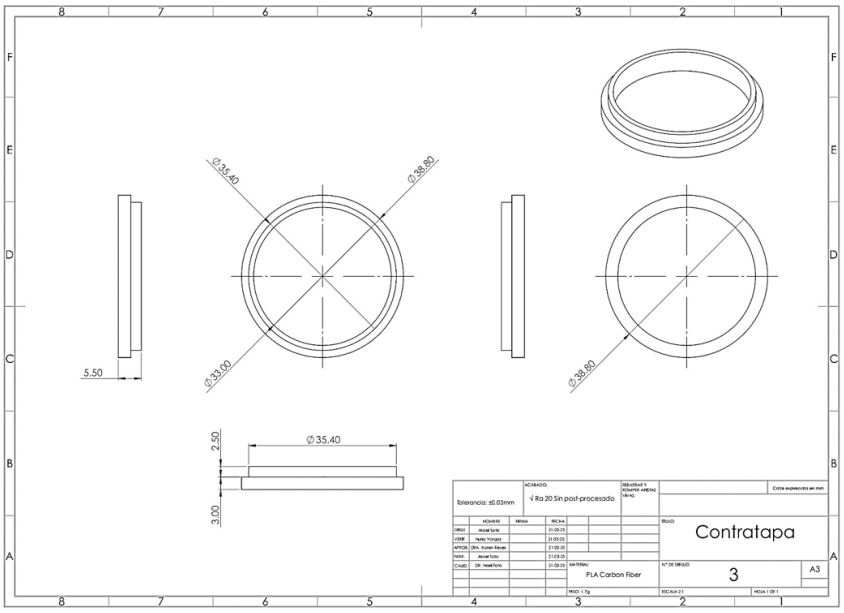


Figura 3. Plano de contratapa.

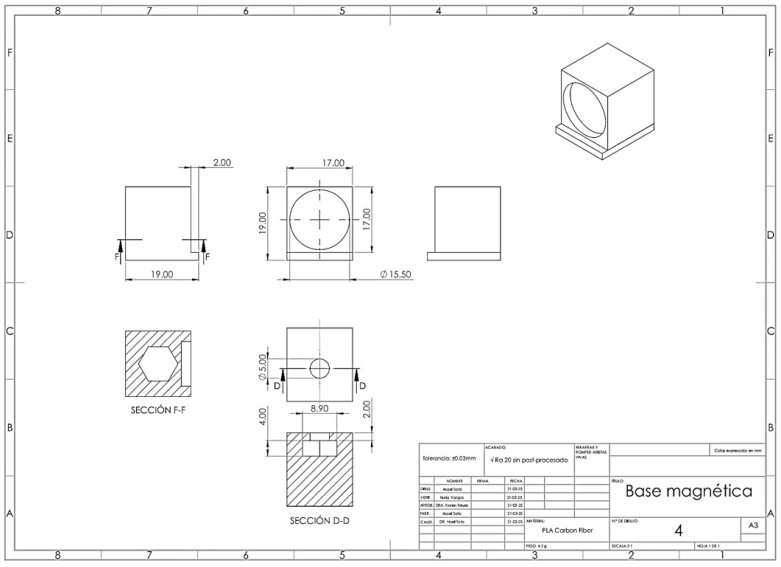


Figura 4. Plano de base magnética.

Durante las pruebas en el laboratorio, se comprobó que el sistema era capaz de mantener la orientación angular de cada polarizador con una tolerancia estimada inferior a 2°, suficiente para actividades educativas y experimentales de nivel universitario, como se muestra en la Fig. 5 se tienen cuatro patrones de interferencia con corrimientos relativos de 90°.

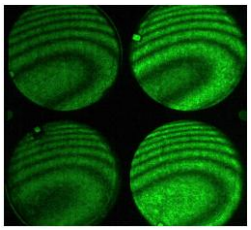
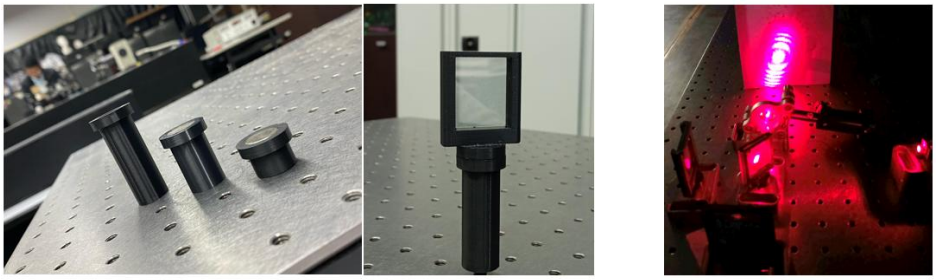


Figura 5. Interferogramas simultáneos con corrimientos relativos de 90°

El sistema de base magnética (Fig. 6) permite un montaje y desmontaje rápido en la mesa óptica, lo que reduce significativamente los tiempos de preparación de experimentos, en la Fig. 6 se muestran en 6(a) las bases magnéticas y los soportes y en 6(b) una configuración de interferómetro de Michelson iluminado con un láser operando a 632 nm, se pueden observar las franjas características de un frente de onda sin colimación.



(a) (b)

Figura 6. Monturas con base magnética. (a) Soportes y monturas. (b) Configuración de Interferómetro de Michelson.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible diseñar y fabricar monturas ópticas funcionales mediante manufactura aditiva, a bajo costo y con alta personalización. La implementación de estos dispositivos en contextos de docencia e investigación básica permite superar limitaciones presupuestarias sin comprometer la calidad de los experimentos.

La impresión 3D ofrece una solución flexible y escalable, que puede adaptarse a diversas necesidades experimentales mediante simples modificaciones digitales. De este modo, la manufactura aditiva no solo facilita el acceso a instrumentación óptica especializada, sino que también fomenta la innovación en la configuración de experimentos científicos.
Finalmente, el diseño de las monturas para los filtros polarizadores es un componente crítico en el funcionamiento del sistema, podemos concluir que:

1. La montura tipo anillo móvil es la más adecuada para el sistema, ya que ofrece estabilidad, precisión y facilidad de uso.
2. Las monturas sin engranajes o con engranajes impresos presentan limitaciones funcionales que las hacen menos confiables en aplicaciones que requieren ajustes finos o repetitivos.
3. El uso de impresión 3D en PLA permitió desarrollar prototipos funcionales con suficiente resolución para este tipo de mecanismos, aunque los engranajes mostraron un desgaste más rápido.

Como trabajo a futuro se pretende continuar el desarrollo de la montura tipo anillo, posiblemente explorando materiales más duraderos y refinando su diseño para producción a mayor escala o integración modular con otros sistemas ópticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. K. Reyes, Gustavo Rodríguez-Zurita, A. Montes-Pérez, J.R. Sánchez-Aguilar, L. García-Lechuga, Noel-Ivan Toto-Arellano, “Development of a Wollaston phase grating polarized interferometer for simultaneous generation of interferograms “, Optics and Lasers in Engineering,186, 2025, pp. 108739.
2. Guillermo Reyes Pozo, "Fabricación Aditiva: Tecnologías". [PDF]. Disponible en: http://www.eic.cat/gfe/docs/10585.pdf
3. Gómez, S. “Impresión 3D”, ed. Marcombo, primera edición, publicado 2016.
4. López, JE. “Nota de futuro, Impresión 3D” (consulta online; visto en mayo de 2025 http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranettmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf
5. Fontrodona, J; Blanco, R. et en 2014] Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D: “Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D” (consulta online; visto en mayo de 2025) http://empresa.gencat.cat/web/.content/19_-_industria/documents/economia_industrial/impressio3d_es.pdf
6. Markillie P. A third industrial revolution. The Economist. 21 Apr 2012.
7. Hayes T. The future of 3D printing. Optics and Photonic News. 1 Jul 2013.
8. Wittbrodt BT, Glover AG, Laureto J, Anzalone GC, Oppliger D, Irwin JL, et al. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. Mechatronics. 2013; 23:713.
9. Berman B. 3D printing: The new industrial revolution. Business Horizons. 2012; 55:155–162.
10. Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams CB, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design. 2015; 69:65–89.
11. Daniel Burón, "Impresión 3D: llega el futuro de los sistemas de producción", Noviembre, 2013. [Online]. Disponible en: Silicon Week, http://www.siliconweek.es/workspace/impresion-tridimensional-llega-elfuturo-de-los-sistemas-de-produccion-49043 ♣ Formizable, "Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D", Septiembre, 2014. [Online]. Disponible en: http://formizable.com/2014/09/02/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-paraimpresion-3d/
12. Wyant J C 2003 Dynamic interferometry Opt. Photon. News14 36–4.
13. Pearre BW, Michas C, Tsang J-M, Gardner TJ, Otchy TM. Fast Micron-Scale 3D Printing with a Resonant-Scanning Two-Photon Microscope. arXiv preprint arXiv:1803.07135. 2018.
14. Lai L, Laakso M, Edinger P, Hartwig O, Duesberg GS. 3D Printing of Glass Micro-Optics with Subwavelength Features on Optical Fiber Tips. ACS Nano. 2024;18(4):1234-1241.
15. Nilsson DPG, Dahlberg T, Andersson M. A Step-by-Step Guide to 3D Print Motorized Rotation Mounts for Optical Applications. Appl Opt. 2021;60(13):3764-3771
16. Advanced Motion Control Scales Submicron Additive Manufacturing. Photonics Spectra. 2023;57(7):42-45.
17. Trappen M, Blaicher M, Dietrich P-I, Hoose T, Xu Y, Billah MR, et al. 3D-Printed Optics for Wafer-Scale Probing. arXiv preprint arXiv:1808.10834. 2018.
18. Schmid M, Sterl F, Thiele S, Herkommer A, Giessen H. 3D Printed Hybrid Refractive/Diffractive Achromat and Apochromat for the Visible Wavelength Range. arXiv preprint arXiv:2107.10255. 2021.
19. Huard, S. Polarization of Light (Wiley, 1997).
20. Goldstein, D. Polarized Light 2nd edn (Marcel Dekker, 2003).
21. Chipman, R. A., Lam, W. S. T. & Young, G. Polarized Light and Optical Systems (CRC Press, 2018).
22. G. Rodríguez-Zurita, C. Meneses-Fabian, N.I. Toto-Arellano, J.F. VázquezCastillo, C. Robledo-Sánchez, One-shot phase-shifting phase-gratinginterferometry with modulation of polarization: case of four interferograms,Opt. Express 16 (2008) 7806–7817

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DETECTOR ÓPTICO BASADO EN PROGRAMACIÓN GRAFICA PARA SU INTEGRACIÓN EN UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA

María del Carmen Soto Robles1, Jorge Arturo Sandoval Espino1, Romeo Emmanuel Núñez Gomez2, Jesús Castrellon-Uribe1

1 Laboratorio de Sensores Fotónicos. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM Av. Universidad 1001, Col Chamilpa, C.P. 62209. Cuernavaca Mor, 2Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec Calzada Tecnológico No. 27, C.P. 62780, Zacatepec de Hidalgo, Morelos
maria.sotorob@uaem.edu.mx

RESUMEN

Actualmente, existe la necesidad de desarrollar factibles sistemas sensores para el monitoreo de diversas magnitudes físicas con aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento y en diversos campos tecnológicos. En esta dirección, las características intrínsecas de los sensores basados en fibra óptica resuelven parte de las necesidades de medición y monitoreo. Los componentes básicos de un sensor de fibra óptica incluyen una fuente óptica, un transductor y un receptor. En este último, se emplean dispositivos como un espectrómetro y/o un fotodetector para monitorear la variación en la señal óptica causada por la perturbación física externa del sistema.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema detector óptico basado en programación *LabVIEW* y una tarjeta *Arduino* para su incorporación en un sensor de fibra óptica. Una fibra óptica estrechada (FOE) comúnmente llamada "*taper*" fue utilizada como el transductor del sensor. La fabricación de la microestructura óptica fue a través de la técnica calentamiento-estirado utilizando un quemador oscilante con una pequeña flama. Se investigaron diferentes detectores ópticos comerciales disponibles, de bajo costo, y compatibles con la plataforma de programación.

El fotodiodo considerado en el estudio fue de InGaAs en configuración de polarización inversa el cual fue utilizado para implementar un circuito para la detección de una señal óptica en la región del infrarojo cercano (NIR) del espectro electromagnético. La señal generada por los fotodiodos fue adquirida a través de una tarjeta *Arduino UNO* y procesada en tiempo real mediante una interfaz en *LabVIEW* para visualizar los datos obtenidos. El circuito implementado para el fotodiodo fue diseñado para operar en tres diferentes longitudes de onda 1450 nm, 1500 nm, y 1550 nm. Finalmente, este sistema detector óptico basado en programación gráfica fue integrado a un sensor basado en fibra óptica estrechada para monitorear cambios de índice de refracción en soluciones acuosas.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día vivimos en una era de cambios implacables y acelerados, impulsados por la evolución demográfica, social y económica. Tecnologías como los sensores pueden brindarnos las herramientas para ayudar a abordar muchos de los importantes desafíos globales del siglo XXI.[1] Los sensores son dispositivos transductores que en respuesta a las variaciones de una magnitud física producen una señal útil para fines de medición, recopilación y control de procesos.[2]

Para cualquier señal dada, suele haber más de un tipo de sensor que se puede utilizar para tomar una medida. Cada tipo de sensor ofrece diferentes niveles de precisión, sensibilidad y capacidad para operar en diferentes condiciones ambientales. Dada la gran cantidad de sensores que existen, estos se pueden clasificar principalmente en sensores eléctricos, mecánicos, semiconductores, electroquímicos u ópticos.[3] Entre algunos tipos de sensores ópticos se encuentran los sensores de fibra óptica los cuales ofrecen una serie de ventajas tales como una mayor sensibilidad en comparación con las técnicas existentes y versatilidad geométrica, que permite la configuración en formas arbitrarias entre otras.[4]

Hoy en día, existe la necesidad de desarrollar factibles sistemas sensores ópticos para el monitoreo de diversas magnitudes físicas como la temperatura, presión, curvatura, índice de refracción, color, radiación, concentración e intensidad entre otras. En esta dirección, las características intrínsecas de los sensores basados en fibra óptica resuelven partes de las necesidades de medición y monitoreo.

Por otro lado, los instrumentos utilizados en el laboratorio para procesar y monitoreara los datos provenientes del sensor de fibra óptica (transductor) son los fotodetectores y espectrómetros los cuales son utilizados en condiciones controladas de laboratorio. Sin embargo, el costo de estos instrumentos para aplicaciones reales en campo es prohibitivo; lo cual conduce a la necesidad de investigar alternativas con un desempeño equivalente, efectivas y de bajo costo para ser utilizadas en aplicaciones reales.

En esta dirección, plataformas de hardware y software de bajo costo como *Arduino* y *LabVIEW* ofrecen herramientas versátiles para el desarrollo de sistemas sensores portables y funcionales. *Arduino UNO* es una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra, que permite la adquisición de señales analógicas mediante un conversor analógico-digital (ADC) integrado. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla.[5] Para complementar esta adquisición de datos, se emplea *LabVIEW*, este es un entorno de programación gráfica que los ingenieros utilizan para desarrollar sistemas, pruebas automatizadas de investigación, validación y producción. Gracias a su capacidad de integración con plataformas como *Arduino*, *LabVIEW* proporciona una poderosa herramienta para el análisis y visualización de datos en tiempo real.[6]

TEORÍA

Sensor de fibra óptica (SFO)

Los sensores de fibra óptica son dispositivos dieléctricos los cuales operan a frecuencias ópticas, son inmunes a la interferencia electromagnética y tienen la capacidad de llevar a cabo mediciones remotas. Los componentes básicos de un sensor de fibra óptica incluyen una fuente óptica, un transductor y un receptor. En estos dispositivos de detección óptica, se utilizan con frecuencia láseres, diodos laser y/o LEDs como la fuente óptica. Como transductor (el corazón del sensor) se emplean fibras ópticas (unimodal o multimodal), fibras dopadas y/o materiales bulto entre otros. A la salida del sistema sensor, se utiliza un fotodetector que recibe la variación de la señal óptica causada por una perturbación física externa al sistema.[4]

El uso de la tecnología de fibra óptica en los sistemas de detección presenta ventajas técnicas y económicas en comparación con los sensores convencionales no ópticos. Dado que la fibra óptica es un medio dieléctrico, los sensores de fibra óptica son inmunes a cualquier tipo de interferencia electromagnética; además pueden soportar temperaturas relativamente altas gracias al alto punto de fusión de la fibra óptica y dadas las dimensiones y naturaleza de las fibras ópticas, se pueden fabricar transductores ópticos pequeños y ligeros. La biocompatibilidad, fiabilidad y naturaleza no intrusiva de la fibra óptica, combinadas con la posibilidad de fabricar interfaces pequeñas y simples entre el sensor y el punto de medición, promueven que los SFO sean muy adecuados para la detección, de diferentes variables físicas y en algunos casos en procedimientos con variables biomédicas.[4]

Fibras ópticas estrechadas

Las fibras ópticas estrechadas ("*taper*") de diámetro micrométrico tienen aplicaciones en el campo de los sensores fotónicos [7]. El propósito de adelgazar la fibra es alterar pasivamente la luz que se propaga en su interior, y parte de esta energía es guiada a través de la fibra en forma de ondas evanescentes. Cuando el índice de refracción cambia en el entorno externo a la fibra, estas ondas experimentan un cambio espectral y de intensidad proporcional a la perturbación externa, lo que hace que estas microestructuras sean ideales para el desarrollo de sensores con alta sensibilidad.

A la fecha, se han empleado varias técnicas para fabricar fibras ópticas estrechadas tales como el calentamiento y estiramiento mediante un mechero, la utilización de CO2, el calentamiento por arco eléctrico y el ataque químico [3]. Entre estas técnicas, la de calentamiento y estiramiento es una de las más adaptables para fabricar fibras estrechadas con propiedades ópticas y físicas adecuadas como el diámetro y la longitud de la cintura del *taper* [8].

Fotodetectores

Un fotodetector es un dispositivo cuyas características eléctricas tales como la corriente, voltaje, o la resistencia varían cuando este es expuesto a radiación óptica. Al convertir la energía de los fotones absorbidos en una señal eléctrica medible, esta se puede utilizar para determinar el flujo de fotones (potencia óptica) de un haz de luz. El principio de operación de estos dispositivos se basa en el efecto fotoeléctrico, donde la absorción de fotones por un material provoca que los electrones pasen a niveles de energía más altos dando lugar a portadores de carga móviles bajo el efecto de un campo eléctrico, estos portadores se mueven y producen una corriente eléctrica medible. [9]

Por lo anterior, la corriente eléctrica i_0 es proporcional a la potencia óptica incidente P_0:

$$i_0 = \frac{P_0}{hf}\eta q = \frac{q\eta}{hc}\lambda P_0 = \mathcal{R} \times P_0 \qquad [A] \qquad [1]$$

Donde $\frac{P_0}{hf}$ es el número de fotones incidentes por segundo, $\frac{P_0}{hf}\eta$ es el número de fotones detectados por segundo, η es la eficiencia cuántica de conversión y el factor de proporcionalidad $\mathcal{R}$ llamado responsividad.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del fotodetector, el valor de la responsividad ($\mathcal{R}$) que tiene una dependencia con la longitud de onda de la señal, debe ser lo más alta posible y la eficiencia cuántica de la conversión η, que depende del material utilizado para fabricar el fotodetector, también debe ser lo más alta posible.

Fotodiodos

Los fotodiodos de semiconductor son estructuras de unión p-n los cuales operan bajo el principio del efecto fotoeléctrico. Los fotones absorbidos en la capa de agotamiento del dispositivo generan electrones y huecos que están sujetos al campo eléctrico local dentro de esa capa de los portadores de carga se desplazan en direcciones opuestas. Este proceso de transporte induce una corriente eléctrica en el circuito externo. [10]

Un fotodiodo puede operar en uno de dos modos: fotoconductor (polarización inversa) o fotovoltaico (polarización cero). La selección del modo depende de los requisitos de velocidad de la aplicación y de la cantidad de corriente de oscuridad tolerable (corriente de fuga).

En el modo fotoconductor se aplica una polarización inversa externa. La corriente medida a través del circuito indica la iluminación del dispositivo; la corriente de salida medida es linealmente proporcional a la potencia óptica de entrada. La aplicación de una polarización inversa aumenta el ancho de la unión de la región de agotamiento, lo que produce una mayor capacidad de respuesta con una disminución de la capacitancia de la unión y produce una respuesta muy lineal. El funcionamiento en estas condiciones tiende a producir una corriente oscura mayor, pero esto puede limitarse en función del material del fotodiodo.

Por otro lado, para tener una conexión de polarización inversa el cátodo se conecta a un potencial positivo (una fuente de tensión) y el ánodo a tierra. Esto polariza el fotodiodo en inverso, lo que significa que no conduce corriente en ausencia de luz, pero cuando la luz incide sobre él, genera una señal de corriente inversa proporcional a la intensidad de la luz.

La Figura 1 muestra un circuito con un fotodiodo para calcular las potencias midiendo la caída de voltaje $\mathbf{V_L}$ en la resistencia de carga $\mathbf{R_L}$ relacionando la corriente generada del fotodiodo producto de la potencia óptica incidente $\mathbf{P_0}$. La resistencia $\mathbf{R_P}$ y el capacitor $\mathbf{C_P}$ conforman un circuito de

protección RC, donde la función principal de este es limitar la cantidad de voltaje que llega al fotodiodo. Cuando ocurre una sobretensión, el capacitor se carga rápidamente a través del resistor, lo que ayuda a reducir la amplitud del pico de voltaje. [10]

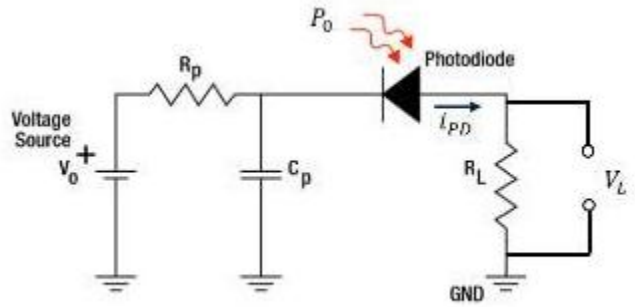


Figura 1. Circuito integrado al fotodiodo.

Para obtener la relación de la potencia óptica incidente P_0 con el voltaje V_L medible en la resistencia de carga R_L, es necesario partir de la ecuación de la responsividad:

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{i_{PD}}{P_0} \qquad \left[\frac{A}{W}\right] \qquad [2]$$

Donde la corriente generada por el fotodiodo es:

$$i_{PD} = \mathcal{R}(\lambda) \times P_0 \qquad [A] \qquad [3]$$

La relación de la resistencia de carga con la corriente y voltaje por ley de ohm

$$R_L = \frac{V_L}{i_{PD}} \qquad [\Omega] \qquad [4]$$

Despejando P_0 en [2] obtenemos:

$$P_0 = \frac{i_{PD}}{\mathcal{R}(\lambda)} \qquad [W] \qquad [5]$$

Sustituyendo i_{PD} en [5] por la relación en la ecuación [4] obtenemos:

$$P_0 = \frac{V_L}{\mathcal{R}(\lambda) \times R_L} \qquad [W] \qquad [6]$$

Adquisición y visualización de datos mediante Arduino y LabVIEW

Arduino UNO es una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines de entrada/salida digitales y analógicos. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla. Se destaca por su facilidad de uso, costo accesible y gran cantidad de recursos disponibles. [11]

El microcontrolador de *Arduino UNO* incorpora un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits, lo que permite digitalizar señales analógicas con una resolución de hasta 1024 niveles discretos. Esta resolución es adecuada para tareas de monitoreo en sensores ópticos donde se requiere captar variaciones finas de voltaje con precisión razonable.

Por otro lado, *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un entorno de programación gráfica que permite desarrollar sistemas de adquisición y análisis de datos con interfaces de usuario personalizados.

La comunicación entre *Arduino UNO* y *LabVIEW* se establece mediante el protocolo serial, utilizando bloques como *VISA Configure Serial Port* para establecer la comunicación con *Arduino UNO* y el bloque *VISA Read* se emplea para capturar los datos enviados. Una vez recibidos, los datos digitales son escalados a valores de voltaje reales mediante una constante de calibración que considera la resolución del ADC. [11]

La combinación de *Arduino UNO y LabVIEW* permite obtener un sistema de adquisición y visualización eficiente para las mediciones realizadas. *Arduino UNO* realiza la adquisición directa de la señal analógica generada por el sensor; mientras que *LabVIEW* se encarga del procesamiento, análisis y despliegue visual de la información. Esta combinación resulta útil para el desarrollo de sensores ópticos experimentales, al ofrecer una solución económica, flexible y funcional en tiempo real. [12-13]

PARTE EXPERIMENTAL

En este trabajo, se diseñó e implementó un sistema detector óptico basado en programación gráfica LabVIEW y una tarjeta *Arduino UNO* para su integración en un sensor de fibra óptica. El sistema sensor está compuesto por los siguientes elementos: un fotodiodo como receptor de la señal óptica, una tarjeta *Arduino UNO* para la adquisición de la señal, una interfaz en *LabVIEW* para procesar y visualizar los datos en tiempo real y una fibra óptica estrechada "*taper*" como el transductor del sensor de fibra óptica.

Fotodiodo de (InGaAs)

Se seleccionó un fotodiodo comercial de bajo costo, de arseniuro de indio y galio (InGaAs) modelo YA302PD el cual opera en el intervalo de longitud de onda de 900-1770 nm. La capacidad de respuesta de un fotodiodo es una medida de su sensibilidad a la luz y se define como la relación de la fotocorriente generada, **iPD** a la potencia de la luz incidente, **P0** a una longitud de onda específica, esta relación es conocida como responsividad espectral, **R(λ)**. La Figura 2 muestra la gráfica de la responsividad del fotodiodo de InGaAs modeloYA302PD utilizado para el desarrollo del presente proyecto.

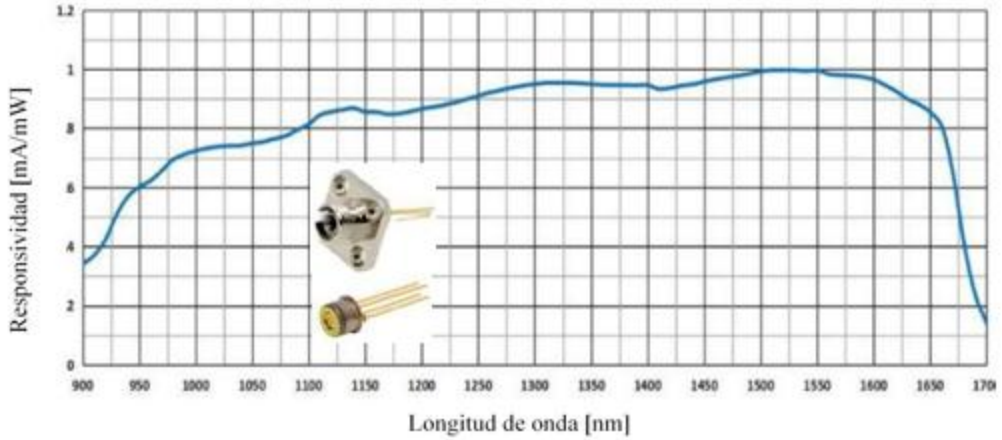


Figura 2. Responsividad del fotodiodo modelo YA302PD.

Diseño del circuito integrado al fotodiodo

Con base en lo descrito anteriormente, se diseñó un circuito con polarización inversa que incluye un arreglo RC como protección. Este circuito tiene como objetivo principal limitar el voltaje que llega al

fotodiodo evitando un daño fisico del sistema. La Figura 3 muestra el diagrama del circuito que incluye al fotodiodo modelo YA302PD.

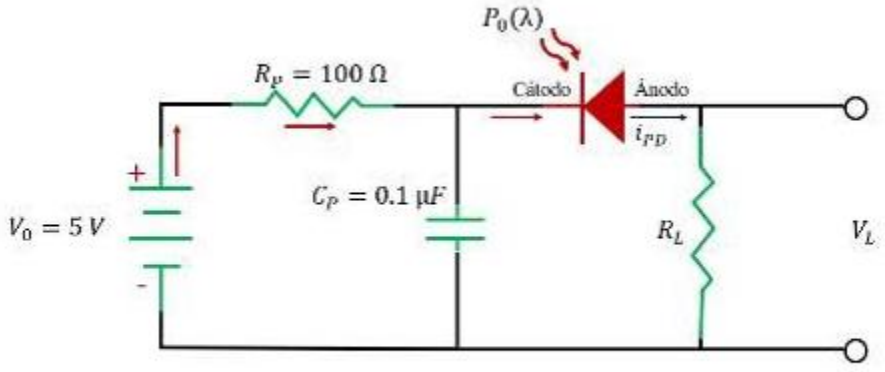


Figura 3. Circuito integrado con un fotodiodo modelo YA302PD conectado en polarización inversa. [10]

El fotodiodo de InGaAs modelo YA302PD con respuesta óptica en la región del infrarrojo cercano (NIR) fue configurado para 3 diferentes longitudes de onda: 1450, 1500 y 1550 nm. El cálculo de las resistencias de carga **RL** se obtuvo despejando esta de la ecuación 6 y estableciendo un límite de potencia óptica máxima **P0max** de 20 µW con un voltaje de polarización **V0** de 5 V.

Diseño de la interfaz gráfica en LabVIEW

Para la visualización en tiempo real de la señal generada por el fotodiodo, se desarrolló una interfaz gráfica utilizando el entorno de programación *LabVIEW*. En este sistema, la placa *Arduino UNO* actúa como dispositivo de adquisición de datos, al estar conectada al circuito integrado del fotodiodo y registrar la caída de voltaje *VL* a través de la resistencia de carga *RL*. Se diseñó un diagrama de bloques para establecer la comunicación con la tarjeta *Arduino UNO* mediante el protocolo serial. La Figura 4 muestra el panel frontal de la interfaz que fue diseñado para facilitar la interpretación de los datos de voltaje y convertirlos directamente en lecturas de potencia óptica.

La interfaz calcula el promedio de las lecturas de voltaje y, a partir de este valor, determina la potencia óptica correspondiente utilizando la responsividad del fotodiodo para una longitud de onda seleccionada y la resistencia de carga empleada. También, incluye un campo para seleccionar la longitud de onda de operación; además el usuario puede seleccionar la unidad de visualización deseada entre microwatts (µW), miliwatts (mW), watts (W), milivolts (mV) y/o volts (V). Además, puede desplegar gráficamente las mediciones obtenidas como una función del tiempo para un número definido de muestras, lo que permite observar la evolución de la señal.

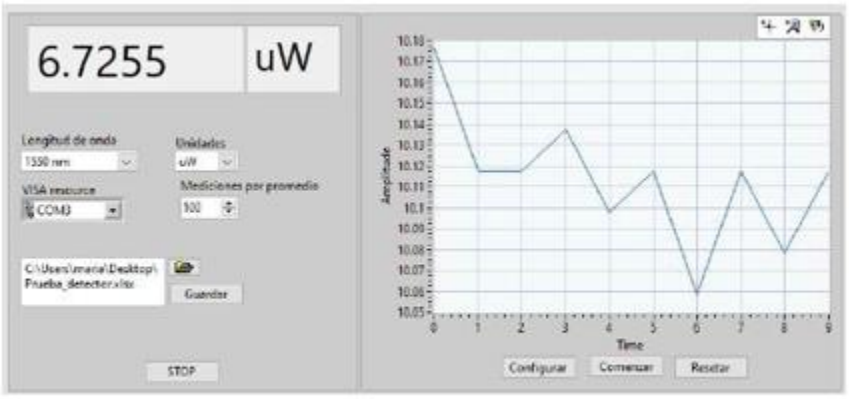


Figura 4. Panel frontal de la interfaz diseñada en LabVIEW.

Fabricación de la fibra óptica estrechada (FOE)

Una fibra óptica multimodo de índice gradual fue utilizada para fabricar una fibra óptica estrechada comúnmente llamada "*taper*" (T-MMF). Los diámetros de núcleo/revestimiento de la fibra fueron de 62.5/125 µm con una apertura numérica de 0.14.

Para la fabricación del T-MMF se cortó 60 cm de fibra óptica y 4cm de revestimiento y cubierta protectora de polímero fueron removidos al centro de la fibra. La superficie de la fibra se limpió con acetona y alcohol isopropílico para disolver cualquier sustancia orgánica.

Posteriormente, la fabricación del T-MMF se basó en una técnica de calentamiento y estiramiento utilizando un quemador viajero con una pequeña llama en la que se controló el proceso de adelgazamiento, tal y como se describe en [8].

La Figura 5 muestra la geometría del perfil de la fibra óptica estrechada que se midió después de su fabricación. En el inserto de la Figura 5 se indica la longitud de las zonas de transición, de la zona adelgazada y el diámetro de adelgazamiento de la fibra óptica multimodal.

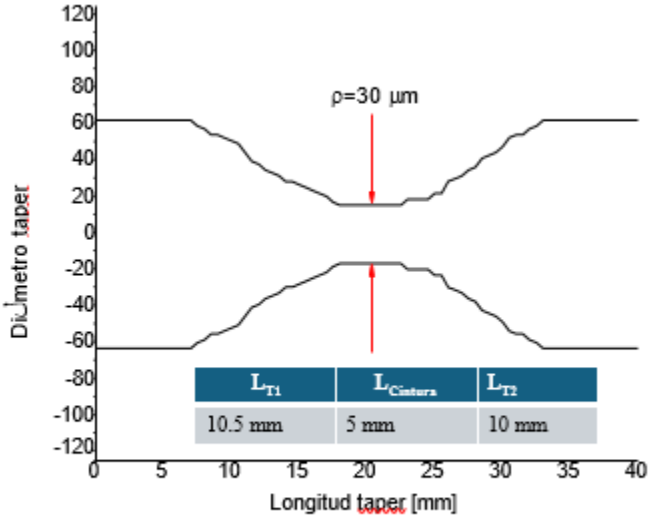


Figura 5. Perfil geométrico de una T-MMF con un diámetro de cintura de 30 µm.

RESULTADOS

Cálculo de las Resistencias de Carga

Primero, se calcularon las resistencias de carga óptimas para cada longitud de onda de operación considerando su responsividad y los parámetros de operación establecidos para el fotodiodo como previamente se describió. Estos valores se muestran en la Tabla 1.

Integración del Sistema de detección óptica

Posteriormente, el sistema detector óptico diseñado fue integrado a un sensor basado en fibra óptica estrechada (S-FOE) comúnmente conocido como *taper*. En este sensor, la fibra óptica adelgazada actúa como elemento transductor. Para el sistema de detección óptico, se empleó el sistema desarrollado con el fotodiodo de InGaAs, la tarjeta *Arduino UNO* para la adquisición de la señal y la interfaz gráfica en *LabVIEW* respectivamente (ver Figura 6).

Tabla 1. Parámetros cálculos para el circuito integrado y del fotodiodo modelo YAR302PD tales como las resistencias de carga R_L.

Fotodiodo YA302PD		
Potencia P_{0max}	20 μW	
Longitud de onda [nm]	Responsividad [A/W]	Resistencia de carga $\mathbf{R_L}$ [Ω]
1550	0.99	263.152 KΩ
1500	0.99	263.157 KΩ
1450	0.95	252.525 KΩ

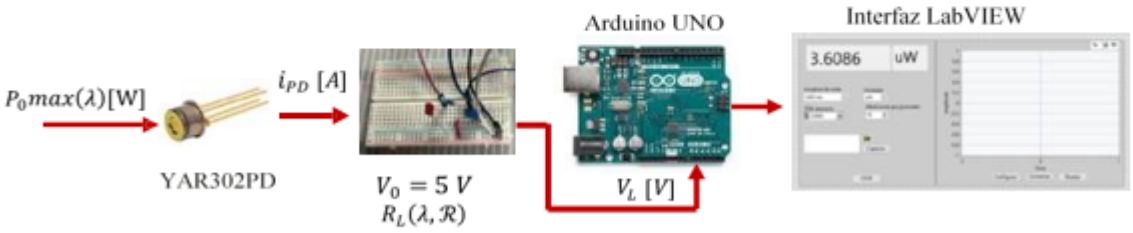


Figura 6. Estructura del sistema de detección implementado para la detección de señales ópticas empleando un PD, una tarjeta *Arduino UNO* y una interfaz diseñada en *LabVIEW*.

Implementación del sistema sensor basado en fibra óptica estrechada para la detección índice de refracción

Para evaluar la capacidad del sistema de detección de señales ópticas, este fue integrado a un sensor basado en una fibra óptica estrechada (S-FOE). El S-FOE opera como el elemento transductor, el adelgazamiento a través de una sección a lo largo de la fibra permitirá detectar cambios de índice de refracción en el entorno de la fibra.

Para llevara a cabo las pruebas del sistema sensor óptico para la detección de cambios de índice de refracción se procedió con lo siguiente. Primero, se obtuvieron soluciones acuosas con distintas concentraciones de sacarosa tales como 10, 25, 50, 75 y 100%, disueltas en 5 mL de agua ultra

pura. Después, se determinaron los índices de refracción de cada diferente solución, además del agua ultra pura empleando un refractómetro modelo *Pocket PAL-BX/RI*. Las mediciones fueron realizadas a una temperatura ambiente 25 °C. Los índices de refracción medidos para las diferentes concentraciones de sacarosa se muestran en la tabla 2.

Posteriormente se implementó el sistema sensor óptico incorporando el sistema de detección que incluye, un fotodetector modelo YA302PD comercialmente disponible y de bajo coste, una tarjeta adquisidora de datos *ARDUINO UNO*, la interfaz de *LabVIEW* para desplegar la información, como transductor se utilizó un "*taper*" de fibra óptica multimodo fabricado mediante la técnica de fusión por calentamiento-estirado, con un diámetro de adelgazamiento de aproximadamente 30 μm y una longitud de 25 mm y una fuente óptica modelo DHL-2000 BAL (ver Figura 7).

Para llevar a cabo las mediciones de índice de refracción con el sensor de fibra óptica, cada una de las soluciones acuosas a diferente concentración de sacarosa fueron cuidadosamente aplicadas sobre el taper. Después de cada medición, la solución fue retirada con la ayuda de una pipeta. Enseguida la fibra óptica, es decir la zona del taper se enjuagó con agua ultra pura para eliminar residuos antes de añadir la siguiente concentración. Este procedimiento se repitió para cada concentración, asegurando que se registrara nuevamente el espectro de referencia antes de cada medición, garantizando así la precisión y repetibilidad del experimento.

Entonces, se midieron los espectros de transmisión para cada diferente concentración de sacarosa utilizando un espectrómetro modelo NIR512 (*Oceanoptics Inc.*) en el intervalo de longitud de onda de 900 a 1700 nm.

Finalmente, bajo el mismo procedimiento antes descrito se llevaron a cabo mediciones de la respuesta en potencia óptica del sistema sensor para diferentes concentraciones de sacarosa. Estas mediciones se obtuvieron para para 2 diferentes longitudes de onda tales como 1450 y 1550 nm. Una fotografía del arreglo experimental utilizado para la detección de índice de refracción del sistema sensor óptico propuesto es observada en la Figura 8.

Tabla 2. Índices de refracción medidos de soluciones acuosas para diferentes concentraciones de sacarosa.

Azúcar refinada Concentración (%)	Índice de refracción
0	1.3320
25	1.3649
50	1.3854
75	1.4037
100	1.4185

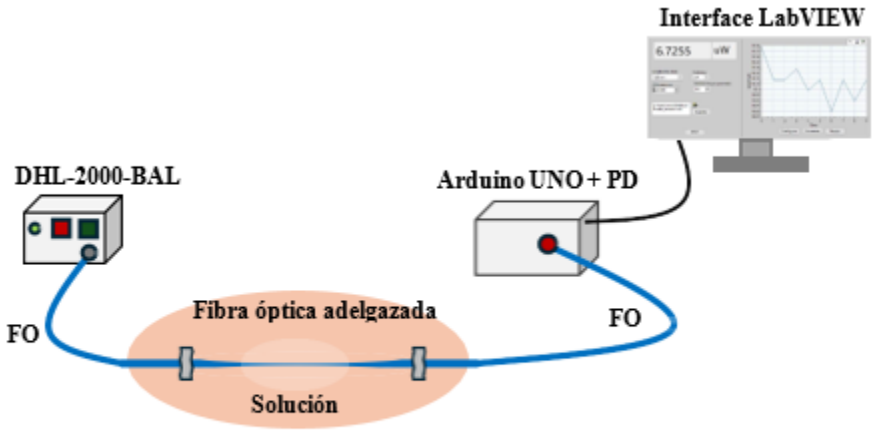


Figura 7. Diagrama esquemático dl sensor basado en unan fibra óptica estrechada para la detección de índice de refracción incorporando un fotodetector de InGaAs, una tarjeta *ARDUINO UNO* y una interface diseñada en *LabView*.

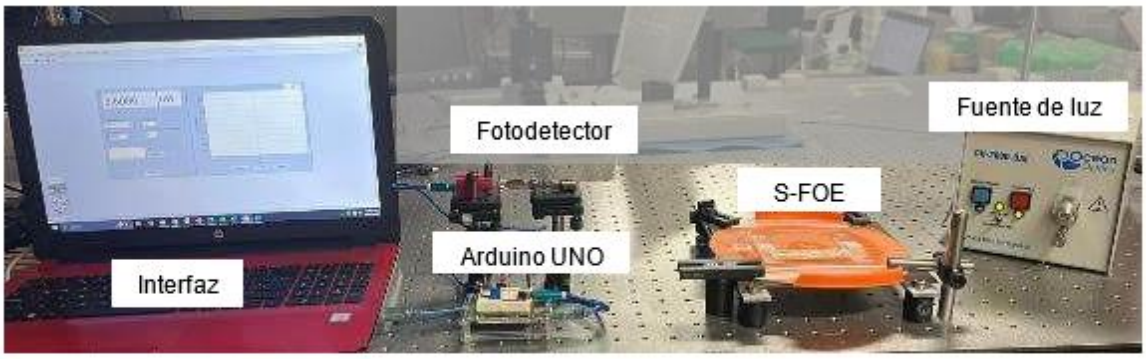


Figura 8. Fotografía del sistema sensor implementado para la medición de índice de refracción de diferentes concentraciones de soluciones acuosas de sacarosa.

Respuesta óptica del sistema sensor

La figura 9 muestra la respuesta espectral medida para diferentes concentraciones de sacarosa utilizando el arreglo experimental de la figura 7. La señal en la región espectral de 1400 nm a 1600 nm muestra un decremento en la intensidad de la señal de transmisión normalizada a medida que la concentración de la sacarosa aumenta. Finalmente, se realizaron mediciones de la respuesta en potencia del sensor para diferentes concentraciones de sacarosa (ver figura 10). La respuesta óptica de potencia del sensor de índice de refracción fue medida en dos longitudes de onda 1450 y 1550 nm. La figura 10 muestra que a medida que la concentración de sacarosa se incrementa de 25 a 100% la respuesta en potencia óptica del sensor decrece de 3.75mW a 2.85 mW con una ligera diferencia entre las dos longitudes de onda bajo estudio.

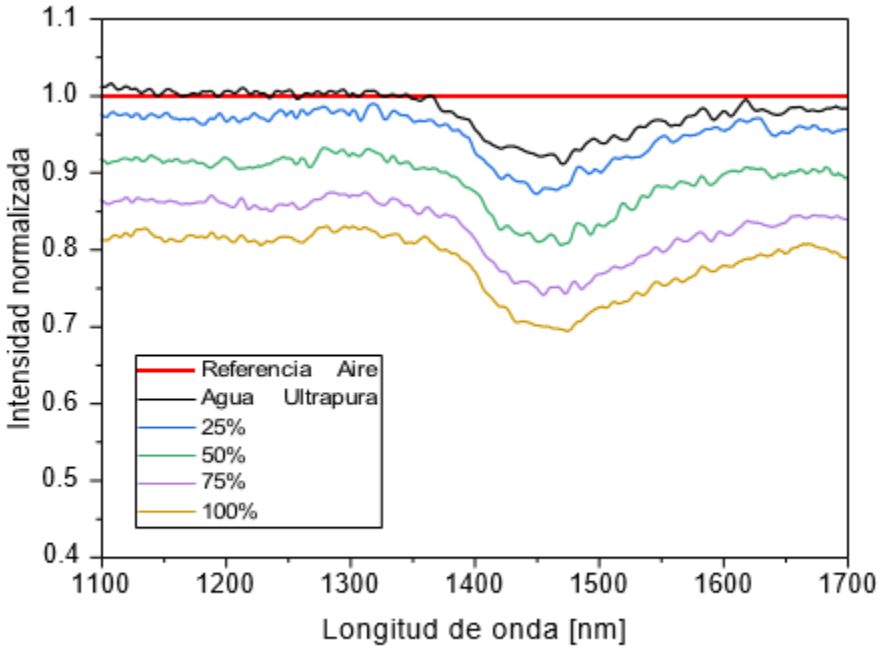


Figura 9. Espectros transmisión de las diferentes soluciones de sacarosa.

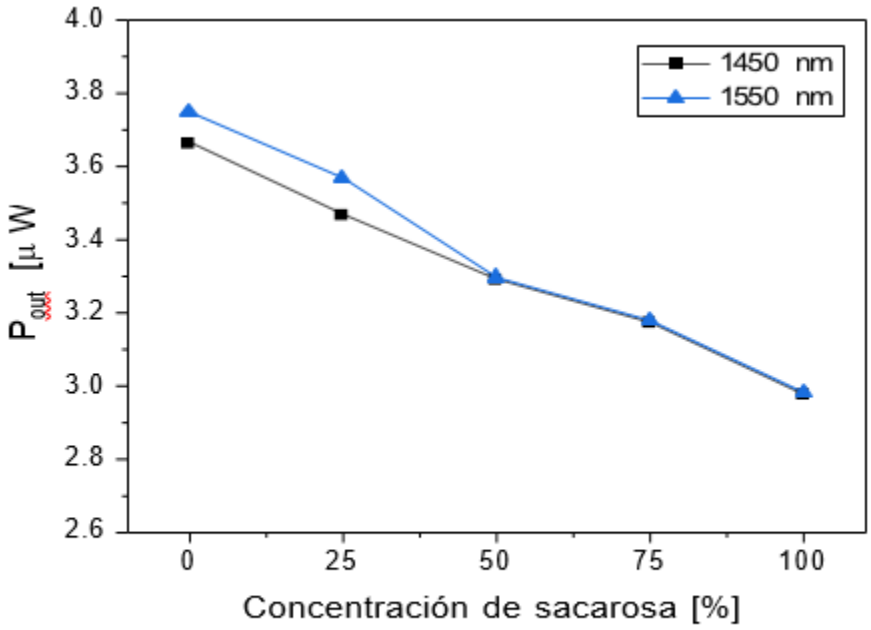


Figura 10. Respuesta óptica del sistema sensor de fibra óptica integrando una tarjeta *ARDUINO UNO* y una interfaz desarrollada en *LabVIEW*.

CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema de detección basado en un fotodiodo de InGaAs, e integrando una placa *Arduino UNO* y una interfaz gráfica en *LabVIEW* que permitió adquirir, visualizar y analizar

en tiempo real las señales ópticas-eléctricas generadas. El sistema fue capaz de operar a distintas longitudes de onda y mostrar las lecturas de potencia en diferentes unidades.
El sistema detector fue acoplado exitosamente a un sensor de fibra óptica, donde el transductor fue una fibra óptica estrechada "*taper"* fabricada con una fibra multimodo, con un diámetro de cintura de 30 µm y una longitud de 25 mm. Este sensor fue implementado para la detección de cambios de índice de refracción de soluciones acuosas con diferentes concentraciones de sacarosa.

Este trabajo demuestra la viabilidad de construir un sistema sensor óptico preciso, adaptable y de bajo costo mediante el uso de fotodiodos comerciales, plataformas abiertas como *Arduino*, y programación gráfica con *LabVIEW.*

BIBLIOGRAFÍA

1. McGrath, M. J., & Scanaill, C. N. (2013). *Sensor technologies: Healthcare, wellness and environmental applications*. Apress Open.
2. Serna, A. (2010). *Guía práctica de sensores*. Creaciones Copyright, S.L.
3. Haus, J. (2010). *Optical sensors: Basics and applications*. Wiley-VCH.
4. Lopez-Higuera, JM (Ed.). (2002). *Handbook of optical fibre sensing technology* . Wiley.
5. Arduino. (s.f.). *What is Arduino?* Arduino. Recuperado el 14 de mayo de 2025, de https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction
6. National Instruments. (s.f.). *¿Qué es LabVIEW?* Recuperado el 14 de mayo de 2025, de https://www.ni.com/es/shop/labview.html
7. J Castrellon-Uribe *et al* 2025 Tapered optical fiber sensor for monitoring corrosion processes of X70 pipeline steel in natural seawater. *Eng. Res. Express* 7 015373.
8. J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, and E. Mejía, "Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors," Appl. Opt., vol. 42, no. 13, p. 2278, 2003.
9. Saleh and Teich*, "Fundamentals of Photonics"*, 1 Ed., Wiley, 2007
10. Thorlabs, Inc. (2024). *Effects of incident optical power on the effective reverse bias voltage of photodiodes*. https://www.thorlabs.com
11. aula21. (2023, mayo 8). Arduino: Guía completa para principiantes y expertos. Formación para la Industria. https://www.cursosaula21.com/arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/
12. Julián, E. (2018). Manual de programación LabVIEW 9 (2ª ed.). ASOCIACIÓN DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA - ENERGÍA
13. VERDE. https://doi.org/10.5281/zenodo.2557815
14. D. Călinoiu, R. Ionel, M. Lascu and A. Cioablă, "Arduino and LabVIEW in educational remote monitoring applications," 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings, Madrid, Spain, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/FIE.2014.7044027.

SIMULACIÓN DE LA DETECCIÓN DE FALLAS EN UN INVERSOR PUENTE-H EN CASCADA DE SIETE NIVELES USANDO UNA RED NEURONAL Y EL ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE SALIDA

Eliseo Guzmán Rodríguez, Gilberto Muñoz Moreno, Marcos Jesús Villaseñor Aguilar, Adolfo Rafael López Núñez, Mario Alberto Juárez Balderas, José Miguel Sosa Zúñiga

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
mip24110006@irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

Los inversores de potencia son fundamentales en sistemas de energía renovable, especialmente en aplicaciones fotovoltaicas y eólicas. En particular, el inversor puente H en cascada de 7 niveles, con doce interruptores, presenta desafíos en la detección de fallas, ya que estas afectan la eficiencia y pueden dañar el sistema. En este trabajo se propone el uso de una red neuronal para detectar fallas de circuito abierto en los interruptores del inversor, a partir del análisis de la señal de voltaje simulada. Las fallas se inducen mediante compuertas lógicas, y se identifican a través del valor promedio y RMS obtenidos en simulación utilizados como entradas para entrenar la red neuronal en MATLAB. La red neuronal emplea una arquitectura Multilayer Perceptron (MLP) con una capa oculta de 15 neuronas, logrando identificar correctamente el tipo de falla y el interruptor o grupo de interruptores afectado. Esto demuestra la viabilidad de las redes neuronales como herramienta para la detección de fallas en sistemas de conversión energética.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energías renovables ha impulsado el desarrollo de tecnologías de conversión energética más eficientes, donde los inversores de potencia juegan un papel importante al transformar la energía generada en formas adecuadas para el consumo doméstico o industrial [1]. Entre las distintas topologías, el inversor puente H en cascada de siete niveles ha ganado interés por su capacidad de mejorar la calidad de la señal de salida y disminuir el contenido armónico, lo cual favorece una mayor eficiencia energética y compatibilidad con la red. No obstante, esta topología incorpora un número elevado de interruptores, lo que incrementa su complejidad operativa y la probabilidad de fallas internas.

Las fallas, especialmente aquellas de tipo circuito abierto en los interruptores, pueden provocar distorsiones en las señales de salida, pérdidas de eficiencia y en casos severos, daños irreversibles en el sistema. Por ello, la detección temprana y precisa de estos eventos se vuelve indispensable para garantizar la confiabilidad y seguridad del sistema. Si bien existen métodos convencionales para el diagnóstico de fallas, estos pueden resultar limitados cuando se requiere un análisis en tiempo real o cuando las condiciones de operación varían considerablemente.

En este contexto, las redes neuronales artificiales representan una alternativa prometedora debido a su capacidad de aprendizaje, generalización y reconocimiento de patrones complejos en grandes volúmenes de datos [2]. Estas redes pueden ser entrenadas con información extraída de señales en condiciones normales y luego empleadas para identificar comportamientos anómalos relacionados con fallas.

Las redes neuronales artificiales (RNA, por sus siglas en inglés) son modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Estas redes están conformadas por unidades de procesamiento llamadas neuronas artificiales, organizadas en capas y conectadas entre sí mediante enlaces con pesos ajustables. Estos pesos determinan la influencia que cada señal de entrada tiene sobre la salida de una neurona y son el principal parámetro que se modifica durante el proceso de entrenamiento [3].

La función principal de una RNA es transformar un conjunto de entradas en una salida deseada. Esto se logra mediante un proceso de aprendizaje basado en datos, en el cual la red ajusta sus pesos internos a partir de ejemplos previamente conocidos, utilizando algoritmos de optimización. Así, la red aprende a identificar patrones complejos en los datos y generaliza su comportamiento ante nuevas entradas [4].

Una red neuronal típica consta de tres tipos de capas: una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Cada neurona de una capa se conecta con las neuronas de la siguiente mediante enlaces ponderados, y en cada conexión se aplica una función de activación que introduce no linealidad al sistema, permitiendo representar relaciones complejas entre variables [5].

Las RNA se utilizan ampliamente en tareas como clasificación de patrones, regresión, predicción de series temporales, procesamiento de señales y diagnóstico de fallas. Su capacidad para modelar relaciones no lineales entre variables las hace adecuadas para sistemas complejos donde los métodos tradicionales resultan insuficientes [6].

Entre las diversas arquitecturas, el perceptrón multicapa (MLP, por sus siglas en inglés) es una de las más utilizadas. Se trata de una red neuronal tipo feedforward, donde la información fluye en una única dirección desde la capa de entrada hasta la capa de salida, sin retroalimentación. El MLP requiere un algoritmo de aprendizaje supervisado.

En la Figura 1 se muestra una red neuronal simple con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las entradas están representadas como x_1, x_2, x_3 y la salida como y_1, y_2.

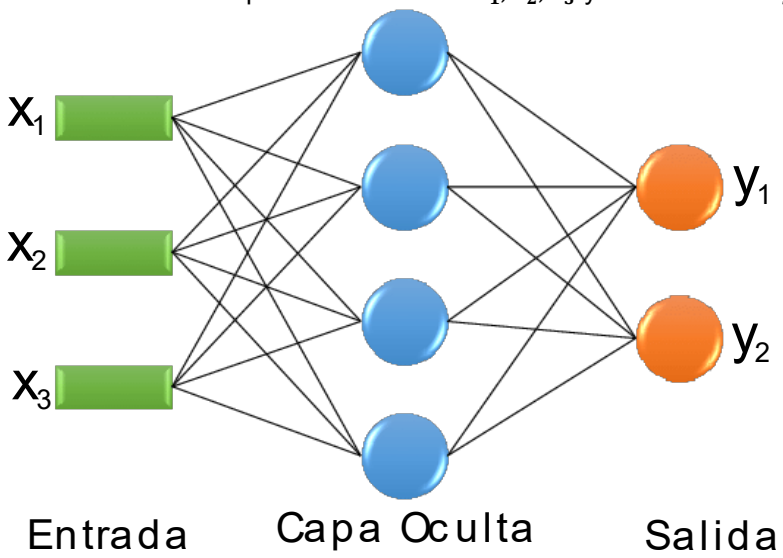


Figura 1. Diagrama de una red neuronal típica.

El comportamiento general de una neurona se describe mediante la Ecuación 1.

$$y = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i + b\right) \quad (1)$$

Donde f es la función de activación, w_i los pesos sinápticos, x_i las entradas, b el sesgo y y la salida resultante.

Cada neurona dentro del MLP calcula una combinación lineal ponderada de sus entradas, la cual es transformada mediante una función de activación. Durante el proceso de entrenamiento, la red ajusta sus pesos internos con el objetivo de minimizar el error entre la salida obtenida y la salida deseada. Este entrenamiento se realiza a lo largo de múltiples épocas, que representan el número de veces que todo el conjunto de datos de entrenamiento se presenta a la red para ajustar sus parámetros [7].

Este proceso permite que el modelo aprenda a identificar patrones complejos y a generalizar correctamente ante nuevas entradas [4].

Gracias a su capacidad de clasificación y detección de patrones, el MLP es ampliamente utilizado en tareas de diagnóstico y monitoreo de sistemas eléctricos, donde se requiere interpretar señales variables para identificar comportamientos anómalos, como fallas en componentes electrónicos.

Los inversores de potencia son arreglos electrónicos que convierten corriente continua (CD) en corriente alterna (CA), permitiendo así el aprovechamiento de fuentes de energía renovable como los paneles fotovoltaicos [8].

Una de las configuraciones más comunes y fundamentales en la electrónica de potencia es el inversor puente H, el cual se utiliza para generar una señal de salida de tensión alterna a partir de una fuente de corriente continua. Este inversor está compuesto por cuatro interruptores controlados electrónicamente (normalmente transistores IGBT o MOSFET) dispuestos en una topología en forma de "H". Al activar de forma alternada los pares de interruptores opuestos, se logra invertir la polaridad de la tensión aplicada a la carga, generando así una forma de onda alterna [9].

El funcionamiento del inversor puente H puede ser mejorado utilizando técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM), las cuales permiten aproximar la forma de onda de salida a una senoidal y reducir el contenido armónico. Esta topología es ampliamente utilizada en convertidores de baja y media potencia debido a su sencillez, bajo costo y buena eficiencia [9].

Para aplicaciones donde se requiere una mayor calidad de la señal de salida, una menor distorsión armónica y una operación más eficiente, se han desarrollado topologías de inversores multinivel, siendo una de ellas el inversor puente H en cascada de siete niveles. Esta configuración consiste en la conexión en serie de múltiples celdas puente H, cada una alimentada por una fuente de voltaje independiente. Al combinar los diferentes niveles de voltaje generados por cada celda, se obtiene una señal de salida más cercana a una senoidal, con una menor tasa de cambio del voltaje con respecto al tiempo (dv/dt) y una significativa reducción del THD (Total Harmonic Distortion) [9].

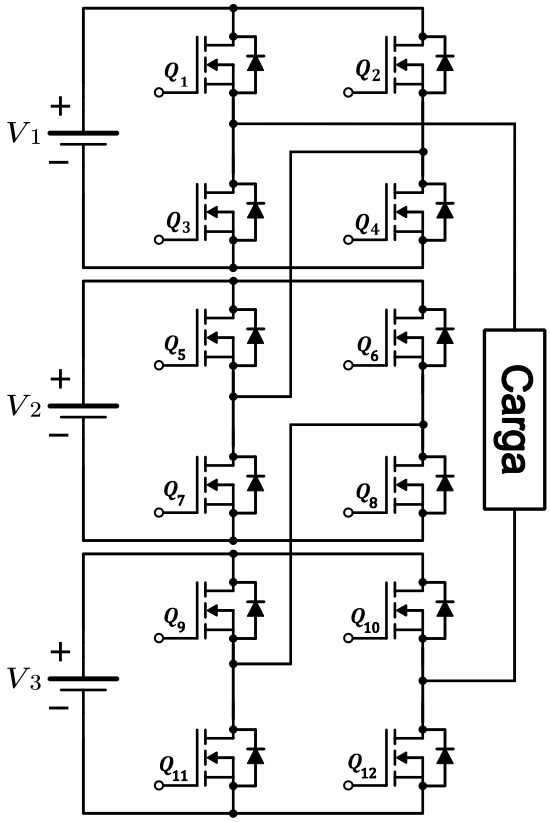


Figura 2. Topología de inversor puente H en cascada de 7 niveles.

En la Figura 2 se muestra la topología para el inversor puente H en cascada de siete niveles, esta emplea tres celdas puente H conectadas en serie, lo que da lugar a una salida con siete niveles de tensión. Esta estructura requiere un total de doce interruptores, lo cual aumenta su complejidad, pero ofrece ventajas notables en términos de rendimiento eléctrico. Este tipo de inversor es especialmente útil en aplicaciones de media y alta potencia, como en sistemas de energía renovable, calidad de energía [8], [10].

En el caso de los inversores, especialmente en el puente H en cascada de siete niveles, la detección de fallas es esencial para evitar daños en los componentes y mejorar la confiabilidad del sistema [8]. Las fallas en un inversor pueden clasificarse principalmente en dos grandes categorías: fallas internas y fallas externas. Las fallas internas afectan directamente a los dispositivos de conmutación (IGBT o MOSFET), mientras que las fallas externas están relacionadas con condiciones anómalas en las señales de entrada o carga conectada al sistema.

Entre las fallas internas más comunes se encuentran:

- Falla en estado abierto: ocurre cuando el interruptor no conduce corriente cuando deberían estar encendido. Esta condición altera la generación de los niveles de tensión deseados, reduciendo la amplitud de la señal de salida o introduciendo asimetrías.
- Falla en estado cerrado (cortocircuito): sucede cuando un interruptor permanece encendido, provocando la circulación de corrientes no deseadas que pueden dañar otros componentes o producir distorsiones severas en la señal de salida.

La detección de estas fallas requiere el análisis de los parámetros de salida del inversor, como el valor RMS, valor pico, promedio, y especialmente el THD. Una alteración significativa en estos valores, comparados con los de operación normal, puede indicar la presencia de una falla en uno de los interruptores [11].

PARTE EXPERIMENTAL

La simulación se llevó a cabo en el entorno de diseño PSIM. Se implementó un inversor puente H en cascada de siete niveles, compuesto por tres celdas H en serie, cada una con cuatro interruptores, sumando un total de doce dispositivos de conmutación. En la Figura 3 se muestra el diagrama implementado en PSIM.

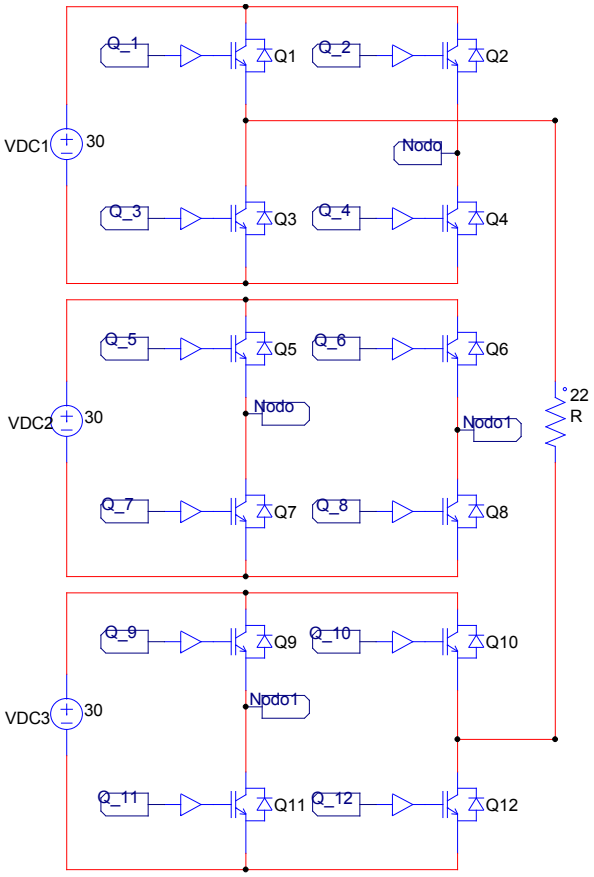


Figura 3. Diagrama del inversor implementado en PSIM.

Se colocó una fuente independiente de 30 V a cada módulo puente H, el inversor opera a una frecuencia de conmutación de 10 kHz y genera una señal de 60 Hz a la salida. Cuenta con una carga resistiva de 22 Ω.

El inversor fue controlado mediante una modulación SPWM, en el que la señal de referencia fue una senoidal de 60 Hz con un voltaje pico de 2.9 V, mientras que la portadora consistió en seis señales triangulares de 10 kHz en fase, cada una con un voltaje pico de 0.5 V. Estas señales triangulares se distribuyeron verticalmente en el eje Y, desplazándose en niveles de voltaje para cubrir de manera escalonada toda la amplitud de la senoidal. El diagrama de comparación para generar esta modulación en PSIM se muestra en la Figura 4.

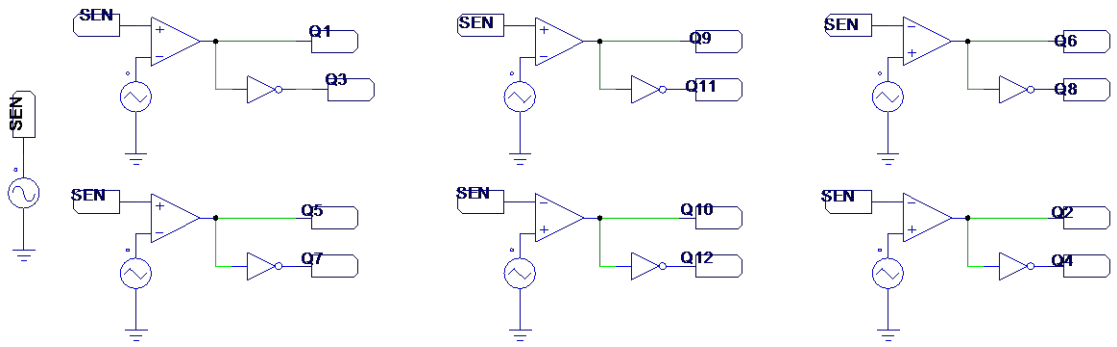


Figura 4. Diagrama de control para el inversor puente H en cascada de 7 niveles.

Para la implementación de las fallas en circuito abierto se colocó una compuerta AND para la señal de control de cada interruptor. De esta manera solo se activaría el interruptor si se tienen las dos señales en alto. El Diagrama para la implementación de fallas en PSIM se muestra en la Figura 5.

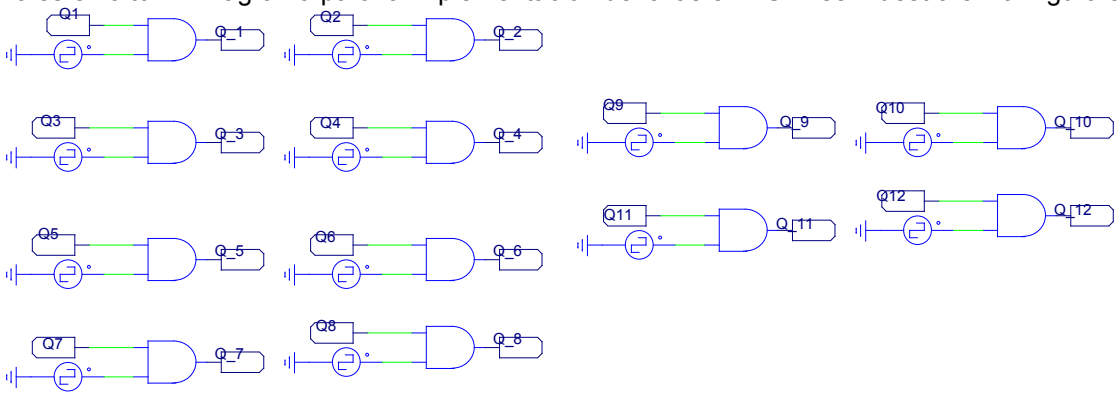


Figura 5. Diagrama para la implementación de fallas de circuito abierto en PSIM.

La falla se puede aplicar a todos los interruptores, cada una de las fallas se tiene que cambiar de manera manual, al ser doce interruptores se considera solo tomar los casos individuales de cada una de las fallas, sin incluir combinaciones de interruptores.

Para la implementación de la red neuronal se utilizó como entrada el voltaje de salida del inversor simulado, el cual fue previamente normalizado a un rango de 0 a 3 V.
La red neuronal utilizada para la clasificación de fallas fue desarrollada en el entorno MATLAB, utilizando una red de tipo Multilayer Perceptron (MLP). El objetivo es clasificar los interruptores afectados a partir de dos parámetros extraídos de la señal de salida del inversor: el valor promedio y el valor RMS.

La organización del código implementado es la siguiente:

1. Se definen los datos de entrada X como una matriz donde cada fila representa un caso de falla y contiene dos valores: el promedio y el valor RMS del voltaje de salida. Para cada fila de entrada, se asocia una o varias etiquetas que indican los interruptores afectados.
2. Se emplea una red del tipo patternnet, con una sola capa oculta compuesta por 15 neuronas. La red se configura para realizar todo el entrenamiento sin usar conjuntos de validación o prueba, debido al tamaño reducido de los datos. En la Figura 6 se muestra el diagrama de MATLAB de la red neuronal.

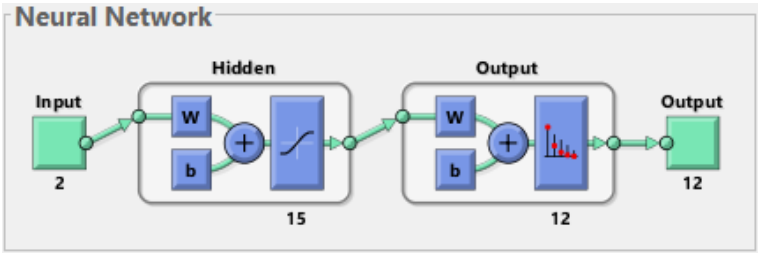


Figura 6. Diagrama de la red neuronal dado por MATLAB.

3. Una vez entrenada, la red se utiliza para predecir el tipo de falla a partir de nuevos datos. Las salidas de la red representan la probabilidad de pertenencia a cada interruptor. Se establece un umbral de decisión de 0.24 para considerar una salida como válida.
4. Finalmente, se comparan las clases predichas con los grupos de fallas definidos en el entrenamiento para identificar el conjunto más probable de interruptores afectados.

RESULTADOS

En el software de PSIM se obtiene la salida de voltaje ya normalizada en el rango de 0 a 3V mediante el uso de un sensor de voltaje. En la Figura 7 se muestra la salida sin ningún tipo de falla.

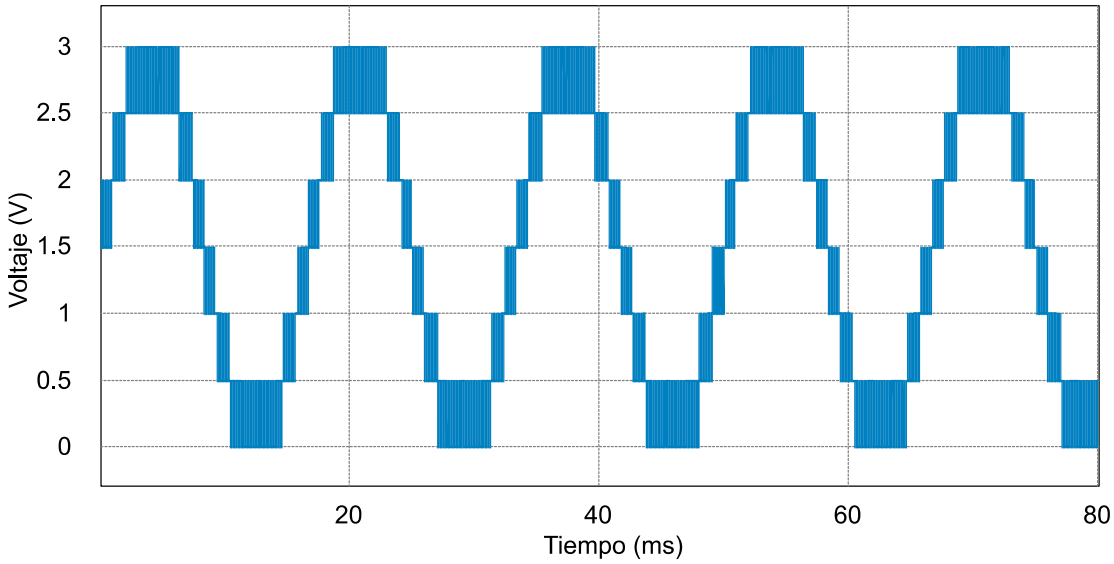


Figura 7. Voltaje de salida sin ninguna falla.

Se observa que la señal de salida presenta los siete niveles de voltaje esperados, con una forma de onda simétrica y periódica. Para el caso sin fallas, se obtuvo un valor promedio de 1.53 V y un valor RMS de 1.85 V del voltaje ya normalizado.

En las Figuras 8, 9 y 10 se presentan las formas de onda del voltaje correspondientes a cada una de las doce fallas simuladas, asociadas individualmente a los interruptores del inversor. En cada caso se muestra el valor del voltaje promedio, RMS y el interruptor en falla. Se observa que algunos interruptores generan fallas similares en la señal de salida.

En la Figura 8 se agrupan los interruptores que producen un comportamiento de falla similar, con valores promedio y RMS muy cercano al igual que en la Figura 9.

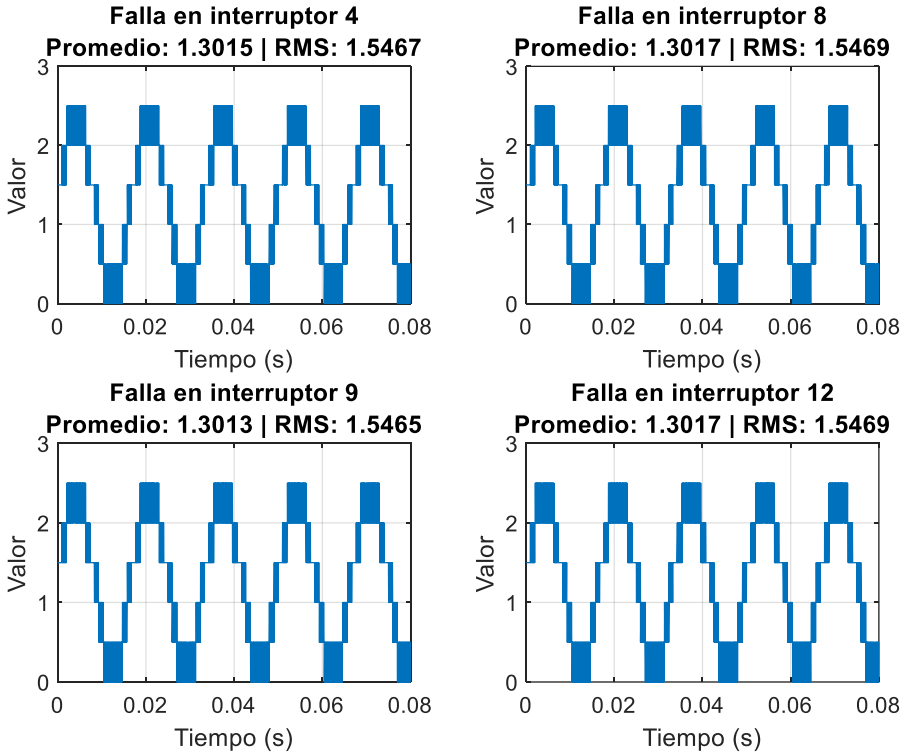


Figura 8. Falla en los interruptores 4, 8, 9 y 12.

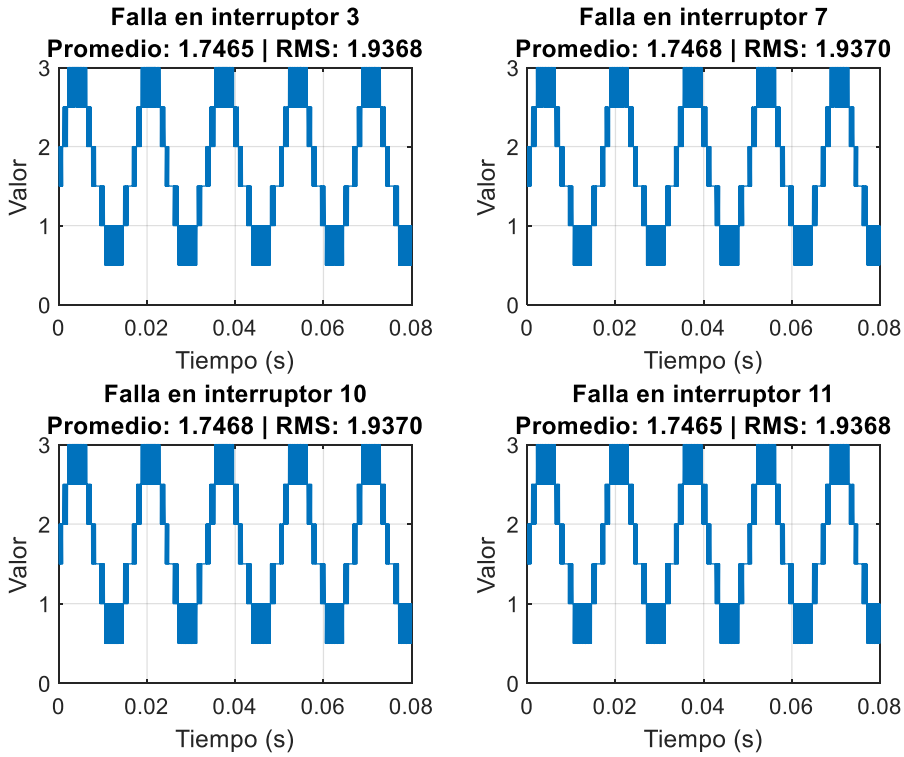


Figura 9. Falla en los interruptores 3, 7, 10 y 11.

Por otro lado, en la Figura 10 se identifican cuatro interruptores cuya falla genera una respuesta única a la salida, teniendo un mayor rango de variación entre los valores obtenidos de cada uno.

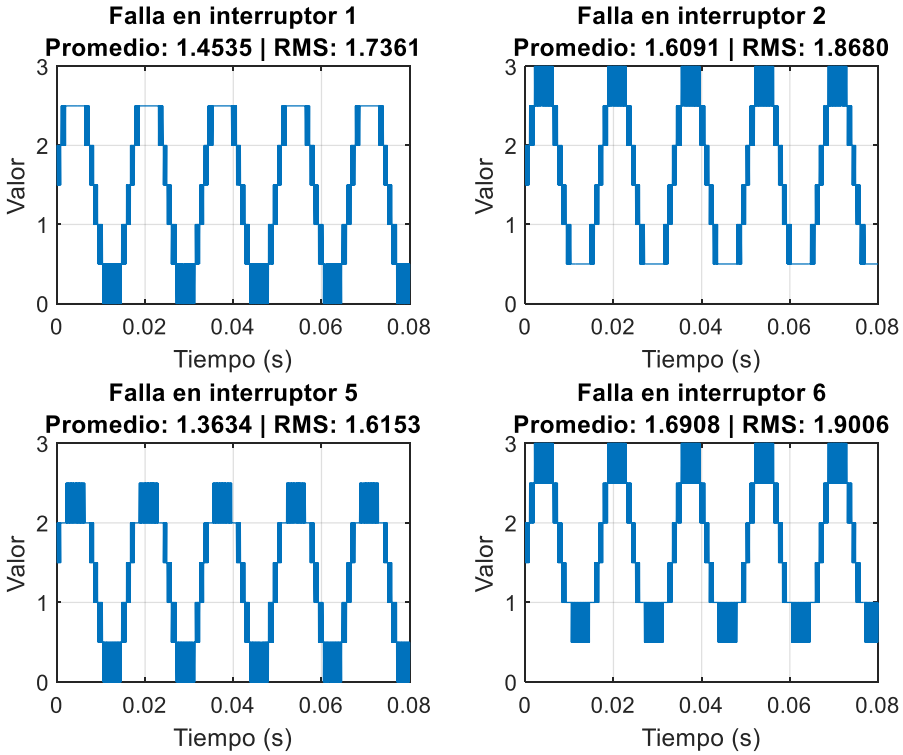


Figura 10. Falla en los interruptores 1, 2, 5 y 6.

Teniendo estos resultados se considera que se aplicó correctamente la falla en circuito abierto a cada uno de los interruptores y se identificó la falla que causa cada uno.
Considerando los resultados de las Figuras 8-10, se realiza la Tabla 1 con las posibles entradas de datos para la red neuronal y la falla que debe identificar, agrupando las fallas que causan la misma forma a la salida como una sola falla.

Tabla 1. Entrada y salida de datos para el entrenamiento de la red neuronal.

Entrada		Salida
Valor promedio	**Valor RMS**	**Interruptor en falla**
1.53	1.85	Ninguno
1.4535	1.7361	1
1.6091	1.8680	2
1.3634	1.6153	5
1.6908	1.9006	6
1.3015	1.5467	4, 8, 9 o 12
1.7465	1.9368	3, 7, 10 o 11

La Figura 11 muestra la evolución del desempeño de la red neuronal durante el entrenamiento, en función del número de épocas. El parámetro evaluado es la entropía cruzada, que es una métrica comúnmente utilizada en problemas de clasificación multiclase, ya que mide la discrepancia entre la salida predicha por la red y la salida deseada.

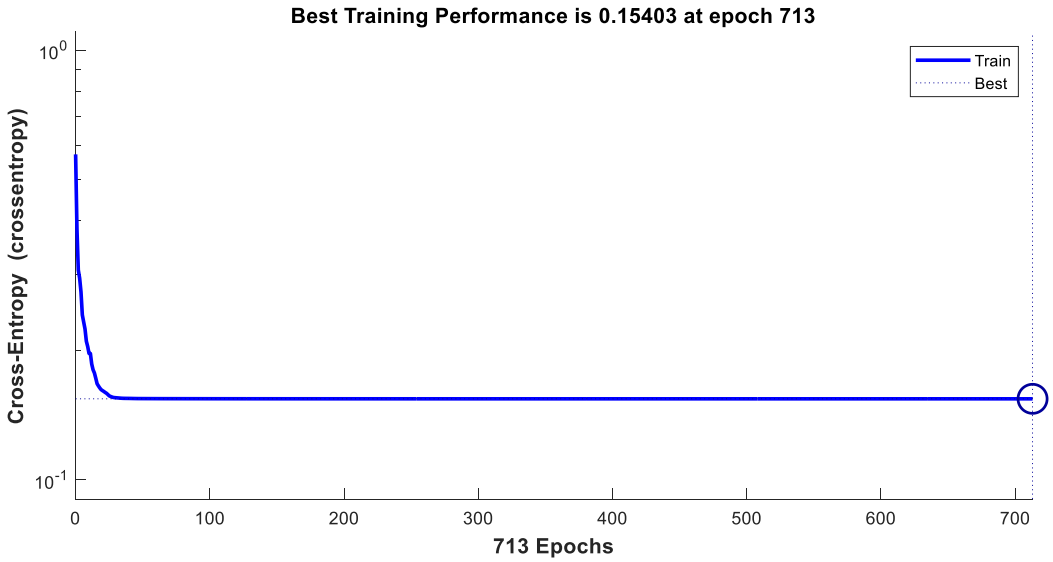


Figura 11. Curva de Performance durante el Entrenamiento de la Red Neuronal.

Se puede observar que la curva desciende rápidamente en las primeras épocas, lo cual indica que la red aprende de manera efectiva desde el inicio. Aproximadamente a partir de la época 100, la tasa de disminución se vuelve mucho más lenta.

El mejor desempeño se alcanzó en la época 713, con un valor mínimo de error de entropía cruzada de 0.15403, lo que representa una buena capacidad de ajuste del modelo a los datos de entrenamiento. Este punto está resaltado con un círculo, indicando el momento en el que la red logró su mejor rendimiento.

Una vez realizado el entrenamiento se realizan nuevas simulaciones para cada uno de los casos de falla, se obtienen nuevamente los valores promedio y RMS de las señales obtenidas y se colocan estos nuevos valores en el código. La captura de la ventana de comandos del software de MATLAB con los resultados se muestra en la Figura 12.

```
Command Window
Falla en el interruptor 1
>> Fallas_simuladas
Falla en el interruptor 2
>> Fallas_simuladas
Falla en el interruptor 5
>> Fallas_simuladas
Falla en el interruptor 6
>> Fallas_simuladas
Posible Falla en uno de los interruptores 4, 8, 9 o 12
>> Fallas_simuladas
Posible Falla en uno de los interruptores 3, 7, 10 o 11
```

Figura 12. Resultados arrojados por la red neuronal en MATLAB.

CONCLUSIONES

La red neuronal implementada en MATLAB fue capaz de detectar correctamente las fallas en los interruptores del inversor multinivel puente H de 7 niveles, compuesto por 12 interruptores. Se identificó que algunos interruptores generan efectos similares en la señal de salida, por lo que fueron agrupados, mientras que otros producen una alteración única que permite su detección individual.

Se lograron clasificar seis casos distintos de falla: cuatro correspondientes a fallas únicas, y dos casos agrupados que abarcan interruptores con un comportamiento similar a la salida.
Estos resultados validan el uso de redes neuronales como una herramienta efectiva para el diagnóstico automático de fallas en inversores multinivel, especialmente en entornos donde se requiere supervisión continua.

BIBLIOGRAFÍA

1. N. N. Lopatkin, "Output Voltage and Current Waveforms' PSIM Simulation of Three-Phase Seven-Level Cascaded H-Bridge Inverter," 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russian Federation, 2021, pp. 574-579.
2. J. Induja and N. Saju, "Fault Detection in NPC Multilevel Inverter Using Artificial Neural Network," 2024 International Conference on Advancements in Power, Communication and Intelligent Systems (APCI), KANNUR, India, 2024.
3. R. Rojas, Neural Networks: A Systematic Introduction, Springer-Verlag, 1996.
4. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, 3rd ed., Pearson Education, 2009.
5. J. M. Zurada, Introduction to Artificial Neural Systems, West Publishing Company, 1992.
6. C. M. Bishop, Neural Networks for Pattern Recognition, Oxford University Press, 1995.
7. S. A. Kalogirou, Artificial Intelligence in Energy and Renewable Energy Systems, Nova Science Publishers, 2007.
8. M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices and Applications, 4th ed., Pearson, 2014.
9. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed., Wiley, 2003.
10. J. Rodríguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
11. R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 3rd ed., McGraw-Hill, 2012.

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA DETECTAR Y SEGMENTAR TUMOR MALIGNO EN MUESTRAS INFRARROJAS DE SENO USANDO UN NUEVO MÉTODO BASADO EN CNN

J. Reyes Luévano[1,2], Luis Manuel Valentín Coronado [2], M. G. Minero Ramales[1], J. A. Guerrero Viramontes[1]

[1] TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., 20256 México, [2] Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Ags., 20200 México.
juanreyes.luevano@gmail.com

RESUMEN

El cáncer de seno (tumor maligno en seno) es una enfermedad que ocurre cuando las células del seno crecen, se dividen de manera incontrolada y forman un neoplasma maligno que se expande hacia los tejidos sanos. Este padecimiento es una de las principales causas de muerte en la mujer y los niveles de incidencia actuales muestran una tendencia significativa en aumento. La detección temprana, un diagnóstico correcto y un tratamiento oportuno son factores que incrementan la taza de sobrevivencia en pacientes con cáncer de seno. En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de diagnóstico para detectar y extraer (segmentar) con alta confianza la región de tejido asociada a tumor maligno en muestras térmicas de seno. El enfoque de exploración está basado en un sensor de cámara Therm-App TH (384x288) que trabaja en la banda espectral infrarroja LWIR (7-14 μm). En este contexto, para obtener un diagnóstico de cáncer de seno, el sistema requiere únicamente una imagen térmica del seno, la cual es procesada usando un nuevo método de detección y segmentación basado en Inteligencia Artificial (IA), específicamente, en Redes Neuronales Convolucionales (CNN). El desempeño del sistema de diagnóstico es evaluado a través de un número significativo de pruebas de diagnóstico llevadas a cabo en pacientes con cáncer de seno. Los resultados indican que el sistema propuesto para diagnóstico de cáncer de seno presenta un excelente desempeño con AUC de 1.0 en detección y un nivel de confianza de 0.97 en segmentación de tumor maligno. En conclusión, el sistema propuesto puede ser implementado de manera segura en el área médica como una herramienta de apoyo en el diagnóstico no invasivo de cáncer de seno.

Palabras clave: Cáncer de seno, imágenes térmicas, inteligencia artificial, redes neuronales convolucionales, diagnóstico médico.

INTRODUCCIÓN

Estadísticas de la Organización Mundial de la Salud (WHO) indican que hoy en día hay una población de 2.3 millones de mujeres diagnosticadas con Cáncer de Seno en el mundo, con un estimado de 666,103 muertes cada año. En este sentido, las proyecciones para 2050 sugieren una tendencia en aumento significativa, con un incremento del 38% en nuevos casos y un 68% en muertes a causa del Cáncer de Seno [1]. Este trabajo presenta la implementación de un sistema personalizable, costo-efectivo, no invasivo y confiable, para diagnóstico de Cáncer de Seno. El equipo usa termografía infrarroja como enfoque de exploración [2-4] y puede ser puesto en producción en un manipulador (Robot) o un VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado). El mecanismo de diagnóstico está impulsado por IA, particularmente, Redes Neuronales Convolucionales (CNN).

TEORÍA

Las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) son un algoritmo de Inteligencia Artificial basado en aprendizaje profundo supervisado que imita el sentido de la percepción humana [4, 5]. En este trabajo se hace uso de la alta capacidad de extracción de características de las CNN a nivel profundo, para desarrollar un modelo de estimación capaz de diferenciar o reconocer la anomalía térmica característica asociada a tumor maligno (neoplasma maligno) en seno. El motor de diagnóstico del

sistema que se propone en este trabajo está impulsado por el modelo de CNN que se presenta en la Fig. 1.1. Esta arquitectura permite llevar a cabo un proceso de detección de Cáncer de Seno a nivel global y local; como se muestra en la Fig. 1.2. A nivel global, el modelo propuesto permite detectar con alta confianza la presencia de anomalía térmica característica de cáncer de seno en una etapa media o avanzada del padecimiento. Por su parte, a nivel local, el motor de inferencia es capaz de detectar la anomalía térmica característica de tumor maligno en la fase temprana como lo muestra la Fig. 1.2 (b). El mecanismo de diagnóstico a nivel local es de particular interés porque permite detectar un tumor en la fase temprana de la enfermedad y delimitar tres regiones en una muestra de seno. Dichas regiones corresponden a tejido sano, la región de metástasis y el tumor maligno que normalmente está focalizado en el seno.

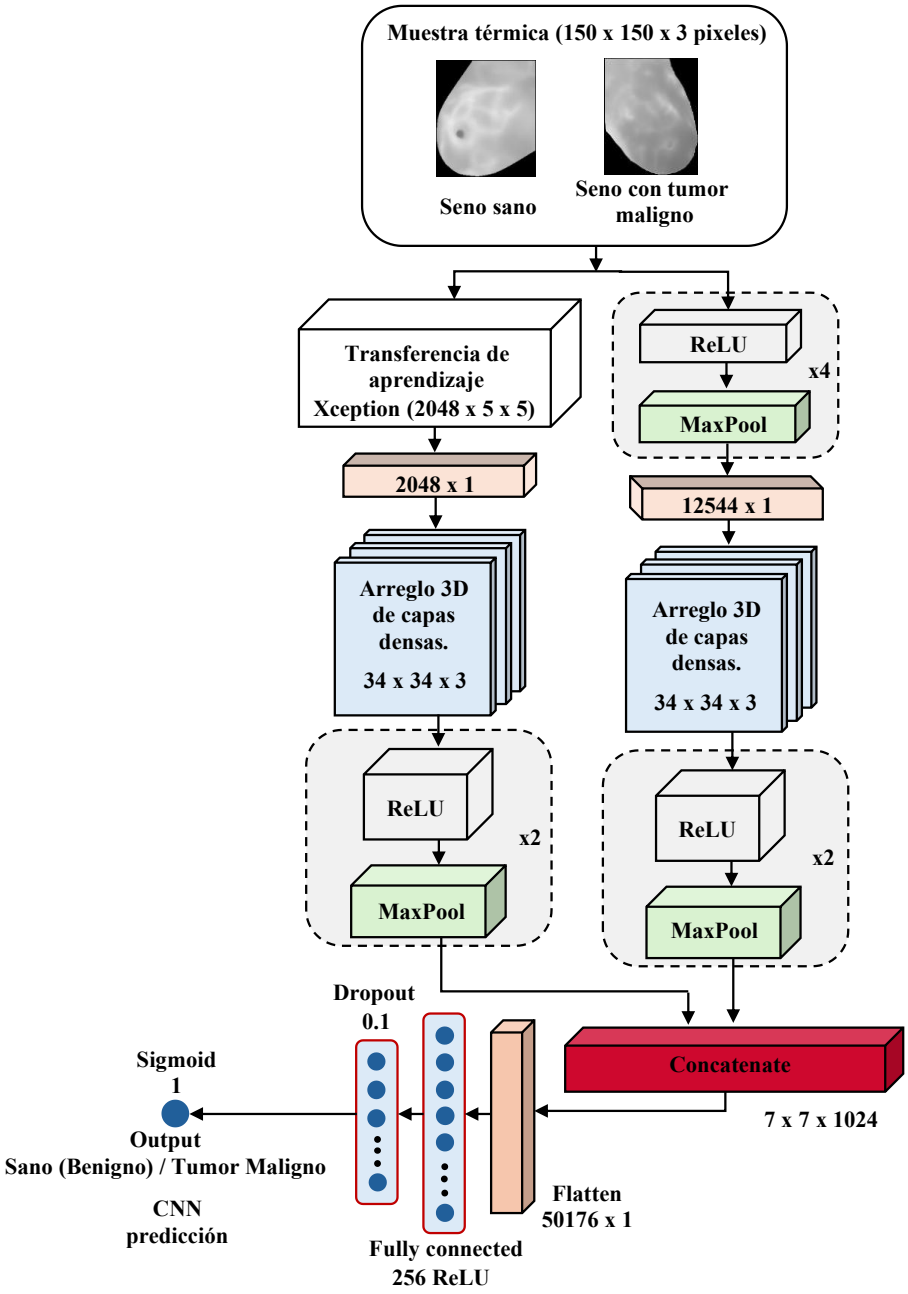


Figura 1.1 Modelo CNN para estimación de tumor maligno en muestras térmicas de seno.

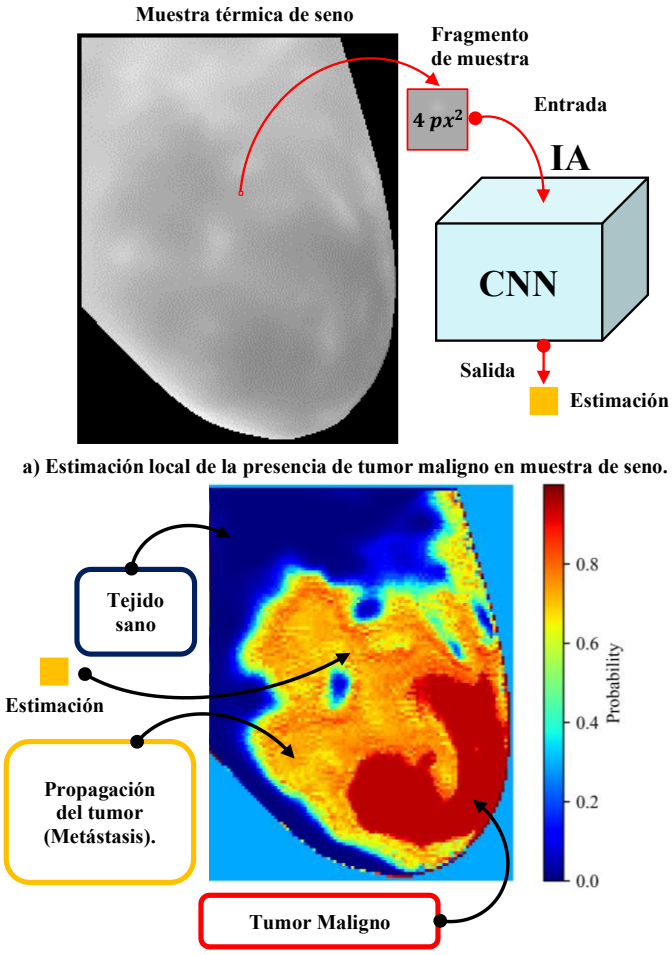


Figura 1.2 Mecanismo de estimación de tumor maligno en muestras térmicas de seno.

PARTE EXPERIMENTAL

Pruebas experimentales de entrenamiento son conducidas usando el modelo de red de la Fig. 1.1 y muestras infrarrojas de seno previamente diagnosticadas por un especialista radiólogo. Las muestras forman parte del dataset DMR-IR [3] disponible en la literatura y un dataset adicional de acceso restringido (no público). El proceso de entrenamiento, validación y evaluación es llevado a cabo usando un protocolo de validación cruzada con 50% de los datos para entrenamiento, 25% para validación y 25% para evaluación.

El procesador usado en las pruebas experimentales es un Intel (R) Core (TM) i7-6700HQ CPU 2.60GHz 32 GB RAM con un módulo GPU externo del tipo NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti de 11 GB. El marco de trabajo está basado en Keras, TensorFlow y Python. Dado el proceso de entrenamiento, validación y evaluación; el modelo CNN de inferencia es implementado en un sistema de exploración basado en tecnología de Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) o en manipulador de seis grados de libertad, como se muestra en la Fig. 1.3. La implementación de esta tecnología nos ha permitido desarrollar un equipo para el área médica eficiente en tamaño, con alta calidad de exploración debido al alto número de grados de libertad, costo efectivo, y con posibilidad de generar un dispositivo de uso personalizado.

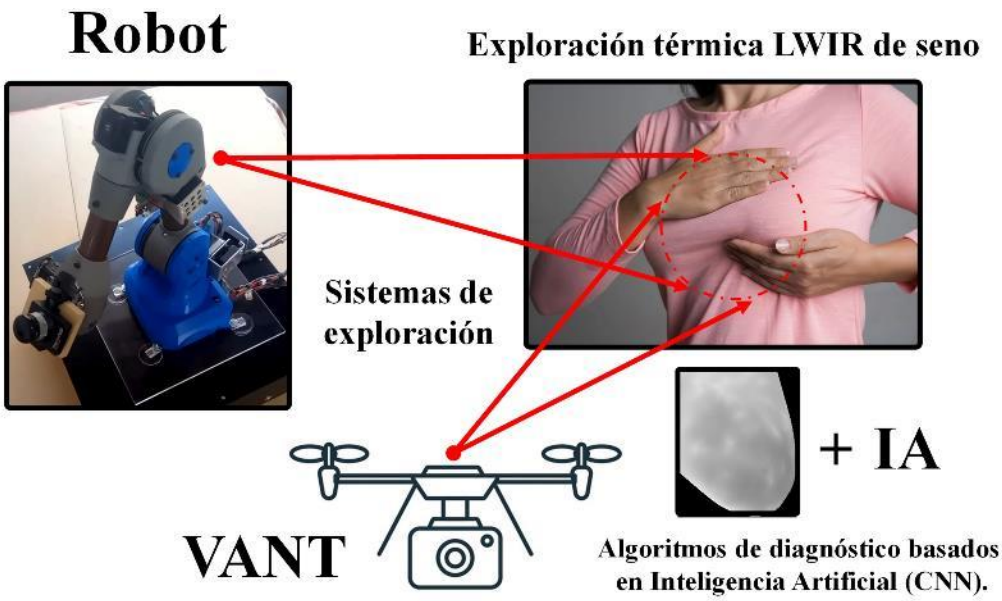


Figura 1.3 Sistema impulsado por IA para exploración y diagnóstico de cáncer de seno en muestras térmicas.

RESULTADOS

Pruebas experimentales de entrenamiento, validación y evaluación son llevadas a cabo usando el modelo de red que se presenta en la Fig. 1.1 y el mecanismo de estimación presentado en la Fig. 1.2. Como resultado, las métricas de desempeño del modelo se presentan en Tabla 1 para ambos procesos, detección de cáncer de seno y proceso de segmentación de tumor maligno, así como metástasis.

La Fig. 1.4 presenta los resultados de una prueba de diagnóstico de cáncer de seno llevada a cabo usando el sistema de exploración descrito en la Fig. 1.3. y el modelo entrenado de la Fig. 1.1. Los resultados indican que el sistema propuesto aunado al modelo de estimación; es capaz de detectar la anomalía térmica característica de tumor maligno a nivel local. A nivel global, los resultados de diagnóstico sugieren que existen tres regiones bien delimitadas dentro de una muestra térmica de seno. Esas regiones corresponden a tumor maligno (neoplasma maligno), metástasis (propagación de las células tumorales hacia el tejido sano del seno) y región de tejido sano. La estimación de la región de metástasis es especialmente importante en la comunidad científica dado que los estudios del estado del arte indican, que el proceso de metástasis está directamente relacionado con un alto índice de muerte en pacientes con Cáncer de Seno. La razón de ello reside, en que la metástasis es un mecanismo de propagación de las células tumorales focalizadas en el seno hacia otros tejidos del cuerpo humano, no obstante, el sistema inmune del paciente pierde la capacidad de reconocer las células tumorales y eliminarlas. En otras palabras, el proceso de metástasis que ocurre en la vecindad del tumor maligno es un mecanismo donde las células tumorales adquieren las características necesarias para lograr no ser detectadas por el sistema inmune.

Tabla 1. Métricas de desempeño del sistema de diagnóstico de Cáncer de Seno.

Desempeño en detección de cáncer de seno.						
Exploración	Sensitividad	Especificidad	Precisión	Exactitud	F1-Score	**AUC (stdev.)**
LWIR	1.000 ± 0.00	1.000 ± 0.00	1.000 ± 0.00	1.000 ± 0.00	1.000 ± 0.00	**1.000 ± 0.00**
Desempeño en proceso de segmentación.						

LWIR	0.9697 ± 0.03	0.9711 ± 0.02	0.9710 ± 0.03	0.9704 ± 0.04	0.9703 ± 0.01	**0.9953 ± 0.02**

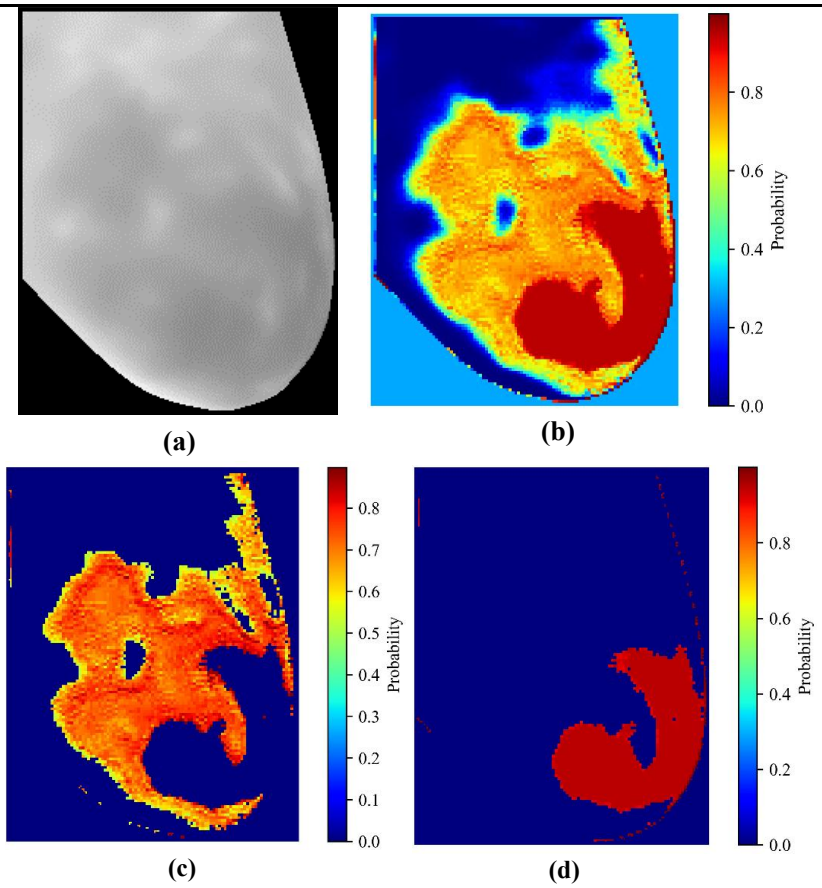


Figura 1.4 (a) Muestra térmica de seno, (b) Diagnóstico de cáncer de seno, (c) Metástasis y (d) Tumor maligno (Cáncer de seno).

CONCLUSIONES

Los resultados indican que nuestro sistema de diagnóstico de cáncer de seno impulsado por IA presenta un excelente desempeño con AUC de 1.0 en detección y un nivel de confianza de 0.97 en segmentación de tumor maligno. Véase Tabla 1. El sistema de exploración basado en termografía infrarroja e implementado en VANT o manipulador robótico; representa una opción no invasiva, de nulos efectos secundarios y costo efectiva para diagnóstico médico de seno. En conclusión, el sistema propuesto puede ser implementado de manera segura en el área médica como una herramienta de apoyo en el diagnóstico no invasivo de cáncer de seno.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Kim, A. Harper, V. McCormack, H. Sung, N. Houssami, E. Morgan, M. Mutebi, G. Garvey, I. Soerjomataram, M. Fidler-Benaoudia, “Global patterns and trends in breast cancer incidence and mortality across 185 countries”, Nature Medicine, Vol. 1, 1, 2025, 1-9.
2. A. Mashekova, Y. Zhao, E. Y. K. Ng, V. Zarikas, S. C. Fok, O. Mukhmetov, “Early detection of the breast cancer using infrared technology – A comprehensive review”, Thermal Science and Engineering Progress Vo. 27, 1, 2022, pp. 101142.
3. L. F. Silva, D. C. M. Saade, G. O. Sequeiros, A. C. Silva, A. C. Paiva, R. S. Bravo, A. Conci, “A new database for breast research with infrared image”, J. Med. Imaging Health Inform, Vol. 4, 1, 2014, pp. 92-100.

4. M. Nasser, U. K. Yusof, “Deep learning based methods for breast cancer diagnosis: a systematic review and future direction”, Diagnostics, Vol. 13, 161, 2023, pp. 1-26.
5. F. Chollet, “Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions”, Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern. Recognit., Vol. 1, 1, 2017, pp. 1800-1807.

DETERMINACIÓN DE LA AFINIDAD TINTÓREA DE MICROPLÁSTICOS DE TYGON™ 44–4X AL COLORANTE ROJO NILO

Alejandra Melgar García, Ma. Rosario González Mota, Juan José Soto Bernal y J. Ascención Guerrero Viramontes

Instituto Tecnológico de Aguascalientes
g23153202@aguascalientes.tecnm.mx

RESUMEN

Actualmente, el ser humano le ha dado una gran importancia al uso de plásticos, particularmente a los plásticos de un solo uso, pues tan solo en México se ha estimado un consumo anual de 66 kg de plásticos por habitante. No obstante, cuando estos residuos plásticos actúan como contaminantes, con el tiempo comienzan a degradarse y fragmentarse, dando lugar a partículas con dimensiones menores a 5 mm denominadas como microplásticos (MP). Sin embargo, debido a su diminuto tamaño se han presentado dificultades para su detección en cualquier medio, por lo que aún no se ha establecido una metodología estandarizada. No obstante, una de las técnicas comúnmente reportada en la literatura es la tinción de MP empleando colorantes lipofílicos fluorescentes. Esta tinción se lleva a cabo conforme a la capacidad de enlace que presenta el colorante con la molécula del polímero, conocida como afinidad tintórea. La presente investigación determinó la afinidad tintórea por medio de la determinación de la fluorescencia en muestras de Tygon™ B-44-4X, cloruro de polivinilo (PVC) modificado, empleando como colorante el Rojo Nilo (RN), que es un colorante lipofílico fluorescente. La tinción de los MP se llevó a cabo utilizando un baño ultrasónico digital, bajo condiciones de temperatura de 60 °C y un tiempo de 50 minutos. La solución patrón de colorante RN empleada fue a una concentración de 10 ppm en metanol. La afinidad tintórea se determinó midiendo la intensidad de corriente mediante un sistema óptico conformado por una base plástica diseñada con la ayuda del software SolidWorks 2022 e impresa en 3D, teniendo como fuente de radiación un láser azul con una longitud de onda de 445 nm y un fotodiodo monolítico y amplificador de transimpedancia de alimentación única modelo OPT 101. Finalmente, para el procesamiento de los datos obtenidos se utilizó un algoritmo desarrollado en el programa LabVIEW. Con los datos obtenidos se obtuvo un modelo matemático con base a la ecuación que describe la Ley de Lambert-Beer debido al comportamiento óptico dominado por la absorbancia presentado por el material.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el ser humano le ha dado una gran importancia al uso de plásticos, particularmente a los plásticos de un solo uso. En México se ha estimado un consumo anual de 66 kg de plásticos por habitante [1]. Aunado a estas cifras, polímeros como el Tygon™ B-44-4X (TY) es usado ampliamente en el área médica y alimenticia, llegando a reportar su presencia en cubos de hielo en tiendas mexicanas gracias al empaque en el que viene este producto [2].

Con el tiempo, estos plásticos comienzan a degradarse y fragmentarse, dando lugar a partículas con dimensiones menores a 5 mm denominadas como microplásticos (MP) [3], [4]. Estas partículas se encuentran prácticamente en todos lados, desde la sal de mesa, el azúcar que se consume, bebidas embotelladas hasta en aguas marinas, potables, en el aire, las nubes e incluso en regiones polares y glaciales, entre muchos otros [2], [4].

Una de las técnicas reportada para la detección de MP es la tinción empleando colorantes lipofílicos, la cual se lleva a cabo dependiendo de la Afinidad Tintórea (AT) de cada MP con el colorante, es decir, dependiendo la capacidad que tiene un MP para unirse a algún colorante. Entre los colorantes lipofílicos que se han utilizado destaca el Rojo Nilo (RN), ya que es el que mejores resultados ha proporcionado [6], [7].

La presente investigación tiene por objetivo determinar la afinidad tintórea del TY empleando el colorante lipofílico fluorescente RN. Para lo cual se definió el método de tintura, además de desarrollar un Sistema Óptico (SO) para detectar y cuantificar la fluorescencia de MP.

TEORÍA

Los MP son aquellas partículas provenientes de polímeros sintéticos que presentan un tamaño entre 5 mm y 1 μm, y debido a su naturaleza, actualmente son catalogados como contaminantes emergentes; además presentan una baja tasa de biodegradación, una gran durabilidad y un potencial tóxico para los seres vivos y sus ecosistemas [4], [5]. Los MP pueden ser clasificados de acuerdo a su origen, ya sean primarios o secundarios. Los MP primarios son plásticos fabricados intencionalmente con un dicho tamaño microscópico, pues están diseñados para aplicaciones específicas para ser usados en productos de higiene personal como cremas exfoliantes, cremas dentales, cosméticos, o bien para ser parte de procesos de extrusión y moldeado o impresiones 3 D [4], [6], [7]. Por otro lado, los MP secundarios son aquellos que son producto de la fragmentación y/o degradación selectiva de plásticos de mayor tamaño, ya sea por efecto de fuerzas mecánicas, como por ejemplo por el efecto sinérgico entre la acción de las olas; por fotodegradación, biodegradación o termodegradación [4], [7], [8]. Con el inicio de la producción global de plásticos, partiendo del primer polímero patentado por la empresa DuPont, en el año de 1938 es que hoy en día existe una gran variedad de polímeros en el mundo empleados para diversos fines [4]. En el año 2021, se reportó que la producción mundial de plásticos fue de alrededor de 390.7 millones de toneladas, de las cuales alrededor de 125 millones fueron fabricadas en China. Esta producción consistió en 19.3 % de polipropileno, 14.4% y 12.5% de polietileno de baja y alta densidad respectivamente, 12.9% de policloruro de vinilo (PVC), 6.2% de tereftalato de polietileno, 5.5% de poliuretano y 5.3% de poliestireno [5]. El TY es PVC modificado, patentado por la empresa Saint-Gobain Performance Plastics, es resistente a productos químicos, presenta una buena flexibilidad, bajo olor, una baja transferencia de sabor, no es humectante, no es tóxico y además de presenta propiedades no hemolíticas y no pirogénicas [9], [10], [11], [12], [13]. Este polímero es muy usado dentro de la industria de la salud y farmacéutica para el manejo de fluidos, en la industria automotriz, para sistemas de combustible y enfriamiento, en bienes de consumo como electrodomésticos, entre otras [12].

Por otro lado, son muchas las técnicas que se han reportado para la detección de MP en diversas matrices de muestras, sin embargo, una de las técnicas más reportadas es la tinción de MP con diferentes colorantes. Uno de los colorantes más usados para llevar a cabo esta técnica es el Rojo Nilo (RN) debido a que por sus características presenta una Afinidad Tintórea (AT) con diversos polímeros. El RN es un colorante lipofílico fluorescente que tiende a tener afinidad con una amplia gama de polímeros y es soluble en solventes orgánicos como el cloroformo o el metanol [14], [15], [16], [17]. Este colorante fuertemente fluorescente se sintetiza a partir del Azul Nilo, y está presente en pequeñas cantidades de preparaciones comerciales de la tinción lipídica azul del Nilo y en la forma de polvo rojo púrpura oscuro [18], [19]. La principal característica que presente este colorante es la de ser solvatocromático, es decir, su fluorescencia varía espectralmente según la polaridad del medio en el que se encuentre, pues se ha encontrado que, dependiendo de la hidrofobicidad relativa del disolvente los máximos de excitación y emisión de la fluorescencia pueden variar en un rango de 60 nm [16], [19], [20], [21]. Algunos autores que han reportado que el RN emite fluorescencia en diferentes longitudes de onda, desde el amarillo dorado intenso hasta el rojo intenso, dependiendo de la longitud de onda de la fuente de excitación [20]. Aunado a lo anterior, el hecho de que el RN presente la característica de ser fluorescente, como tal no transfiere del todo color, si no solo produce un efecto óptico, conocido como efecto de blanqueo, el cual consiste en que los colorantes absorben radiación ultravioleta y la reflejen en la región visible (azul o azul-violeta), provocando que el objeto o la sustancia reflejen más luz que la luz incidente [22].

La estructura química de los colorantes consta de dos grupos, el grupo cromóforo y el grupo auxócromo. El grupo cromóforo es la estructura responsable del tinte o tono principal y se clasifica en varios subgrupos como por ejemplo el grupo nitroso (N=O). Por otro lado, el grupo auxócromo es la estructura responsable de la intensidad del color y presenta la capacidad de la sustentividad, es

decir, la capacidad de un colorante para fijarse a un sustrato. Algunos ejemplos son los grupos hidróxi (OH) o alcoxi (OR) o los halógenos cloro (Cl) o yodo (I) [22].

Para describir el fenómeno de la tinción del TY y el RN se deben comprender tres aspectos muy importantes: composición química de un colorante, la AT y el fenómeno de la fluorescencia.
Un colorante es una sustancia de naturaleza orgánica o inorgánica que transfiere su color a otras sustancias, ya sea que experimente o no modificaciones en su estructura química, dando matices e intensidades variables [23].

Por otro lado, la AT se refiere a la capacidad de los polímeros para absorber un colorante y formar un enlace químico de forma permanente, por lo que depende de la estructura molecular del colorante. Aunado a lo anterior, la AT se encuentra muy influenciada por la concentración del colorante en el polímero, por lo que cuanto mayor sea la AT del colorante hacia el polímero más difícil será que exista una pérdida de color [24], [25].

El intercambio físico-químico de energía para generar la fluorescencia comienza cuando la luz de una longitud de onda particular incide en el fluoróforo de una molécula y absorbe un cuanto específico de luz, que excita un electrón de valencia desde su estado fundamental aun estado excitado, incrementando su nivel energético. Posteriormente, existe una disipación parcial de energía, es decir, el electrón se relaja rápidamente a un subnivel excitado de menor energía. Finalmente, la energía absorbida se disipa como luz de menor energía y, por lo tanto, de mayor longitud de onda, provocando que el material polimérico tenga la apariencia de una fuente de radiación. Sin embargo, el color de la fluorescencia puede coincidir o no con el reflejo coloreado intrínseco del objeto [26], [27], [28], [29].

Durante el fenómeno de la fluorescencia, la absorbancia representa un proceso por el cual una muestra absorbe radiación de manera selectiva, a una longitud de onda específica dentro del espectro visible. La intensidad de la absorbancia varía de acuerdo a la composición y concentración del material [30]. Asimismo, se puede calcular en función de la intensidad de la fuente de radiación incidente de acuerdo a la Ley de Lambert–Beer (Ec.1) [30], [31]. Esta ley describe la relación existente entre la radiación incidente I_0 sobre la muestra y la intensidad transmitida I por la muestra, en donde cuanto mayor sea el valor de la absorbancia A menor radiación será transmitida por la muestra [32]. Ygi6910*

$$\boldsymbol{A = log_{10} \frac{I_0}{I} = \frac{1}{T}} \qquad \text{Ec.1}$$

La relación entre la fluorescencia y la Ley de Lambert–Beer, Ec. 1, radica en su contribución al cálculo de la radiación que es absorbida por el MP antes de que ocurra el fenómeno de la fluorescencia. Esta absorbancia depende de dos supuestos externos, siendo el primero que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración, en este proyecto, del colorante RN empleada. El segundo supuesto es que la absorbancia es directamente proporcional a la longitud del camino de haz de luz [33], [34]. Por lo tanto, cuando se experimenta el fenómeno de la fluorescencia, los fluoróforos pueden entrar en ciclos repetitivos de excitación y emisión siempre y cuando no se produzca una destrucción o modificación covalente que interrumpa este proceso de manera irreversible [27].

La excitación de los electrones de valencia para generar la fluorescencia puede ser inducida por una lámpara, un diodo emisor de luz (LED) o una fuente láser. Sin embargo, la elección del tipo de fuente de luz se realiza de acuerdo a la gama de longitudes de onda que se necesite en cada investigación y la aplicación depende de propiedades tales como la monocromaticidad, direccionalidad, y características espaciales y temporales de dicha fuente de luz [26].

Para que el fenómeno de la fluorescencia se desarrolle de manera correcta, existen algunos parámetros y características esenciales para este fenómeno, tales como la eficiencia cuántica (n_f), el tiempo de vida de la fluorescencia, anisotropía, enfriamiento por fluorescencia, intermitencia de la fluorescencia, fotoblanqueo, transferencia de energía por resonancia. Por otro lado, este fenómeno

puede verse afectado por la rigidez molecular, los disolventes en donde se lleva a cabo el fenómeno, así como el pH y la temperatura [26], [35], [36]

PARTE EXPERIMENTAL

El TY se extrajo de sobres flexibles para usos varios, con una geometría cuadrada de dimensiones de entre 9–10 mm por lado. Dada la naturaleza de la muestra se realizó un lavado simple con agua y jabón para quitar cualquier impureza, además de un lavado simple con una solución de etanol al 50 % para retirar cualquier resto de grasa o suciedad.

Para la tinción del polímero se preparó una solución patrón de RN en metanol a 10 ppm y se dejó reposar en la oscuridad durante 24 horas a una temperatura de 4°C; a partir de esta solución se prepararon cinco disoluciones de concentraciones 1, 2, 4, 6 y 8 ppm. Posteriormente, se coloraron las muestras del polímero en 25 ml de cada disolución y se colocaron en un baño de ultrasonido Soner 203 marca ROCKER®, a 60 °C, durante 50 minutos y en completa oscuridad. Después de este tiempo se dejaron reposar durante 24 horas a temperatura ambiente. Por último, las muestras se sometieron a un lavado por triplicado con agua grado HPLC y se dejaron secar en la obscuridad a temperatura ambiente en una caja Petri.

Para la medición de voltaje se diseñó un SO, conformado por una base plástica diseñada en el software SolidWorks 2022 e impresa en 3D, que sostiene los componentes fundamentales del sistema para obtener una alineación del camino óptico y por ende buenos resultados. Como fuente de radiación se empleó un láser azul de longitud de onda de 445 nm, con una potencia de 2.5 W, por lo que se requirió un par de atenuadores para evitar que el láser dañase la muestra. Se construyó también un portamuestra, el cual fue colocado delante de un fotodiodo monolítico y amplificador de transimpedancia de alimentación única modelo OPT 101. Para la determinación de la fluorescencia y AT, las muestras teñidas de TY fueron colocadas una a una en un SO, el cual fue diseñado y fabricado especialmente para cumplir con este objetivo.

RESULTADOS

En la Tabla 1, se muestran los voltajes del láser azul (V_A), los voltajes de los plásticos sin teñir (V_L) y los voltajes de los plásticos teñidos a diferentes concentraciones de RN (V_0), así como el espesor de los plásticos usados.

Tabla 1. Valores promedio de voltajes del láser azul y del Tygon™ B-44-4X a distintas concentraciones.

Polímero: Tygon™ B-44-4X					Espesor: 0.03 cm
Concentración RN	0 ppm	2 ppm	4 ppm	6 ppm	8 ppm
V_A	4.248103	4.248103	4.252245	4.256049	4.256450
V_L	4.259276	4.259276	4.268392	4.274597	4.269722
V_0	4.259276	4.260868	4.272081	4.277090	4.272517

En la Figura 1 se muestra el comportamiento de los voltajes de las muestras de Tygon™ B-44-4X teñidas, en donde se puede observar que los voltajes aumentan ligeramente con respecto a la concentración de RN posiblemente por la existencia de fluorescencia. Los valores de los voltajes del polímero teñido se comportan de manera similar a una ligera curva de Gauss posiblemente atribuida a una saturación del colorante en el punto máximo de concentración de RN de 6 ppm. Es importante mencionar que la matriz este plástico es PVC, el cual contiene aditivos para darle propiedades para su uso específico, por lo que presentó una alta absorción del colorante, lo que se puede atribuir a su interacción con la estructura molecular del material [13]. En este sentido, se optó por ajustar los

voltajes a un modelo matemático de segundo orden, encontrando los valores de los coeficientes para el modelo polinómico de manera empírica, Ec. 2, los cuales son:

P_0 = 4.240918 P_1 = 0.011864 P_2 = 0.000987

Por lo que la ecuación ajustada queda expresada como:

$$V_{prom}(C) = 4.240918 + 0.011864 \cdot C - 0.000987 \cdot C^2 \quad \text{Ec.2}$$

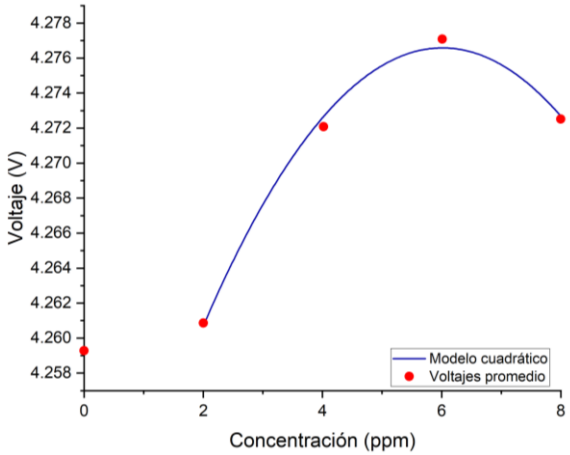


Figura 1. Comportamiento de los valores de voltaje del Tygon™ B-44-4X teñido obtenidos con el modelo polinómico cuadrático.

Sin embargo, se puede observar que el modelo no se ajusta a todos los voltajes medidos, pues el tramo conformado por las concentraciones de 0 a 2 ppm no se ajusta con el comportamiento del modelo polinomial de segundo orden. Por lo tanto, para explicar físicamente el fenómeno de la AT de los diversos polímeros y el colorante RN y encontrar un mejor ajuste se propone un modelo óptico matemático que implica diversos parámetros ópticos como la transmitancia, modelada con la Ley de Lambert–Beer, la luz perdida por dispersión debido a las imperfecciones de las muestras, la luz absorbida por las muestras, y la fluorescencia generada, que pueda sumarse a los voltajes de salida de las muestras teñidas, basada en la eficiencia cuántica (η_f) del RN [37], [38]. En la Tabla 2 se muestra la comparación de variables para proponer el modelo óptico matemático.

Tabla 2. Comparación de variables de Ec. 2 y Ec. 3

Modelo Polinómico	Modelo Óptico Matemático
P_0 – Término independiente	V_0 – Voltaje base, sin pérdidas ni absorciones
P_1 – Coeficiente lineal	β – Factor de dispersión, pérdidas por dispersión, el cual afecta linealmente a la concentración
P_2 – Coeficiente cuadrático	α – Coeficiente de absorción de la Ley de Beer-Lambert, el cual influye de manera exponencial en la transmitancia
No presente	η_f – Eficiencia cuántica de la fluorescencia

Con la sustitución de las variables de la Ec. 2 por las variables antes mencionadas, se obtiene la ecuación del modelo óptico matemático, Ec. 3, la cual tiene un ajuste a los voltajes promedio del polímero, ver Figura 2.

$$V_{opt}(C) = V_0 \cdot e^{-\alpha CL} + (1 - e^{-\alpha CL}) \cdot \eta_f - \beta C \quad \text{Ec. 3}$$

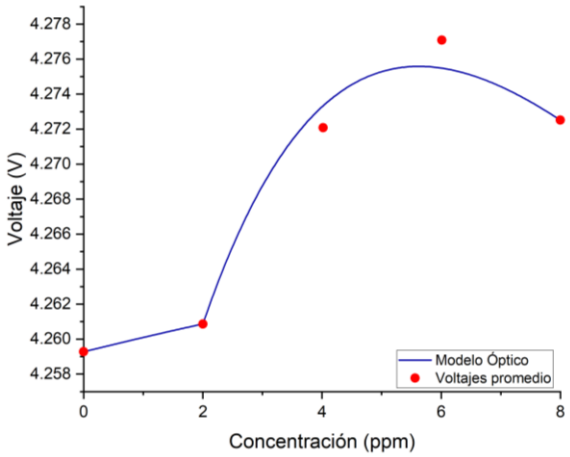


Figura 2. Comportamiento de los voltajes obtenidos con el modelo óptico del Tygon™ B-44-4X.

Dado a que el modelo óptico contempla factores que ocurren durante el fenómeno de la fluorescencia, se tiene un mejor ajuste al comportamiento de los voltajes promedio del TY. Con base a la Figura 2, la concentración de 6 ppm de RN representa el voltaje máximo del polímero, lo cual indica que la fluorescencia en ese punto es más alta y por ende es el punto en que el TY presenta una AT máxima. Sin embargo, para comprobar que realmente existe esa AT entre el colorante y el polímero se utilizó espectroscopía Raman para descartar que el incremento en los voltajes se atribuyera a cualquier subida de voltaje durante la experimentación. En la Figura 3 se muestran los espectros Raman de TY para cada concentración de RN. Los espectros Raman fueron obtenidos con un espectrofotómetro *DRX Raman Microscope* de la marca *Thermo Scientific*, a una longitud de onda de 780 nm.

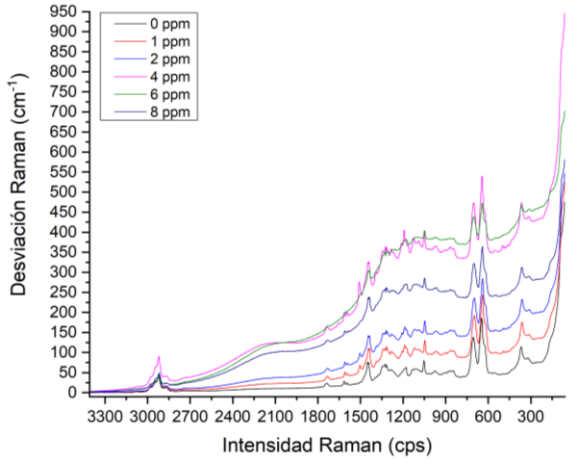


Figura 3. Espectros RAMAN de Tygon™ B-44-4X a diferentes concentraciones

De acuerdo con la Figura 3 se puede observar la presenciar fluorescencia en los plásticos teñidos, ya que los espectros presentan un desplazamiento con respecto a la línea base [39]. Cabe resaltar que el Tygon™ B-44-4X teñido mostró un incremento de la fluorescencia en incremento conforme la concentración aumentaba, hasta llegar a un máximo entre las concentraciones de 4 y 6 ppm, lo cual

indicaría que en esta concentración de RN el TY llega a su AT máxima, ya que se puede observar que la fluorescencia de 8 ppm presenta decaimiento.

CONCLUSIONES

Los MP son contaminantes emergentes presentes en todo el mundo, ya sea en ecosistemas acuáticos, terrestres o aéreos, lo cual dificulta su fácil detección representando así un reto para la comunidad científica para desarrollar y estandarizar una técnica específica. Sin embargo, la técnica de tinción de MP con colorantes lipofílicos fluorescentes como el RN parece ser una alternativa viable, pues tienden a presentar afinidad con diversos polímeros y el Tygon™ B-44-4X no fue la excepción. El TY mostró una AT desde concentraciones mínimas de RN, la cual iba aumentando de manera mínima conforme aumentó la concentración del colorante. No obstante, cuando se llegó a una concentración de 6 ppm el material presentó un voltaje máximo y por ende una saturación, lo que representó que a una concentración mayor la AT decayera, así como la fluorescencia. Sin embargo, al complementar el análisis con la espectroscopía Raman se observó que la mayor cantidad de fluorescencia se observa entre las concentraciones de 4 y 6 ppm, lo cual concuerda con los valores de los voltajes promedio de esas dos concentraciones, pues a pesar de tener un máximo de voltaje, la variación es muy pequeña entre las dos concentraciones, únicamente difiere en cinco milésimas del voltaje.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), “Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP),” CDMX, México, 2023. Acceso: 19 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/817333/INFCP_RE__2023.pdf

[2] V. C. Shruti, G. Kutralam-Muniasamy, F. Pérez-Guevara, P. D. Roy, e I. Elizalde-Martínez, “First evidence of microplastic contamination in ready-to-use packaged food ice cubes,” Environmental Pollution, vol. 318, 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120905.

[3] S. Calvo Anglada and E. B. Morales, “Detección y caracterización por tamaños de micro y nanoplásticos en muestras de interés ambiental,” Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2020. [En línea]. Disponible en: https://zaguan.unizar.es/record/97987/files/TAZ-TFG-2020-3200.pdf?version=1F

[4] G. Castañeta, A. F. Gutiérrez, F. Nacaratte, y Carlos A. Manzano, “Microplastics: a contaminant that grows in all environmental areas, its characteristics and possible risks to public health from exposure,” Revista Boliviana de Química, vol. 37, no. 3, Agosto 2020, doi: 10.34098/2078-3949.37.3.4.

[5] M. Elena Páez-Hernández, I. S. Ibarra Ortega, R. L. Camacho-Mendoza, and I. P. Silva, “Microplásticos (MP): Clasificación, aplicación y remoción,” Universidad Autónoma de Coahuila, vol. 75, pp. 6–21, Julio 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc75/317.-%20microplasticos.pdf

[6] A. Areanely, C. Salas, J. Carlos, A. Zeferino, and A. Vazquez, “Técnica de tinción de fluorescencia con Rojo Nilo y Safranina para la identificación de microfibras plásticas,” Encuentro de Expertos en Residuos Sólidos, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, Octubre 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/374946940

[7] Elisa. Rojo-Nieto and Tania. Montoto, “Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global”, Ecologistas en Acción, Enero 2017. [En línea]. Disponible en: https://agua.org.mx/biblioteca/informe-basuras-marinas-plasticos-y-microplasticos-eea/#:~:text=Basuras%20marinas%2C%20pl%C3%A1sticos%20y%20micropl%C3%A1sticos%20es%20un%20estudio,or%C3%ADgenes%2C%20impactos%20y%20consecuencias%20de%20las%20basuras%20marinas.

[8] C. Bollaín Pastor and D. V. Agulló, “Presencia de Microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública,” Rev Esp Salud Publica, vol. 93, pp. 28–29, Agosto 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17066277062

[9] X. Jiang et al., “Biocompatibility of Tygon® tubing in microfluidic cell culture,” Biomed Microdevices, vol. 17, no. 1, 2015, doi: 10.1007/s10544-015-9938-9.
[10] J. M. Joslin, S. M. Lantvit, and M. M. Reynolds, “Nitric oxide releasing tygon materials: Studies in donor leaching and localized nitric oxide release at a polymer-buffer interface,” ACS Appl Mater Interfaces, vol. 5, no. 19, 2013, doi: 10.1021/am402112y.
[11] F. Ippoliti et al., “Comparative spallation performance of silicone versus Tygon extracorporeal circulation tubing,” Interact Cardiovasc Thorac Surg, vol. 29, no. 5, 2019, doi: 10.1093/icvts/ivz170.
[12] Saint-Gobain, “TygonTM B-44-4X,” knowde Marketplace. Úlitmo acceso: 30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.knowde.com/stores/saint-gobain/products/tygon-b-44-4x
[13] United States Plastic Corporation, “Material Safety data sheet of TygonTM B-44-4X.” Último acceso:30 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.usplastic.com/catalog/files/msdss/MSDSB444X.pdf
[14] K. H. R. Jensen and R. W. Berg, “CLARITY-compatible lipophilic dyes for electrode marking and neuronal tracing,” Sci Rep, vol. 6, Septiembre 2016, doi: 10.1038/srep32674.
[15] L. C. Corrales Ramírez and L. Caycedo Lozano, “Principios físicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología Principios físicoquímicos de los colorantes,” Nova, vol. 18, no. 33, Febrero 2020, doi: 10.22490/24629448.3701.
[16] J. T. Cirulis, B. C. Strasser, J. A. Scott, and G. M. Ross, “Optimization of staining conditions for microalgae with three lipophilic dyes to reduce precipitation and fluorescence variability,” Cytometry Part A, vol. 81 A, no. 7, pp. 618–626, Julio 2012, doi: 10.1002/cyto.a.22066.
[17] J. C. Prata, V. Reis, J. T. V. Matos, J. P. da Costa, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, “A new approach for routine quantification of microplastics using Nile Red and automated software (MP-VAT),” Science of the Total Environment, vol. 690, pp. 1277–1283, Noviembre 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.060.
[18] W. J. Shim, Y. K. Song, S. H. Hong, and M. Jang, “Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining,” Mar Pollut Bull, vol. 113, no. 1–2, pp. 469–476, Diciembre. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.049.
[19] P. Greenspan and S. D. Fowler, “Spectrofluorometric studies of the lipid probe, nile red,” J Lipid Res, vol. 26, no. 7, pp. 781–789, 1985, doi: 10.1016/s0022-2275(20)34307-8.
[20] P. Greenspan, E. P. Mayer, and S. D. Fowler, “Nile Red" A Selective Fluorescent Stain for Intracellular Lipid Droplets,” J Cell Biol, vol. 100, pp. 965–973, Marzo 1985, [En línea]. Disponible en: http://rupress.org/jcb/article-pdf/100/3/965/1051509/965.pdf
[21] J. Valido and A. de la, “Determinación del contenido lipídico en ‘Crypthecodinium cohnii’ por citometría de flujo,” Septiembre 2003. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10553/11633
[22] D. Marcano, Introducción a la Química de los Colorantes, Segunda. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, 2018. [En línea]. Disponible en: https://acfiman.org/wp-content/uploads/2023/01/introduccion-a-la-quimica-de-los-colorantes.pdf
[23] I. G. Garrido Fariña, M. Á. Cornejo Cortés, and V. M. López Pérez, Colorantes para laboratorios de ciencias básicas. Cuautitlán, México: Ediciones Cuautitlán, 2021.
[24] J. Cegarra, P. Puente, M. Pepió, and J. Azuaga, “El factor de afinidad y su aplicación a la tintura optimizada en foulard,” Biol. Intextar, vol. 91, pp. 45–61, 1987. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/6256/Article04.pdf?sequence=1
[25] G. E. Pallo Cuichán, “Análisis comparativo de la Afinidad Tintórea de colorantes reactivos amarillo, azul y rojo en tejidos de fibras celulósicas,” Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10669
[26] D. E. Zacharioudaki, I. Fitilis, and M. Kotti, “Review of Fluorescence Spectroscopy in Environmental Quality Applications,” Molecules, vol. 27, no. 15, Agosto. 2022, doi: 10.3390/molecules27154801.
[27] H. C. Ishikawa-Ankerhold, R. Ankerhold, and G. P. C. Drummen, “Advanced fluorescence microscopy techniques-FRAP, FLIP, FLAP, FRET and FLIM,” Molecules, vol. 17, no. 4, pp. 4047–4132, Abril. 2012, doi: 10.3390/molecules17044047.
[28] J. Marshall and S. Johnsen, “Fluorescence as a means of colour signal enhancement,” Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 372, no. 1724, 2017, doi: 10.1098/rstb.2016.0335.

[29] M. de J. Perea Flores and A. Peña Barrientos, “Fundamentos y aplicaciones de la microscopía de fluorescencia,” 23 de junio de 2022, Centro de nanociencias y micro y nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, México.
[30] L. V. Salgado and C. Vargas Hernández, “Medición de la absorbancia óptica de soluciones acuosas mediante la instrumentación virtual y el control Optical absorbance measurement of aqueous solutions using virtual instrumentation and control,” Scientia et Technica Año XIX, vol. 19, no. 1.
[31] I. J. Orlando-Guerrero, C. H. Bravo-Delgado, Z. J. Hernández-Paxtián, and A. A. Aguilar-Felipe, “Microscope as absorbance reader with utility in clinical analysis,” Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica, vol. 40, no. 1, Enero 2019, doi: 10.17488/RMIB.40.1.10.
[32] G. D. Christian, “Cálculos cuantitativos,” in Química Analítica, Sexta., A. L. Delgado-Rodríguez, Ed., México: McGraw-Hill/interamericana Editores, S.A. de C.V., 2009, Capítulo 16, pp. 474–476.
[33] M. Barzan and F. Hajiesmaeilbaigi, “Investigation the concentration effect on the absorption and fluorescence properties of Rhodamine 6G dye,” Optik (Stuttg), vol. 159, 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.01.075.
[34] A. Shapiro, “Can Beer Lambert law be applied to fluorescence based detection of enzyme activity?,” ResearchGate GmbH. Último acceso: 04 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/post/Can_Beer_Lambert_law_be_applied_to_fluorescence_based_detection_of_enzyme_activity/56e36ba648954cd3b5441943/citation/download
[35] NutanKaushik, M. Amir, and MymoonaAkhtar, “Analytical Chemistry / Instrumentation Atomic - Spectroscopy Factor Affecting Fluorescence and Phosphorescence,” e-PG Pathshala, Gandhinagar, Gujarat, India, Abril. 2025. [En línea]. Disponible en: https://epgp.inflibnet.ac.in/epgpdata/uploads/epgp_content/S000944AC/P001632/M028148/ET/1520579143Q1M11.pdf
[36] A. Bose, I. Thomas, and E. Abraham, “Fluorescence spectroscopy and its applications: A Review,” International Journal of Advances in Pharmaceutical Analysis, 2018, doi: https://doi.org/10.7439/ijapa.v8i1.4578.
[37] A. Ma. Delgado-Camón, “El efecto del entorno en la emisión de fluorescencia. Modelos teóricos y aplicaciones analíticas,” Doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 2012. [En línea]. Disponible:
https://digital.csic.es/bitstream/10261/64871/1/Delgado%20Cam%C3%B3n%2C%20MA.pdf
[38] C. A. Briones-Vázquez and A. Álvarez-Hernández, “Sondas fluorescentes, una revisión general: propiedades, diseño y aplicaciones,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 9, no. 17, pp. 9–16, Jul. 2021, doi: 10.29057/icbi.v9i17.7143.
[39] E. Smith and G. Dent, “Resonance Raman Scattering,” in Modern Raman Spectroscopy-A Practical Approach, Primera., Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd, 2005, Capítulo. 4, pp. 93–100. [En línea]. Disponible en: https://bbhegdecollege.com/assets/uploads/storage/1177/154043919-Modern-Raman-Spectroscopy-A-Pratical-Approach.pdf

CÁLCULO Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS ÓPTICOS EN FIBRAS ÓPTICAS MONOMODALES: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS COMPUTACIONALES Y SOFTWARES COMERCIALES

R. D. Rivas-Lozada*, J. Castrellon-Uribe

Laboratorio de Sensores Fotónicos. Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM. Avenida Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209 Cuernavaca, Morelos, México.

*roel.rivas@uaem.edu.mx

RESUMEN

La propagación del modo fundamental ($LP_{0,1}$) en fibras ópticas unimodales (*FOU*) bajo la aproximación guiado débil, es un aspecto crucial para su estudio e investigación en sistemas sensores de fibra óptica (*SSFO*). Este modo óptico, influye directamente en el comportamiento de la radiación electromagnética (*EM*) que se propaga en el interior de las *FOU* y su interacción con el medio circundante. La constante de propagación de fase ($\beta_{0,1}$) es el parámetro óptico clave para describir dicha propagación, así como algunos fenómenos ópticos.

Este parámetro óptico se calcula al resolver la ecuación característica (dispersión) modal o de ecuaciones variantes, que depende de factores como el índice de refracción del núcleo (n_1), el índice del revestimiento (n_2), el radio del núcleo (r_0) y la longitud de onda de operación (λ_{op}). Por otro lado, emplear herramientas tecnológicas tales como; algoritmos o programas computacionales permiten calcular soluciones precisas de la β_{01}. Sin embargo, la consideración de las cifras significativas tanto para los valores iniciales como para los valores finales determinan la calidad del estudio, análisis y los resultados del comportamiento del modo $LP_{0,1}$.

En este trabajo, se presenta el cálculo y análisis de algunos parámetros ópticos en *FOU* como la $\beta_{0,1}$. Para calcular este parámetro se consideraron cinco ecuaciones diferentes con un algoritmo computacional particular para cada ecuación característica, dos de estos son basados en los métodos numéricos de Newton-Raphson y la Secante. Los dos métodos numéricos fueron seleccionados por su estabilidad, rendimiento y número de iteraciones requeridas para el cálculo y análisis posterior. Además, se calculó este parámetro en tres softwares comerciales; RP Fiber Calculator®, ANSYS OPTICS® y COMSOL Multiphysics®. Las soluciones obtenidas fueron comparadas en términos de precisión para asegurar la confiabilidad de las soluciones numéricas de los algoritmos computacionales desarrollados con respecto a los resultados de los softwares comerciales.

La comparación de los valores de $\beta_{0,1}$ mostró una alta concordancia, validando así la fiabilidad del uso de estos algoritmos para un estudio en particular. Además, los resultados en ambos métodos numéricos presentan una convergencia efectiva cuando se eligen adecuadamente los valores iniciales, lo que asegura la estabilidad en el proceso del cálculo y sus soluciones.

Este estudio destaca la importancia de la ejecución exacta de las ecuaciones que calculan $\beta_{0,1}$ debido a que este parámetro impacta sobre otro parámetro óptico tal como el índice de refracción efectiva ($n_{0,1}^{eff}$). Los métodos numéricos evaluados ofrecen una alternativa eficaz y económica frente a software comercial costoso, con ventajas en términos de flexibilidad y control sobre los parámetros. Además, la selección de cifras significativas sigue siendo un aspecto crítico que influye directamente en la precisión de los resultados para su estudio-análisis del comportamiento y propagación del modo $LP_{0,1}$ al propagarse al interior de la *FOU*. Finalmente, este enfoque no solo permite realizar un análisis más detallado, sino que también abre la posibilidad de mejorar el diseño y optimización de dispositivos basados en fibras ópticas.

INTRODUCCIÓN

La fibra óptica (*FO*), introducida en los años 60, revolucionó las telecomunicaciones por su alta capacidad de transmisión, inmunidad electromagnética y versatilidad. Estas ventajas promovieron configuraciones ópticas orientadas a aplicaciones exigentes como los *SSFO* [1]. La *FO* es una guía dieléctrica que opera en frecuencias ópticas, con estructura cilíndrica coaxial compuesta por tres secciones: un núcleo y revestimiento, generalmente fabricados en material vítreo e inclusive de plástico, y un recubrimiento polimérico externo. En esta guía óptica, la radiación *EM* se propaga por el núcleo debido al fenómeno de reflexión interna total (*RIT*), cuya condición requiere que $n_1 > n_2$.

La capacidad de guiado en *FO*s depende del perfil de índice de refracción (*IR*), que puede ser escalonado (*FOIRE*) o gradual (*FOIRG*) [1, 2-5]. En las *FOIRE*, el núcleo posee un n_1 constante y, bajo ciertas condiciones, permite el guiado de un único campo *EM*: la propagación fundamental. Esta propiedad da lugar a la *FOU* [2-6], como las *SMF-28* comerciales, con diámetros típicos de $8.2/125\,\mu m$ (núcleo/revestimiento) [6], que garantiza una propagación estable y un análisis controlado.

El confinamiento óptico en *FOU* se describe al resolver las ecuaciones las ecuaciones *EM* de Maxwell, obteniendo soluciones modales exactas, discretas y guiadas. Destacando la solución modal de orden mínimo, energía baja y dos polarizaciones ortogonales asociadas a la componente X y Y [2-5, 21].

En FOs como la $SMF\text{-}28$, con $n_1 \approx n_2$, se cumple la condición de guiado débil permitiendo describir las soluciones como modos linealmente polarizados (LP) introducidos por *Gloge* (*1972*) [7]. Esta aproximación, generalmente, elimina la degeneración modal, representando el modo fundamental como $LP_{0,1}$, convergiendo a un valor único de la $\beta_{0,1}$ y facilitando su tratamiento analítico y numérico.

La $\beta_{0,1}$ distingue degeneraciones modales, describe el confinamiento y evolución espacial de la onda guiada, y permite derivar parámetros clave como el índice efectivo ($n_{eff}^{0,1}$), la potencia confinada en el núcleo ($\%P_{0,1}^{núc}$) y métricas asociadas al acoplamiento modal, campos evanescentes o criterios adiabáticos, cruciales para la sensibilidad en *SSFO* [8-9]. Su cálculo, exige resolver su ecuación característica modal, que vincula las propiedades ópticas y geométricas de la *FOU*.

Dicha ecuación, al ser trascendental y no admitir soluciones cerradas, requiere métodos numéricos como *Newton-Raphson* [10,16] para su resolución precisa. En la literatura, se han utilizado diversos lenguajes de programación y herramientas computacionales, especialmente en entornos como MATLAB® [10] y Mathematica® [6], así como plataformas comerciales como RP Fiber Calculator®, ANSYS Optics®, COMSOL Multiphysics® y FIMMWAVE® [11-13], todas con capacidades robustas para la resolución y caracterización modal de *FO*.

En este trabajo, se desarrollaron cinco algoritmos computacionales para resolver ecuaciones asociadas al cálculo de $\beta_{0,1}$, validados frente a tres softwares comerciales, incluyendo el código propuesto por *Martínez-Ríos et al.* [6]. Los resultados evidenciaron coherencia numérica, así como la eficiencia y bajo costo computacional de nuestras implementaciones. Un cálculo preciso de $\beta_{0,1}$ es esencial, ya que sustenta al análisis teórico y experimental, siendo clave la gestión de recursos computaciones y la asignación correcta de cifras significativas [14-15]. Este enfoque computacional-metodológico fortalece la comprensión del modo $LP_{0,1}$, promoviendo su continua investigación en dispositivos basados en *FO* con recubrimientos funcionales o modificaciones geométricas [8, 17].

TEORÍA

Esta sección aborda de forma breve; la propagación en guías ópticas, las condiciones para el guiado del modo fundamental, y el cálculo de parámetros ópticos claves en *FOU*.

Constante de propagación compleja en guías ópticas

En guías ópticas, la constante de propagación compleja (γ) [18] describe la evolución espacial, velocidad de fase, confinamiento óptico y pérdidas en el transporte de energía de una onda *EM*. Se compone de una parte real, la constante de atenuación (α), y una parte imaginaria, la constante de propagación de fase (β). Se expresa como:

$$\boldsymbol{\gamma}[m^{-1}] = \boldsymbol{\alpha}\left[\frac{Np}{m}\right] + i\boldsymbol{\beta}\left[\frac{rad}{m}\right]. \quad (1)$$

Derivación de las ecuaciones modales en $FOIRE$

La ecuación de onda *EM* se obtiene al resolver las ecuaciones de Maxwell en un medio lineal, isotrópico y sin fuentes libres, donde los campos eléctricos $(\vec{E})$ e intensidad magnética $(\vec{H})$ se propagan como ondas transversales. El comportamiento ondulatorio de dichos campos depende de las propiedades del medio, su simetría y las condiciones de continuidad.

Se considera una guía de onda óptica dieléctrica cilíndrica sin pérdidas como es la *FOIRE*, caracterizada por un perfil de *IR*:

$$\boldsymbol{n}(\boldsymbol{r}) = \begin{cases} \boldsymbol{n_1}, & \boldsymbol{r \le r_0} \rightarrow \text{núcleo} \\ \boldsymbol{n_2}, & \boldsymbol{r > r_0} \rightarrow \text{revestimeinto} \end{cases}. \quad (2)$$

Asumiendo continuidad en la interfase núcleo-revestimiento y considerar este último medio de extensión infinita. El análisis modal se plantea en el dominio frecuencial donde la solución parte de la ecuación de Helmholtz [2-5,18] de las componentes longitudinales E_z y H_z, responsables del comportamiento modal de propagación, descrita:

$$\begin{gathered} \boldsymbol{\nabla^2}\begin{pmatrix}\boldsymbol{E_Z}\\ \boldsymbol{H_Z}\end{pmatrix} - (\boldsymbol{\gamma_0^2} - \boldsymbol{\gamma^2})\begin{pmatrix}\boldsymbol{E_Z}\\ \boldsymbol{H_Z}\end{pmatrix} = \boldsymbol{0}, \\ \downarrow \\ \boldsymbol{\nabla^2}\begin{pmatrix}\boldsymbol{E_Z}\\ \boldsymbol{H_Z}\end{pmatrix} + (\boldsymbol{k^2} - \boldsymbol{\beta^2})\begin{pmatrix}\boldsymbol{E_Z}\\ \boldsymbol{H_Z}\end{pmatrix} = \boldsymbol{0}, \end{gathered} \quad (3)$$

donde, $\nabla^2\ (r, \varphi, z)$ es el operador laplaciano, γ_0^2 es la constante de propagación con las condiciones iniciales en términos de $k = n(r)\frac{2\pi}{\lambda_{op}}$ que es la magnitud del número de onda local.

La *Ecuación* (3) se plantea como un problema de eigenvalores, donde E_z y H_z son funciones propias y β el eigenvalor. Sus soluciones definen los modos de propagación, configuraciones autosostenidas que mantienen una distribución transversal.

En *FOIRE*, se destacan los modos guiados exactos, confinados principalmente en el núcleo y de cantidad finita. Dichos modos se obtienen al resolver la *Ecuación* (3) por el método de separación de variables, conduciendo a la solución total expresada en funciones de Bessel y exponenciales.

En el análisis modal, las condiciones de frontera determinan el acoplamiento entre E_z y H_z. Si no hay acoplamiento, surgen modos transversales: eléctricos (TE) si $E_z = 0$, o magnéticos (TM) si $H_z = 0$. Cuando ambos son distintos de cero, aparecen modos híbridos (HE o EH), con distinta dominancia transversal [2-4,21].

Cada modo se clasifica por dos números modales: el azimutal l, que define la simetría angular, y el radial m, establecido por los ceros de la función de Bessel en el núcleo. Así, los modos se etiquetan como $TE_{l,m}$, $TM_{l,m}$, $HE_{l,m}$ o $EH_{l,m}$. Cada modo se caracteriza por una distribución particular del campo transversal y un eigenvalor $\beta_{l,m}$, que determina su comportamiento en la *FOIRE*. El confinamiento modal exige cumplir que [5]:

$$\boldsymbol{k_2} \le \boldsymbol{\beta_{l,m}} \le \boldsymbol{k_1}. \quad (4)$$

El perfil escalonado (*2*) impone continuidad en la interfase, lo que restringe el término $k^2 - \beta^2$ en la *Ecuación* (3). Para caracterizar la propagación en cada región de la guía, se definen dos parámetros transversales adimensionales importantes, u y w [2-5]:

- En el núcleo ($n(r) = n_1$), donde $k_1^2 - \beta^2 > 0$; el parámetro $u = r_0 \sqrt{k_1 - \beta_{l,m}}$, describe el comportamiento oscilatorio del campo confinado.
- En el revestimiento ($n(r) = n_2$), donde $k_2^2 - \beta^2 < 0$; el parámetro $w = r_0 \sqrt{\beta_{l,m} - k_2}$, cuantifica el decaimiento exponencial del campo, es decir, su atenuación transversal.

Estos parámetros definen la frecuencia normalizada (V), que determina la cantidad y tipos de modos pueden propagarse; $V = \sqrt{u^2 + w^2} = \frac{2\pi}{\lambda_{op}}\ r_0\ \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda_{op}}\ r_0\ A.N.$, donde $A.N.$ es la apertura numérica.
Valores de $V < 2.405$ limitan la propagación al único modo guiado permitido: el fundamental.

Asimismo, los modos guiados generan campos evanescentes, consecuencia natural del decaimiento exponencial del campo fuera del núcleo impuesto por las soluciones de la *Ecuación* (3). Estos campos son clave en fenómenos como el acoplamiento modal en *SSFO*. Cabe señalar que la expresión matemática que rige formalmente el comportamiento modal en la *FOIRE* se conoce como *ecuación característica* o *de dispersión modal*, ampliamente documentada en la literatura [2-7]. No obstante, la ecuación central en este estudio es la que se presenta a continuación.

Cálculo de $\beta_{0,1}$ en FOU; expresiones
En la sección anterior se describieron los modos guiados exactos en *FOIRE*, destacando al modo hibrido exacto, $HE_{1,1}$ por ser el de menor orden y energía mínima. Este modo presenta dos polarizaciones ortogonales degeneradas $HE_{1,1}^{X/Y}$ caracterizada por la $\beta_{0,1}^{X/Y}$ para cada componente, sensible a imperfecciones o anisotropías geométricas [21].

Al imponer la condición de 'aproximación de guiado débil' ($n_1 - n_2 \ll 1$), la ecuación característica [2-7] se simplifica. En este contexto, y bajo condiciones geométricas y ópticas adecuadas, las *FOIRE* dan lugar a las *FOU*, eje de esta investigación. Estas guías propagan modos linealmente polarizados (LP), siendo más estables frente a perturbaciones que los modos exactos. En este régimen, el número azimutal es reemplazado de $l \to n$, permitiendo reagrupar las soluciones en familias $LP_{n,m}$.

El modo fundamental se aproxima como $LP_{0,1}^{X/Y}$, equivalente al modo $HE_{1,1}^{X/Y}$, conservando la distribución y simetría rotacional. Este modo, foco del presente estudio, se emplea en la fibra comercial *SMF-28*.

Algunas ventajas de las *FOU*:
- ✓ Modo único; puede propagar solo el modo fundamenta dentro de un rango de longitudes de onda.
- ✓ Campo evanescente amplio; por su pequeño núcleo y débil confinamiento, ideal para sensado.
- ✓ Simplicidad y bajo costo; que favorecen su aplicación académica y comercial.

Este modo, foco del presente estudio, se emplea en la fibra comercial *SMF-28*.

En el amplio cuerpo de literatura sobre el régimen de guiado débil, el comportamiento del modo fundamental y los parámetros ópticos asociados pueden describirse numéricamente o desarrollos asintóticos, como los presentados en el trabajo clásico de *Snyder* (1969) [19].

A continuación, se exponen diversas formulaciones matemáticas desarrolladas para calcular la constante $\beta_{0,1}$ del modo fundamental $LP_{0,1}$ en *FOU*.
1. Se inicia este apartado con la clásica ecuación característica modal bajo condiciones ópticas y geométricas generales:

$$\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{u}}\ \frac{\boldsymbol{J_0(u)}}{\boldsymbol{J_1(u)}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{w}}\ \frac{\boldsymbol{K_0(w)}}{\boldsymbol{K_1(w)}}. \qquad (5)$$

Esta formulación, ampliamente discutida en *Okamoto* (2006) [2], describe la condición de existencia de modos guiados en guías de onda cilíndricas. Las funciones de Bessel de primera especie $J_{m=1}(u)$

y de segunda especie modificada $K_{m=1}(u)$ reflejan la naturaleza oscilatoria y atenuante del campo en cada región.

2. Una variante algebraica de la ecuación característica anterior se obtiene al cambiar el orden de las funciones de Bessel, usando las identidades de simetría: $J_1 = -J_{-1}$ y $K_1 = K_{-1}$. reescribiéndola como:

$$\boldsymbol{u}\,\frac{\boldsymbol{J_{-1}(u\cdot r_0)}}{\boldsymbol{J_0(u\cdot r_0)}} = -\,\boldsymbol{w}\,\frac{\boldsymbol{K_{-1}(w\cdot r_0)}}{\boldsymbol{K_0(w\cdot r_0)}}. \tag{6}$$

Esta formulación alternativa, extraída de *Keiser* (2000) [3], presenta explícitamente los argumentos de las funciones de Bessel en función del r_0. Aunque equivalente en contenido, esta representación facilita observar con mayor claridad la dependencia geométrica del sistema.

3. Una forma particularmente útil de abordar la clásica ecuación característica del modo $LP_{0,1}$ consiste en reformularla mediante la constante de propagación de fase normalizada (b), definida como: $b = \frac{w^2}{V^2}$, donde $w^2 = \left(\frac{\beta_{0,1}}{k_0}\right)^2 - n_2^2$ y $V^2 = n_1^2 - n_2^2$. Este parámetro adimensional $b \in [0,1]$, proporciona una medida directa del grado de confinamiento del modo en el núcleo: valores próximos a 0 reflejan un campo más extendido hacia el revestimiento. Utilizando esta normalización, la ecuación característica modal se expresa como:

$$\boldsymbol{V\sqrt{1-b}}\,\frac{\boldsymbol{J_{-1}\left(V\sqrt{1-b}\right)}}{\boldsymbol{J_0\left(V\sqrt{1-b}\right)}} = -\,\boldsymbol{V\sqrt{b}}\,\frac{\boldsymbol{K_{-1}\left(V\sqrt{b}\right)}}{\boldsymbol{K_0\left(V\sqrt{b}\right)}}. \tag{7}$$

Esta forma alternativa fue presentada por *Martínez-Ríos et al.* (2012) [6], y permite visualizar de manera más clara la relación entre la b y V, facilitando el análisis teórico y numérico del modo $LP_{0,1}$.

4. Un enfoque distinto pero eficiente para estimar la constante $\beta_{0,1}$, sin resolver directamente las expresiones trascendentales anteriormente mencionadas, es mediante un enfoque asintótico basado en interpolaciones numéricas precisas.

5.

Esta formulación, documentada en el texto clásico de *Ghatak & Thyagarajan* (1998) [4], resulta particularmente útil en el intervalo de $1.5 \leq V \leq 2.5$, donde la *FOU* opera de manera eficaz. La expresión aproximada se define como:

$$\boldsymbol{\beta_{0,1}} \approx \frac{\boldsymbol{2\pi}}{\boldsymbol{\lambda_{op}}}\sqrt{\boldsymbol{b_{0,1}\,(n_1^2 - n_2^2) + n_2^2}}. \tag{8}$$

Donde, $b_{0,1}$ representa una constante de propagación normalizada ajustada empíricamente mediante la relación; $b_{0,1} = \left(\boldsymbol{A} - \frac{\boldsymbol{B}}{V}\right)^2$, con $\boldsymbol{A} = 1.1428$ y $\boldsymbol{B} = 0.9960$. Esta expresión concuerda con resultados precisos y agiliza significativamente los cálculos en condiciones prácticas.

6. Existen en la literatura dos estrategias ampliamente aceptadas para determinar la constante de propagación de fase del modo $LP_{0,1}$. Ambas se derivan a partir de una expresión basada en el parámetro adimensional u:

$$\boldsymbol{\beta_{0,1}} = \sqrt{\left(\frac{\boldsymbol{2\pi}}{\boldsymbol{\lambda_{op}}}\right)^2 \boldsymbol{n_1^2} - \left(\boldsymbol{u}/\boldsymbol{r_0}\right)^2}. \tag{9}$$

5.1. La primera estrategia consiste en resolver directamente la ecuación característica modal reescrita en función de u y V, obteniendo $\beta_{0,1}$ con alta precisión al incorporar de forma exacta la geometría y las propiedades del guiado débil:

$$\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{u}}\,\frac{\boldsymbol{J_0(u_r)}}{\boldsymbol{J_1(u_r)}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{\sqrt{V^2 - u^2}}}\,\frac{\boldsymbol{K_0\left(\sqrt{V^2 - u^2}\right)}}{\boldsymbol{K_1\left(\sqrt{V^2 - u^2}\right)}} \tag{10}$$

5.2. La segunda estrategia se basa en una formulación asintótica propuesta por *Snyder* (1969) [19], sin necesidad de resolver numéricamente la expresión clásica. En este enfoque, el parámetro adimensional u se aproxima en:

$$\boldsymbol{u \approx u_{\infty} \cdot e^{1/V}} \quad (11)$$

donde u_{∞} representa el valor límite característico de cada modo guiado, en este caso su representación está asociada al modo exacto $HE_{1,1}$, que se aproxima como el modo $LP_{0,1}$. Cuyo valor es $u_{\infty} \cong 2.405$, correspondiente a la primera raíz de la función de Bessel $J_0(u) = 0$. Sustituyendo esta aproximación en la *Ecuación* (9)*,* se obtiene una formulación analítica dependiente al parámetro V, lo cual permite estimar el valor de $\beta_{0,1}$ de forma rápida y eficiente. Dicha estrategia resulta útil para estudios teóricos y modelados preliminares donde se requiere una buena estimación inicial.

En conjunto, las distintas estrategias abordadas, exactas, aproximadas y asintóticas, permiten calcular o estimar con buena precisión el valor de $\beta_{0,1}$ en *FOU*. El análisis de estas soluciones muestra que la *Ecuación* (4) se modifica a [5]:

$$\boldsymbol{k_2 \cong \beta_{0,1} \cong k_1}. \quad (12)$$

Esta ecuación describe un confinamiento óptico débil, pero suficiente para mantener una propagación estable del modo fundamental. Esta condición también implica una fuerte presencia del campo evanescente en el revestimiento, aspecto clave para aplicaciones en *SSFO* de alta sensibilidad.

PARTE EXPERIMENTAL-COMPUTACIONAL

El cálculo preciso de la constante $\beta_{0,1}$ y del índice efectivo, $n_{eff}^{0,1}$ cuya relación es la siguiente:

$$\boldsymbol{n_{eff}^{0,1} = \frac{\lambda}{2\pi} \beta_{0,1}}. \quad (13)$$

El trabajo fue realizado a partir de un enfoque numérico centrado en el modo $LP_{0,1}$ en *FOU*.
Para ello, se desarrollaron algoritmos computacionales implementados en Python®, complementado con herramientas especializadas como RP Fiber Calculator®, ANSYS OPTICS® y COMSOL Multiphysics®.

Las expresiones presentadas en la sección teórica constituyen formulaciones exactas o aproximadas para la obtención del parámetro de propagación, abarcando desde enfoques clásicos, basados en la resolución de la ecuación característica modal trascendental, hasta técnicas de normalización adimensional con el parámetro de confinamiento b, desarrollos asintóticos, y aproximaciones empíricas. Cada metodología ofrece ventajas específicas en función del grado de precisión requerido, el régimen de operación modal y las limitaciones computacionales inherentes al análisis. En particular, los métodos asintóticos resultan altamente eficientes durante las etapas iniciales de modelado teórico, al proporcionar estimaciones precisas de los parámetros modales sin recurrir a esquemas numéricos intensivos. Se implementaron métodos numéricos basados en rutinas iterativas para garantizar la convergencia hacia soluciones físicamente viables.

El presente trabajo incorpora una estrategia computacional robusta y estructurada, orientada al análisis modal espectral y al cálculo de parámetros ópticos clave en *FO*, con especial énfasis en la caracterización del modo fundamental. El trabajo computacional se llevó a cabo en una computadora portátil de disco sólido; 12GB de RAM con procesador Intel Core i7 - 4° generación*.*
Esta estrategia se resume en la Figura 1, mediante un diagrama de flujo que ilustra los procedimientos numéricos, semi-analíticos y empíricos implementados.

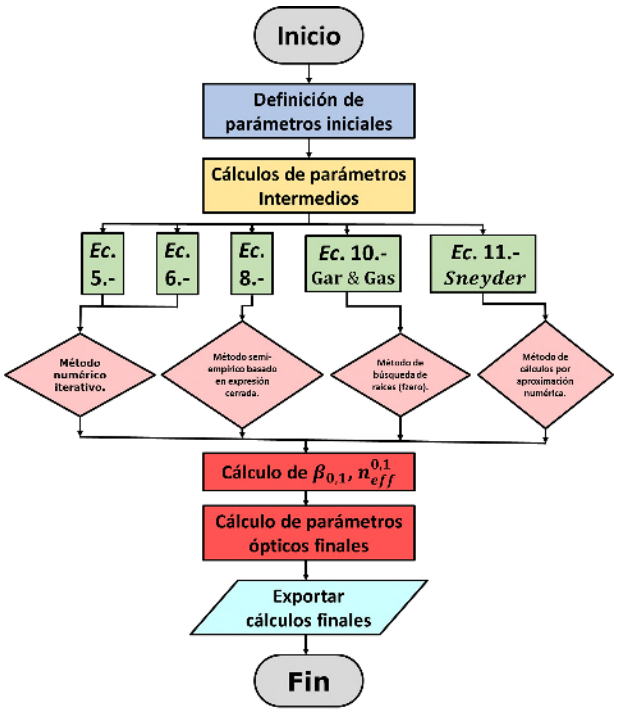


Fig. 1.- Diagrama de flujo de algoritmos con los métodos computacionales utilizados para el cálculo de parámetros ópticos para *FOU*, como la $\beta_{0,1}$.

El algoritmo inicia con la definición de parámetros iniciales, donde se especifican tanto las propiedades geométricas como las ópticas de la *FOU*. Los valores de estos parámetros iniciales son:

- Radio del núcleo, $r_0 = 4.1\ \mu m$.
- Índice de refracción del núcleo, $n_1 = 1.4458$.
- Apertura numérica, $NA = 0.14$.
- Índice de refracción del revestimiento, $n_2 = \sqrt{n_1^2 - NA^2} = 1.43900578$.
- Barrido espectral de longitud de onda, $\lambda\ \epsilon\ [1200{:}\,25{:}\,1700]\ nm$.

Estos parámetros iniciales fueron reportados por *Martínez-Ríos et al.* [6].
Además de:

- ${}^{n_1}/_{n_2} = 1.00472 \cong 1$, lo que permite aceptar la condición de guiado débil.
- Índice de refracción (IR) del medio propagante, n_x.
- Número de onda en función del medio de propagación, $k(n_x) = \frac{2\pi}{\lambda} n_x$, que permite condicionar el guiado en los cálculos posteriores.

A continuación, se procede al cálculo de parámetros intermedios, como el cálculo de V para determinar, teóricamente, la longitud de onda de corte que impone la condición de régimen unimodal.

Metodologías numéricas

La metodología computacional adoptada se estructuró en función de las ecuaciones (5) a (9), presentadas previamente para el análisis modal. Cada una de estas expresiones corresponde a estrategias computacionales distintas, las cuales se integran dentro de un esquema algorítmico diseñado para evaluar, validar y comparar diversos enfoques para el cálculo de la constante $\beta_{0,1}$.

El núcleo del algoritmo se fundamenta en la evaluación de cinco enfoques computacionales, resumidos a continuación:

- **Método numérico-iterativo**; Este método se basa en la resolución directa de la ecuación característica trascendental, mediante algoritmos iterativos como **Newton-Raphson** y el método de la **Secante**, con criterios de convergencia definidos por tolerancias numéricas estrictas.

El **método de Newton-Raphson** [16]; Es un algoritmo iterativo ampliamente utilizado para encontrar las raíces de funciones reales. Su eficiencia radica en la rápida convergencia hacia la solución, siempre que se parta de una estimación inicial suficientemente próxima a la raíz. El método se basa en la linealización local de la función $f(x_i)$ mediante su derivada $f'(x_i)$, según la siguiente expresión; $x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$.

Donde; x_i representa la aproximación actual. Este método requiere el cálculo explícito de la derivada, lo cual puede ser una limitación en funciones con alta complejidad simbólica.

El **método de la Secante** [16]; alternativamente, este método evita el cálculo de derivadas, utilizando una aproximación de la pendiente a partir de dos iteraciones previas.

La fórmula utilizada es; $x_{i+1} \approx x_i - \frac{f(x_i)(x_{i-1}-x_i)}{f(x_{i-1})-f(x_i)}$.

Aunque puede no converger en ciertos casos, bajo condiciones bien definidas ofrece una precisión similar al método de Newton-Raphson, con una implementación computacional más sencilla y robusta frente a funciones no diferenciables. La fórmula anterior gobierna al método de la Secante. Nótese que para poder calcular el valor de x_{i+1}, necesitamos conocer los dos valores anteriores x_i y x_{i-1}.

Ambos métodos se emplearon con un control estricto sobre los parámetros de entrada, incluyendo el número máximo de iteraciones, la tolerancia absoluta y relativa, y la validación física de la raíz encontrada, para asegurar soluciones físicamente significativas.

- **Método semi-empírico**; este enfoque utiliza expresiones cerradas obtenidas de la literatura especializada, basadas en desarrollos analíticos aproximados. Si bien no requiere iteraciones, su precisión está limitada a ciertos regímenes de operación, siendo útil para estimaciones preliminares o como punto de partida para algoritmos más sofisticados.
- **Método de búsqueda de raíces (*fzero*)**; Consiste en la implementación de algoritmos de localización de raíces provistos por los entornos de desarrollo Python® y MATLAB® particularmente mediante la función *fzero*. Esta técnica permite determinar el valor de $\beta_{0,1}$ que satisface la ecuación característica, partiendo de un intervalo inicial en el que se garantice un cambio de signo de la función objetivo. Su ventaja principal radica en su simplicidad de uso y estabilidad numérica.
- **Método de aproximación numérica de *Snyder***; que recurre a desarrollos de aproximación formulados por A. W. Snyder (1969), particularmente útiles en regímenes de operación unimodal para estimar su valor y el grado de confinamiento.

Con el objetivo de validar y comparar los resultados obtenidos mediante las distintas estrategias de cálculo del modo $LP_{0,1}$, se implementó una estrategia de verificación. La *Tabla 2* presenta una comparación detallada de cada método considerado las ecuaciones resueltas, las técnicas numéricas involucradas, el grado de personalización de los códigos, la precisión numérica impuestas o alcanzadas por los softwares comerciales (expresada en cifras significativas (c.s.)) y parámetros ópticos calculados de salida.

Tabla 1.- Metodología numérica de precisión controlada; comparación de herramientas de cálculo computacional aplicadas para el análisis modal en *FOU*. La información está basada en códigos propios (Python®) y capacidades específicas de softwares comerciales. La daga (†) en verde representa que los valores de $\beta_{0,1}$ no son calculados en el software correspondiente, por lo tanto, fueron cálculos mediante su *Ecuación* (13).

Valores de parámetros ópticos y geométricos iniciales:

$$R_1 = 4.1\mu m / n_1 = 1.4458 / NA = 0.14 / n_2 = \sqrt{n_1^2 - NA^2} = 1.43900578$$

$$n_1/n_2 = 1.00472 / k(n_x) = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_x / \lambda_0 \in [1200: 25 :1700]\ nm.$$

Herramienta computacional	*Ecuación*	*Técnica computacional*	*Código / Simulación*	*Precisión numérica de salida, # de cifras significativas (c.s.)*	*Salida: Más parámetros*
Mathematica / Python	7.-Martínez-Ríos	Resolución y optimización de ecuación característica implícita.	Adaptado y corregido.	10	$n_{eff}^{0,1}$
Python	6.-	Método de **Newton-Raphson**.	**Propio.**	12*	V, $\lambda_{corte}^{0,1}$.
	5.-	Método de la **Secante**.	**Propio.**	12*	
	8.- Gha & Thy	Evaluación directa por expresiones de constantes asintóticas.	**Propio.**	12*	$b_{0,1}$, $\lambda_{corte}^{0,1}$, verificación; V.
	9.- 10.- Gar & Gas	Cálculo numérico y búsqueda de raíces de la ecuación modal $LP_{0,1}$.	**Propio.**	12*	V, $\lambda_{corte}^{0,1}$.
	9.- 11.- Sneyder	Evaluación directa; $u\ (V, u_\infty)$.	**Propio.**	12*	u, V, $\lambda_{corte}^{0,1}$.
COMSOL®	$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) - (k_0 n)^2 \vec{E} = \vec{0}$	Método modal en el dominio de la frecuencia por elementos finitos.	**Propio.**	17	u, w, $\vec{E}$, V, + parámetros.
ANSYS OPTICS®	Internas y predefinidas	Método modal (frecuencias) por discretización en diferencias finitas.	**Personalizado.**	†7	$\beta_{0,1}$, $n_{eff}^{0,1}$, $n_{grupo}^{0,1}$, A_{eff}.
RP Fiber Calculator® (versión gratuita)	Internas y predefinidas	Métodos optimizados de modelos especializados.	**Personalizado.**	6 −7	$\beta_{0,1}$, $n_{eff}^{0,1}$, A_{eff}, $\%P_{núcleo}$.

En primer lugar, se utilizaron entornos de programación en Python® para resolver las expresiones descritas anteriormente mediante técnicas numéricas clásicas, tales como el método de Newton-Raphson y el método de la secante. Estos algoritmos requieren una inicialización adecuada del parámetro de búsqueda y garantizan la convergencia bajo condiciones de continuidad y derivabilidad de la función característica. La elección de los puntos iniciales, así como los criterios de tolerancia y número máximo de iteraciones, fueron cuidadosamente definidos para asegurar soluciones físicamente válidas y computacionalmente estables.

En el caso de Mathematica®, se adaptó y corrigió un código previamente publicado [6], con una configuración prestablecida de precisión de salida hasta 10 cifras significativas (c.s.). Por su parte, los códigos desarrollados en Python®, al estar escritos de forma personalizada, permitieron alcanzar precisiones superiores, limitadas a 12 c.s. (indicadas mediante un asterisco "*").

Para propósitos de validación numérica de alta precisión, se incorporaron herramientas comerciales que implementan técnicas numéricas avanzadas, descritas en la Tabla 1. En COMSOL® permite extraer valores con una precisión de hasta 17 cifras significativas para parámetros críticos como la constante $\beta_{0,1}$ e $n_{eff}^{0,1}$ del modo $LP_{0,1}$. No obstante, para otros parámetros derivados, la precisión alcanzada tiende a estabilizarse en torno a 7 cifras significativas, lo que ofrece una primera apreciación sobre los niveles de confiabilidad y exactitud alcanzables con soluciones numéricas directas frente a soluciones analíticas o semianalíticas.

Finalmente, todos los resultados obtenidos fueron organizados y exportados en estructuras de datos optimizadas para su posterior análisis y visualización. Este enfoque modular y metodológico, que combina técnicas iterativas, semianalíticas y comerciales, proporciona una robustez superior en el proceso de validación entre métodos, permitiendo detectar inconsistencias, validar tendencias y garantizar la coherencia física de los resultados.

En la siguiente sección, se presentan los resultados obtenidos del análisis y comparación de los valores calculados para las $\beta_{0,1}$ e $n_{eff}^{0,1}$ destacando la importancia de una asignación precisa de cifras significativas como criterio fundamental en la validación y aceptación de resultados numéricos en estudios teóricos y aplicaciones experimentales posteriores.

RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados derivados de la implementación computacional descrita anteriormente, organizados en cuatro casos de estudio que estructuran y articulan el análisis realizado. Cada caso fue diseñado con el objetivo de evaluar, validar y comparar los valores de los parámetros ópticos calculados, $\beta_{0,1}$ e $n_{eff}^{0,1}$, asociadas al modo fundamental.

En primer lugar, se llevó a cabo una reproducción controlada de los valores reportados por *Martínez-Ríos et al.* [6], quienes propusieron un conjunto de condiciones iniciales y parámetros empleados como referencia en este trabajo. Esta etapa permitió verificar la correcta implementación de los algoritmos propiamente desarrollados, estableciendo así un marco de validación confiable.

Posteriormente, se procedió a la comparación sistemática entre las diferentes estrategias de cálculo del parámetro de propagación $\beta_{0,1}$ y del $n_{eff}^{0,1}$ correspondiente. Los métodos empleados incluyeron esquemas iterativos, formulaciones cerradas semiempíricas, aproximaciones desarrolladas por *Snyder* y procedimientos de búsqueda de raíces provistos por entornos como Python®. Adicionalmente, se contrastaron estos resultados con cálculos de alta precisión realizadas en plataformas comerciales como COMSOL Multiphysics®, RP Fiber Calculator® y ANSYS OPTICS®.

Un aspecto central de este análisis consistió en examinar el efecto del truncamiento numérico sobre los valores obtenidos. Para ello, se calculó el error relativo porcentual asociado a la reducción del número de cifras significativas (c.s.) en los resultados finales, evaluando así el grado de sensibilidad de los cálculos frente a la precisión numérica disponible en cada herramienta. Esta evaluación permitió identificar el número óptimo de cifras necesarias para garantizar la confiabilidad de los resultados sin incurrir en sobrecarga computacional innecesaria.

Cálculo de $n_{eff}^{0,1}$ con valores iniciales de una *FOU* estándar *SMF-28*; Código de referencia Martínez-Ríos

Con el objetivo de validar los algoritmos numéricos desarrollados, se utilizó como punto de partida el código base propuesto por *Martínez-Ríos et al.* [6], el cual fue corregido y adaptado al entorno de programación en Python®. Este primer caso de estudio se centró en la replicación de resultados con los parámetros iniciales para una *FOU* del tipo *SMF-28* estándar.

El código de referencia calcula, primeramente, los valores del $n_{eff}^{0,1}$ asociados al modo fundamental por medio de la *Ecuación* (7)(7) con su método correspondiente en la Tabla 1. Los resultados se muestran en la Figura 2 para los cálculos de $n_{eff}^{0,1}$ y $\beta_{0,1}$, respectivamente.

En la Figura 1.1 ilustrada en la Figura 2, se observa que el $n_{eff}^{0,1}$ presenta una disminución suave a medida que aumenta la longitud de onda, comportándose dentro de los límites físicos impuestos por el $\boldsymbol{n_1}$ e $\boldsymbol{n_2}$, según lo establecido en la relación:

$$\boldsymbol{n_2 < n_{eff}^{0,1} < n_1}, \tag{14}$$

Este comportamiento confirma la validez física del análisis, y permite visualizar con mayor claridad el grado de confinamiento del modo dentro del núcleo, en comparación con la Figura 1.2, donde se representa la constante $\beta_{0,1}$, obtenida mediante la relación (13).

No obstante, una limitación visual de utilizar $\beta_{0,1}$ como parámetro principal de análisis es la proximidad extrema de sus valores al límite óptico definido por los números de onda del núcleo y del revestimiento, $k_{núcleo}$ y $k_{revestimiento}$, respectivamente. Esto dificulta distinguir claramente si el modo permanece guiado únicamente por el núcleo. Por tal motivo, se incluye un *insert* ubicado entre los $1500 - 1550\, nm$, donde se evidencia con mayor precisión el confinamiento del modo, cumpliendo con la condición de guiado establecida en la relación (12).

Este tipo de representación gráfica aporta información clave para el análisis modal preliminar del modo $LP_{0,1}$ en *FOU*, especialmente al evidenciar que, a longitudes de onda más largas, tanto $n_{eff}^{0,1}$ como $\beta_{0,1}$ tienden hacia el índice del revestimiento.

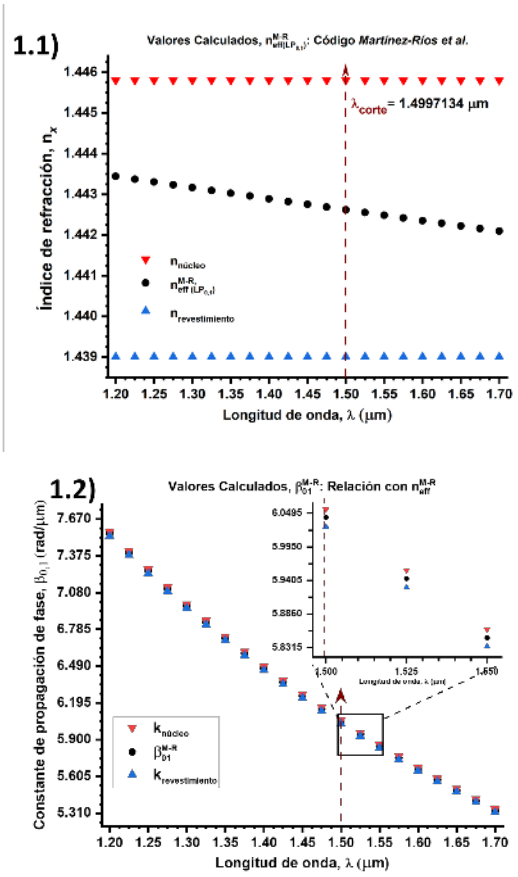


Fig. 2.- Representaciones graficas de parámetros iniciales correspondientes a una fibra *SMF-28* estándar [6]; 1.1) $n_{eff}^{0,1}$ calculados por el código por *Martínez-Ríos et al.*; 1.2) $\beta_{0,1}$ obtenidos por la relación (13).

Esta tendencia indica un debilitamiento progresivo del confinamiento modal, lo que implica una mayor extensión del campo evanescente en la interfaz dieléctrica, por lo que provoca disminución de % de la potencia propagada por el núcleo.

Asimismo, se identifica claramente la longitud de onda de corte modal, $\lambda_{corte} = 1.4997134\, \mu m$, por encima de la cual la fibra se comporta como unimodal, propagando exclusivamente el modo fundamental. Este valor es relevante, ya que define el rango espectral operativo de interés, especialmente en diseños orientados a una alta concentración de energía en el núcleo.

Finalmente, se destaca que el uso de gráficos del $n_{eff}^{0,1}$ facilita una estimación cualitativa del alcance del campo evanescente en el medio externo, al reflejar la disminución del confinamiento modal con la longitud de onda.

Este primer estudio proporciona así una base robusta de validación para el algoritmo iterativo implementado y establece un comportamiento de referencia del modo fundamental en la *FOU* estándar. Los resultados obtenidos serán fundamentales como punto comparativo frente a los análisis que se presentan en los siguientes casos de estudio conforme a la Tabla 1.

Cálculos de las $\beta_{0,1}$ e $n_{eff}^{0,1}$ con valores iniciales de una *FOU* estándar *SMF-28*; Análisis comparativo entre códigos propios y softwares comerciales respecto al código de referencia *Martínez-Ríos et al.*.

En esta segunda fase del estudio, se llevó a cabo un análisis comparativo detallado entre los valores obtenidos mediante distintos enfoques computacionales, tanto propios como comerciales, con respecto al código de referencia propuesto por *Martínez-Ríos et al.*. El objetivo fue evaluar la sensibilidad numérica y la precisión relativa de cada técnica, así como la consistencia del comportamiento modal al calcular $\beta_{0,1}$ y $n_{eff}^{0,1}$.

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos por los diversos métodos empleados.
La Figura 2.1 muestra los valores de $\beta_{0,1}$, mientras que su contraparte, la Figura 2.2, presenta los correspondientes valores de $n_{eff}^{0,1}$.

En primer lugar, se observa en la Figura 2.1 que los valores de $\beta_{0,1}$ presentan una aparente similitud visual, lo que inicialmente podría sugerir que los métodos son equivalentes. Sin embargo, al realizar el primer *insert* en la región espectral de los $1550\ nm$, de especial relevancia para aplicaciones en comunicaciones ópticas, se identifica una diferencia clara; el valor obtenido al emplear la *Ecuación* (11) insertada en la *Ecuación* (9) referenciada por *Snyder*, se sobresale respecto al resto, evidenciando una mayor desviación. Este valor se distingue desde la quinta cifra significativa (cuarta décima), lo cual lo convierte en una primera alerta sobre posibles discrepancias de precisión.

Para profundizar en estas diferencias, se aplicó un segundo *insert* en la Figura 2.1 cuyo análisis se profundiza hasta la quinta décima de los valores calculados.

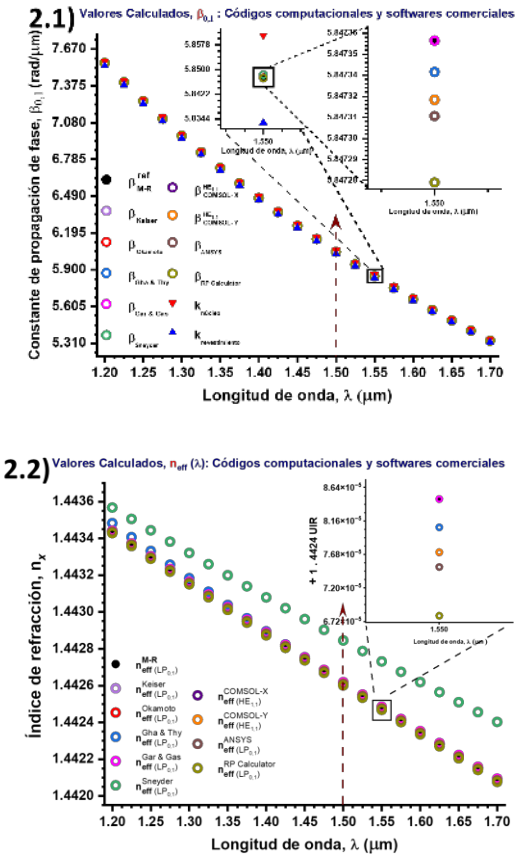


Fig. 3.- Representaciones graficas de parámetros iniciales correspondientes a una fibra *SMF-28* estándar [6]; 2.1) $\beta_{0,1}$ y; 2.2) $n_{eff}^{0,1}$, calculados al emplear todos los códigos computacionales y softwares comerciales.

En este nivel de resolución, los valores obtenidos mediante la ecuación de *Snyde*r quedaron fuera del margen de comparación, y se observó una clara distinción entre el resto de los métodos empleados. Como era previsible, los resultados generados a partir de las expresiones reportadas por *Okamoto*, *Keiser* y *García & Gasulla* [20] basada en la *Ecuación* (10), fueron idénticos en todas las longitudes de onda, diferenciándose únicamente en la forma en que se expresan, así como en las técnicas numéricas aplicadas. Cabe resaltar que estos valores resultaron ser los segundos más altos en magnitud.

Le siguen en magnitud los resultados calculados mediante el código propio que implementa la *Ecuación* (8). Inmediatamente después se posicionan los dos valores extraídos de COMSOL Multiphysics®, correspondientes a los modos exactos híbridos degenerados $HE_{1,1}^{X/Y}$, caracterizados por las $\beta_{1,1}^{X/Y}$, los cuales serán discutidos en mayor profundidad en la siguiente sección. Finalmente, se encuentra el valor más bajo de $\beta_{0,1}$, calculado mediante la herramienta RP Fiber Calculator®, evidenciando no solo menor precisión, sino también un uso limitado de cifras significativas, lo cual influye directamente en la confiabilidad del análisis modal.

Por su parte, la Figura 2.2 evidencia un comportamiento análogo respecto al ordenamiento de los valores de $n_{eff}^{0,1}$,dada su proporcionalidad directa con $\beta_{0,1}$. No obstante, la dispersión del valor generado mediante la ecuación de *Snyder* es aún más pronunciada, lo cual confirma que dicha expresión no es adecuada para estudios que requieran alta precisión, pues introduce errores que podrían comprometer la validez de análisis ópticos posteriores. A su vez, se confirma que el resto

de los valores de $n_{eff}^{0,1}$ presentan una diferencia sutil pero constante en la quinta décima, con un valor de referencia en torno a 1.4424 unidades de índice de refracción, lo cual refuerza que este parámetro ofrece una mayor sensibilidad para distinguir pequeñas discrepancias entre métodos numéricos.

Este segundo estudio comparativo pone de manifiesto que, aunque varios métodos coinciden en el orden general de magnitud, el uso de ciertas expresiones o herramientas puede inducir errores significativos si no se consideran adecuadamente las condiciones de validez y precisión numérica.

Análisis de los valores de $n_{eff}^{1,1}$ para cada modo exacto híbrido degenerado, $HE_{1,1}^{X/Y}$, calculados mediante el software COMSOL Multiphysics®.

Uno de los aspectos fundamentales que se aborda en esta sección es la forma en que softwares comerciales como COMSOL Multiphysics® calculan los modos de propagación en *FO*, particularmente cuando se espera obtener el modo fundamental $LP_{0,1}$. En estos entornos computacionales, debido a la formulación vectorial completa de las ecuaciones de Maxwell, el modo $LP_{0,1}$ se representa mediante su forma exacta híbrida degenerada, es decir, los modos $HE_{1,1}^{X}$ y $HE_{1,1}^{Y}$, cada uno correspondiente a una polarización ortogonal del campo electromagnético. En la Figura 4, centrándonos en la Figura 3.1 se presenta los valores del $n_{eff}^{1,1}$ para ambos modos degenerados como función de la longitud de onda, obtenidos a través de cálculos numéricos en dicho software. En esta representación, los modos $HE_{1,1}^{X}$ y $HE_{1,1}^{Y}$ son visualizados mediante círculos morados y naranjas, respectivamente.

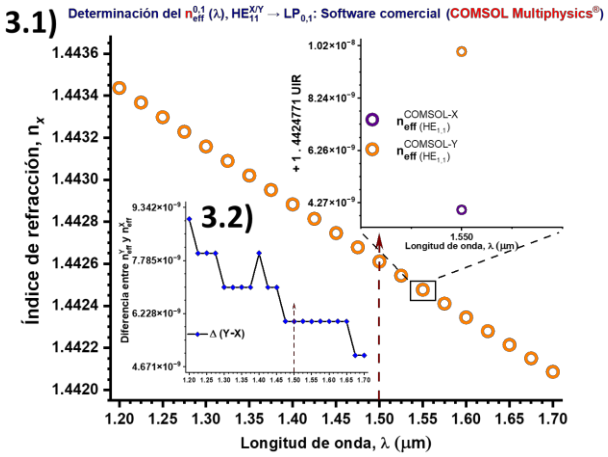


Fig. 4.- Visualización grafica; 3.1) valores de los modos exactos degenerados $HE_{1,1}^{X/Y}$ calculados por COMSOL®; 3.2) resta entre ambos valores, logrando obtener una diferencia de nueve ordenes de magnitud.

Como puede observarse, el comportamiento de ambos modos es monótonamente decreciente, lo cual es coherente con la disminución típica de $n_{eff}^{1,1}$ al aumentar la longitud de onda, dado que el confinamiento modal disminuye. Esta tendencia se mantiene con una precisión destacable a lo largo de todo el espectro considerado.

Un aspecto particularmente relevante se encuentra en la región centrada en $1550\,nm$, visualizada en el *insert* de la Figura 3.1. Allí se aprecia que el valor de $n_{eff/y}^{1,1}$ es ligeramente superior al de $n_{eff/x}^{1,1}$, revelando una diferencia pequeña pero resoluble por el software.
Esta diferencia está cuantificada mediante el parámetro $\Delta(Y-X) = n_{eff/y}^{1,1} - n_{eff/x}^{1,1}$, y se muestra, explícitamente en el *insert* de la Figura 3.2 sobre la Figura 3.1.

A pesar de que los modos $HE_{1,1}^{X}$ y $HE_{1,1}^{Y}$ son teóricamente degenerados en una fibra perfectamente cilíndrica e isótropa, las simulaciones indican una pequeña birrefringencia residual, la cual podría estar asociada a discretizaciones numéricas, asimetrías geométricas mínimas introducidas durante la malla, o errores de redondeo. Esta diferencia, sin embargo, se mantiene del orden de 10^{-9}, confirmando que la degeneración se conserva con alta precisión dentro de los márgenes tolerables aceptados en la literatura. De hecho, estudios como el de *Wang Z. et al.* [22] establecen que, si la diferencia entre los índices efectivos de los modos degenerados es inferior al quinto orden de magnitud, los valores pueden considerarse numéricamente equivalentes, representando así un único valor asociado al modo fundamental. Por lo tanto, en base a estos criterios y a la alta resolución alcanzada por los cálculos, se justifica adoptar, de aquí en adelante, el valor de $n_{eff/y}^{1,1}$ como representativo del $n_{eff}^{0,1}$ del modo $LP_{0,1}$ en los análisis comparativos y espectrales siguientes.
Esta sección confirma que este software comercial es capaz de capturar y resolver diferencias extremadamente pequeñas entre modos degenerados, lo cual no solo evidencia la precisión, sino que también permite distinguir con seguridad el comportamiento del modo fundamental aún en contextos donde las diferencias físicas son mínimas.

Asignación de cifras significativas y errores relativos numéricos: Código de referencia *Martínez-Ríos et al.*.
Una de las motivaciones en este trabajo radica en el análisis de la importancia de una adecuada asignación de cifras significativas en los cálculos relacionados con parámetros modales en *FO*. En contextos donde se requiere alta precisión numérica, como en el cálculo de parámetros ópticos claves, el número de cifras significativas empleadas no solo afecta la exactitud del resultado, sino también su confiabilidad en la comparación con valores teóricos y experimentales de referencia. Para estudiar este efecto, se adoptaron como referencia los valores obtenidos con el código desarrollado por *Martínez-Ríos et al.*, en el cual estableció una asignación de diez cifras significativas para todos los parámetros ópticos y modales calculados. Dichos valores fueron considerados como los valores "reales" o de referencia, sobre los cuales se estiman los errores relativos porcentuales introducidos por nuestros códigos y softwares comerciales que, en algunos casos, emplean menos cifras significativas o utilizan redondeo prematuro. Los errores relativos se calcularon mediante las siguientes expresiones [14-15]:

$$\boldsymbol{ER_{\beta}\%} = \left|\frac{\boldsymbol{\beta_{0,1}^{T.C.,\#c.s.}} - \boldsymbol{\beta_{0,1}^{M\text{-}R}}}{\boldsymbol{\beta_{0,1}^{M\text{-}R}}}\right| \boldsymbol{x100}, \tag{15}$$

$$\boldsymbol{ER_{n_{eff}}\%} = \left|\frac{\boldsymbol{n_{eff}^{T.C.,\#c.s.}} - \boldsymbol{n_{eff}^{M\text{-}R}}}{\boldsymbol{n_{eff}^{M\text{-}R}}}\right| \boldsymbol{x100}, \tag{16}$$

donde; $\boldsymbol{\beta_{0,1}^{T.C.,\#c.s.}}$ y $\boldsymbol{n_{eff}^{T.C.,\#c.s.}}$ representan los valores calculados mediante distintos códigos propios o plataformas comerciales, truncados a un número específico de cifras significativas sin aplicar redondeo, con el fin de evaluar su impacto directo sobre la precisión.

$\boldsymbol{\beta_{0,1}^{M\text{-}R}}$ y $\boldsymbol{n_{eff}^{M\text{-}R}}$ corresponden a los valores obtenidos con el código de *Martínez-Ríos et al.* utilizando diez cifras significativas, asumiendo que constituyen el valor más cercano al valor exacto teórico.

La Tabla 1 sintetiza la cantidad de cifras significativas utilizadas en las distintas respuestas de salida obtenidas en los cálculos. Por su parte, la Figura 5 presenta los errores relativos porcentuales calculados para cada caso. En particular, La Figura 4.1 muestra la evolución de $ER_{\beta}\%$ para diferentes cantidades de cifras significativas asignadas en $\beta_{0,1}$. Mientras que la Figura 4.2 presenta $ER_{n_{eff}}\%$ bajo las mismas condiciones para el índice efectivo $n_{eff}^{0,1}$.

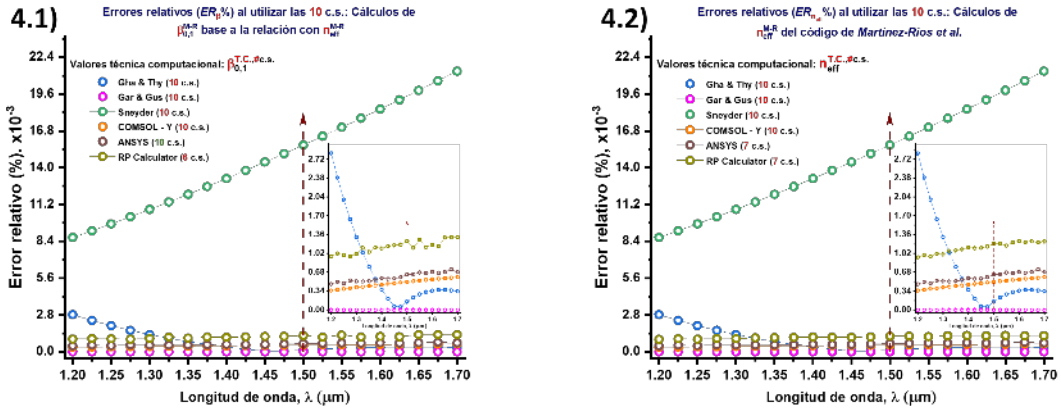


Fig. 5.- Grafica representativa del error relativo porcentual escalable de valores; 4.1) $\beta_{0,1}$ y; 4.2) $n_{eff}^{0,1}$. Con valores de referencia [6] con el resto de técnicas computacionales a 10 cifras significativas.

Como se observa en las Figuras 4.1 y 4.2 ubicadas en la Figura 5, los resultados son similares por lo que el análisis se llevó a cabo para los $\beta_{0,1}$. La Figura 4.1 compara el error relativo porcentual (ER_β%) en el cálculo de la constante de propagación de fase modal. Estos cálculos se realizan en comparación con un código de referencia, el de *Martínez-Ríos et al*., con el objetivo de evaluar la precisión de cada método. La mayoría de los cálculos se realizaron con 10 cifras significativas (c.s.), excepto para ANSYS® y RP Calculator®, que se realizaron con 7 c.s..

La Figura 4.1 muestra que el error relativo de la mayoría de los métodos computacionales se mantiene relativamente bajo y estable a lo largo de todo el rango de longitudes de onda.

Sin embargo, el método implementado por la expresión de *Snyder* (círculos esmeraldas) presenta un error relativo significativamente más alto y creciente con la longitud de onda, alcanzando valores superiores al 20% a $1.70\ \mu m$. Esto sugiere que este método en particular podría ser menos preciso o menos adecuado para rangos de longitudes de onda más grandes o para la estructura específica bajo análisis. Los demás métodos con sus respectivas técnicas computaciones muestran errores relativos muy bajos, en la mayoría de los casos por debajo del 1%, a lo largo de todo el espectro. Esto indica una excelente concordancia con el código de referencia de *Martínez-Ríos et al*..
El *insert* en las Figuras 4.1 y 4.2 permite una observación más cercana de los errores relativos de estos métodos de alta precisión. Se observa que ANSYS® y RP Fiber Calculator®, a pesar de usar 7 cifras significativas, mantienen errores muy competitivos, incluso ligeramente menores que algunos métodos que usan 10 cifras significativas en ciertos puntos.

La elección de 10 o 7 cifras significativas no parece ser el factor determinante principal para el error, ya que algunos métodos con menos cifras significativas aún logran una precisión comparable o incluso superior en ciertos puntos, tanto para los parámetros $\beta_{0,1}$ y $n_{eff}^{0,1}$.

Sin embargo, en la Figura 6 se extiende el análisis de errores relativos, esta vez centrándose al comparar los valores de referencia $\beta_{0,1}^{M\text{-}R}$ y con respecto a las $\beta_{0,1}^{T.C.,\#c.s.}$ al asignar 4 cifras significativas (c.s.) para las demás técnicas computacionales, representadas en la Figura 5.1.

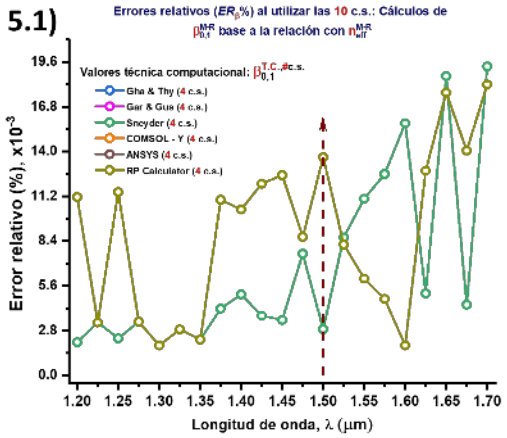


Fig. 6.- Error relativo (%) en $\beta_{0,1}$ calculado con diferentes métodos (4 c.s.) respecto al código de referencia (10 c.s.). Se destaca la importancia del criterio de cifras significativas para parámetros ópticos.

A diferencia de los errores evaluados con una precisión de diez c.s., los errores relativos correspondientes a una precisión reducida, como es el caso de, $\beta_{0,1}^{T.C.,4\ c.s.}$, exhiben fluctuaciones significativas a lo largo del espectro de longitudes de onda para todas las técnicas computacionales analizadas. Este comportamiento revela una mayor sensibilidad del parámetro modal $\beta_{0,1}$ cuando se limita el número de cifras significativas empleadas en el cálculo, particularmente a partir de la cuarta cifra. Tal asignación limitada de precisión puede inducir una amplificación de los errores relativos, especialmente en técnicas que involucran cálculos dependientes de condiciones iniciales.

La influencia de la precisión numérica no solo afecta la evaluación directa de $\beta_{0,1}$, sino que propaga inestabilidades hacia otros parámetros ópticos derivado.

De manera particularmente interesante, los resultados obtenidos con la expresión aproximada de *Snyder* muestran, bajo esta condición de baja precisión, errores relativos inferiores en ciertos rangos espectrales, lo cual resulta contradictorio respecto al análisis previo, realizado con mayor precisión, en el que esta técnica presentaba errores sistemáticamente mayores en comparación con otros métodos más rigurosos. Esta aparente anomalía sugiere que la influencia de la precisión numérica puede alterar el orden de confiabilidad de las distintas técnicas computacionales.

Este estudio destaca la relevancia de asignar adecuadamente cifras significativas en cálculos modales, dado que la precisión numérica afecta de manera desigual a distintas herramientas y métodos computacionales. La formulación matemática, el entorno de cálculo y el algoritmo de resolución son determinantes en la estabilidad de los resultados. Por tanto, el análisis del error relativo según la precisión se establece como un paso clave para validar modelos teóricos en óptica de fibra. Asimismo, se continuará con el estudio sobre este tema, que es crucial para el desarrollo y análisis ópticos teóricos posteriores al determinar el límite de la precisión en la toma de cifras significativas.

CONCLUSIONES

El análisis del modo $LP_{0,1}$ considerando los parámetros $\beta_{0,1}$ y $n_{eff}^{0,1}$ permite prever su guiado y la magnitud del campo evanescente. Las ecuaciones abordadas en este estudio facilitan algoritmos propios, cuyo aporte clave es su bajo costo frente a softwares comerciales. La precisión es crucial, ya que una asignación incorrecta del número de cifras significativas afecta la exactitud del cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Castrellon-Uribe, J. (2012). *Optical fiber sensors: an overview* (pp. 1-26). London, UK:: IntechOpen.
2. Okamoto, K. (2006). Fundamentals of optical waveguides. Elsevier.
3. Keiser, G. (2000). Optical fiber communications (Vol. 2). McGraw-Hill.
4. Ghatak, A. K., & Thyagarajan, K. (1998). An introduction to fiber optics. Cambridge University Press
5. Cerecedo-Núñez, H. H., Sánchez-Martínez, A., Padilla-Sosa, P., & Rodríguez-Zurita, G. (2009). Revisión y análisis experimental de modos LP nm en fibras ópticas. *Revista mexicana de física E*, *55*(1), 15-20.
6. Martinez-Rios, A., Monzon-Hernandez, D., Salceda-Delgado, G., & Torres-Gomez, I. (2012). *Long period fibre gratings*. INTECH Open Access Publisher.
7. Gloge, D. (1971). Weakly guiding fibers. *Applied optics*, *10*(10), 2252-2258.
8. Zhang, W., Lang, X., Liu, X., Li, G., Singh, R., Zhang, B., & Kumar, S. (2023). Advances in tapered optical fiber sensor structures: from conventional to novel and emerging. *Biosensors*, *13*(6), 644.
9. Brambilla, G., Xu, F., Horak, P., Jung, Y., Koizumi, F., Sessions, N. P., ... & Richardson, D. J. (2009). Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications. *Advances in Optics and Photonics*, *1*(1), 107-161.
10. Bhatia, V. (1996). *Properties and sensing applications of long-period gratings*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
11. Ibrahim, H. K., & Salih, A. R. (2020, December). Studying properties of propagated transverse modes through optical fibers. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2307, No. 1). AIP Publishing.
12. Santos, D. F., Guerreiro, A., & Baptista, J. M. (2013). Numerical investigation of a refractive index SPR D-type optical fiber sensor using COMSOL multiphysics. *Photonic sensors*, *3*, 61-66.
13. Ravets, S., Hoffman, J. E., Kordell, P. R., Wong-Campos, J. D., Rolston, S. L., & Orozco, L. A. (2013). Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission. *Journal of the Optical Society of America A*, *30*(11), 2361-2371.
14. Osses, A. (2011). *Análisis numérico*. JC Sáez Editor.
15. Gutiérrez, C. (2010). *Introducción a la metodología experimental*. Editorial Limusa.
16. R. L. Burden y J. D. Faires, *Análisis numérico*, 7ª ed., Thomson Learning, México, D.F., 2002, pp. 1–888
17. Wang, Q., & Zhao, W. M. (2018). A comprehensive review of lossy mode resonance-based fiber optic sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, *100*, 47-60.
18. Page de la Vega, J. E. (1988). *Propagación de ondas guiadas*. Servicio de Publicaciones. ETSI de Telecomunicación.
19. Snyder, A. W. (1969). Asymptotic expressions for eigenfunctions and eigenvalues of a dielectric or optical waveguide. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 17(12), 1130–1138.
20. Garcia, S., & Gasulla, I. (2020). Universal characteristic equation for multi-layer optical fibers. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 26(4), 1–11.
21. Woliński, T. R. (1999). Polarization in optical fibers. *Acta Physica Polonica A*, *95*(5), 749-760.
22. Wang, Z., Tu, J., Gao, S., Li, Z., Yu, C., & Lu, C. (2021, June). Transmission and generation of orbital angular momentum modes in optical fibers. In *Photonics* (Vol. 8, No. 7, p. 246). MDPI.

RULA Y OCRAS COMO ALTERNATIVA PARA LA PREVENCIÓN DE LESIONES MUSCULOESQUELÉTICAS EN LA FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES

Gabriela Nava Vigil, José Roberto Razo Hernández, Juan Antonio Magdaleno Zavala

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
gabriela.nv@irapuato.tecnm.mx.

RESUMEN

La investigación se enfoca en analizar los riesgos ergonómicos presentes en los procesos productivos de la fabricación de transformadores, tales como el manejo manual de cargas, posturas inadecuadas y movimientos repetitivos, estos considerados en los lineamientos de la norma NOM-036-STPS:2018. Se desarrolló un diagnóstico de la situación actual de la empresa, se identifican los principales problemas ergonómicos, esta evaluación refleja un nivel de incumplimiento de 87.67% con respecto a los requisitos del NOM-036-STPS-2018 en el rubro de salud. Posteriormente, se utilizan métodos de evaluación ergonómica, RULA (Evaluación Rápida de la Extremidad Superior), OWAS (Sistema de Análisis del Trabajo Ovako) y NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional), para analizar las posturas, esfuerzos y movimientos de los trabajadores en cada estación de trabajo. La priorización incluye elementos de frecuencia de tareas con la que se realiza cada actividad en el proceso de fabricación, nivel de riesgo evaluado de acuerdo con la NOM036, considerando factores como la postura, carga, fuerza y repetitividad. La clasificación de riesgos clasificados en tres niveles: alto, medio y bajo, de acuerdo con la combinación de frecuencia y nivel de riesgo. Con la evaluación del área de embobinado se determina que es una tarea que requiere precisión manual y movimientos repetitivos para el embobinado y el aislamiento. Pueden provocar tensión en hombros, cuello y muñecas. El análisis por el método OCRAS para la tarea de TAPS de bobina refleja que se realizan 100 vueltas cada 2 minutos, lo que hace de esta una actividad repetitiva que puede generar sobrecarga en manos y muñecas, generando un riesgo inminente de lesiones en manos y muñecas. Para reducir la repetitividad de movimientos y mejorar la postura de trabajo se realiza un diseño ergonómico, se implementan mesas giratorias para que el trabajador gire el componente y no sus brazos, lo cual disminuye los movimientos repetitivos de hombros y muñecas. Soportes de Brazo o Descansos Acolchados que alivien la carga en hombros y muñecas durante la tarea repetitiva de embobinado. Ajuste de altura de la mesa para que los codos del trabajador queden a un ángulo de 90° sin tener que inclinarse. Esto alinea las tareas a la altura de los codos, evitando sobrecarga en la zona lumbar. Gracias a la implementación de protocolos ergonómicos específicos, se observó una disminución del 25% en la incidencia de lesiones musculares relacionadas con la repetitividad de movimientos y el manejo de cargas pesadas en el área de embobinado. Así como un incremento al 92% en cumplimiento a la Normativa aplicable. Se destaca la necesidad de rediseñar las estaciones de trabajo para ajustarlas a las características físicas de los operadores, reducir el esfuerzo físico y mejorar las condiciones laborales generales. También se propone la estandarización de procedimientos de seguridad, la capacitación de los empleados en técnicas de levantamiento seguro, y la implementación de herramientas y equipos ergonómicos que faciliten las tareas productivas las cuales se ven incrementadas en un 35%. Con las acciones implementadas se da cumplimiento al 86% de los requisitos de la NOM036.

INTRODUCCIÓN

La industria de fabricación de transformadores enfrenta desafíos críticos en salud laboral debido a la naturaleza física de sus procesos. Operaciones como el embobinado manual, ensamblaje de núcleos magnéticos y soldadura de componentes exponen a los trabajadores a:

- Movimientos repetitivos (>30 ciclos/minuto en tareas de bobinado).
- Posturas forzadas (flexión lumbar >30° al manipular cargas >20 kg).
- Esfuerzos estáticos prolongados (hasta 4 horas continuas en estaciones fijas).

Estos factores generan lesiones musculoesqueléticas (LMES) que representan el 68% de las enfermedades ocupacionales en el sector eléctrico mexicano (STPS, 2023). Estudios previos evidencian que:

1. El 45% de los operadores de bobinado desarrollan tendinitis de Quervain en el primer año (Chinchilla, 2002).
2. Las posturas inadecuadas en ensamblaje incrementan un 300% el riesgo de lumbalgias (Bridger, 2019).

Aunque herramientas como RULA y OWAS se han aplicado en automotriz y aeronáutica, su implementación en fabricación de transformadores es limitada. Esta investigación aborda tres vacíos críticos:

- Falta de protocolos adaptados a tareas específicas (ej. ajuste de láminas magnéticas).
- Insuficiente integración entre evaluación ergonómica y rediseño de estaciones.
- Escasa medición del impacto económico de las LMES en productividad.

El presente estudio propone un enfoque integral mediante:

1. Diagnóstico con RULA (extremidades superiores), OWAS (postura global) y OCRAS (repetición de movimientos).
2. Rediseño de estaciones basado en ergonomía participativa (trabajadores-diseñadores).
3. Validación mediante indicadores de salud (incidencia de lesiones) y eficiencia (ciclos de producción).

Los hallazgos buscan establecer un modelo replicable para industrias de bienes de capital, alineado con normativas internacionales y mexicanas (NOM-036-STPS).

TEORÍA

La ergonomía laboral se centra en adaptar el trabajo al trabajador, optimizando el bienestar y la productividad. En entornos industriales como la fabricación de transformadores, las tareas repetitivas (embobinado) y posturas forzadas (ensamblaje de núcleos) generan riesgos musculoesqueléticos. Herramientas como RULA, OWAS y OCRAS permiten cuantificar estos riesgos para diseñar intervenciones basadas en evidencia (Bridger, 2019).

Evaluación rápida de extremidades superiores (rula)
Desarrollado por McAtamney y Corlett (1993), RULA es un método de screening que evalúa:

- Ángulos articulares de cuello, tronco, brazos y muñecas.
- Carga muscular estática durante tareas repetitivas.
- Asigna puntuaciones de riesgo (1-4), donde ≥3 requiere cambios inmediatos. Su aplicación en embobinado es crítica, pues identifica estrés en muñecas por rotaciones forzadas (Chinchilla, 2002).

Sistema de análisis postural owas
Creado por Karhu et al. (1977) en la industria siderúrgica finlandesa, OWAS:

- Clasifica 252 combinaciones posturales mediante 4 variables:
    - Espalda (4 opciones: recta, flexionada, girada, flexionada + girada).
    - Brazos (3 niveles: ambos bajo codo, uno sobre codo, ambos sobre codo).
    - Piernas (7 posiciones: sentado, de pie, arrodillado, etc.).
    - Carga (3 intervalos: <5 kg, 5-10 kg, >10 kg).

Prioriza correcciones con códigos de acción (1: no necesario; 4: urgente). En ensamblaje de transformadores, detecta riesgos lumbares al levantar núcleos magnéticos (Belmans & van Hertem, 2017).

Método ocras para actividades repetitivas
OCRAS (Ocupational Repetitive Actions) cuantifica:

- Frecuencia de movimientos por unidad de tiempo (ej. >10 ciclos/5 min en embobinado).
- Duración de la tarea y recuperación muscular.

Según Colombini et al. (2011), un índice OCRAS >15 indica riesgo alto de trastornos en extremidades superiores, vinculado a tendinitis por movimientos de pronación-supinación en soldadura.

Sinergia metodológica en la industria
La integración RULA-OWAS-OCRAS ofrece un diagnóstico integral:

- RULA focaliza extremidades superiores en tareas cíclicas.
- OWAS evalúa el cuerpo completo durante maniobras de carga.
- OCRAS cuantifica la repetitividad en procesos continuos.

Marco normativo aplicable

NOM-036-1-STPS-2018, Factores de riesgo ergonómico en el Trabajo-Identificación, análisis, prevención y control, manejo manual de cargas

- Límites para esfuerzos repetitivos en México (≥30 ciclos/min exige pausas).
- Cargas máximas conforme a lo establecido en la NOM-036-1-STPS-2018, como se muestra en la Tabla 1 Masa máxima que puede levantar o bajar un trabajador por edad y genero

Masa máxima (kg)	Genero	Edad (en años)
7	Femenino	Menores de 18
	Masculino	
15	Femenino	Mayores de 45
20	Femenino	Entre 18 y 45
	Masculino	Mayores de 45
25	Masculino	Entre 18 y 45

Tabla 1 Masa máxima que puede levantar o bajar un trabajador por edad y genero[1]

PARTE EXPERIMENTAL

Metodología integrada para el rediseño ergonómico

La investigación se desarrolló en tres fases secuenciales, aplicando un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) en colaboración con la empresa fabricante de transformadores

[1] (NORMA Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018, s.f.)

Fase 1: Diagnóstico de riesgos

Muestreo:

- 32 operadores (85% de la planta) con más de 2 años de experiencia.
- Enfoque en 4 áreas críticas: embobinado manual (45% del tiempo laboral), ensamblaje de núcleos (30%), soldadura (15%), pruebas de calidad (10%).

Herramientas aplicadas:

- **RULA**:
    - Filmación en cámara lenta de ciclos completos de trabajo.
    - Análisis de ángulos articulares en muñecas, codos y hombros durante tareas repetitivas (ej. enrollado de cobre).
    - Clasificación de riesgo mediante software ergonautas.

- **Cuestionario Nórdico**:
    - Observación directa con checklist estandarizado cada 15 minutos.
    - Evaluación y diagnóstico de las condiciones de trabajo que podrían estar contribuyendo al desarrollo de estas molestias entre los empleados. Tabla 2 Cuestionario nórdico

Fecha consulta: 18/10/2024
Sexo: M

¿Cuánto tiempo lleva realizando el mismo tipo de trabajo?
Años: 2 años Meses: 2 meses

En promedio, cuántas horas a la semana trabaja?
Horas: 10

Parte del cuerpo	No	Sí	Izq.	Der.
Cuello		☒		
Hombro		☒		☒
Codo	☒			
Muñeca		☒		☒
Espalda alta (región dorsal)	☒			
Espalda baja (región lumbar)		☒		
Una o ambas caderas/piernas		☒		
Una o ambas rodillas	☒			
Uno o ambos tobillos/pies	☒			

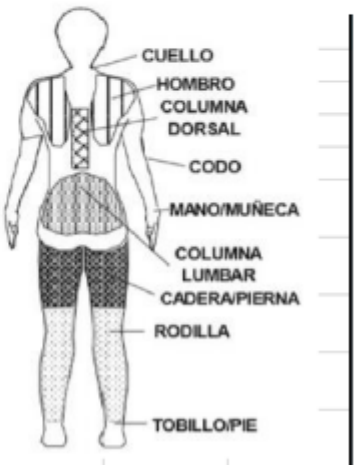


Tabla 2 Cuestionario Nórdico

- **OCRAS**:
    - Cronometraje de movimientos por minuto (ej. 38 taps/min en bobinado).
    - Cálculo del índice de riesgo según fórmula:

$$\textbf{Indice OCRAS} = \frac{(\textbf{Frecuencia} \times \textbf{Duración})}{\textbf{Tiempo recuperación}}$$
$$\textbf{Índice OCRAS} = \frac{\textbf{Tiempo recuperación}}{(\textbf{Frecuencia} \times \textbf{Duración})}$$

- Análisis ergonómicos de las actividades laborales para determinar los riesgos asociados a la carga física, mental y visual.

Fase 2: Diseño participativo de soluciones

Talleres cocreativos con ingenieros, operarios y terapeutas ocupacionales:

- **Problemáticas priorizadas**:
    - Puntuación RULA ≥3 en muñecas (76% de casos en embobinado).
    - Posturas OWAS Categoría 3-4 al cargar núcleos (>15 kg).
    - Índice OCRAS >22 (riesgo alto) en soldadura.

Se observan en las tablas 3 Carga física, mental y visual y 4 Movimientos repetitivos los riesgos identificados en cada una de las actividades evaluadas. Con base en estos riesgos, se realizan los diseños ergonómicos de las estaciones y los elementos de apoyo para llevarlas a cabo.

Área	Movimientos	Carga física	Carga Mental	Carga Visual
Embobinado	Bobinado de alambres	x		
	Corte de alambres	x		
	Colocación de aislantes			x
	Manipulación de herramientas y equipos	x		
	Inspección visual			x
Conexión	Conexión de cables		x	
	Aplicación de soldadura			x
	Apriete de terminales y conectores	x		
	Verificación de conexiones		x	x
	Pruebas eléctricas		x	x
Armador	Armado de núcleos	x		
	Colocación de bobinas	x		
	Conexión de terminales	x	x	x
	Aplicación de aislantes	x		
	Soldadura y unión de componentes	x		
	Instalación de accesorios y componentes auxiliares	x		
	Pruebas y verificación		x	x
Herrero	Corte de materiales	x		
	Soldadura	x		x
	Doblado y conformado	x		
	Manipulación de herramientas manuales	x		
	Montaje de estructuras	x		
	Manipulación de materiales	x		
Pintor	Preparación de superficies	x		
	Aplicación de pintura	x		
	Movimientos de barrido	x		
	Pintura de detalles	x		
	Limpieza de equipos	x		

Tabla 3 Carga física, mental y visual.

Área	Movimientos repetitivos
Embobinado	Bobinado de alambres
	Corte de alambres
	Colocación de aislantes
	Manipulación de herramientas y equipos
	Inspección visual
Conexión	Conexión de cables
	Aplicación de soldadura
	Apriete de terminales y conectores
	Verificación de conexiones
	Pruebas eléctricas
Armador	Armado de núcleos
	Colocación de bobinas
	Conexión de terminales
	Aplicación de aislantes
	Soldadura y unión de componentes
	Instalación de accesorios y componentes auxiliares
	Pruebas y verificación
Herrero	Corte de materiales
	Soldadura
	Doblado y conformado
	Manipulación de herramientas manuales
	Montaje de estructuras
	Manipulación de materiales
Pintor	Preparación de superficies
	Aplicación de pintura
	Movimientos de barrido
	Pintura de detalles
	Limpieza de equipos

Tabla 4 Movimientos repetitivos

- **Prototipado de intervenciones**:

Riesgo	Solución	Mecanismo
Flexión lumbar	**Mesas elevables neumáticas**	**Ajuste altura (70-110 cm) en 3 segundos**
Rotación de hombros	**Mesas giratorias magnéticas**	**Giro suave 360° con fuerza <2 Nm**
Estrés en muñecas	**Soportes braquiales de espuma viscoelástica**	**Reducción de presión en nervio mediano**
Todos los identificados	**Hojas de seguridad estándar**	**Hojas de trabajo con las medidas de seguridad y las posturas correctas.**

Capacitación sobre técnicas de levantamiento: En las tareas de carga de materiales pesados (50-140 kg), la capacitación sobre levantamiento adecuado y uso de equipos de asistencia puede reducir significativamente el riesgo de lesiones musculares.

Revisión de la frecuencia de las tareas repetitivas: Reducir el número de repeticiones o la duración de las actividades como el corte de material o la soldadura puede disminuir el riesgo de lesiones por esfuerzo repetitivo.

Reducción del tiempo de esfuerzo físico: En tareas como soldadura (10 horas al día, 12 veces), se mejora la distribución del trabajo o incorporar descansos más frecuentes para reducir la fatiga muscular.

Evaluación de las cargas: El levantamiento de núcleos de transformadores y el manejo de carretes y bobinas pesadas (de 32 a 50 kg) debe optimizarse para reducir la carga sobre los trabajadores.

Fase 3: Implementación y validación

Protocolo de transición:

1. Capacitación técnica (12 horas/operario) en uso de nuevas estaciones.
2. Período de adaptación con monitoreo biomecánico (EMG superficial).
3. Evaluación de impacto mediante:

    - **Indicadores de salud**:

        - Registro diario de molestias musculoesqueléticas.
        - Análisis comparativo de ausentismo por incapacidades médicas pre/post.

    - **Indicadores operativos**:

        - Tiempo ciclo de producción (cronómetro digital).
        - Tasa de errores en pruebas.

Variables controladas:

- Carga de trabajo.
- Cargas físicas.

Análisis estadístico

- Pruebas t-Student para muestras pareadas (pre/post intervención).
- Nivel de significancia: $p < 0.05$ (IC 95%).
- Software: ergonauta

RESULTADOS

Las intervenciones ergonómicas implementadas en áreas clave como embobinado y ensamblaje de núcleos generaron una reducción significativa en la prevalencia de lesiones musculoesqueléticas. En el área de embobinado, las molestias en muñeca disminuyeron en un 38%, pasando del 78% al 40% de los operarios afectados. Asimismo, los casos de tendinitis del hombro se redujeron en un 25%, validado mediante estudios de ultrasonido musculoesquelético. Estos resultados se atribuyen principalmente a la incorporación de mesas giratorias, que limitaron las rotaciones del hombro a menos de 60°, y a los soportes braquiales, los cuales redujeron la presión sobre los nervios en un 45%, según análisis de electromiografía (EMG).

En la línea de ensamblaje de núcleos, las lumbalgias se redujeron en un 32%. Este cambio se evidenció mediante la herramienta OWAS, que mostró una disminución de posturas de riesgo en categorías 3 y 4, pasando del 41% al 9%. Un factor determinante en esta mejora fue la instalación de mesas elevables, que permitieron mantener el ángulo lumbar por debajo de los 20° durante el 92% del tiempo de trabajo, en comparación con el 55% antes de la intervención.

Desde el punto de vista operativo, las mejoras ergonómicas también se reflejaron en una mayor eficiencia. El tiempo de ciclo en embobinado se redujo de 42 a 36 minutos por transformador, lo que

representa una mejora del 14.3%. Los errores en soldadura descendieron del 8.2% al 5.1%, mientras que los rechazos durante pruebas finales bajaron del 6.5% al 3.9%.

El impacto en el bienestar laboral fue igualmente notorio. Una encuesta aplicada a 10 operarios indicó un aumento del 27% en la comodidad postural, subiendo a nivel de riesgo óptimo con la evaluación con OCRAS Figura 1 Interpretación del nivel de riesgo.

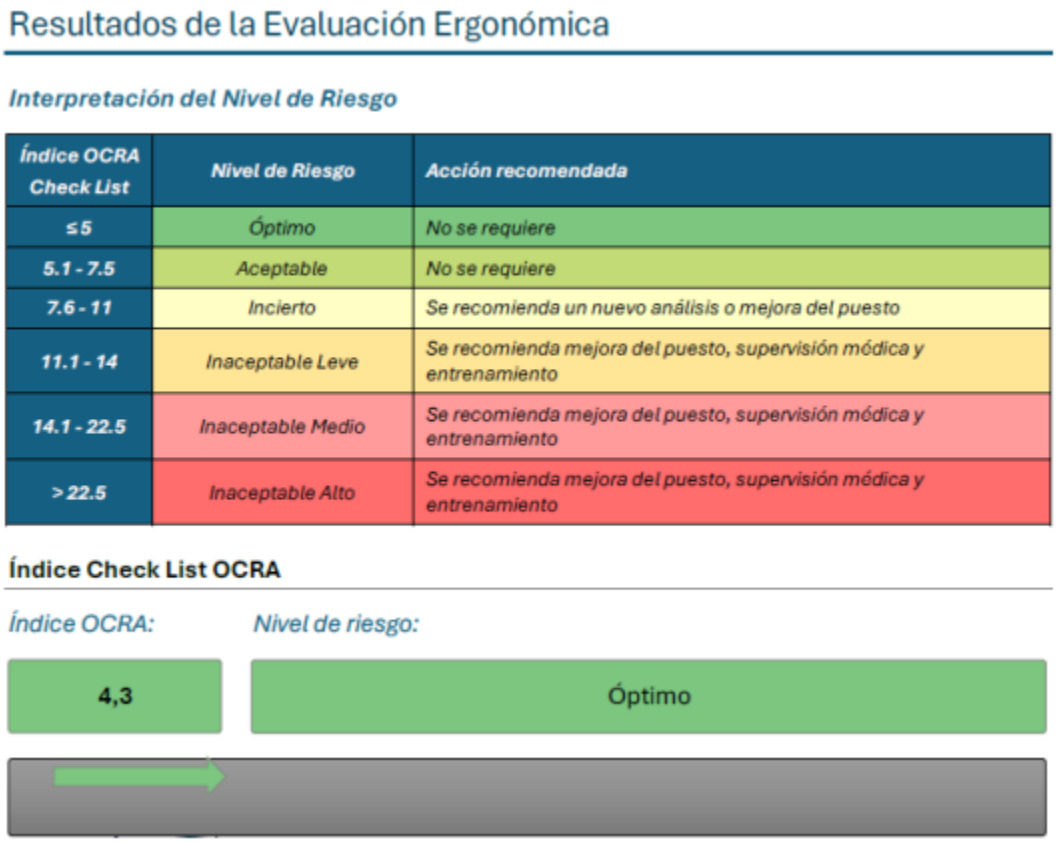


Figura 1 Interpretación del nivel de riesgo

Desde un enfoque estadístico, los resultados fueron respaldados mediante pruebas de t de Student para muestras pareadas. La reducción de lesiones arrojó un valor $t(31) = 6.28$; $p < 0.001$; $d = 1.24$, indicando un efecto grande. Por otro lado, el incremento en productividad fue también significativo, con $t(31) = 4.91$; $p = 0.0003$; $d = 0.97$. Entre las correlaciones destacadas se encontró que un índice OCRAS superior a 15 se asociaba con un aumento de errores en soldadura ($r = 0.79$; $p < 0.01$), mientras que un ángulo lumbar mayor a 30° se vinculó con una disminución en la velocidad de ensamblaje ($r = -0.68$; $p < 0.05$).

Finalmente, se identificaron hallazgos inesperados con gran relevancia. Uno de ellos fue el efecto cascada en la seguridad: los incidentes por resbalones disminuyeron en un 52%, como resultado indirecto de la redistribución ergonómica de las estaciones, que eliminó cables sueltos del área de paso. Asimismo, se observó una exitosa transferencia tecnológica, ya que el 73% de las soluciones desarrolladas fueron adaptadas al área de subestaciones eléctricas, ampliando así el alcance del proyecto. La figura 2 ilustra la relación entre el índice OCRAS y la productividad**, donde la zona verde (OCRAS <10) se asocia con los niveles más altos de eficiencia.**

Indicador	Pre-intervención	Post-intervención
Lesiones musculoesqueléticas	100% referencia	↓ **25%**
Productividad	100% referencia	↑ **15%**
Satisfacción laboral	100% referencia	↑ **15%**
Bienestar físico	100% referencia	↑ **18%**

Figura 2: Impacto de las mejoras ergonómicas

CONCLUSIONES

La implementación de protocolos ergonómicos basados en RULA, OWAS y OCRAS demostró ser efectiva para reducir lesiones y mejorar la eficiencia. La reducción del 25% en lesiones en embobinado confirma que ajustes como mesas giratorias y soportes acolchados mitigan riesgo y el 18% en bienestar físico evidencian que la ergonomía no solo previene daños, sino que optimiza el desempeño. Se recomienda extender estas intervenciones a otras áreas con alta demanda física, como soldadura y ensamblaje.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bridger, R. S. (2019). Introduction to ergonomics. CRC Press.
2. Chinchilla, R. (2002). Salud y seguridad en el trabajo. Editorial EUNED.
3. Belmans, R., & van Hertem, D. (Eds.). (2017). Power transformers: Principles and applications. CRC Press.
4. American National Standards Institute. (2020). *ANSI/ASME Y14.1M - Metric Drawing Sheet Size and Format*. ASME.
5. British Standards Institution. (2016). *BS ISO 269:2010 - Office machines and printing machines*. ISO.
6. (NORMA Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018, s.f.)

EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN CERÁMICOS SIO2/PDMS PARA MEJORAR LA CAPACIDAD ANTICORROSIVA

Carmen Salazar Hernández[1*], Ariel Jair Chi Dzil[1], Andrés Madriña Peralta[1], José Francisco Villegas Alcaraz[1,3], Mercedes Salazar Hernandez[2], Enrique Elorza Rodríguez[2] y Juan Manuel Mendoza Miranda[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional-UPIIG, [2]Universidad de Guanajuato-DI Campus Guanajuato Departamento de Minas, Metalurgia y Geología.[3]Instituto Politécnico Nacional-ESIME-Culhuacán
*msalazarh@ipn.mx

RESUMEN

La corrosión es un fenómeno fisicoquímico que causa la degradación de los materiales metálicos a través de procesos oxido-redox, y éste no es ajeno a la industria aeronáutica. Aunque en la actualidad el fuselaje de los aviones se construye de materiales compuestos, aún existen en operación una cantidad importante de aeronaves que empelan diferentes aleaciones de aluminio para el fuselaje y otras partes. Para disminuir los efectos de la corrosión se han propuesto diferentes métodos, entre los cuales se encuentran los recubrimientos anticorrosivos que consisten en adicionar sobre la superficie del metal una capa que actúa como barrera que evita el contacto del sustrato metálico con el agente corrosivo. En este proyecto se estudió el proceso de densificación en un cerámico híbrido SiO_2/PDMS con la finalidad de eliminar la porosidad e incrementar el comportamiento anticorrosivo del mismo; mejorando la estabilidad química del mismo. El cerámico fue sintetizado variando el porcentaje en peso de PDMS en la estructura del mismo; la cual fue del 10-40%peso, estos se aplicaron en una aleación de aluminio (Al-6061). La integración de la fase orgánica e inorgánica del cerámico se evaluó por espectrosopía de infrarrojo. El efecto del tratamiento térmico del material se determinó por IR-TF y microscopía óptica; por otra parte, la caracterización del material antes y después del tratamiento térmico indicó una mejora en la adherencia y dureza del cerámico. La capacidad anticorrosiva se determinó empleando el análisis de impedancia electroquímica (EIS) usando un medio corrosivo salino-ácido (NaCl al 3.5%w acidificada a un pH de 3) observando una mejora importante en la resistencia a la corrosión cuando se densifica el cerámico.

INTRODUCCIÓN

Para disminuir los efectos de la corrosión en los metales se emplean los recubrimientos anticorrosivos; donde el agente anticorrosivo empleado a nivel industrial son los anodizados de cromo; es decir se adiciona una capa de cromo que actúa como ánodo de sacrificio (se corroe por el metal que se protege). Aunque el cromo presenta excelentes propiedades anticorrosivas [1]; este es un elemento tóxico que debe ser remplazado para emplear recubrimientos más amigables [2]. Recientemente, C. Salazar-Hernández y colaboradores han desarrollado recubrimientos híbridos base sílice y polidimetilsiloxano (PDMS). Donde el PDMS se entrecruza en la red de sílice permitiendo obtener recubrimientos con alta estabilidad mecánica, adherencia y buena resistencia a la corrosión en el Al-6061; la estructura química de estos recubrimientos se muestra en la Figura; donde fragmentos de sílice formada a partir de las reacciones de policondensación del Tetraetilortosilicato (TEOS) se entrecruzan con las cadenas del polidimetilsiloxano (PDMS) [3-5].

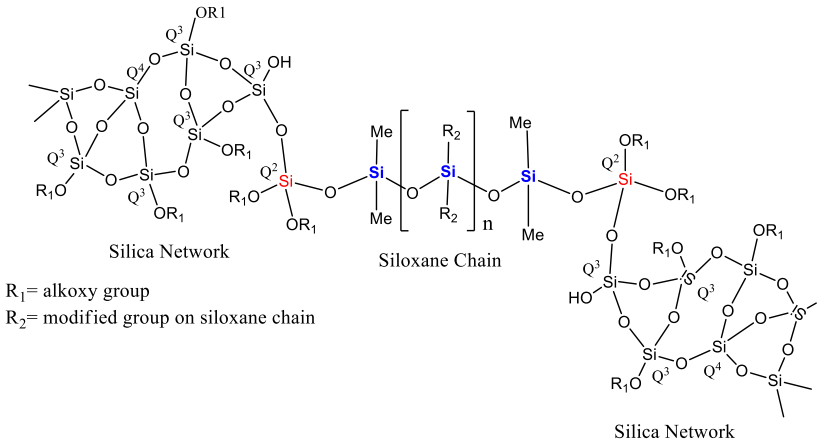


Figura 1. Estructura química del material híbrido SiO_2/PDMS [5]

En este trabajo se estudió el efecto del grupo funcional en la cadena del PDMS en el comportamiento anticorrosivo evaluado a través de la impedancia electroquímica (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) la cual simula el sistema electroquímico en equilibrio como un circuito eléctrico que tiene diversos componentes como son resistores, capacitores e inductores que pueden ir conectados de diversas formas (en serie o paralelo) [6,7]. La impedancia (Z) para cualquier sistema se calcula de acuerdo con la Ecuación 1; donde E es el potencial, I corriente, □ frecuencia y □□el ángulo de desfase. Esta expresión se divide en una parte real que se grafica en el eje X y una imaginaria que se grafica en el eje Y dando lugar a las curvas de Nyquist.

$$\boldsymbol{Z = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(i\emptyset) = Z_0(cos\emptyset + isen\emptyset)} \quad (1)$$

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de los Cerámicos SiO_2/PDMS.- Los recubrimientos fueron obtenidos a partir de la metodología sol-gel empleando tetra-etil-orto-silicato, TEOS (99%; Fluka) como reactivo de partida para la formación de la sílice y polidimetilsiloxano hidroxilo terminado (DMS-15; GELEST; 9912-32cst). Para ello se realizó una solución sol mezclando las cantidades indicadas en la Tabla 1; adicionando el 1%peso con respecto al TEOS de di-butil-di-laurato de estaño, DBTL (95%; Aldrich) que actuó como catalizador de policondensación promoviendo el entrecruzamiento de la fracción de sílice y las cadenas siloxana del PDMS [3,5]. Las soluciones sol se calentaron a 50ºC manteniendo la temperatura constante y se aplicaron a superficies de Al-6061 previamente tratadas con lija abrasiva del 200, 300, 400 y 600 para posteriormente lavar en baño de ultrasonido con agua destilada y etanol.

Tabla 1. Porcentaje de Composición para los Recubrimientos de SiO2/DMS-15

	TEOS (g)	DMS-15 (g)	DBTL (g)
SiO2/DMS15-1	10	1	0.01-0.02
SiO2/DMS15-2	10	2	0.01-0.02
SiO2/DMS15-4	10	4	0.01-0.02

Tratamiento Térmico de Densificación.- Después de haber secado los recubrimientos por 24 hr a temperatura ambiente, estos se sometieron al tratamiento térmico que se especifica en la Tabla 2, para ello se utilizó un mufla Felisa-340 con rampa de temperatura programable de 10ºC/min.

Tabla 2. Condiciones del tratamiento térmico de densificación

Tratamiento de Densificación	% PDMS	Temperatura (ºC)	Tiempo (min)	Tratamiento de Densificación	% PDMS	Temperatura (ºC)	Tiempo (min)
T1	10 y 20	50	15	T2	30 y 40	50	15
		80	120			80	120
		200	120			200	120
						400	60

Caracterización de los Recubrimiento

Espectroscopía Infrarrojo (IR-ATR).- Los espectros de infrarrojo se obtuvieron en un equipo ATR-FTIR Thermo Scientific Nicolet iS10; midiendo el promedio de 32 scans en una ventana espectral de 4000-600 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1}.

Microscopía óptica.- Se realizó la inspección visual de los cerámicos con y sin tratamiento térmico empleando un microscopio digital NJ-13415.

Ensayo de Adherencia.- Se calculó la fuerza necesaria para desprender el recubrimiento utilizando el método de ensayo de tracción mediante un equipo PosiTest AT-A, conforme a la norma ASTM D4541-22 [8]

Ensayo de dureza Leeb.- La dureza Leeb fue medida con un equipo UNI-T UT-347A siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM A956/A956M-17a [9].

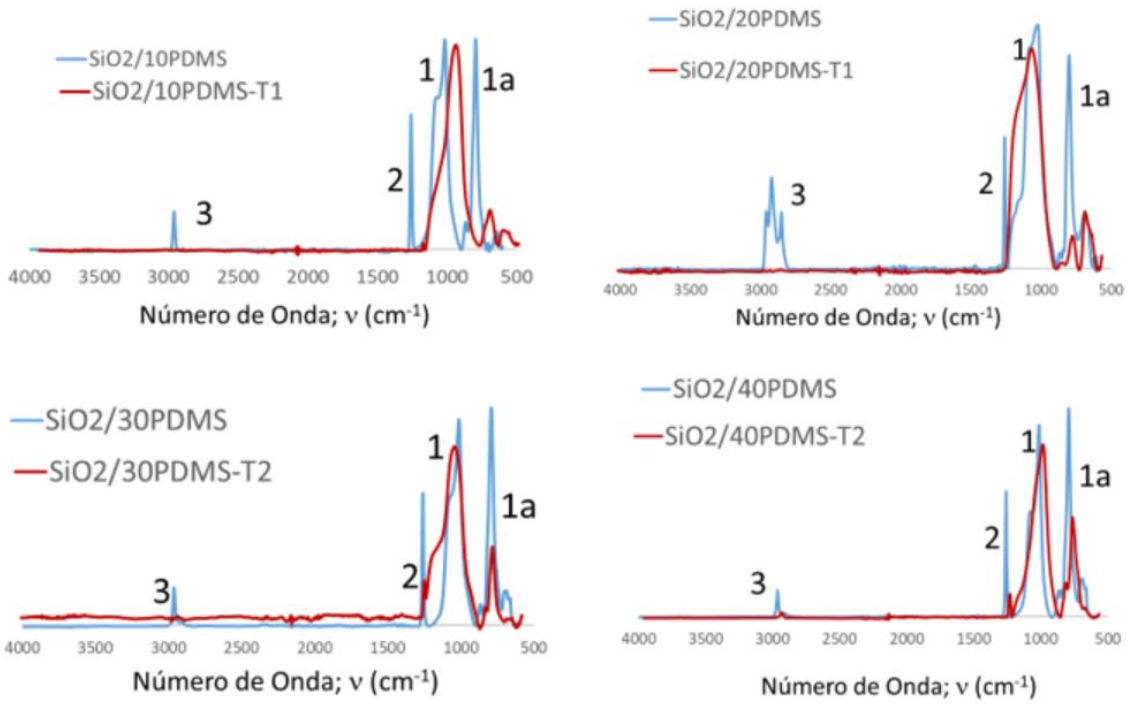
Evaluación de la Corrosión.- Los ensayos de impedancia electroquímica (EIS) se realizaron con un potenciostato Gamry-1010T empleando como medio corrosivo una solución salina de NaCl 5% peso acidificado con ácido clorhídrico a un pH de 3. La lectura se tomaron en un rango de frecuencia de 10000-0.1 Hz; empleando platino como contra electrodo y Ag/AgCl como electrodo de referencia.

RESULTADOS

Caracterización Química y Física de los Recubrimientos SiO_2/DMS-15

La Figura 2a muestra los espectros de infrarrojo obtenidos por ATR para los recubrimientos de SiO_2/DMS-15 con las diferentes concentraciones de cadena siloxana (10-40%peso); antes (graficas color azul) y después del tratamiento térmico (graficas color rojo). Las principales señales se remarcan con números; teniendo el enlace siloxano (Si-O-Si) de la red de la sílice a 1007 cm^{-1} (pico 1). Mientras que este enlace correspondiente para la cadena siloxano del PDMS (cadena lineal) se observa como una banda intensa delgada a 856 cm^{-1} (pico 1a); el enlace Si-C a 1257 cm^{-1} (pico 2) y el C-H de los grupos metilo como un triplete a 2917 cm^{-1} (pico 3). Después del tratamiento térmico; gráficas en color rojo, la señal Si-C (pico 2) es disminuida, así como los correspondientes picos para los grupos metilo (C-H; pico 3). Por lo que, se propone que el proceso de densificación permite la formación de la estructura propuesta en la Figura 2b; donde las cadenas del PDMS se co-condensan entre sí y con la red de sílice disminuyendo el contenido de materia orgánica [10].

(a)



(b)

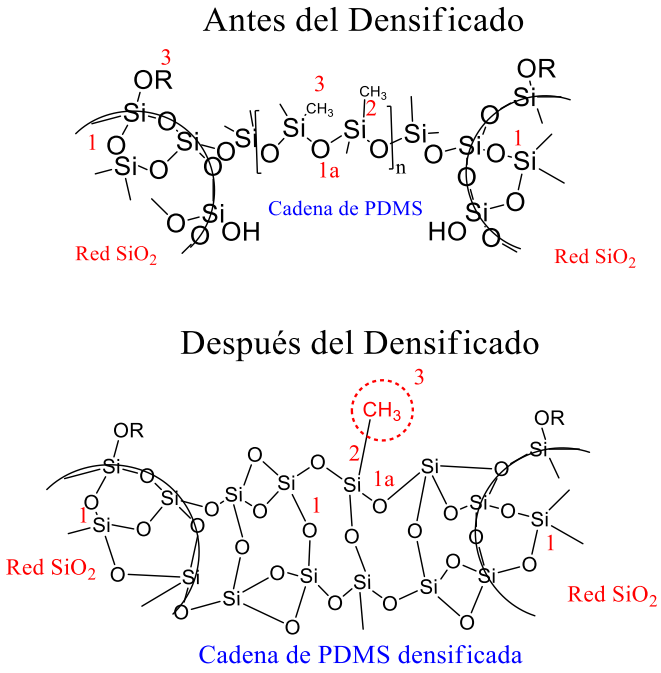


Figura 2. IR-FT (a) Espectroscopia para el SiO2/DMS-15 (b)

La Figura 3a muestra el efecto del tratamiento térmico sobre la dureza donde se puede observar un incremento lineal en la propiedad física de acuerdo con el incrementó de la cadena de PDMS en la

estructura del cerámico; antes del tratamiento de densificación la HL vario de 470-500 HL; después del tratamiento de densificación vario de 510-518 HL. Por otra parte, la adherencia se determinó a través del método de Pull of test observándose fractura cohesiva (Figura 3b); el tratamiento térmico mejoró la adhesión del cerámico en el sustrato metálico requiriendo una mayor fuerza de tensión para lograr su desprendimiento en comparación con aquellos que no tienen tratamiento de densificación. Para el cerámico con 10% de PDMS; se incrementó la fuerza de tensión para eliminar el recubrimiento de 50N hasta 100N; para los otros recubrimientos, la adherencia se incrementó en un valor menor al 17%. Se espera que a mayor adherencia y dureza se tenga un mejor comportamiento anticorrosivo debido a que se generan cerámicos con mayor estabilidad mecánica y química.

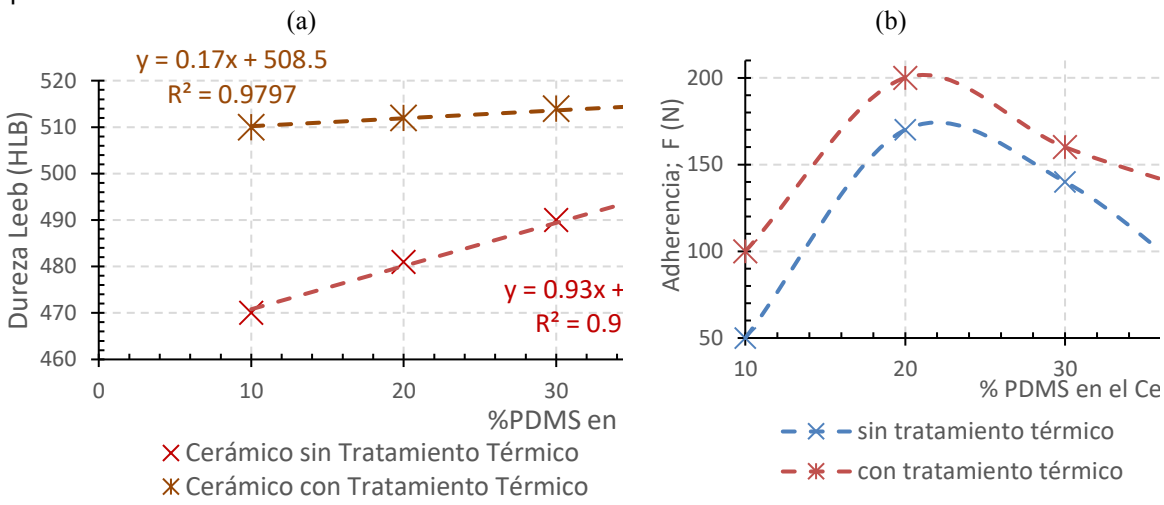
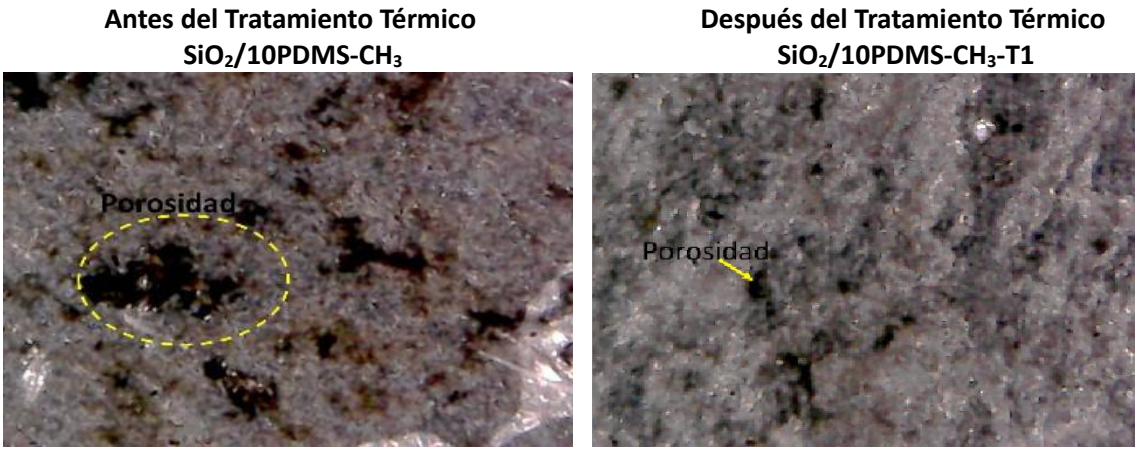


Figura 3. Caracterización física de los recubrimientos de SiO2/DMS-15 (a) Dureza Vickers (b) Adherencia

El tratamiento térmico; además afecto la porosidad presente en el material, en la Figura 4 se muestran microscopías ópticas para los recubrimientos obtenidos con el 10, 30 y 40% peso de PDMS antes y después del densificado; observando la disminución en la porosidad del material; que es remarcada con un círculo amarillo (micrografías antes del tratamiento térmico) y con una flecha del mismo color en las micrografías después del tratamiento térmico.



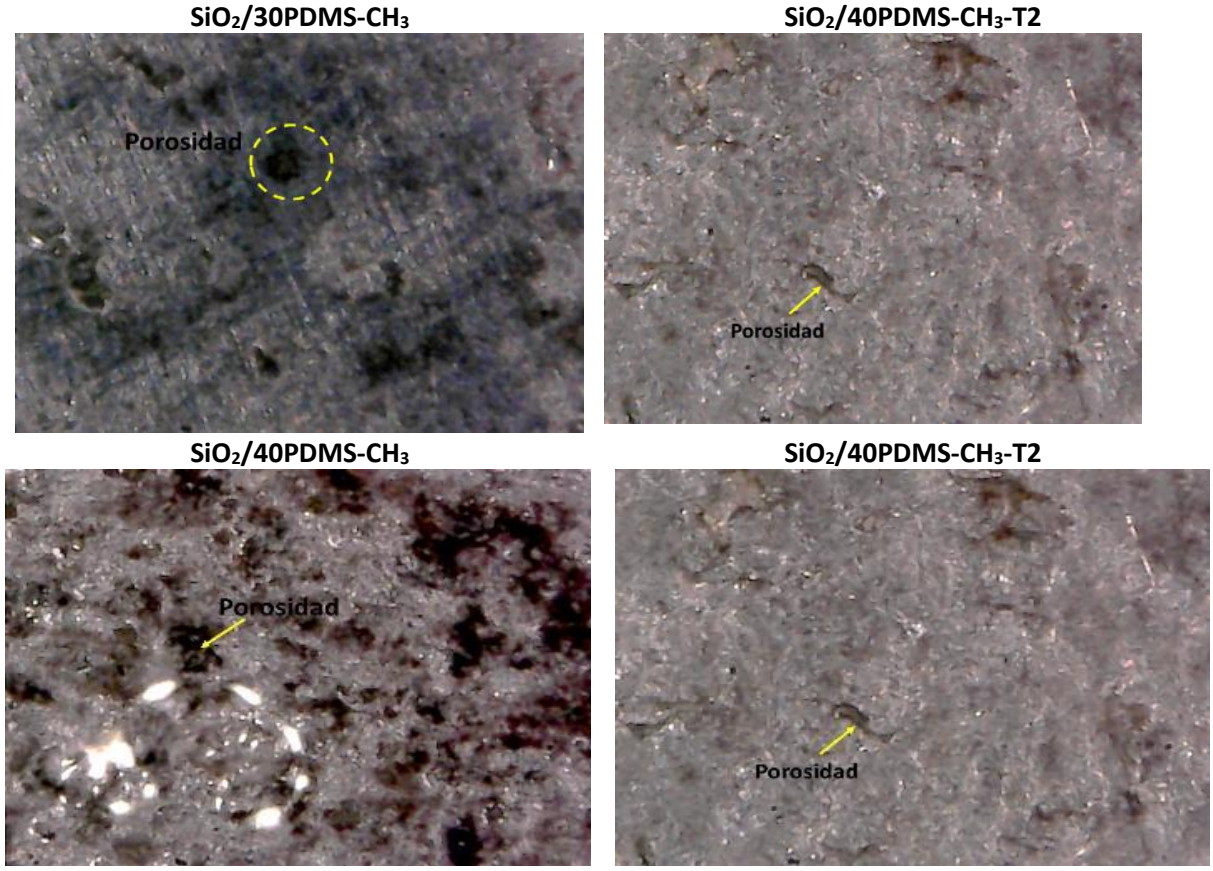


Figura 4. Micro-estructura de los cerámicos observada por AFM

Comportamiento Anticorrosivo para los Cerámicos SiO2/DMS-15

La Figura 5 muestra las curvas de Nyquist obtenidas para el Al-6061 sin recubrimientos y con los recubrimientos cerámicos con y sin el tratamiento térmico. Donde se puede observar un incremento en el diámetro del círculo. Los valores de Rs (Resistividad del electrolito) y Rp (Resistividad a la Transferencia de carga) para estos círculos se resumen en la Tabla 3; observando un incrementó en Rp del aluminio de 35.3-123.17 veces mayor con los recubrimientos; teniendo un incremento lineal conforme se incrementa el contenido de DMS-15 en la estructura del material. Al densificar, eliminación de poros; se incrementó el Rp de 62.37-108032 veces; lo que indica un excelente capacidad anticorrosiva.

(a) (b)

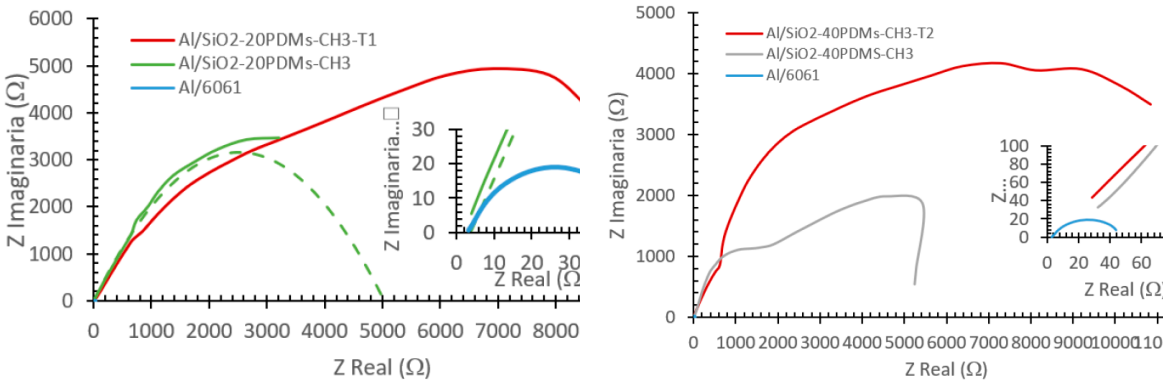


Figura 5. Curva Nyquist para el Aluminio sin recubrimiento y con los recubrimientos cerámicos SiO2/DMS-CH3 (a) 20% de DMS-15 en la estructura del cerámico (b) 40% de DMS-15 en la estructura del cerámico

Tabla 3. Comparación en las resistividades

	Rs	Rp	Incremento Rp
Al/6061	3.51	42.49	
Al/SiO_2-10PDMS-CH_3	3.44	1500	35.3
Al/SiO_2-10PDMS-CH_3-T1	33.45	2650	62.37
Al/SiO_2-20PDMS-CH_3	3.93	5020	118.14
Al/SiO_2-20PDMS-CH_3-T1	34.89	9454	222.49
Al/SiO_2-40PDMS-CH_3	3.97	5244	123.17
Al/SiO_2-40PDMS-CH_3-T2	32.28	10803	108032.49

CONCLUSIONES

El DBTL favorece la reacción de policondensación entre el TEOS y la cadena de DMS-15 formando la estructura híbrida esperada; donde a menor concentración se forman dos clúster de sílices diferentes; de acuerdo con lo observado por la espectroscopia de infrarrojo. De acuerdo con el análisis de impedancia electroquímica estos cerámicos evitan el contacto del agente corrosivo con la superficie del metal incrementando así su resistencia a la corrosión; teniendo un mayor incremento del Rp de acuerdo con el incremento de DMS-15 (cadena siloxano; fragmento orgánico) en la estructura de la sílice; se observó un incremento en la resistencia a la transferencia de carga (diámetro del círculo de la curva Nyquist). Para los recubrimientos sin tratamiento térmicos, estos incrementaron el Rp de 35-123 veces mayor que para el aluminio sin recubrir; mientras que al realizar el tratamiento térmico de densificación el incremento fue de 62-108032 veces. De acuerdo con los resultados obtenidos el porcentaje de cadena de DMS-15 incrementa la resistencia a la corrosión de los cerámicos teniendo el siguiente comportamiento: SiO2/DMS15-1< SiO2/DMS-15-2<SiO2/DMS-15-4 y SiO2/DMS15-1-T1< SiO2/DMS-15-2-T1<SiO2/DMS-15-4-T2.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo financiero a través del proyecto **SIP-2025-0523.**

BIBLIOGRAFÍA

1) Aircraft; Types of aircraft corrosion to be wary of. https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-corrosion/
2) Pellerin, S. Booker, “Reflection on hexavalent chromium: health hazards of an industrial heavyweight”, Environmetal Health Perspectives, 2000, 08 (9)
3) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, R Carrera-Cerritos, E. Elorza, J.M. Mendoza-Miranda, R. Navarro, “DBTL as neutral catalyst on TEOS/PDMS anticorrosive coating”, J. Sol-Gel Sci and Technol, 2017, 81, pp. 405-412.
4) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, J.M Mendoza-Miranda, R. Miranda-Avilés, E. Elorza-Rodríguez, R. Carrera-Cerritos, M.J. Puy-Alquiza, “Organic modified silica obtained from DBTL polycondensation catalyst for anticorrosive coating”¸ J. Sol-Gel Sci and Technol, (2018) 87 (2) pp. 229-309.
5) C. Salazar-Hernández, M. Salazar-Hernández, R. Carrera-Cerritos, J. Mendoza-Miranda, E. Elorza-Rodríguez, R. Miranda-Avilés y C. Mocada-Sánchez, “Anticorrosive properties of PDMS-Silica coatings: effect of methyl, phenyl and amino groups” Progress in Organic Coatings, (2019) 136, p. 105220

6) H.S. Magar, R.Y.A. Hassan, A. Mulchandani (2021) Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): Principles, Construction, and Biosensing Applications, Sensors, 21, 6578.
7) A.Ch. Lazanas, M.I. Prodromidis (2023) Electrochemical Impedance Spectroscopy-A Tutorial, JAC 3, 162-163
8) ASTM D4541-22 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
9) ASTM A956/A956M-17a. Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products
10) P.J. Launer (1987) Infrared Analysis of Organosilicon Compounds: Spectra Structure Correlation Silicon Compounds, B. Arkles (Ed.), Gelest Inc, Morrisville, P

FORTALECIMIENTO EN AGRONEGOCIOS DE MUJERES RURALES MEDIANTE LA MEJORA DE PROCESOS PRODUCTIVOS EN EL NORTE DE SANTANDER

Claudia Ivonne Arámbula García[1], María Guadalupe de Lourdes Acosta Castillo[2], Everardo Mares Mares[2]

[1]Universidad de Santander UDES, [2] Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato
Cl.arambula@mail.udes.edu.co

RESUMEN

A pesar de constituir una cuarta parte de la población mundial, las mujeres rurales enfrentan múltiples desafíos que limitan su capacidad para acceder a recursos esenciales como financiamiento, servicios básicos y oportunidades laborales. En muchas regiones del mundo, como en el departamento de Norte de Santander, Colombia, las mujeres rurales tienen un rol central en la agricultura y la producción de alimentos, pero siguen experimentando desigualdades en términos de ingresos, acceso a recursos y toma de decisiones. Sin embargo, el 64% de las mujeres rurales que se dedican a la agricultura perciben bajos ingresos y tienen una limitada participación en los espacios de toma de decisiones (1). En este contexto, el objetivo de este trabajo es fortalecer los agronegocios liderados por mujeres rurales, mejorando sus procesos productivos mediante la implementación de un diagnóstico y estrategias enfocadas en la optimización de sus actividades económicas. El proceso metodológico inició con la recolección de datos cualitativos y cuantitativos de diversas organizaciones de mujeres rurales en el departamento de Norte de Santander para evaluar áreas clave como planeación, finanzas, procesos de transformación, planes financieros y gestión de mercados. A partir del diagnóstico, se analizó el estado actual de los procesos de producción en las organizaciones identificadas. Este análisis permitió identificar las áreas críticas en las que se requería intervención. Basado en los hallazgos del diagnóstico, se elaboraron propuestas de mejora enfocadas en la optimización. Esto incluyó la creación de planes de acción enfocados en mejorar la eficiencia de la producción, así como en la implementación de estrategias para fortalecer el acceso a mercados y recursos financieros. Finalmente, se presentó una retroalimentación estructurada a las participantes del estudio, con el fin de validar las propuestas y ajustar las estrategias a las realidades locales. Se concluye que, a través de un diagnóstico y la implementación de propuestas centradas en la optimización de procesos, es posible mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los agronegocios liderados por mujeres en Norte de Santander. Adicionalmente, la aplicación de principios de ingeniería en la mejora de procesos productivos, el uso de tecnologías adecuadas y la gestión eficiente de los recursos disponibles son esenciales para transformar los agronegocios rurales liderados por mujeres en actores clave de la economía local y regional.

INTRODUCCIÓN

Las mujeres rurales son aquellas que se encuentras en áreas campesinas las cuales tienen una representación en diversos roles en su comunidad como la agricultura, ganadería, pesca, entre otros. A pesar de representar una cuarta parte de la población mundial se confrontan con desafíos financieros, territoriales, servicios básicos y oportunidades laborales. “Un 64% de las mujeres rurales que trabajan en agricultura tienen bajos ingresos, sumado a las pocas oportunidades para participar en espacios de toma de decisiones y el poco acceso a recursos productivos, créditos y mercados, situación que es agravada por las crisis globales en materia económica y alimentaria.” (2)

La mayor parte de mujeres rurales se enfocan en proyectos propios asociados a la producción y elaboración de alimentos o artículos derivados de productos primarios, esto hace que impulsen el desarrollo económico y social en sus comunidades contribuyendo a una participación activa en el sector agrícola y agroindustrial representando significativamente en la fuerza laboral en áreas de la producción de cultivos.

De acuerdo con los resultados que obtuvo el Departamento Administrativos de Estadísticas (DANE) en Colombia hay una población rural de 12,22 millones de personas lo que equivale el 23,7% de la población del país, lo que corresponde a un 48,2% son mujeres que es semejante a 5,89 millones de personas en el territorio colombiano. Para una proyección en el departamento de Norte de Santander del 46,73% equiparable a 154.172 mujeres rurales. (3)

Este proyecto revela que los agronegocios enfrentan grandes dificultades para ser competitivos y lograr un crecimiento sostenido. Entre los factores que contribuyen a estas dificultades se encuentran la escasa formación y el limitado acompañamiento técnico en áreas como el empresarismo, el manejo de finanzas, el mercadeo y el desarrollo de procesos industriales eficientes; otros factores incluyen las dificultades de conectividad y el uso limitado de tecnología, así como la escasa capacidad de financiamiento y la limitada gestión de mercados.

En este sentido, se buscó identificar mediante la aplicación de herramientas de diagnóstico en un número de agronegocios vinculados “muestra” cómo es la organización de sus agronegocios, su planeación, sus finanzas, sus procesos productivos o industriales, si cuentan con procesos de transformación, con un plan financiero y una adecuada gestión de mercados. Lo anterior, con el ánimo de contribuir con la elaboración de una propuesta de mejora que fortalezca a los agronegocios identificados, con el fin de que las mujeres las apliquen para el mejoramiento de sus negocios rurales siendo competitivos y exitosos.

De manera inicial se observó que la gran mayoría de los negocios rurales que se participaron cuenta con dificultades de infraestructura, nivel tecnológico de maquinaria, comercialización, escaso apoyo de entidades, problemas financieros y en algunos casos rutas en mal estado dificultando el acceso. Además, se pudo identificar que los negocios agroindustriales tienen una vida productiva aproximada de mediano a corto plazo por consecuencia de faltas de innovación, estudios o capacitaciones hacia los mismos trabajadores en temas referente al manejo del producto, ventas y la falta de nuevos contactos para impulsar los negocios.

En la parte final del proyecto se abordan estrategias y retos que se consideraron importantes al mejoramiento de los negocios, haciendo que las empresarias opten por algunas de las propuestas para encaminar al éxito progresivo. Esto debido al análisis realizado y a las necesidades de los negocios según correspondan, dando como resultado que la propuesta requerida por la mayoría de los negocios es la vinculación de programas del gobierno referentes a la proporción del enfoque de género con el fin de fortalecer temas de capacitación hacia el financiamiento y formalización de las empresas. Otra estrategia que sobresalió en los retos fue en la realización de publicidad y mercadeo aprovechando los programas de mercados campesinos y las herramientas virtuales para la publicidad. Por último, resalta el tema de financiamiento con el objetivo de buscar programas de microcréditos orientados a la mujer rural para financiar inversiones en la infraestructura productiva, equipos, materiales y materias primas.

TEORÍA

Norte de Santander es uno los treinta y dos departamentos que conforma el territorio colombianO Y se encuentran ubicado en la zona nororiental del país, su capital es Cúcuta y tiene un aproximado de 812.176 habitantes. Según el DANE, el 51.5% son mujeres mientras que el 48.5% son hombres. Además, es un departamento fronterizo donde limita al norte y al este con Venezuela, al sur con el departamento de Boyacá y al oeste con los departamentos de Santander y Cesar (4).

Su localización geográfica (FIGURA 1) Ves entre los 06º56’42’ y 09º18’01» de latitud norte y los 72º01’13» y 73º38’25» de longitud oeste. Tiene como extensión 22.130 Km2, lo que equivale al 1.91% del territorio nacional, ya que este cuenta con un millón ciento cincuenta y nueve mil ochocientos setenta y un kilómetros cuadrados (1.159.871,41 km2) (5).

Figura 1.

Ubicación de Norte de Santander en Colombia.

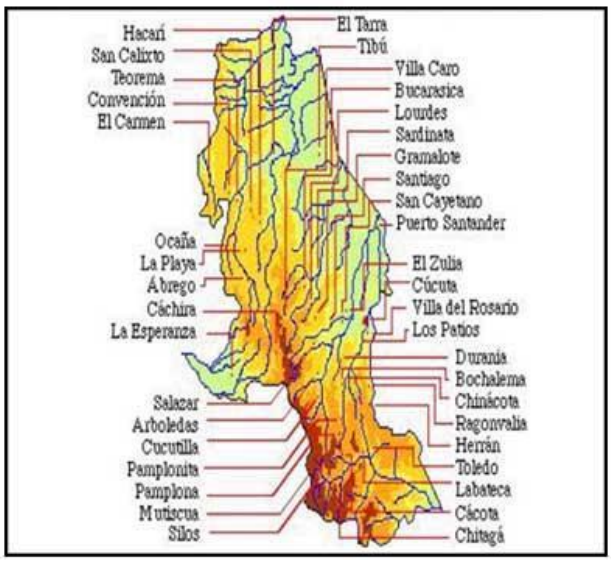


Fuente: Gobernación de Norte de Santander

Por otra parte, el departamento Norte de Santander está conformado por cuarenta municipios los cuales se pueden observar en la Figura 2, se agrupan en seis subregiones, las cuales son norte, occidente, oriente, centro, sur-occidente y sur- oriente. De los cuales, para poder realizar el proyecto se han tenido que visitar algunos municipios, como los son Cúcuta, Los Patios, Puerto Lleras, Campo dos (Tibú), Sardinata, Villa del Rosario, San cayetano, Pamplona, Pamplonita y el corregimiento de agua clara.

Figura 2.

Ubicación de municipios de Norte de Santander.



Fuente: Visión histórica de Norte de Santander – Táchira.

Norte de Santander cuenta con antecedentes agropecuarios, además de ser uno de los departamentos que cuenta con su mayoría de municipios con hectáreas producidas. Algunos de los sectores que aporta más a la economía y desarrollo es el palmero, el café, cacao, frutas y hortalizas.

Por otro lado, la agroindustria ha permitido que familias afectadas por conflictos armados hallan progresado, siendo un pilar importante para el departamento. Asimismo, se realizan festivales agropecuarios con el fin de impulsar e incentivar los pequeño y medianos negocios rurales, por medio de publicidades y compra de los productos (6).

Con respecto a la agroindustria en el departamento se puede encontrar un potencial exportador ya que se cuenta con una amplia variedad de cultivos con buena calidad, generando mayor beneficio al progreso del territorio. Aunque los diversos municipios tengan desarrollo en las cadenas productivas, siempre se han tenido desafíos en puntos claves, como es la falta de infraestructura, limitaciones en los créditos, presencia de grupos armados ilegales y un clima muy variado, lo que dificulta el progreso de la producción.

El tema de la Agro-Industria Rural (AIR) emergió en los años ochenta en la literatura sobre la economía campesina. Al principio se concibió la AIR esencialmente como un medio para reforzar el control del campesino latinoamericano sobre la creación de valor agregado en la cadena de producción: se suponía que, procesando al menos en parte el producto bruto, tenía la oportunidad de retener un porcentaje más elevado de dicho valor agregado, lo que le permitía incrementarse el nivel de ingreso (7).

El desarrollo de agroindustrias competitivas es crucial para generar oportunidades de empleo e ingresos. Contribuye, además, a mejorar la calidad de los productos agrícolas y su demanda. Las agroindustrias tienen el potencial de generar empleo para la población rural, no sólo a nivel agrícola, sino también en actividades fuera de la explotación como manipulación, envasado, procesamiento, transporte y comercialización de productos alimentarios y agrícolas (8).

Actualmente, la agroindustria es reconocida no solo por su producción e impacto económico mundial, sino también por los procesos que se implementan para disminuir el impacto ambiental que generan sus residuos; por tanto, su permanencia y oportunidades en el mercado no dependen solamente de reglamentaciones sujetas a sanciones sino también de su relación con el medio ambiente. Dentro de esta relación medioambiental, la agroindustria debe considerar que, durante los procesos previos a la producción, manejo, procesamiento y comercialización, se generan subproductos o residuos que conllevan serios problemas asociados a su disposición final (9).

Por otra parte, los estudios sobre la mujer ocupan un lugar cada vez más destacado en nuestra sociedad: los malos tratos, las situaciones flagrantes de desigualdad, las enormes dificultades para acceder a un empleo, la propensión a aumentar las tasas de paro, las dificultades para encontrar un trabajo de características similares a los de los hombres, las importantes diferencias en la retribución salarial, la, todavía, radical división de géneros, con una orientación ineludible y necesaria hacia el trabajo remunerado, para los hombres, y la responsabilidad del hogar, para las mujeres, son alguno de los aspectos que actualmente preocupan (10).

La participación de las mujeres rurales en la vida de la sociedad colombiana tiene una larga y variada trayectoria en el siglo veinte y en los comienzos del veintiuno. Sin embargo, la historia ha invisibilizado su aporte como sujeto histórico y presenta una imagen de ellas como agentes sumisos y pasivos replegados en la esfera doméstica, incapaces de ejercer un papel activo ante las desigualdades de la sociedad y en los movimientos sociales (11).

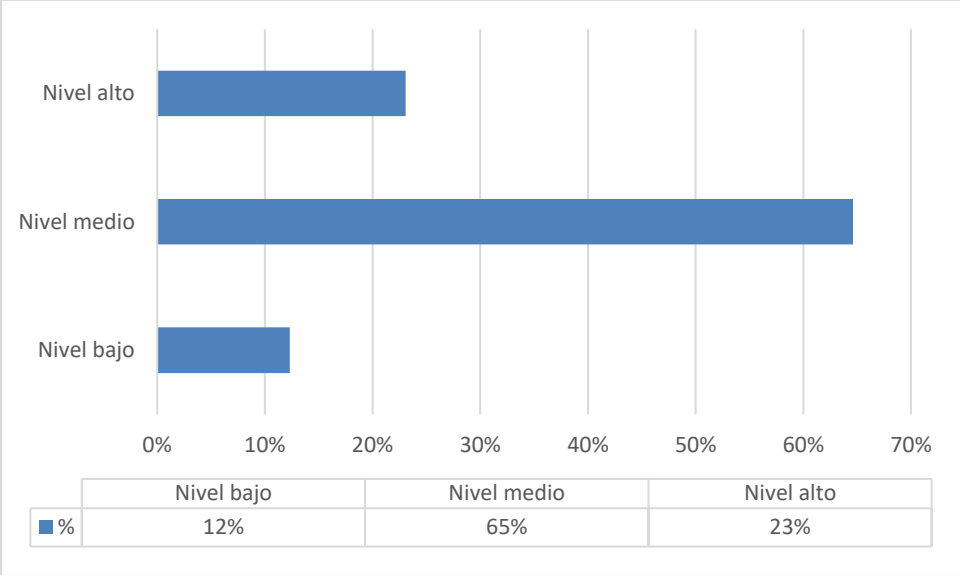
La participación efectiva de las mujeres rurales en el desarrollo de sus comunidades es una condición necesaria que va unida a su adscripción territorial. Este hecho hace que las mujeres sean capaces de mejorar su propio bienestar al actuar directamente sobre los factores que pueden afectarles, lo que deriva en una fuerte interacción con la comunidad y refuerza el sentimiento de pertenencia al territorio (12).

PARTE EXPERIMENTAL

De manera inicial se realizó un análisis de cómo se encuentra el departamento en el ámbito rural y el rol que cumple la mujer campesina, por medio del análisis de bases de datos que mostraron una totalidad de sesenta y cinco agronegocios que están distribuidos en los diferentes municipios y con diferentes productos de diferente origen.

Con la información obtenida se analizó el nivel educativo de cada emprendedora, la cual se estructuró de la siguiente manera: Nivel bajo, donde se encuentran las mujeres que no tienen formación académica y las que completaron la primaria. Nivel medio, donde se ubican las mujeres que culminaron los estudios de secundaria, técnicas y tecnologías. Nivel Alto, las mujeres que obtienen títulos profesionales, postgrado y otros (según el caso). Esa información se puede analizar en la Figura 3.

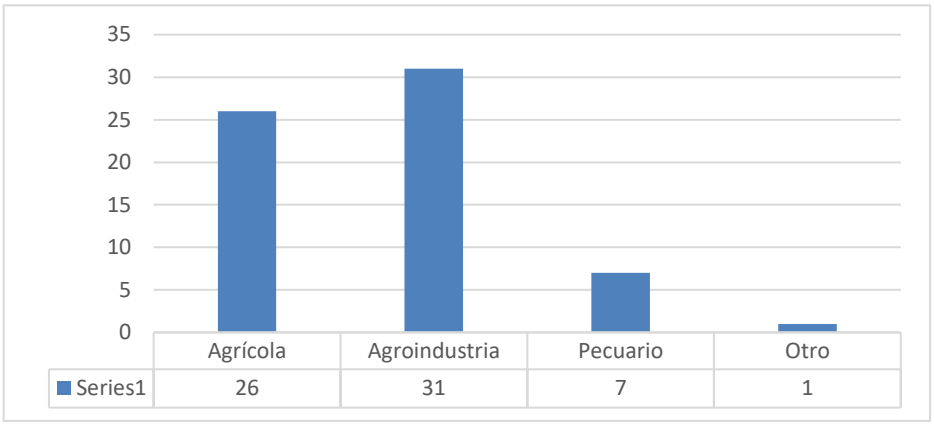
Figura 3.
Nivel educativo de las emprendedoras.



Fuente: elaboración propia.

Tomando la información del nivel educativo en la base de datos, se realizó el análisis de las sesenta y cinco representantes de agronegocios que dio como resultado los porcentajes de estas mujeres que tiene un nivel educativo bajo (hace referencia a mujeres que no han tenido ninguna formación académica y las que terminaron la primaria) es de 12%, lo que equivale a 8 mujeres campesinas. Seguidamente se obtuvo que el nivel medio educativo (Estudios de secundaria, técnicas y tecnológicas) sobre sale por tener mayor el porcentaje en la encuesta con un 65% lo que equivale a 42 mujeres del agro. Por otro lado, tenemos mujeres encuestadas que están en el nivel educativo alto (Estudios profesionales, postgrados y otros) con un 23% en la encuesta, con una totalidad de 15 mujeres emprendedoras. Seguidamente se identificó el origen del producto que realizan, dando como resultado la siguiente Figura 4.

Figura 4.
Tipos de emprendimientos.



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la gráfica anterior, la agroindustria tiene mayor participación en la base de datos que se utilizó con un total de 31 negocios rurales siendo un 48% en encuesta, siguiendo así los negocios agrícolas tienen un 40% de los agronegocios, equivalente a 26 negocios. Por otro lado, se puede ver que los negocios que manejan productos de origen pecuario tienen poca participación con un total de 7, representando el 11%. Además, el de menor representación es de otro tipo de producto que se realiza en los negocios rurales representando a un solo negocio siendo el 2% de los encuestados.

También se pudo obtener un análisis de la participación de las emprendedoras las cuales se representan de la siguiente manera en la Tabla 1:

Tabla 1.
Participación principal de las emprendedoras.

Participación	Total
Accionistas	4
Administradora	11
Propietaria	45
Otro	5
Total	65

Fuente: elaboración propia.

Las mujeres emprendedoras identificaron áreas de capacitación fundamentales para impulsar el crecimiento y desarrollo de los negocios. Entre las más relevantes se destaca el manejo administrativo por lo que optimiza los internos adecuando los recursos financieros y así tomar decisiones estratégicas. Otro aspecto crucial que consideraron es el mejoramiento de productos y servicios, enfocados en garantizar la calidad y satisfacción de las expectativas de los clientes con las tendencias del mercado. Además, identifican el mercadeo de productos y servicios para considerar el aumento de nuevos clientes y apuntar a nuevos nichos de mercado. Por último,

contemplan la formalización de los negocios para poder ser parte de nuevas oportunidades y accesos financieros que permitan mejorar sus procesos productivos.

En el ámbito de la venta de productos, las representantes de los negocios indicaron que comercializan sus productos principalmente en mercados locales y entre los vecinos de la comunidad. Sin embargo, señalaron que los registros de ingresos se realizan de manera manual en cuadernos y en algunos casos no se lleva ningún control formal de las compras y ventas. Esta falta de seguimiento sistemático puede dificultar la gestión financiera y la toma de decisiones, impactando la eficiencia y el crecimiento del negocio. Debido a esto, se examinó y se clasificó el nivel tecnológico en tres categorías: alto, mediano y bajo. Como resultado, se observó que solo un 5% de los negocios cuentan con un alto nivel tecnológico, mientras que un 40% se encuentran en un nivel medio. Sin embargo, la mayoría, representando un 55%, opera con bajo nivel tecnológico, lo que sugiere oportunidades de mejora e implementación de nuevas herramientas tecnológicas. Esta distribución refleja la necesidad de fortalecer los procesos y modernizar los recursos, especialmente en los negocios con bajo desarrollo tecnológico, para aumentar su competitividad y eficiencia en el mercado.

Una vez seleccionados los agronegocios participantes, se llevaron a cabo visitas de campo donde se analizó el entorno de cada organización con el propósito de obtener una comprensión detallada del negocio y su direccionamiento estratégico, identificando y documentando sus problemática particulares.

RESULTADOS

Con base en el análisis realizado a cada emprendimiento participante, se desarrollaron estrategias de mejora para complementar el fortalecimiento de cada uno de los negocios, destacando las siguientes como las que representan mayor impacto e incidencia en la mayoría de los emprendimientos analizados:

- Vinculación de la dirección y administración a programas y convocatorias de fortalecimiento de capacidades empresariales e innovación tecnológica.
- Participación en ferias y eventos comerciales.
- Aumentar la capacidad de producción y publicidad.
- Gestionar recursos financieros de la banca en condiciones favorables o condonables que permitan mejorar tecnológicamente la infraestructura, equipos y la producción de productos que cumplan con todos los requerimientos del mercado.
- Formular un plan estratégico e implementar una herramienta de manejo contable y financiero.
- Elaborar e implementar un plan de mercadeo y publicidad.
- Hacer recorridos en horarios diurnos y programar horarios diferentes.
- Implementar un plan de manejo de riesgos.
- Involucrar mano de obra de la zona donde se cultiva el cáñamo.
- Elaborar un plan de acciones para identificar y minimizar los diferentes riesgos.
- Vinculación a programas de acompañamiento institucional.
- El plan de mercadeo orientarlo a los productos finales tanto al mercado nacional como en el exterior.

Se observó que las mujeres emprendedoras han tenido una motivación enorme al momento de realizar un emprendimiento que con el tiempo vaya progresando y colaborar económicamente a sus familias. Por otra parte, se observa que los negocios agroindustriales tienen una vida productiva de corto a mediano plazo debido a falta de estudios o capacitación de las trabajadoras, falta de venta en sus productos, aunque lo puedan hacer en las veredas o mercados campesinos, falta de contactos para promocionar sus productos y sobre todo la capacidad al momento de solucionar las diversidades que puedan ocurrir de manera inesperada.

CONCLUSIONES

La mayoría de los negocios rurales investigados enfrentan serios obstáculos relacionados con infraestructura deficiente, tecnología obsoleta en sus maquinarias, problemas de comercialización, y escaso respaldo de entidades gubernamentales o privadas. Además, muchos enfrentan dificultades financieras, y en algunos casos, el mal estado de las vías limita el acceso, dificultando la distribución de sus productos. Se identificó también que estos negocios agroindustriales tienen una vida productiva corta o mediana debido a la falta de innovación, poca inversión en estudios de mercado, y la carencia de capacitaciones para los trabajadores en áreas clave como la gestión del producto, ventas y marketing, lo cual limita su capacidad para adaptarse a las cambiantes demandas del mercado y para establecer nuevos contactos comerciales que podrían ampliar sus oportunidades de crecimiento.

El trabajo permitió descubrir que varios de los negocios comparten problemáticas similares, como la falta de eficiencia en algunos procesos, limitaciones en la capacidad de producción, y oportunidades desaprovechadas en el mercado, esta identificación es clave para diseñar estrategias específicas que fortalezcan sus operaciones y potencien su crecimiento.

La investigación presenta diversas estrategias y retos fundamentales para mejorar los negocios con el propósito de que las empresarias adopten algunas de estas propuestas y logren un avance progresivo hacia el éxito. Estas estrategias se basan en el análisis de las necesidades específicas identificadas en cada negocio, una de las oportunidades identificadas fue la vinculación a programas gubernamentales que promuevan el enfoque de género, buscando fortalecer áreas clave como la capacitación en financiamiento y la formalización de las empresas. Además, se destacó la importancia de mejorar la publicidad y el mercadeo, aprovechando tanto los programas de mercados campesinos como las herramientas digitales, para aumentar la visibilidad y el alcance de sus productos en el mercado. También se resaltó la importancia de generar redes de apoyo y colaboración entre los negocios, para compartir experiencias, recursos y estrategias, lo que podría potenciar su desarrollo y sostenibilidad a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Conde, W. R. I. y Brochado, E. R. C. (2023). Mujeres rurales en la era digital: cómo la tecnología está abriendo nuevas puertas. InGente Americana, 3(3).
2. ONU mujeres. (2023, octubre 13). En Colombia, las mujeres rurales son ‘Raíces, mujeres sembradoras del cambio. [En línea]. Disponible: https://lac.unwomen.org/es/stories/noticia/2023/10/en-colombia-las-mujeres-rurales-son-raices-mujeres-sembradoras-del-cambio
3. Departamento Administrativos de Estadísticas (DANE). (2022, octubre 18). Situación de las mujeres rurales desde las estadísticas oficiales. [En línea]. Disponible: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/notas-estadisticas/oct-2022-nota-estadistica-mujer-rural-presentacion.pdf
4. Telencuestas. Cuántos habitantes tiene San José de Cúcuta, Norte de Santander en 2024. [En línea]. Disponible: https://telencuestas.com/censos-de-poblacion/colombia/2024/norte-de-santander/san-jose-de-cucuta
5. Gobernación de Norte de Santander. (2022, diciembre 5). Información General Norte de Santander. [En línea]. Disponible: https://administrador.nortedesantander.gov.co/menu-sede/nuestro-
6. Semana. (2023, octubre 3). Agricultura: uno de los pilares de la paz en Norte de Santander. [En línea]. Disponible: https://www.semana.com/mejor-colombia/articulo/agricultura-uno-de-los-pilares-de-la-paz-en-norte-de-santander/202300/
7. D. Requier. “Agro-Industria Rural y Sistemas Agroalimentarios Localizados: ¿Cuáles puestas?”, Aniversario de PRODAR, noviembre 1999.
8. C. A. Da Silva, D. Baker, A. W. Shepherd, C. Jenane & S. Miranda. *Agroindustrias para el desarrollo.* Roma. 2013.

9. L. V. Peñaranda, S. P. Montenegro & P. A. Giraldo, “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia”, vol. 8, no. 2, pp141-150, abril 2017.
10. B. García, “La mujer rural en los procesos de desarrollo de los pueblos”, Revista del ministerio del trabajo y asuntos sociales, vol. 4, pp. 107.
11. D. I. Díaz. Situación de la mujer rural colombiana. Perspectiva de género. Instituto Latinoamericano de Servicios Legales Alternativos, ILSA. 2002.
12. B. Martínez, Carrasco, “Mujer, actividad emprendedora y desarrollo rural en América Latina y el Caribe”, vol. 10, no 72, pp. 21-75, febrero 2013.

DE LO VIRTUAL A LO FÍSICO: EL PAPEL DE GEOGEBRA Y LA IMPRESIÓN 3D EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA COSTA GRANDE DE GUERRERO

Manuel Arciga Vargas[1], Rafael Alberto Medina Salgado[1],Rafael Pantoja Rangel[2], Gabriel Aparicio Jaimes[1], María Fernanda Otero Solís[1] y Mirza Anahí Sánchez Hernández[1]

[1]Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, [2]Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías; Universidad de Guadalajara
m_arciga@utgg.edu.mx

RESUMEN

La integración de mediadores digitales en la educación matemática ha revolucionado la enseñanza de conceptos abstractos en ingeniería. Este trabajo explora el uso de herramientas como GeoGebra y la impresión 3D para mejorar la comprensión de temas como funciones y cálculo diferencial e integral en estudiantes de Ingeniería Mecánica. A través de un enfoque práctico, se vinculan conceptos teóricos con aplicaciones reales, como el diseño de mecanismos biela-manivela, fomentando un aprendizaje significativo. Los resultados muestran un aumento del 95% en asistencia a sesiones prácticas, un 37% de mejora en calificaciones y un 80% de participación en proyectos voluntarios, evidenciando el impacto positivo de estas tecnologías en la motivación y el rendimiento académico.

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de las matemáticas en ingeniería enfrenta el desafío de trasladar conceptos abstractos a aplicaciones prácticas. Tradicionalmente, los estudiantes presentan dificultad para poder visualizar cómo las funciones trigonométricas o el cálculo diferencial se aplican en contextos reales, como el diseño de mecanismos automotrices. Este problema se agrava en carreras técnicas, donde la falta de conexión entre teoría y práctica puede desmotivar a los alumnos. En respuesta a esto, las tecnologías digitales emergen como mediadores clave. GeoGebra, por ejemplo, permite modelar y simular sistemas mecánicos de manera interactiva, mientras que la impresión 3D facilita la materialización de diseños teóricos. Estas herramientas no solo mejoran la comprensión conceptual, sino que también preparan a los estudiantes para los desafíos tecnológicos de la industria. Este estudio se llevó a cabo en la Universidad Tecnológica de la Costa Grande Guerrero, específicamente en el diseño de un mecanismo biela-manivela para un aplasta latas, demostrando cómo la combinación de lo virtual y lo físico transforma el aprendizaje.

TEORÍA

La educación matemática en ingeniería requiere un equilibrio entre rigor teórico y aplicación práctica. Según Moreno (2013), la integración de tecnologías digitales en los currículos no solo moderniza la enseñanza, sino que también cierra brechas cognitivas al permitir visualizaciones dinámicas de conceptos abstractos. En el caso del mecanismo biela-manivela, conceptos como las funciones senoidales y la trigonometría son fundamentales para entender el movimiento del pistón.

GeoGebra actúa como un puente entre estos conceptos y su aplicación. Al simular el mecanismo, los estudiantes observan cómo variables como la longitud de la biela o el radio de la manivela afectan la carrera del pistón. Esta interactividad fomenta un aprendizaje activo, donde los alumnos no solo memorizan fórmulas, sino que comprenden su significado físico. Por otro lado, la impresión 3D, apoyada en software como SolidWorks y Ultimaker Cura, traslada estos modelos virtuales al plano tangible, reforzando habilidades de diseño y manufactura.

FASE EXPERIMENTAL

El desarrollo de este proyecto se estructuró en tres fases interconectadas, cada una diseñada para maximizar la transferencia de conocimiento entre lo abstracto y lo concreto. La implementación se realizó con 25 estudiantes del tercer semestre de T.S.U. en Mecánica Automotriz, quienes trabajaron en equipos de 5 integrantes durante un período de 8 semanas.

Diseño de un Applet en GeoGebra

La primera fase se centró en el modelado virtual interactivo, donde los estudiantes recibieron capacitación especializada en el uso avanzado de GeoGebra. Cada equipo desarrolló un modelo dinámico del mecanismo biela-manivela, incorporando parámetros personalizados según las dimensiones específicas de su diseño.

La Figura 1 muestra capturas de pantalla de los modelos creados, en los que se aprecian los deslizadores implementados para manipular variables clave como el radio de la manivela, que variaba entre 2.5 y 5 centímetros, la longitud de la biela, ajustable desde 7 hasta 12 centímetros, y la velocidad angular, configurable entre 50 y 300 revoluciones por minuto. Esta interactividad permitió a los estudiantes visualizar en tiempo real cómo cambios en estos parámetros afectaban el comportamiento del mecanismo.

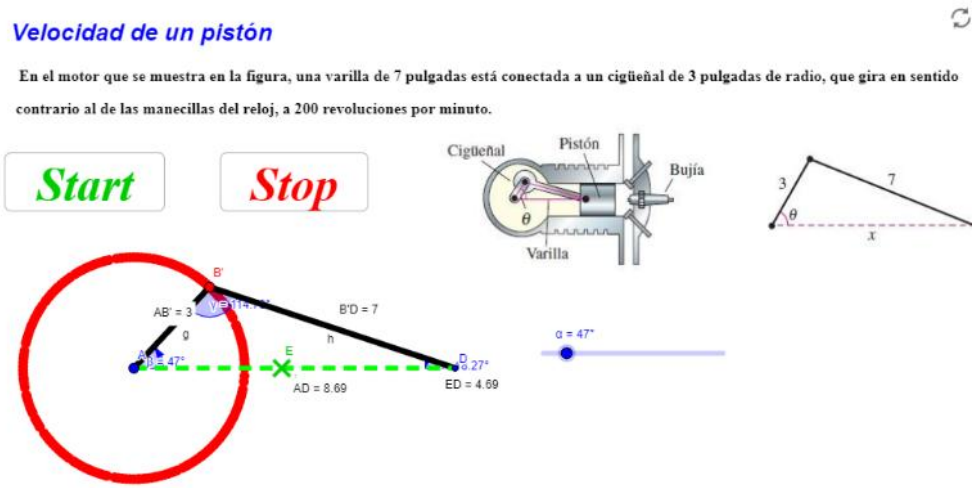


Figura 1. Análisis geométrico del mecanismo biela-manivela con el apoyo del GeoGebra https://www.geogebra.org/m/kbrxparv

Durante las sesiones de trabajo, en las hojas de trabajo se platearon desafíos progresivos para profundizar en la comprensión de los conceptos. Inicialmente, los estudiantes simularon el movimiento básico del pistón, observando la relación entre el desplazamiento lineal y la rotación de la manivela. Posteriormente, avanzaron hacia el cálculo de la velocidad instantánea mediante derivadas, analizando cómo esta variaba en diferentes puntos del ciclo. Finalmente, identificaron y discutieron los puntos críticos donde la aceleración alcanzaba sus valores máximos, relacionando estos hallazgos con las ecuaciones matemáticas subyacentes.

El proceso de modelado no solo reforzó los conceptos teóricos, sino que también fomentó la colaboración entre los equipos. Los estudiantes compartieron sus hallazgos y soluciones, creando un ambiente de aprendizaje colaborativo donde las dificultades técnicas se abordaban colectivamente. Esta fase sentó las bases para las siguientes etapas del proyecto, proporcionando a los participantes las herramientas necesarias para trasladar sus modelos virtuales al mundo físico con precisión y confianza.

De lo digital a lo físico

Una vez diseñado los Applet de los modelos geométricos y matemáticos en GeoGebra, los equipos dieron llevaron a cabo la migración al diseño técnico mediante el software SolidWorks. Esta transición representó un desafío significativo, ya que los estudiantes debían traducir sus modelos conceptuales en diseños manufacturables que cumplieran con especificaciones técnicas precisas.

El proceso inició con el diseño paramétrico de cada componente del mecanismo, incluyendo la manivela, biela y soportes, donde los parámetros geométricos establecidos en la fase virtual sirvieron como base para las dimensiones finales.

La Figura 2 ilustra detalladamente el flujo de trabajo seguido en Ultimaker Cura para la preparación de los archivos de impresión. En fase de trabajo, los estudiantes optimizaron múltiples parámetros técnicos para garantizar la calidad de las piezas impresas en PLA. Se estableció una altura de capa de 0.15 milímetros como compromiso óptimo entre resolución y tiempo de fabricación, mientras que el patrón grid de relleno al 20% proporcionó el equilibrio adecuado entre resistencia y economía de material. La velocidad de impresión se fijó en 50 milímetros por segundo para las piezas estructurales principales, ajustándose según los requerimientos específicos de cada componente.

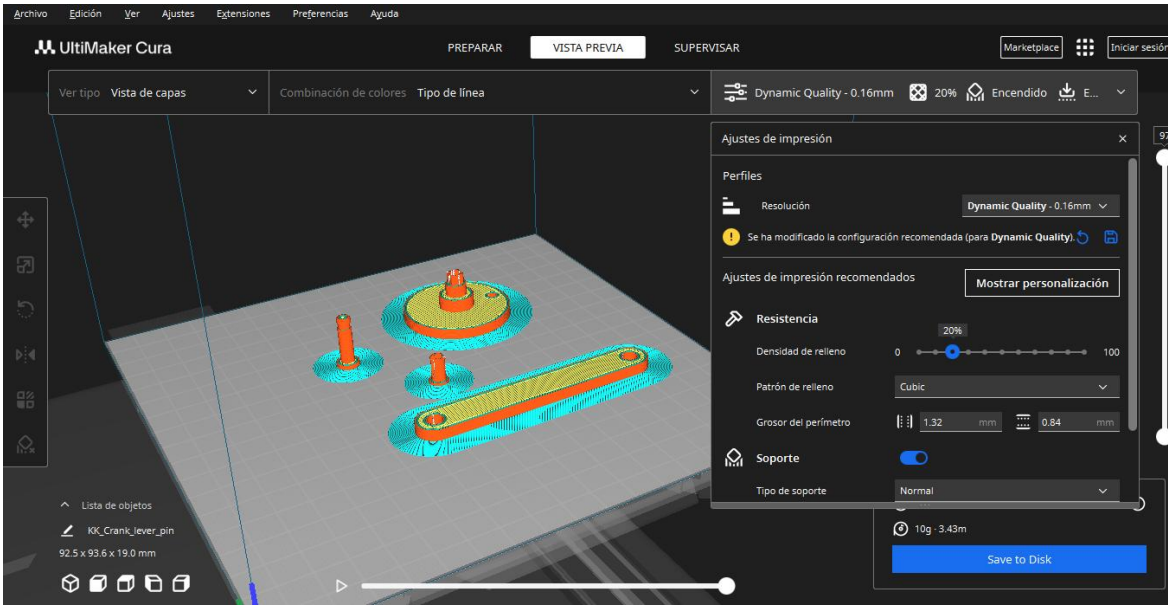


Figura 2. Preparación de los archivos STL en programa gratuito Ultimaker Cura

El proceso de diseño incluyó un riguroso análisis de interferencias y tolerancias, donde los equipos trabajaron con márgenes de ±0.1 mm para garantizar el correcto ensamblaje de las piezas. Esta precisión resultó fundamental para el funcionamiento del mecanismo final, particularmente en las zonas de unión entre la biela y la manivela. Como parte integral del proceso, los estudiantes generaron planos técnicos completos con todas las cotas funcionales, desarrollando así habilidades esenciales en documentación de ingeniería.

Durante esta fase, los participantes enfrentaron y resolvieron diversos desafíos prácticos, desde la optimización de orientación de piezas para minimizar soportes, hasta el cálculo de tiempos de impresión estimados. La experiencia adquirida en esta transición del mundo digital al físico no solo consolidó su comprensión del mecanismo biela-manivela, sino que también les proporcionó valiosas competencias en fabricación digital y gestión de proyectos técnicos.

RESULTADOS

La fase final del proyecto integró exhaustivas pruebas físicas y análisis cuantitativos para evaluar el rendimiento de los prototipos desarrollados. Cada equipo procedió al montaje completo de su mecanismo biela-manivela en bancos de pruebas especialmente adaptados, donde realizaron mediciones precisas comparando la carrera real del pistón con los valores teóricos obtenidos en las simulaciones.

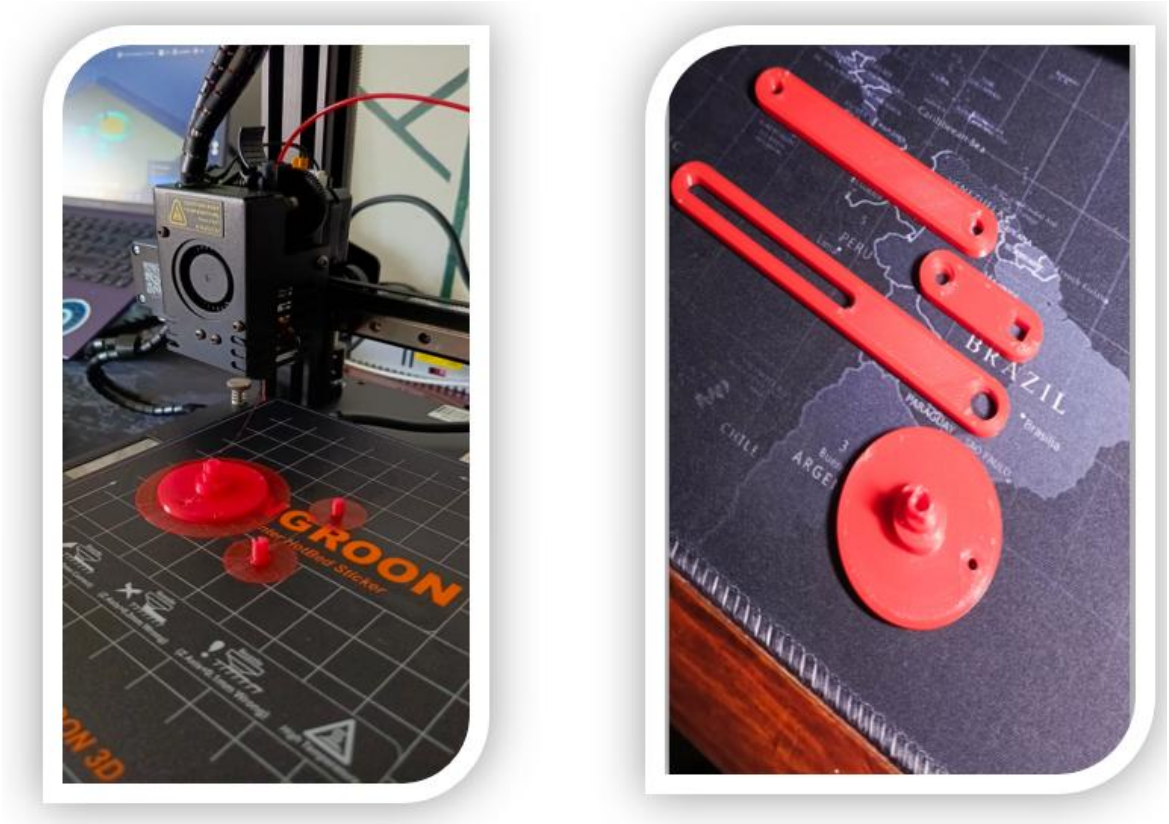


Figura 3. Impresión de los componentes mecánicos en la impresora Kingroon KP3S con PLA

Los resultados obtenidos validaron la escalabilidad de esta metodología, demostrando su potencial aplicación en el estudio de otros sistemas mecánicos complejos. Actualmente, se están explorando adaptaciones para el análisis de engranajes planetarios y sistemas leva-seguidor en proyectos avanzados de la Programa Educativo de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, lo que evidencia la transferibilidad de las competencias desarrolladas mediante este enfoque pedagógico innovador. La integración de herramientas digitales con prototipado físico no solo mejoró la comprensión conceptual, sino que también desarrolló habilidades prácticas esenciales para la formación de los futuros ingenieros mecánicos.

CONCLUSIONES

La integración de GeoGebra e impresión 3D en la educación matemática ha demostrado ser una estrategia efectiva para vincular teoría y práctica. Las figuras presentadas ilustran claramente el flujo de aprendizaje: desde la conceptualización matemática en GeoGebra, pasando por la materialización digital, hasta la validación física.

Este enfoque no solo mejoró el rendimiento académico, sino que desarrolló habilidades críticas para la ingeniería. Futuras investigaciones podrían explorar su aplicación en otros temas de matemáticas avanzadas, consolidando estas herramientas como pilares de la educación tecnológica.

La actividad práctica con GeoGebra les brinda a los estudiantes la oportunidad de visualizar en tiempo real cómo cambian las variables, como la longitud de la biela o el ángulo de quiebre de la manivela, y cómo estas afectan la carrera del pistón.

Esto fomenta un aprendizaje significativo, donde los alumnos pueden manipular los parámetros y observar directamente cómo influyen en el movimiento del mecanismo, relacionando así los conceptos matemáticos con su aplicación práctica en ingeniería automotriz.

Además, la inclusión de la impresión 3D, utilizando la impresora Kingroon KP3S y el software gratuito Ultimaker Cura, permite a los estudiantes materializar sus diseños teóricos en modelos físicos. Al diseñar las piezas del mecanismo en SolidWorks, exportarlas a Ultimaker Cura y fabricarlas con PLA, los estudiantes refuerzan su comprensión de la geometría y la trigonometría aplicada al diseño mecánico, mientras exploran parámetros como dimensiones, tolerancias y ensamblaje.

Esta combinación de herramientas digitales y fabricación tangible no solo mejora la comprensión conceptual, sino que también motiva a los estudiantes al vincular directamente las matemáticas con aplicaciones prácticas en ingeniería mecánica, preparándolos para enfrentar los desafíos tecnológicos y profesionales del futuro.

La inclusión de tecnológicas digitales como GeoGebra y la impresión 3D no solo mejora la comprensión conceptual, sino que también promueve habilidades de resolución de problemas y pensamiento crítico. Los estudiantes no solo adquieren conocimientos teóricos, sino que también desarrollan la capacidad de aplicar esos conocimientos en situaciones del mundo real, como el diseño y análisis de mecanismos automotrices.

BIBLIOGRAFIA

1. Moreno, L. (2013). ¿Cómo impactan las tecnologías los currículos de la Educación Matemática? *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, 11, pp. 307-315.
2. Pantoja, R., Guerrero, L., Ulloa, R., y Nesterova, E. (2016). Modeling in problem situations of daily life. *Journal of Education and Human Development*, 5(1), pp. 62-75.
3. Evans, A. G. (1990). Perspective on the development of high-toughness ceramics. *Journal of the American Ceramic Society,* 73(2), pp.187-206.

SISTEMA EMBEBIDO 4.0 MULTITAREA PARA EL MONITOREO DE SEÑALES BIOLÓGICAS Y OTROS SENSORES

Edna G. Briones Andrade, Francisco Sánchez Niño, Lorena Rodríguez Salas, y Oscar F. Núñez Olvera

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
ednaguadalupe_ba@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta un dispositivo para la supervisión remota de signos vitales y diversas señales fisiológicas, basado en sistemas embebidos. El sistema se centra en la adquisición y visualización de señales de ECG (electrocardiograma) y EMG (electromiografía), y además permite la transmisión de datos provenientes de sensores que requieren monitoreo continuo.

Para su implementación, se utilizó un procesador de doble núcleo ESP32, junto con el sensor cardiaco AD8232, el sensor de actividad muscular X2-482, y una pantalla OLED de 128x64 píxeles para la visualización local de los datos.

Las señales adquiridas se transmiten de forma inalámbrica a través de una red Wi-Fi hacia un servidor Modbus TCP/IP, el cual redirige los datos a un panel frontal desarrollado en LabVIEW. Asimismo, la información se publica en una página web, permitiendo el acceso desde cualquier ubicación y dispositivo.

Los resultados demuestran que el sistema es capaz de capturar, transmitir y visualizar señales fisiológicas de forma eficiente, lo que lo convierte en una herramienta útil para fines académicos y de investigación.

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico ha dado paso a una nueva era en la medicina, caracterizada por una mayor precisión, accesibilidad y eficacia. Gracias al desarrollo de la inteligencia artificial, la biotecnología y la conectividad digital, el futuro de la salud promete terapias más personalizadas y una mejor calidad de vida para los pacientes a nivel global [1].

En este contexto, la instrumentación biomédica desempeña un papel fundamental en la monitorización de señales biológicas, permitiendo la adquisición, procesamiento y análisis en tiempo real de datos fisiológicos. Su importancia radica en la detección e identificación temprana de signos vitales como la frecuencia cardíaca, la presión arterial, la temperatura corporal y los niveles de oxígeno en sangre, facilitando diagnósticos más precisos y oportunos [2].

La monitorización de señales fisiológicas es esencial en ámbitos médicos, deportivos y de investigación. En particular, los dispositivos móviles y sistemas de monitoreo remoto contribuyen significativamente a la mejora de la atención sanitaria, permitiendo el seguimiento de pacientes fuera del entorno hospitalario, optimizando el uso de recursos médicos y reduciendo la necesidad de hospitalización [3].

La instrumentación biomédica es, por tanto, un campo multidisciplinario que exige conocimientos especializados en áreas como electrónica analógica y digital, teoría de control, procesamiento de señales, seguridad eléctrica y biocompatibilidad de materiales, entre otras [4, 5 ,6, 7].

En este trabajo se presenta una aplicación de tecnología basada en el Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo remoto de signos vitales y señales generadas por sensores que requieren supervisión continua o provienen de generadores de señal. El sistema propuesto ofrece una solución

eficaz y accesible para la vigilancia remota de pacientes, mejorando la capacidad de respuesta ante emergencias médicas y optimizando la atención tanto en entornos clínicos como domiciliarios [8].

La información es transmitida a través de una red Wi-Fi mediante el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP.

TEORÍA

Una de las tecnologías emergentes con mayor proyección y versatilidad en diversos sectores como la industria, el comercio, el medio ambiente, la academia, los negocios y la investigación entre otros, es el Internet de las Cosas (IoT). Esta tecnología permite la comunicación y transferencia de datos de forma inalámbrica mediante redes de radiofrecuencia, habilitando la interconexión de dispositivos electrónicos para el intercambio dinámico y continuo de información [9].

El IoT se basa en redes móviles que permiten la conexión de múltiples dispositivos a través de redes inalámbricas, como Wi-Fi, lo que facilita su control y monitoreo desde prácticamente cualquier lugar. Estos dispositivos pueden incluir desde motores, ventiladores, cerraduras electrónicas y lámparas, hasta sistemas industriales complejos como redes SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) utilizadas para controlar procesos completos de manufactura [10].

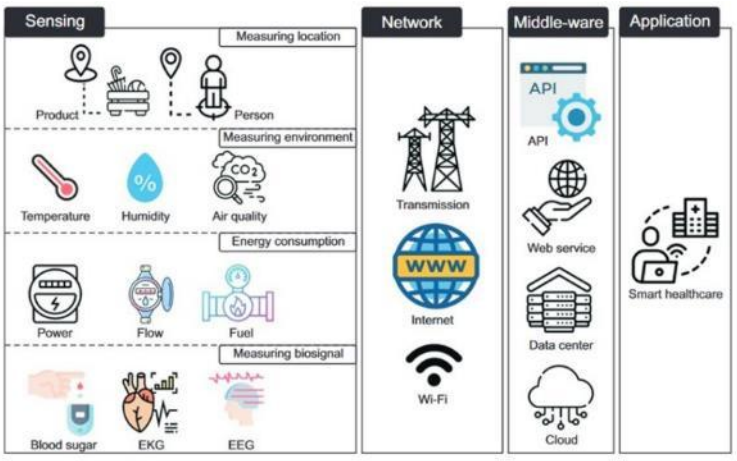


Fig. 1. Sistema de monitorización usando el Internet de las Cosas. Este sistema se ha obtenido de "*Usage of the Internet of Things in Medical Institutions and its Implications".*

Una de las principales ventajas de las redes IoT es su accesibilidad multiplataforma, permitiendo a los usuarios supervisar y controlar dispositivos desde computadoras, laptops, teléfonos móviles, tabletas u otros equipos con capacidad de conexión a Wi-Fi. La Figura 1 ilustra las etapas que conforman un sistema de monitoreo basado en tecnología IoT [9, 10].

Para que los dispositivos dentro de una red IoT puedan comunicarse eficientemente, es necesario emplear protocolos de comunicación, los cuales definen un conjunto de normas y procedimientos que permiten la transmisión de datos entre entidades dentro del sistema. En el mercado existe una amplia variedad de protocolos utilizados para la transferencia de información en redes IoT. Algunos de los más comunes incluyen:

- Modbus RTU
- EtherNet/IP
- Ethernet TCP/IP
- Profibus
- Profinet
- Modbus TCP/IP

- ASI

Estos protocolos permiten la integración efectiva de distintos dispositivos y sistemas, asegurando una comunicación fiable y estructurada, esencial para aplicaciones industriales, domóticas y de investigación.

La arquitectura del sistema implementado contempla la transmisión de datos mediante una red Wi-Fi, empleando el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP. En lo sucesivo, se detallan las distintas etapas que integran el dispositivo implementado. En la figura 2 se muestran las capas de aplicación que pueden llegar a conformar una red WiFi de monitoreo [8].

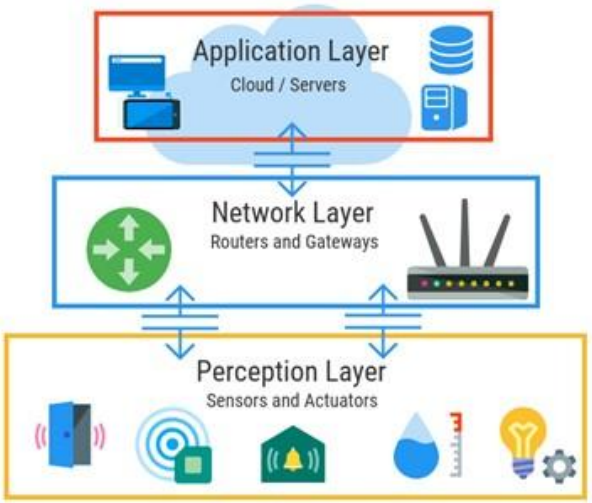


Fig. 2. Sistema de monitoreo de tecnología IoT para monitoreo y control. Obtenido de "*Architectures in the IoT Civilization"*.

PARTE EXPERIMENTAL

A. Hardware utilizado

- **ESP32:** Microcontrolador de doble núcleo con conectividad Wi-Fi integrada, empleado para la adquisición de señales y la transmisión de datos en tiempo real [6].
- **Módulo ECG AD8232:** Sensor de bajo consumo diseñado específicamente para la detección y adquisición de señales electrocardiográficas (ECG) [4].
- **Módulo EMG MU-MUSC:** Sensor utilizado para el monitoreo de la actividad eléctrica generada por los músculos (señales EMG) [5].
- **Potenciómetro:** Componente utilizado como entrada analógica para la calibración y ajuste de la sensibilidad del sistema.
- **Generador de funciones:** Dispositivo que proporciona señales analógicas estándar (senoidal, cuadrada, triangular) con el propósito de verificar y validar el correcto funcionamiento del sistema.
- **Pantalla OLED 128x64:** Dispositivo de visualización utilizado para mostrar, en tiempo real, los valores de las señales adquiridas y procesadas por el sistema.

En la figura 3 se puede observar el hardware utilizado, que contra de una tarjeta electrónica que alberga el microcontrolador ESP32 y otra donde se encuentran montados los sensores a monitorea.

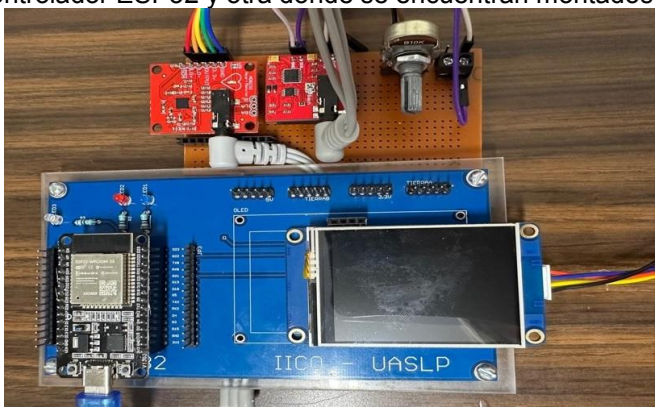


Fig. 3. Hardware utilizado para implementar el sistema de monitoreo de señales y bioseñales basado en el procesador de doble núcleo ESP32. En la parte superior (PCB en color café) se encuentran montados los sensores. En la parte inferior de la figura, (PCB en color azul) se encuentra el microcontrolador ESP32 y la pantalla OLED

B. Digitalización y transmisión

La adquisición de datos es un proceso mediante el cual un fenómeno físico del mundo real se convierte en una señal eléctrica. Estas señales pueden ser transformadas a formato digital para su posterior procesamiento, análisis y almacenamiento. Para realizar este proceso de manera adecuada, se requieren tres componentes fundamentales:

- Sensores: Dispositivos encargados de convertir variables físicas (como temperatura, presión, o actividad eléctrica) en señales eléctricas.

- Acondicionamiento de señal: Etapa que adapta la señal eléctrica adquirida, ajustando su nivel, filtrado o polarización para que sea compatible con la entrada del sistema de adquisición.

- Software de adquisición de datos: Se encarga de digitalizar la señal analógica, transmitirla a un sistema de procesamiento (como una computadora) y permitir su manipulación, visualización y análisis.

En el sistema implementado, las señales analógicas fueron obtenidas a través de los sensores AD8232 (ECG), MU-MUSC (EMG), un potenciómetro y un generador de funciones. Estas señales fueron digitalizadas por el microcontrolador ESP32, el cual transmite los datos mediante el protocolo Modbus TCP/IP a través de una red Wi-Fi hacia una estación de monitoreo implementada en LabVIEW, donde se realiza la visualización y análisis en tiempo real, en la figura 4 se puede observar un esquema de la integración de las etapas que conforman la adquisición de los datos en un sistema de monitoreo basado en microcontrolador [4, 5, 6, 7].

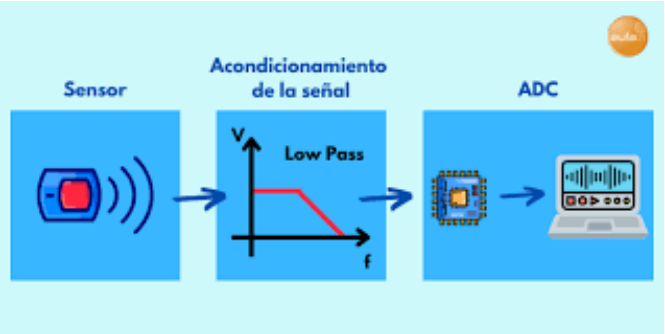


Fig. 4. Componentes básicos para adquisición y digitalización de señales analógicas.

C. Interfaz en LabVIEW

Se desarrolló una interfaz gráfica en LabVIEW con funcionalidad similar a la de un osciloscopio, diseñada para la visualización simultánea de múltiples señales. Esta interfaz permite el monitoreo en tiempo real de señales ECG, EMG, así como de otras señales analógicas auxiliares provenientes del sistema, en la figura 5 se muestra el panel de control implementado en LabVIEW.

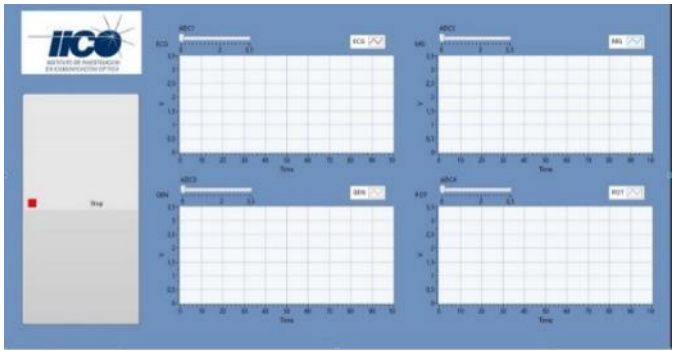


Fig. 5. Panel de control desarrollado en LabVIEW para la visualización de las señales adquiridas por el microcontrolador ESP32.

La comunicación entre el microcontrolador ESP32 y la estación de trabajo se implementó mediante bloques nativos de TCP/IP disponibles en LabVIEW, lo que permite una transmisión eficiente de los datos digitales a través de la red Wi-Fi. La interfaz facilita no solo la visualización dinámica de las señales, sino también su análisis y registro para fines académicos, clínicos o de investigación.

RESULTADOS

El sistema desarrollado demostró ser capaz de adquirir señales biomédicas, como las correspondientes al electrocardiograma (ECG) y la electromiografía (EMG), así como señales provenientes de sensores que requieren monitoreo continuo. La transmisión de datos mediante el protocolo TCP/IP a través de la red Wi-Fi mostró un desempeño estable, con baja latencia y sin pérdidas apreciables de información.

Las pruebas realizadas utilizando señales patrón generadas por un generador de funciones confirmaron la fidelidad y precisión del sistema en la adquisición y transmisión de señales analógicas. Por su parte, la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW permitió una visualización clara y en tiempo

real de las señales adquiridas, facilitando su análisis inmediato y contribuyendo a la validación funcional del sistema.

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un sistema funcional para el monitoreo de signos vitales y señales provenientes de sensores de medición, con capacidad de transmisión inalámbrica mediante tecnología IoT. La solución propuesta representa una alternativa viable, de bajo costo, orientada a aplicaciones en el ámbito educativo, la investigación biomédica y el desarrollo de soluciones móviles.

Este proyecto sienta las bases para futuras implementaciones en sistemas de monitoreo remoto, con potencial de aplicación en el seguimiento de pacientes ambulatorios, entornos clínicos domiciliarios y contextos de entrenamiento físico o rehabilitación, donde el acceso en tiempo real a datos fisiológicos resulta esencial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Webster, J. G. (2010). Medical Instrumentation: Application and Design. John Wiley & Sons
2. Carr, J. J., & Brown, J. M. (2011). Introduction to Biomedical Equipment Technology. Pearson
3. Sánchez Niño F. & De Anda Salazar F.J. (2015). A Hydrogen detectors wireless network for monitoring the gas ambient in a laboratory. Journal of Physics: Conference Series (582)
4. Analog Devices, “AD8232 Heart Rate Monitor Front End,” [Online]. Available: https://www.analog.com/en/products/ad8232.html.
5. Olimex, “EMG Muscle Sensor MU-MUSC,” [Online]. Available: https://www.olimex.com/Letter Symbols for Quantities, ANSI Standard Y10.5-1968.
6. Espressif Systems, “ESP32 Series Datasheet,” [Online]. Available: https://www.espressif.com/.
7. National Instruments, “Getting Started with LabVIEW,” [Online]. Available: https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html
8. Transmisión del SARS-COV-2: repercusiones sobre las precauciones en materia de prevención de infecciones: Reseña científica, 9 de julio de 2020.
9. Gatouillat A, Badr Y, Massot B, Sejdic E. Internet of Medical Things: A Review of Recent Contributions Dealing with Cyber-Physical Systems in Medicine. IEEE Internet Things J. octubre de 2018;5(5):3810-22.
10. Calihman A. Architectures in the IoT Civilization [Internet]. NetBurner. 2019. Disponible en: https://www.netburner.com/learn/architectural-frameworks-in-the-iot-civilization/

DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA DISTRIBUIR INSUMOS AGRICOLAS MEDIANTE UN DESARROLLADOR CAD

Julio Alberto Gutiérrez Jiménez[1], Ariadna Berenice Flores Jiménez[2], Cuauhtémoc Acosta Lua[2], Joel Hinojosa Davalos[2], Claudia Yadira Pacheco Montes[1]*.

[1] Tecnológico Nacional de México Campus Ocotlán[2] Universidad de Guadalajara Centro Universitario de la Ciénega.

Claudia.pm@ocotlan.tecnm.mx *

RESUMEN

La productividad y la competitividad son factores clave en el desarrollo económico de un país, ya que influyen directamente en la mejora de las condiciones de vida de la población al incrementar la disponibilidad de bienes y servicios. En México, estos aspectos desempeñan un papel fundamental en la agricultura, donde se busca fortalecer la producción mediante el control de plagas que afectan los cultivos hortofrutícolas, adoptando estrategias basadas en el manejo agroecológico. El objetivo del siguiente proyecto fue diseñar un prototipo para distribuir insumos agrícolas mediante un desarrollador CAD. Para el diseño del prototipo virtual se utilizó un software CAD, se aplicó la metodología [1] la cual consta de seis etapas: Reconocimiento de la necesidad, Definición del problema, Síntesis, Análisis, Evaluación y Presentación, así como, el modelo de trabajo de los "cinco por qué. Se obtuvieron los siguientes parámetros de prototipado rápido en la impresora Prusa i3: diámetro boquilla de extrusión de 0.4mm, velocidad de extrusión 25 mm/s y tipo de relleno de rejilla al 90%, filamento PLA, gasto de peso de filamento 263.99 g, gasto de filamento en metros 21.12 y con un tiempo estimado de impresión de 5 horas y 44 min, para un volumen de 51338.78 mm para un tamaño de 232.93 x 187.87 x 44.5 mm. El diseño de prototipos mediante un software desarrollador CAD permite optimizar tiempos de trabajo y permite la mejora estructural del proyecto a desarrollar mediante una visualización realista de precisión.

INTRODUCCIÓN

La productividad agrícola constituye un pilar fundamental para garantizar la seguridad alimentaria global, impulsar el desarrollo económico y promover la sostenibilidad en zonas rurales [2, 3,4]. No obstante, este sector enfrenta crecientes desafíos derivados de la degradación ambiental, el agotamiento de recursos naturales y los efectos adversos del cambio climático, como el incremento en temperaturas y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, los cuales comprometen seriamente la capacidad productiva [4,5,6,7,8]. En este contexto, la adopción de tecnologías innovadoras emerge como una estrategia clave para incrementar la productividad agrícola (PA). Soluciones como la agricultura de precisión, la mecanización avanzada y las aplicaciones biotecnológicas no solo optimizan los rendimientos, sino que también mitigan el impacto ambiental [9,10,11]. Sin embargo, persiste un reto crítico: asegurar el acceso equitativo a estas tecnologías, particularmente para pequeños agricultores en regiones en desarrollo, ya que su adopción es determinante para alcanzar sistemas agrícolas sostenibles y productivos [12] (Huang, 2024).

La dinámica agrícola está gobernada por una intrincada red de factores socioeconómicos y tecnológicos [9,13,14]. El rol de la tecnología como catalizador de la productividad agrícola está ampliamente documentado y demuestra que la implementación de innovaciones tecnológicas no solo eleva la eficiencia productiva de las unidades agrícolas, sino que también contribuye al mejoramiento del bienestar de los agricultores y a la seguridad alimentaria familiar [15].El Diseño Asistido por Computadora (CAD) se ha consolidado como una herramienta fundamental en la industria moderna, permitiendo la creación, análisis y optimización de modelos digitales en sustitución de métodos tradicionales basados en dibujo manual [16]. Estos sistemas facilitan la visualización y diseño de componentes que van desde elementos mecánicos básicos (tuercas,

tornillos) hasta maquinaria compleja, ofreciendo una plataforma versátil para materializar conceptos con precisión. En el ámbito agrícola, el CAD adquiere especial relevancia al permitir el análisis de parámetros críticos como deformación, estrés y factor de seguridad, optimizando así la vida útil y reduciendo costos en equipos agrícolas [17]. Además, su capacidad para desarrollar, modificar y perfeccionar diseños de manera iterativa [18,19] junto con la generación de ilustraciones precisas y editables [20] incrementa significativamente la calidad de los productos finales. No obstante, el sector agroalimentario enfrenta la demanda creciente de maquinaria agrícola multifuncional, diseñada en plazos reducidos, con altos estándares de calidad y costos competitivos. Ante este desafío, las tecnologías CAD emergen como soluciones clave, ya que integran capacidades de diseño y fabricación asistida por computadora, generando ahorros sustanciales en tiempo, mano de obra y recursos económicos [21].

PARTE EXPERIMENTAL

Para el diseño del prototipo virtual se utilizó un software CAD, se aplicó la metodología Shivegowda et al. 2022 la cual consta de seis etapas: Reconocimiento de la necesidad, Definición del problema, Síntesis, Análisis, Evaluación y Presentación, así como, el modelo de trabajo de los “cinco por qué.

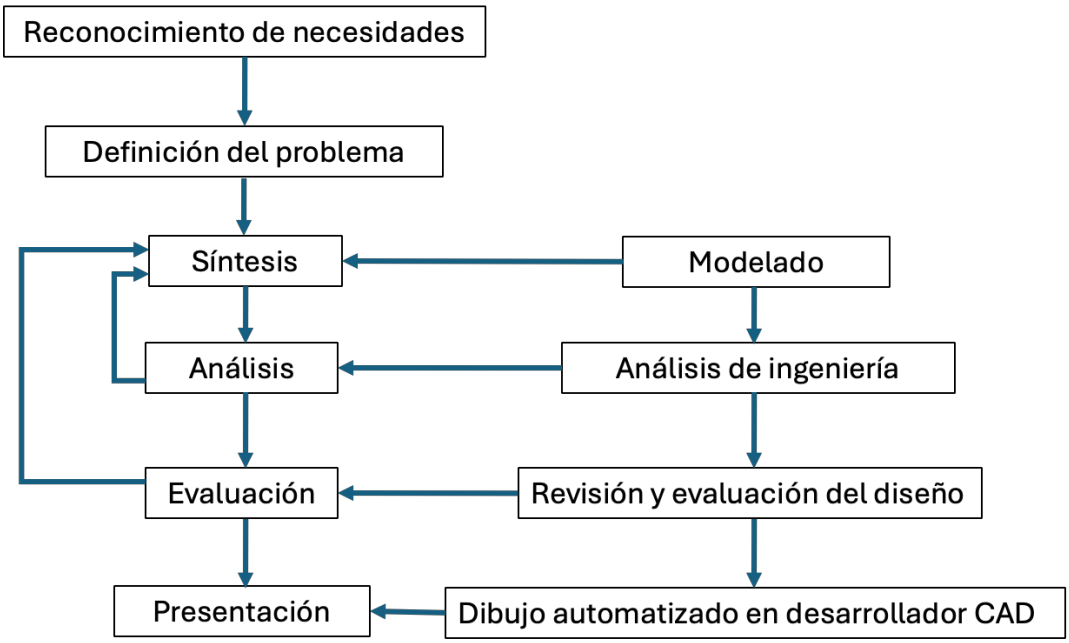


Figura 1. Diagrama general se seguimiento de prototipada fuente (Shivegowda 2022)

Se atendió la necesidad de un grupo de agricultores de la región de implementar un dispositivo de dispersión de insumos agrícolas, que fuera eficiente, fácil de usar, y que su estructura fuera robusta para uso en el campo. Posteriormente se procedió con el diseño de piezas en el desarrollador CAD. Para asegurar que el contenedor de insumos agrícolas tuviera un acceso rápido de llenado se diseñó una tapa de contenedor de insumos figura 2a asimismo, se procedió a desarrollar una pieza de sujeción de Frame con tapa de contenedor de insumos figura 2b, seguido de un diseño de una pieza que sujetará el motor figura 2c, y finalmente una pieza seguro de motor figura 2d. con este mínimo de piezas en su primer diseño garantizaba el correcto funcionamiento del prototipo.

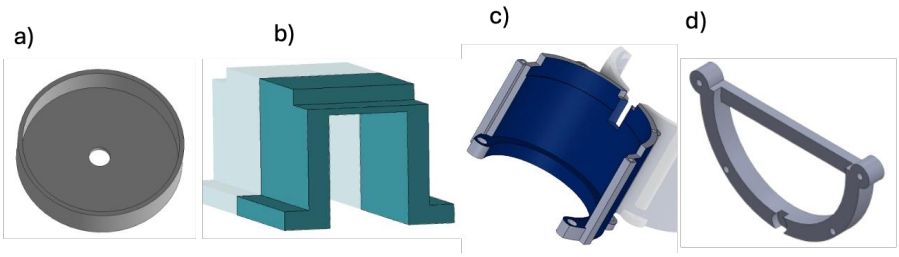


Figura 2. Diseño de piezas: a) Tapa de contenedor de insumos, b) Sujeción de frame con tapa de contenedor de insumos, c) soporte de motor, d) Seguro de soporte para motor.

Se rediseñaron piezas para un mejor manejo debido a que físicamente no fueron viables, se realizó la codificación del dibujo en el desarrollador CAD en Prusaslicer 2.4.1. para la impresión en la impresora Prusa i3. como la tapa engrane sin sujetador figura 3a que se tuvo que desarrollar una tapa engrane con sujetador integrado figura 3b, finalmente se desarrolló una la tapa engrane que tuviera integrada el sujetador, esto debido a que el sujetador por si solo presentaba debilidad a la acción mecánica figura 3d.

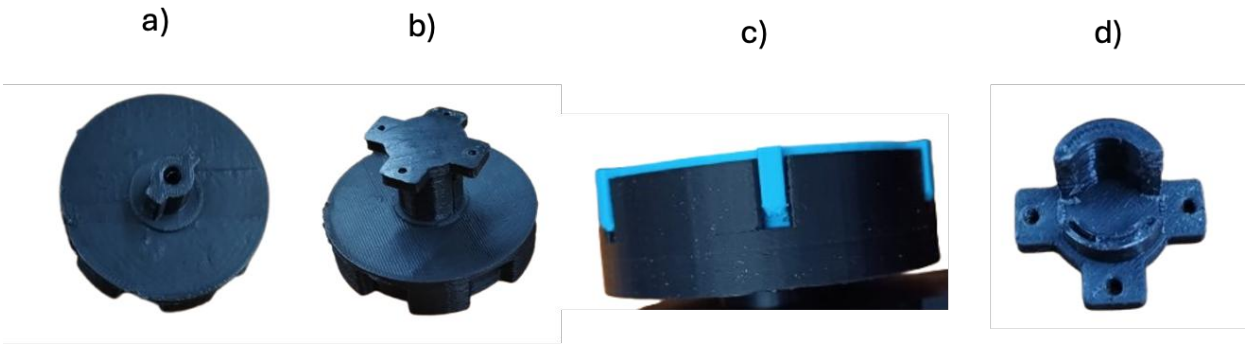


Figura 3. Impresiones en 3D: a) Tapa engrane sin sujetador, b) Tapa engrane con sujetador integrado, c) Remodelación de la tapa engrane, d) Falla de calidad por impresión en nivel bajo.

RESULTADOS

Se obtuvo el diseño final de un prototipo para distribuir insumos agrícolas en atención a las necesidades de los agricultores que fuera eficiente, fácil de usar, y que su estructura fuera robusta para uso en el campo diseñado mediante un software CAD figura 4.

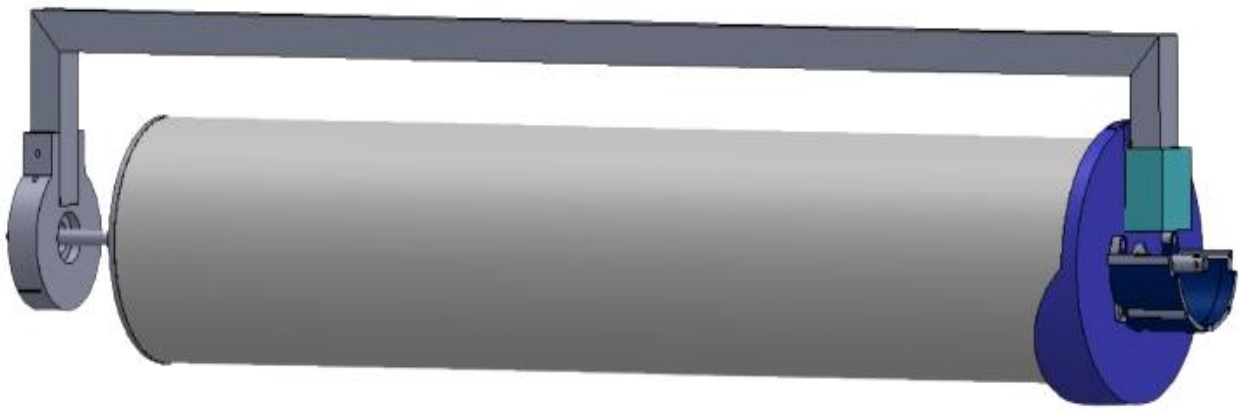


Figura 4. Prototipo para distribuir insumos agrícolas mediante un desarrollador CAD.

Así mismo, se evaluaron tres tipos de niveles para la impresión: Alto, Medio, Bajo, con el objetivo de dar mayor soporte de carga de insumos sin deformación de piezas, se obtuvieron los siguientes parámetros de prototipado rápido en la impresora Prusa i3: diámetro boquilla de extrusión de 0.4mm, velocidad de extrusión 25 mm/s. El mejor parámetro de impresión fue el nivel alto ya que presentaba la mayor resistencia mecánica de las piezas impresas, sin embargo, el gasto en peso del filamento y el tiempo requerido para su impresión fue mayor. Como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla1. Parámetros de impresión en la impresora Prusa i3.

		Bajo	Medio	Alto
Filamento		PLA	PLA	PLA
Relleno		20	60	90
	x	232.93	232.93	232.93
Tamaño	y	187,87	187,87	187,87
	z	44.5	44.5	44.5
Volumen		51338.78	51338.78	51338.78
Filamento en g		255.37	260.44	263.99
Filamento en metros		18.23	19.93	21.12
Tiempo estimado de impresión		5 h 1 min	5h 27min	5h 44 min

CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió el desarrollo de un prototipo funcional para la distribución de insumos agrícolas, diseñado mediante herramientas CAD. La implementación de este software demostró ventajas significativas en la optimización de tiempos de trabajo, la mejora estructural del sistema y la generación de visualizaciones precisas durante la fase de prototipado. Las plataformas CAD facilitan el diseño iterativo, la modificación eficiente y la optimización de productos, aspectos críticos en ingeniería. Adicionalmente, estas herramientas incrementan la exactitud en las representaciones técnicas y agilizan los procesos de corrección, lo que se traduce en diseños de mayor calidad y robustez. El uso de un software CAD no solo agilizó el desarrollo del prototipo, sino que también garantizó un proceso de diseño más flexible, preciso y adaptativo, validando su aplicabilidad en proyectos de ingeniería agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. D. Shivegowda, P. Boonyasopon, S. M. Rangappa et al., “A review on computer-aided design and manufacturing processes in design and architecture,” *Arch. Computat. Methods Eng.*, vol. 29, pp. 3973–3980, 2022, doi: 10.1007/s11831-022-09723-w.
2. S. Behera and D. Dutta, “Tracking gross primary productivity using satellite solar-induced fluorescence: Insights into India’s agricultural ecosystems,” *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, vol. 129, no. 5, p. e2023JG007586, 2024.
3. I. K. Bekoe, J. Abor, and S. Sekyi, “How do financial inclusion and bank stability explain agricultural productivity in Sub-Saharan Africa?,” *J. Econ. Stud.*, vol. 52, no. 2, pp. 225–238, 2025.
4. A. Goodluck, D. J. Otieno, and W. Oluoch-Kosura, “The effects of multiple agricultural advisory service providers on farmers’ productivity in Tanzania,” *Community Dev.*, pp. 1–18, 2024.

5. M. N. Atchadé and H. Nougbodé, “Statistical investigation on the relationship between climate change, food availability, agricultural productivity, and economic expansion,” *Heliyon*, vol. 10, no. 12, 2024.
6. A. Bouteska, T. Sharif, F. Bhuiyan, and M. Z. Abedin, “Impacts of the changing climate on agricultural productivity and food security: Evidence from Ethiopia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 449, p. 141793, 2024.
7. A. B. Omotoso et al., “Climate-smart agricultural practices, productivity, and food-nutrition security in rural South Africa: A dataset of smallholder maize farmers,” *Data Brief*, vol. 55, p. 110725, 2024.
8. R. Sleiman et al., “Irrigation and agricultural opportunities: Evaluating hemp (*Cannabis sativa* L.) suitability and productivity in Lebanon,” *Water*, vol. 16, no. 13, p. 1865, 2024.
9. F. Li et al., “Harnessing the digital economy for sustainable agricultural carbon productivity: A path to green innovation in China,” *J. Knowl. Econ.*, pp. 1–27, 2024.
10. S. Lu et al., “How can rural digitalization improve agricultural green total factor productivity: Empirical evidence from counties in China,” *Heliyon*, vol. 10, no. 15, 2024.
11. R. Karthickmanoj et al., “Revolutionizing agricultural productivity with automated early leaf disease detection system for smart agriculture applications using IoT platform,” *Environ. Dev. Sustain.*, pp. 1–17, 2024.
12. W. Huang and X. Wang, “The impact of technological innovations on agricultural productivity and environmental sustainability in China,” *Sustainability*, vol. 16, no. 19, p. 8480, 2024, doi: 10.3390/su16198480.
13. M. A. Ashour, M. S. A. Nasser, and T. S. Abu-Zaid, “Evaluation of the effects of improving tertiary earthen canals on water savings, conveyance efficiency, and agricultural productivity,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 8, p. 102850, 2024.
14. R. Li, Q. Chen, and M. Li, “The impact of digital finance on enhancing the spatial effects of heterogeneous environmental regulations in supporting agricultural green total factor productivity,” *Agricultur*e, vol. 14, no. 7, p. 995, 2024.
15. A. Fatchiya, S. Amanah, and Y. I. Kusumastuti, “Penerapan inovasi teknologi pertanian dan hubungannya dengan ketahanan pangan rumah tangga petani,” *J. Penyul.*, vol. 12, no. 2, p. 190, 2016, doi: 10.25015/penyuluhan.v12i2.12988.
16. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd ed. Berlin, Germany: Springer, 2007.
17. R. Yadav and E. R. Jakasania, “Computer aided design (CAD): A new era in design of farm machines,” *J. Ergonomics S*, vol. 6, 2017.
18. T. Meinders, I. A. Burchitz, M. H. A. Bonte, and R. A. Lingbeek, “Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 5, pp. 499–514, 2008.
19. X. Y. Xu and Y. Y. Wang, “Multi-model technology and its application in the integration of CAD/CAM/CAE,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 563–567, 2002.
20. V. Quintana et al., “Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry,” *Comput. Ind.*, vol. 61, no. 5, pp. 497–508, 2010.
21. K. Ç. Selvi and Ö. Kabas, “Use of SOLIDWORKS in designing agricultural machines (a sample: Rotary tiller),” *Ann. Fac. Eng. Hunedoara*, vol. 16, no. 4, pp. 101–106, 2018.

ANÁLISIS DE CINÉTICAS DE SECADO EN UN DESHIDRATADOR ROTATIVO CON MONITOREO INTELIGENTE DE VARIABLES

Juan Manuel Tabares Martinez[1], Adriana Guzmán López[1], Yaquelin Verenice Pantoja Pacheco[1], Elizabeth Espitia Romero[1] y Micael Gerardo Bravo Sánchez[1]

1 Instituto Tecnológico de Celaya
juan.tabares@itcelaya.edu.mx

RESUMEN

La deshidratación es un proceso agroindustrial que permite prolongar la vida útil de alimentos, mientras se conserva su calidad. Este estudio aborda el cálculo y análisis de las cinéticas de secado de zanahoria utilizando un deshidratador rotativo, equipado con un sistema para monitorear la temperatura y la pérdida de masa. Se integraron sensores TMP36 para controlar las variables térmicas del proceso, junto con células de carga para medir la pérdida de masa de las muestras durante su deshidratación. La adquisición de datos se gestionó mediante un ordenador Raspberry Pi 5, una plataforma compacta y de alto rendimiento que proporcionó una interfaz eficaz para integrar y sincronizar múltiples sensores. Su aplicación permitió la medición continua de las variables clave del proceso de deshidratación, como la temperatura y la masa. La Raspberry Pi 5 se integró con los sensores TMP36 y células de carga para el cálculo de las cinéticas de secado, facilitando la obtención de datos de alta precisión. Gracias a su capacidad de procesamiento y conectividad avanzada, la tarjeta de adquisición de datos optimizó el control en tiempo real del deshidratador, utilizando un sistema de lógica difusa que ajusta automáticamente los parámetros operativos en función de las condiciones cambiantes durante el proceso. Esta flexibilidad permite una toma de decisiones más rápida y precisa, mejorando la eficiencia del proceso de deshidratación. El deshidratador operó bajo condiciones controladas, evaluando el impacto de parámetros como la velocidad de secado y la temperatura sobre la eficiencia de deshidratación. Se evaluaron tres masas iniciales (250 g, 500 g y 750 g), registrando la pérdida de humedad, la transferencia de energía térmica y la eficiencia del consumo de energía del sistema. Los resultados mostraron que la masa de 750 g presentó la mayor eficiencia (50%) y el mayor consumo energético (1,500 kJ), mientras que la masa de 250 g mostró la tasa de deshidratación más rápida. El valor térmico de operación del deshidratador fue de 65°C. Se concluye que un incremento en la carga inicial mejora la eficiencia del proceso, optimizando la eliminación de humedad y favoreciendo la obtención de curvas de secado. Este estudio ofrece una alternativa viable para aplicaciones agroindustriales y contribuye al diseño de sistemas de secado más eficientes, destacando la importancia de la monitorización inteligente para mejorar tanto la calidad del producto como la reducción de costos en el proceso de deshidratación de alimentos.

INTRODUCCIÓN

La deshidratación de alimentos es una técnica de conservación que ha evolucionado significativamente con el desarrollo de tecnologías térmicas e inteligentes, siendo hoy un proceso fundamental en la industria agroalimentaria para reducir pérdidas poscosecha, extender la vida útil de productos perecederos y facilitar su almacenamiento y distribución [16]. Este método, además de eliminar gran parte del contenido hídrico, tiene como objetivo preservar en la mayor medida posible las características nutricionales, funcionales y sensoriales de los alimentos, lo que representa un desafío técnico relevante, especialmente cuando se trabaja con productos ricos en compuestos bioactivos.

La zanahoria (*Daucus carota L.*) es un ejemplo claro de este desafío. Su alto contenido de agua (superior al 85 %) y su riqueza en compuestos funcionales como los carotenoides, antioxidantes fenólicos y fibra dietética la convierten en un alimento muy susceptible a la degradación durante el secado, particularmente cuando se emplean métodos convencionales con control limitado sobre las condiciones del proceso [9]. Una exposición prolongada a temperaturas elevadas puede inducir una

degradación térmica significativa de dichos compuestos, disminuyendo el valor funcional del producto deshidratado. Esto justifica la necesidad de investigar métodos más eficientes y con mayor control de las variables críticas del proceso, con el fin de garantizar un balance adecuado entre eficiencia energética y calidad nutricional.

En este contexto, el presente estudio propone una evaluación cinética del proceso de deshidratación de zanahoria utilizando un secador rotatorio compacto, el cual ha sido instrumentado con un sistema ciberfísico inteligente. A diferencia de plataformas basadas en microcontroladores tradicionales, se empleó una Raspberry Pi 5 como unidad de procesamiento central, permitiendo el desarrollo de algoritmos complejos en tiempo real, así como la integración de múltiples sensores de alta precisión. En este sistema se utilizaron sensores TMP36 para la medición continua de la temperatura interna del secador y celdas de carga calibradas para el monitoreo dinámico de la pérdida de masa del producto. Esta arquitectura de adquisición de datos, descrita y es altamente eficiente [2], permite una sincronización precisa de las variables térmicas y de peso, condición fundamental para el ajuste de modelos cinéticos que representen la transferencia simultánea de calor y masa durante el proceso de secado [17].

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo condiciones controladas, con una temperatura fija de 65 °C y tres niveles distintos de carga inicial (250 g, 500 g y 750 g). A fin de optimizar el proceso, se integró un controlador basado en lógica difusa que ajustaba dinámicamente el flujo de aire caliente y la intensidad del calentamiento eléctrico en función de las condiciones internas del sistema [11]. La lógica difusa permite implementar reglas heurísticas que simulan el razonamiento humano, lo cual resulta particularmente eficaz en sistemas térmicos no lineales, como el secado rotatorio, donde las condiciones ambientales y de carga pueden cambiar constantemente. Este tipo de control ha demostrado ventajas sustanciales frente a esquemas clásicos como el control PID, en especial cuando se requiere una rápida adaptación a perturbaciones internas y externas [1].

La implementación de sistemas inteligentes de control embebido ha sido identificado como una de las principales vías para mejorar la eficiencia energética de los procesos térmicos en el sector agroindustrial [10]. Asimismo, investigaciones recientes han destacado el papel de los sistemas de monitoreo multivariable en tiempo real como herramientas para obtener curvas de deshidratación más predecibles y homogéneas, lo que contribuye tanto a la calidad final del producto como a la sostenibilidad del proceso [18]. En línea con estos enfoques, el presente trabajo monitoreó variables clave como la eficiencia térmica, la energía específica consumida (kJ/kg) y la dinámica de transferencia de calor, apoyándose en modelos matemáticos de secado que plantean ecuaciones diferenciales acopladas para describir el comportamiento no lineal del proceso [7, 5].

Los resultados revelaron que la mayor eficiencia térmica (50 %) se alcanzó con la carga de 750 g, mientras que la mayor velocidad de deshidratación correspondió a la carga más ligera (250 g). Se ha observado una relación inversa entre carga y velocidad de secado en sistemas rotatorios, lo cual refleja la compleja interacción entre la masa de producto y la eficiencia energética [6]. Esta no linealidad es especialmente relevante para el diseño de tecnologías de secado que buscan maximizar la eficiencia sin comprometer la calidad. Estas relaciones pueden ser aprovechadas en entornos rurales o semi-industriales para desarrollar soluciones energéticamente eficientes [18].

Finalmente, este estudio resalta el potencial de integrar plataformas de bajo costo, como la Raspberry Pi, con sistemas de control avanzados y sensores de alta resolución para optimizar el secado de productos agrícolas. La capacidad de ejecutar algoritmos de control adaptativo en tiempo real, junto con la adquisición precisa de variables críticas, abre nuevas posibilidades para el desarrollo de tecnologías agroindustriales accesibles, eficientes y sostenibles [14]. Este tipo de sistemas puede ser implementado de forma efectiva en contextos rurales con recursos limitados, contribuyendo a mejorar la conservación de alimentos y a reducir el desperdicio poscosecha en regiones agrícolas vulnerables [15].

TEORÍA

Dinámica térmica en procesos de deshidratación rotatoria

La deshidratación de productos agrícolas mediante secadores rotatorios es un proceso termo-másico complejo, regido por la transferencia simultánea de calor y masa. En este sistema, el calor suministrado al tambor induce la evaporación del agua contenida en el producto, mientras el movimiento rotacional promueve la exposición uniforme de la superficie de secado. El transporte de humedad se ve influenciado por gradientes térmicos, resistencia interna del alimento, propiedades higroscópicas y flujo convectivo del aire caliente.

En la etapa inicial del secado, denominada periodo de velocidad constante, la tasa de evaporación está dominada por el suministro de calor y la presión parcial del vapor en la interfase aire-producto. Conforme avanza el proceso, se alcanza la fase de velocidad decreciente, donde la difusión interna de la humedad se convierte en el factor limitante [1]. Esta transición está determinada por la estructura microcelular del vegetal, la porosidad residual y la temperatura superficial.

La eficiencia del proceso depende de la relación entre la energía útil transferida para evaporar el agua y la energía total consumida. Un control térmico adecuado minimiza las pérdidas por sobrecalentamiento y mejora la relación entalpía-eficiencia [2]. Este balance es crítico para productos con alta humedad inicial como la zanahoria, que exhibe una cinética de secado no lineal.

Instrumentación embebida en sistemas ciberfísicos de secado

Los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés) integran sensores, controladores inteligentes y unidades de procesamiento embebido para monitorear y regular fenómenos físicos en tiempo real. En el contexto del secado agroindustrial, esta integración permite capturar variables críticas (temperatura, masa, humedad, velocidad del aire) con alta frecuencia de muestreo y tomar decisiones automáticas sobre parámetros operativos [3].

La Raspberry Pi 5, utilizada como núcleo de control, ofrece capacidades de procesamiento paralelo, conectividad y comunicación con múltiples sensores mediante protocolos como I2C, SPI o UART. Esta plataforma es especialmente útil para implementar algoritmos de control no lineal en ambientes con restricciones energéticas y térmicas.

La medición de masa mediante celdas de carga con galgas extensiométricas permite detectar de forma precisa la pérdida de humedad durante el secado, mientras que los sensores de temperatura analógicos TMP36, si bien simples, ofrecen una respuesta rápida y lineal en el intervalo térmico de interés (0–100 °C), con un margen de error aceptable para aplicaciones experimentales [4].

Control difuso aplicado a procesos térmicos

El control difuso representa una estrategia robusta frente a la naturaleza no lineal, multivariable y altamente dinámica de los sistemas térmicos de secado. A diferencia del control clásico (PID), que requiere una modelación matemática explícita del sistema, la lógica difusa permite operar con reglas heurísticas del tipo “si–entonces”, incorporando el conocimiento empírico del proceso [5].
Un controlador difuso típico consta de tres etapas principales:

Fuzzificación: convierte los valores reales de las variables de entrada (por ejemplo, error térmico y su derivada) en variables lingüísticas.
Inferencia: aplica una base de reglas definida por expertos o métodos de entrenamiento para determinar las salidas correspondientes.
Defuzzificación: convierte las salidas lingüísticas en valores numéricos para la actuación real sobre el sistema (potencia de calefacción, velocidad del ventilador).

Esta arquitectura es especialmente eficaz en procesos con retardos térmicos, histéresis, o condiciones límite no modelables fácilmente. En sistemas de secado rotatorio, su uso permite mantener la temperatura interna dentro de un umbral de oscilación mínimo y ajustar dinámicamente la respuesta del sistema frente a cambios en la tasa de evaporación o variaciones en la carga térmica [6]

PARTE EXPERIMENTAL

Diseño del sistema ciberfísico de secado rotatorio

El sistema desarrollado integra un secador rotatorio de laboratorio con un conjunto de sensores electrónicos, actuadores, microcontroladores y un algoritmo de control difuso adaptativo. La estructura principal del secador rotatorio está construida en acero inoxidable, con dimensiones de 30 cm de largo y 20 cm de diámetro, similar al modelos propuestos para el secado móvil de biomasa [3]. La rotación del tambor se realiza mediante un motor de corriente continua con controlador PWM, permitiendo velocidades ajustables según el material y las condiciones de operación.

El sistema ciberfísico está constituido por un microcontrolador Arduino Mega 2560 R3 como unidad central de adquisición y control. Se incorporaron sensores DHT22 y DHT11 para el monitoreo de temperatura y humedad, un anemómetro IP65 para velocidad del aire caliente, un wattímetro digital para consumo eléctrico y celdas de carga con amplificador HX711 para medir la pérdida de peso del producto durante el proceso de secado. Esta configuración multivariable permite realizar una supervisión integral en tiempo real, como se ha recomendado en estudios recientes sobre eficiencia energética en secadores rotatorios [12, 6], ver figura 1.

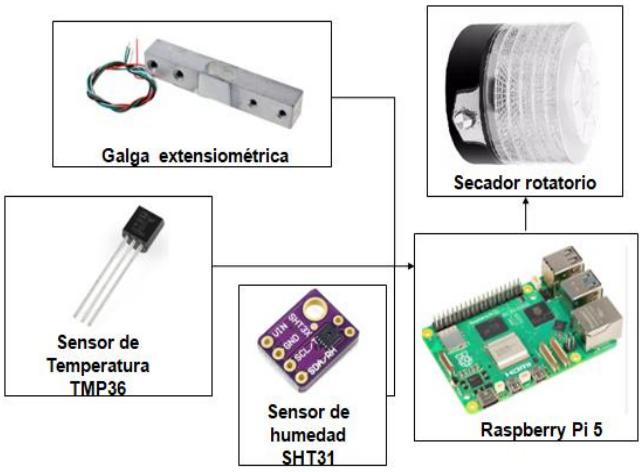


Figura 1. Instrumentación secador rotatorio.

Desarrollo del sistema de control difuso adaptativo

El sistema difuso fue diseñado e implementado en Arduino utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. Se definieron tres variables de entrada: temperatura del aire, humedad relativa y pérdida de masa, y una variable de salida. Las funciones de pertenencia se configuraron de acuerdo con rangos experimentales definidos por los sensores, y se construyó una base de reglas heurísticas de tipo Mamdani. El diseño fue validado con referencia a modelos previos de control difuso para procesos de secado y conversión de energía térmica [5, 8].

Este enfoque permite adaptar la respuesta del sistema a perturbaciones externas, como cambios en la carga inicial o condiciones ambientales, optimizando así el tiempo y consumo energético. La lógica difusa se seleccionó por su efectividad frente a las no linealidades e incertidumbres del proceso de secado, como ha sido demostrado en otras aplicaciones agroindustriales [1, 11].

Protocolo experimental

Se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando zanahoria (Daucus carota) como biomaterial modelo. Las muestras fueron previamente cortadas en rodajas uniformes de 5 mm de espesor y se pesaron 3.5 kg para cada ensayo. Se programó una temperatura promedio del aire de secado de 75 °C y una velocidad constante de 1.5 m/s, siguiendo condiciones para preservar las propiedades fisicoquímicas de productos vegetales [17, 9].

El tiempo de secado fue registrado hasta alcanzar una humedad final del 10%, partiendo de un contenido inicial aproximado del 90%. Las condiciones ambientales del laboratorio se mantuvieron constantes (25 °C y 55 % de HR), y las variables fueron registradas automáticamente cada 5 minutos durante todo el proceso, como se hace en sistemas de control orientado a monitoreo en línea [14, 4].

Evaluación de la eficiencia térmica y energética

La eficiencia térmica del sistema se calculó mediante la relación entre la energía útil transferida al producto (según la pérdida de humedad) y la energía total suministrada por el sistema de calentamiento eléctrico. El consumo energético específico (kWh/kg) se obtuvo dividiendo el total de energía medida por el wattímetro entre la masa deshidratada final. Esta metodología es coherente con lo reportado en estudios de optimización energética de secadores rotatorios [10,15].

Para el análisis de transferencia de calor, se consideró el flujo convectivo del aire caliente a través del cilindro, evaluando las condiciones de transferencia forzada en régimen estacionario. La geometría del tambor rotatorio y la configuración de las aletas internas tipo "L" se diseñaron inspiradas en los modelos de conducción térmica fabricados para tambores rotatorios deshidratadores [18].

Validación del sistema

Se compararon las cargas distintas (1 para analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de masa y flujo térmico. Los resultados obtenidos se contrastaron con la cinética de secado teórica y con trabajos similares de secado en túneles [2], híbridos solares [7,13] y rotatorios con control inteligente [16].

Asimismo, se consideró la vida útil del equipo en función del desgaste de sus componentes, especialmente del sistema de paletas internas [13], analizando la durabilidad en función del número de ciclos térmicos y mecánicos.

RESULTADOS

Monitoreo térmico durante el proceso de deshidratación

El sistema de adquisición de datos, basado en una Raspberry Pi 5 y sensores de temperatura TMP36, permitió registrar continuamente la evolución térmica dentro del tambor rotatorio. Durante los primeros 10 minutos se evidenció una fase transitoria donde la temperatura se elevó progresivamente hasta alcanzar el punto de consigna de 65 °C. A partir de ese momento, gracias al control ejercido por el sistema difuso, se logró mantener la temperatura dentro de un rango de ±1.2 °C, estabilizándose alrededor del valor objetivo. Esta estabilidad térmica es crucial para asegurar una transferencia de calor uniforme y continua durante el secado.

El comportamiento térmico observado concuerda con lo reportado en estudios previos, donde se señala que mantener condiciones térmicas constantes en sistemas de secado rotatorio favorece la eficiencia en la transferencia de energía y la homogeneidad en la deshidratación del producto [1,2].

Particularmente, durante los primeros 60 minutos del proceso se registró la mayor tasa de evaporación, lo que indica que esta etapa es crítica para el control térmico preciso.

Evaluación de la pérdida de masa y curvas de secado

Las celdas de carga integradas al sistema permitieron monitorear en tiempo real la pérdida de masa de las muestras durante el proceso. En los tres ensayos se evidenció una tendencia decreciente exponencial de la masa, típica de procesos de secado por convección forzada. La muestra de 250 g alcanzó el contenido final deseado en aproximadamente 240 minutos, mientras que la muestra de 750 g requirió cerca de 480 minutos, presentando una cinética de secado más lenta (Figura 2).

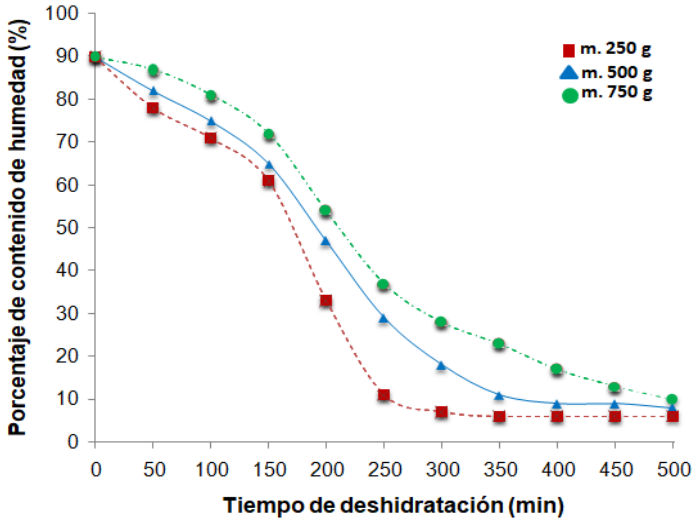


Figura 2. Cinéticas de deshidratación de zanahoria.

Esta diferencia responde al efecto del volumen del producto sobre el gradiente de presión parcial de vapor en el interior del tambor, el cual disminuye a medida que aumenta la masa, generando una mayor resistencia al transporte de humedad. Este fenómeno ha sido documentado en otros estudios, los cuales evidencian que cargas mayores dificultan la difusión de humedad y reducen la pendiente de la curva de secado [3,4]. Así, el diseño del proceso debe considerar la masa de producto como un factor determinante en la eficiencia de deshidratación.

Cálculo de la eficiencia térmica y consumo energético

A partir de los datos experimentales se calcularon la eficiencia térmica y el consumo energético para cada nivel de carga. Se observó que la muestra de 750 g alcanzó la mayor eficiencia térmica, seguida por las muestras de 500 g y 250 g. Esta tendencia sugiere que a mayor carga, el sistema logra un mejor aprovechamiento del calor suministrado, ver figura 3.

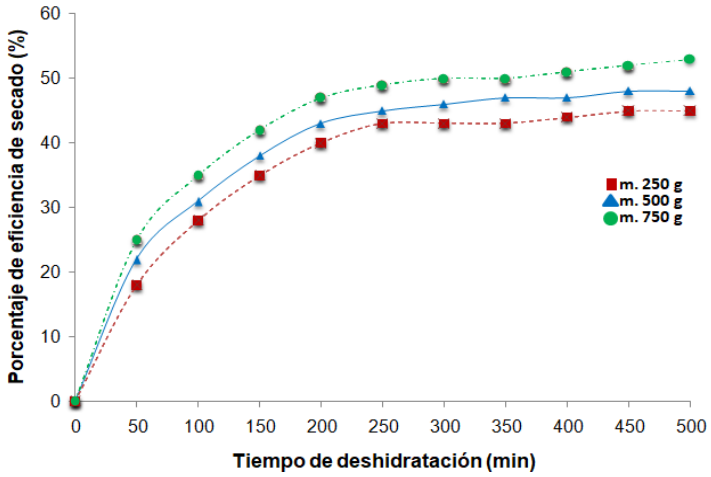


Figura 3. Eficiencia de deshidratación zanahoria.

El consumo energético total mostró una correlación directa con la masa tratada, según los siguientes valores:

- 250 g: 720 kJ
- 500 g: 1,100 kJ
- 750 g: 1,500 kJ

Aunque la muestra de 250 g presentó la tasa de secado más alta, también fue la menos eficiente desde el punto de vista energético, lo que indica un bajo aprovechamiento del calor suministrado. Este comportamiento es consistente con estudios sobre optimización energética en sistemas de secado, los cuales concluyen que cargas intermedias o elevadas tienden a maximizar el rendimiento térmico global [5,6].

Evaluación del sistema difuso en tiempo real

El sistema de control implementado con lógica difusa adaptativa demostró una capacidad efectiva para ajustar en tiempo real la potencia del calefactor y la velocidad del ventilador, en función de las variaciones registradas en la temperatura interna y la tasa de pérdida de humedad. Esta adaptabilidad permitió mantener condiciones operativas estables durante las transiciones críticas del proceso, especialmente al inicio del secado y hacia el final, cuando la eliminación de humedad se torna más lenta.

El desempeño del controlador difuso confirma su idoneidad para sistemas térmicos no lineales, como los procesos de secado agroindustrial. Diversos estudios han validado su eficacia en la regulación de variables en tiempo real, dada su capacidad para operar sin requerir un modelo matemático preciso del sistema [7,8]. En este caso, su aplicación permitió evitar sobrecalentamientos y mejorar la homogeneidad térmica dentro del tambor, favoreciendo una deshidratación más uniforme.

Análisis comparativo entre cargas de producto

Este proyecto muestra que las curvas de secado obtenidas para las tres masas evaluadas. Se observan las siguientes características distintivas:

250 g: Secado más rápido (240 min), pero con menor eficiencia térmica y mayor consumo energético específico.

500 g: Tiempo de secado intermedio (360 min) y mayor equilibrio entre eficiencia térmica, consumo energético y uniformidad.

750 g: Máxima eficiencia térmica (50 %), aunque con el mayor tiempo de proceso (480 min).

Estos resultados evidencian que, si bien cargas mayores pueden mejorar el rendimiento energético del sistema, también implican un mayor tiempo de operación. En consecuencia, la selección de la masa de producto a deshidratar debe basarse en los objetivos del proceso: si se prioriza la eficiencia energética, se recomiendan cargas mayores; si se busca reducción del tiempo, cargas menores resultan más convenientes. Este tipo de análisis ha sido propuesto en otros estudios donde se analiza el balance entre eficiencia, calidad del producto y productividad del sistema [9,10].

CONCLUSIONES

El presente estudio evidenció que la integración de sistemas embebidos de alto rendimiento, como la Raspberry Pi 5, junto con sensores de temperatura TMP36 y celdas de carga, permite desarrollar una plataforma de monitoreo y control en tiempo real altamente precisa y funcional para procesos de deshidratación en secadores rotatorios. Esta arquitectura tecnológica facilitó la adquisición continua de variables clave, como masa y temperatura, posibilitando la caracterización detallada de las cinéticas de secado y la evaluación térmica bajo condiciones controladas.

Los resultados experimentales confirmaron que la masa inicial de carga tiene un impacto significativo en la eficiencia térmica y el consumo energético del sistema. Se observó que cargas mayores, como la de 750 g, favorecen un mayor aprovechamiento energético (50 % de eficiencia con 1,500 kJ consumidos), en contraste con cargas menores (250 g), que aunque reducen el tiempo de proceso, presentan una eficiencia inferior (43 %). Esto sugiere que, en sistemas rotatorios con transferencia de calor por convección forzada, es posible optimizar el rendimiento térmico ajustando la carga de producto, siempre que se mantenga un control activo de las condiciones internas del secador.

La implementación del sistema de control basado en lógica difusa mostró una capacidad adaptativa robusta ante variaciones térmicas y de humedad, regulando dinámicamente la potencia de calentamiento y la velocidad del flujo de aire. Esta estrategia permitió mantener condiciones térmicas estables y homogéneas, fundamentales para lograr una deshidratación uniforme y eficiente. La lógica difusa se consolidó así como una herramienta de control eficaz frente a los desafíos inherentes a procesos térmicos no lineales, mejorando tanto la eficiencia energética como la calidad del producto final.

En síntesis, la combinación de instrumentación inteligente, adquisición multivariable en tiempo real y control difuso adaptativo constituye una solución integral para la optimización del secado agroindustrial. Esta propuesta no solo eleva la eficiencia operativa del sistema, sino que también contribuye a la sostenibilidad energética del proceso. Se recomienda en investigaciones futuras ampliar este enfoque hacia otros productos agrícolas, evaluar su escalabilidad industrial y comparar el rendimiento del controlador difuso con algoritmos avanzados como el control predictivo basado en modelos (MPC) o redes neuronales artificiales, en aras de continuar mejorando el desempeño técnico y económico de los sistemas de deshidratación

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdenouri, N., Choulli, H., Abid, M., & Bouchekara, H. R. E. H. (2021). Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer. Solar Energy, 231, 328–342. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.026
2. Charmongkolpradit, S., Jiamjariyatam, R., Phomrak, P., & Wongwicha, P. (2021). Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture contents in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer. Case Studies in Thermal Engineering, 25, 100886. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100886

3. Del Giudice, A., Colantoni, A., Barbanera, M., & Cecchini, M. (2019). Wood Chip Drying through the Using of a Mobile Rotary Dryer. Energies, 12(1590). https://doi.org/10.3390/en12091590
4. Ettahi, K., Ben Amar, F., Abdelkafi, A., & Ben Bacha, H. (2022). Modeling and Design of a Solar Rotary Dryer Bench Test for Phosphate Sludge. Modelling and Simulation in Engineering, 2022, 1–11. https://doi.org/10.1155/2022/5574242
5. Farajdadian, S., & Hosseini, S. H. (2019). Design of an optimal fuzzy controller to obtain maximum power in solar power generation system. Solar Energy, 182, 161–178. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.051
6. Grimm, A., Weinand, A., Wotruba, H., & Witt, G. (2017). Drying recycled fiber rejects in a bench-scale cyclone: Influence of device geometry and operational parameters on drying mechanisms. Fuel Processing Technology, 167, 631–640. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.08.004
7. Hamdani, N., Rizal, T., & Muhammad, Z. (2018). Fabrication and testing of hybrid solar-biomass dryer for drying fish. Case Studies in Thermal Engineering, 12, 489–496. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.06.008
8. Júnior, M. P., Siqueira, P. H. A., de Almeida, G. G., & de Oliveira, F. P. (2020). Energy savings in a rotary dryer due to a fuzzy multivariable control application. Drying Technology, 40, 1196–1209. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1861459
9. Kulapichitr, F., Pintathong, P., & Ketsa, S. (2021). Effect of post-harvest drying process on chlorogenic acids, antioxidant activities and CIE-Lab color of Thai Arabica green coffee beans. Food Chemistry, 366, 130504. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130504
10. Li, Z., Zhu, W., Jiang, W., & Wang, B. (2022). Energy transfer analysis of the SH626 sheet rotary dryer on the production system perspective. Energy Reports, 8, 13–20. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.057
11. Nadian, M. H., Ghobadian, B., Najafi, G., & Tavakoli, T. (2017). An intelligent integrated control of hybrid hot air-infrared dryer based on fuzzy logic and computer vision system. Computers and Electronics in Agriculture, 137, 138–149. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.001
12. Pang, S., Hu, W., Li, H., Zhou, J., & Sun, Y. (2021). Intelligent control in the application of a rotary dryer for reduction in the over-drying of cut tobacco. Applied Sciences, 11(17), 8205. https://doi.org/10.3390/app11178205
13. Petrescu, M. G., Tarba, C., Moise, V., & Capatina, A. (2024). Estimating the lifetime of rotary dryer flights based on experimental data. Processes, 12(5), 993. https://doi.org/10.3390/pr12050993
14. Sağlam, C., & Çetin, N. (2022). Machine learning algorithms to estimate drying characteristics of apples slices dried with different methods. Journal of Food Processing and Preservation, 46(10), e16496. https://doi.org/10.1111/jfpp.16496
15. Schaßberger, J. M., Görner, K., & Bardow, A. (2024). Control-oriented modeling of direct-heat co-current rotary dryers for energy demand flexibility. Computers & Chemical Engineering, 189, 108774. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108774
16. Vieira, L. V., de Souza, C. C., da Rosa, G. S., & Moreira, F. K. V. (2022). The effects of drying methods and harvest season on piperine, essential oil composition, and multi-elemental composition of black pepper. Food Chemistry, 390, 133148. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133148
17. Wang, Y., & Ding, C. (2023). Effect of electrohydrodynamic drying on drying characteristics and physicochemical properties of carrot. Foods, 12(23), 4228. https://doi.org/10.3390/foods12234228
18. Xie, Q., Zhang, Y., Liu, Y., & Zhao, Y. (2018). Case studies of heat conduction in rotary drums with L-shaped lifters via DEM. Case Studies in Thermal Engineering, 11, 145–152. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.02.001

SIMULACIÓN DE ANDAMIOS CON PROPIEDADES MAGNÉTICAS PARA INGENIERÍA DE TEJIDOS EN COMSOL MULTIPHYSICS

Rebeca Jacqueline González Macías[1], Dulce Araceli Guzmán, Rocha[2], René García Contreras[2]
Ángel David Ramírez Galindo[1]

[1]División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, campus León. [2]Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad León, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
jacky_macias001@hotmail.com

RESUMEN

Este estudio se enfoca en la simulación multifísica de andamios para ingeniería de tejidos, analizando la interacción entre campos magnéticos y la transferencia de calor en su estructura. Utilizando COMSOL Multiphysics, se modela un andamio poroso tridimensional que incorpora nanopartículas magnéticas para generar calor y campo magnético.

Se emplean los módulos de campos magnéticos y transferencia de calor en sólidos para evaluar cómo la distribución espacial del campo influye en el calentamiento localizado del material.

Para el análisis, se establecen condiciones de frontera que representan la aplicación del campo magnético y la disipación de calor dentro del andamio. Se define un estudio transitorio que permite evaluar la evolución temporal del campo magnético y su impacto en la temperatura.

Las simulaciones permiten visualizar la intensidad del campo magnético dentro del andamio y cómo este se distribuye en función de la concentración y ubicación de las nanopartículas magnéticas. Los resultados muestran que la variación de la concentración de nanopartículas altera significativamente el perfil de temperatura en la estructura.

En regiones con mayor densidad de nanopartículas, se observa un incremento localizado en la temperatura, lo que indica un control térmico preciso a nivel microestructural. Los mapas de calor generados en COMSOL permiten analizar cómo la transferencia térmica se propaga a lo largo del andamio y cómo la geometría porosa influye en la disipación del calor.

Se concluye que la distribución de las nanopartículas magnéticas dentro del andamio es factor determinante para optimizar la respuesta térmica del material.

La capacidad de modular la temperatura mediante estimulación magnética puede ser clave en aplicaciones biomédicas, como la hipertermia magnética para terapia celular [1]. Además, el uso de simulaciones computacionales proporciona herramientas valiosas para predecir y optimizar el desempeño térmico de biomateriales avanzados en ingeniería de tejidos.

INTRODUCCIÓN

Los andamios porosos de hidroxiapatita y quitosano se han consolidado como materiales clave en ingeniería de tejidos debido a su biocompatibilidad, bioactividad y propiedades antimicrobianas. La combinación de estos materiales proporciona una base adecuada para el crecimiento celular y la regeneración tisular. A esto se suma el potencial de incorporar nanopartículas magnéticas para lograr una estimulación térmica controlada mediante campos magnéticos externos [1]. Estudios recientes destacan la relevancia de utilizar simulaciones computacionales para anticipar el comportamiento térmico de estos sistemas, reduciendo los costos experimentales. En este contexto, el presente trabajo propone un modelo multifísico en COMSOL para evaluar la respuesta térmica de andamios con propiedades magnéticas.

TEORÍA

Los andamios simulados se basan en las características de sus materiales, por un lado, la hidroxiapatita es un fosfato cálcico con una estructura cristalina similar a la del tejido óseo natural [2]. Esta característica la convierte en un material ideal para aplicaciones en ingeniería ósea, ya que es osteoconductiva y favorece la adhesión y proliferación celular. Además, es bioactiva y puede formar uniones químicas directas con el hueso huésped [3]. Su naturaleza cerámica le confiere una elevada rigidez, pero su fragilidad suele compensarse con la incorporación de polímeros naturales como el quitosano.

El quitosano es un polisacárido derivado de la quitina que presenta alta biocompatibilidad, biodegradabilidad y propiedades antimicrobianas.

En aplicaciones biomédicas, su flexibilidad y capacidad para formar geles lo hacen útil como matriz para la regeneración de tejidos blandos. Además, el quitosano puede funcionalizarse químicamente para mejorar la interacción con células o con otros componentes del andamio. En combinación con hidroxiapatita, se obtiene un compuesto híbrido que equilibra las propiedades mecánicas y biológicas necesarias para un andamio eficaz. El calentamiento inducido por nanopartículas magnéticas se basa en mecanismos físicos fundamentales: la relajación de Néel, relacionada con la fluctuación del momento magnético interno de las partículas, y la relajación de Brown, asociada al movimiento rotacional de toda la partícula en un fluido bajo campo magnético. Ambos procesos generan calor cuando el sistema es sometido a un campo magnético. La tasa de generación de calor depende del tamaño de las partículas, su concentración y la frecuencia del campo aplicado.

En estudios recientes, también se ha demostrado que la interacción entre las propiedades térmicas del biomaterial, el diseño geométrico del andamio y el comportamiento del campo magnético puede ser optimizada mediante la simulación computacional en COMSOL Multiphysics permite modelar fenómenos acoplados mediante el método de elementos finitos, esta técnica permite anticipar con gran precisión la evolución térmica del sistema bajo diferentes condiciones experimentales [4].

PARTE EXPERIMENTAL

Para evaluar la distribución térmica inducida magnéticamente en andamios porosos, se diseñó un modelo tridimensional en COMSOL Multiphysics, utilizando los módulos de “Campos magnéticos (CM)” y “Transferencia de calor en sólidos”. El modelo representó un andamio compuesto por hidroxiapatita y quitosano con nanopartículas magnéticas (NPM) de óxido de hierro (Fe_3O_4) distribuidas dentro de la matriz del material.

El andamio fue modelado como una estructura porosa con geometría regular, representando una red de canales interconectados, lo que permite simular de forma realista el comportamiento de difusión térmica. Se asignaron las características de los materiales y se aplicaron condiciones de frontera, así como las configuraciones del estudio que se muestran en la figura 1.

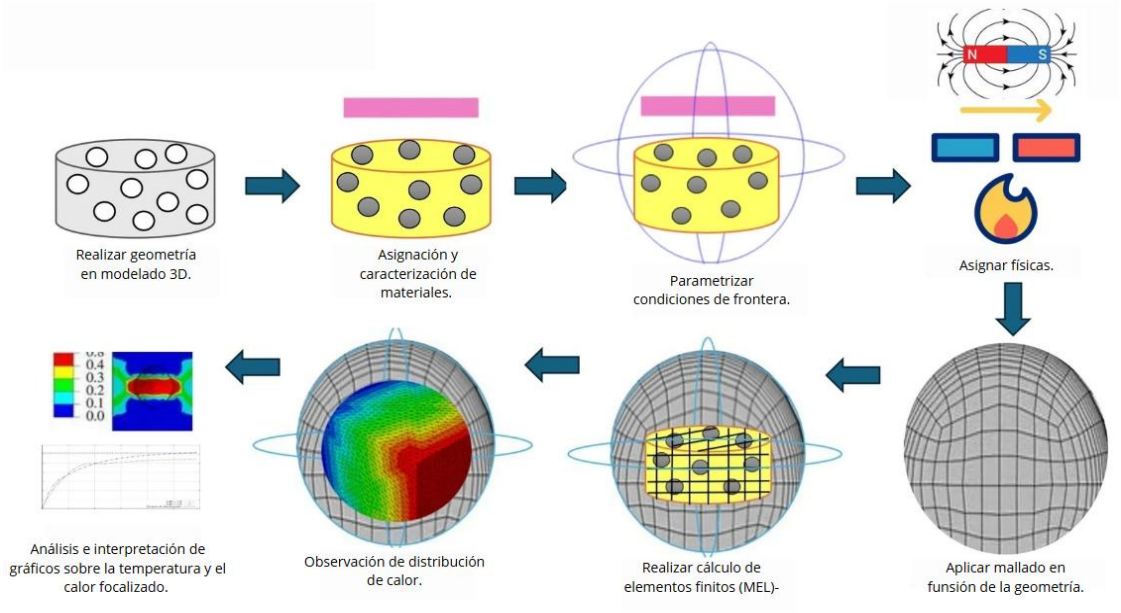


Figura 1. Metodología para la simulación de andamios con NPM en COMSOL Multiphysics.

La simulación fue realizada mediante el acoplamiento de los estudios de transferencia de calor en sólidos y campos magnéticos, por lo que para la transferencia de calor se configuró el estudio en paso temporal y en paso estacionario para la configuración del estudio del campo magnético dependiente de la frecuencia, es decir, se configuró un tercer estudio con las características de ambos permitiendo observar cómo se propaga el calor desde las NPM hacia el resto del andamio así como la difusión del calor por la estructura porosa del andamio.

La duración total del estudio fue de 15 minutos, dividida en intervalos de un segundo para obtener una alta resolución temporal.

Se analizaron distintas pruebas de temperatura para comparar y determinar su efecto sobre la eficiencia del calentamiento. Las propiedades térmicas y magnéticas de los materiales se tomaron de literatura previa y valores experimentales típicos: conductividad térmica, calor específico, permeabilidad magnética y densidad.

Los resultados se visualizaron mediante mapas de calor y líneas de campo magnético, que muestran la distribución espacial del calor generado y permiten cuantificar zonas con mayor intensidad térmica. Además, se monitoreó la temperatura en puntos específicos del andamio para observar la evolución térmica localizada.

El objetivo de esta metodología fue predecir el comportamiento térmico de forma no invasiva, optimizando la distribución de NPM y el diseño geométrico del andamio antes de su fabricación física, con potencial aplicación en terapia térmica localizada e ingeniería de tejidos.

RESULTADOS

Las simulaciones realizadas permitieron evaluar el comportamiento térmico de los andamios con diferentes configuraciones y condiciones de estimulación. Se analizaron tres escenarios clave:

1. Condición basal (sin campo magnético): En ausencia de campo magnético, la temperatura dentro del andamio se mantuvo cercana a la temperatura basal del entorno (aproximadamente 37 °C) como se observa en la figura 2. La distribución térmica fue

homogénea, este resultado confirmó la conductividad térmica de los materiales y la configuración de la geometría porosa tuvo influencia en la dispersión del calor sin la necesidad de una fuente externa para inducir calor.

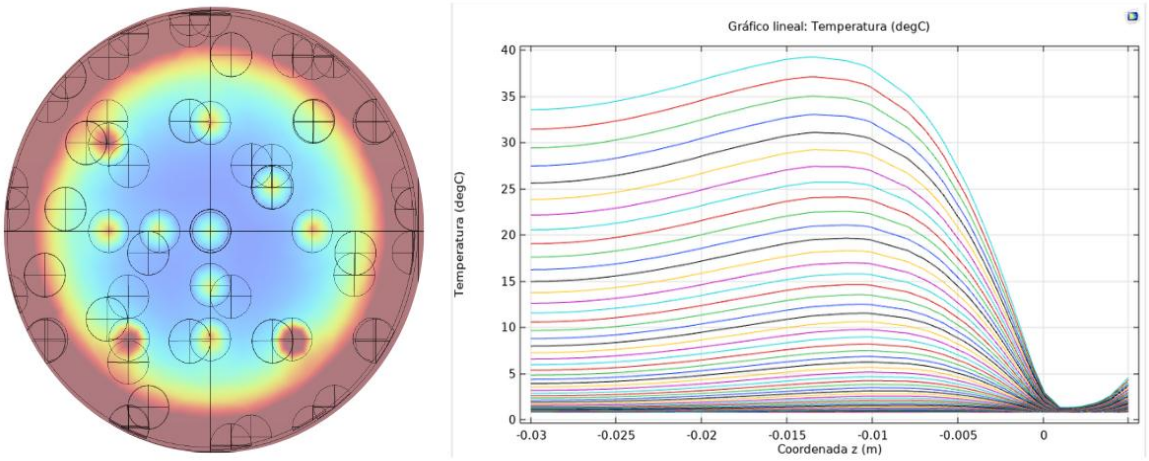


Figura 2. Gráfico de distribución de calor del andamio con NPM a temperatura basal.

2. Campo magnético localizado (bobina solenoide): Al aplicar un campo magnético mediante una bobina solenoide con el andamio en el centro, se observó un aumento significativo de temperatura en las regiones cercanas a la fuente (figura 3). Las temperaturas alcanzaron valores entre 39 °C y 42 °C en zonas con mayor concentración de nanopartículas magnéticas. El gradiente térmico fue pronunciado, permitiendo visualizar un calentamiento focalizado y controlado. Esta configuración simula una posible aplicación clínica para la hipertermia localizada.

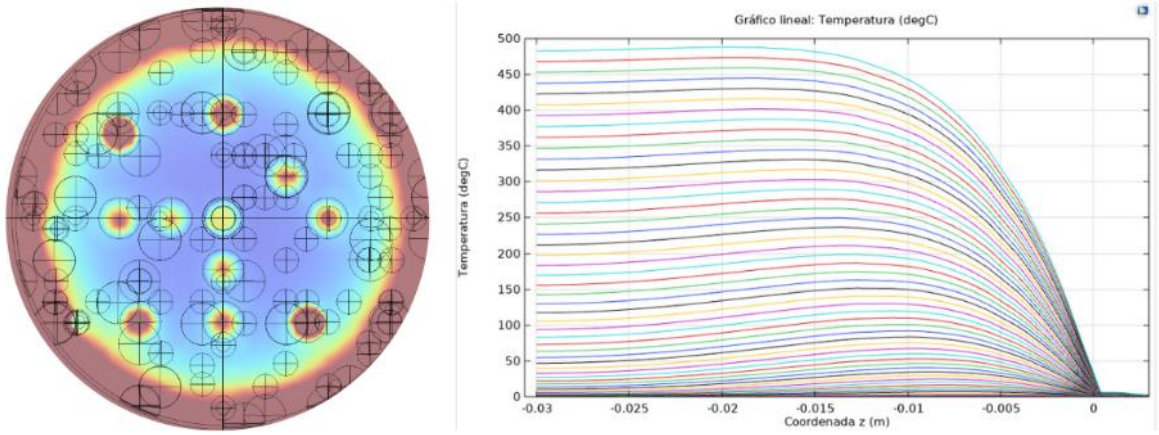


Figura 3. Gráfico de distribución de calor generado por una bobina solenoide sobre el andamio con NPM.

3. Campo magnético global: En la tercera simulación, se aplicó un campo magnético uniforme alrededor del andamio. Aunque las temperaturas elevadas se desprecian al ser parte del calor de la bobina. En este caso, la distribución de temperatura fue más homogénea en toda la estructura, con valores promedio entre 38 °C y 41 °C (figura 4). La eficiencia térmica estuvo directamente relacionada con la densidad y distribución de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) en la matriz del andamio.

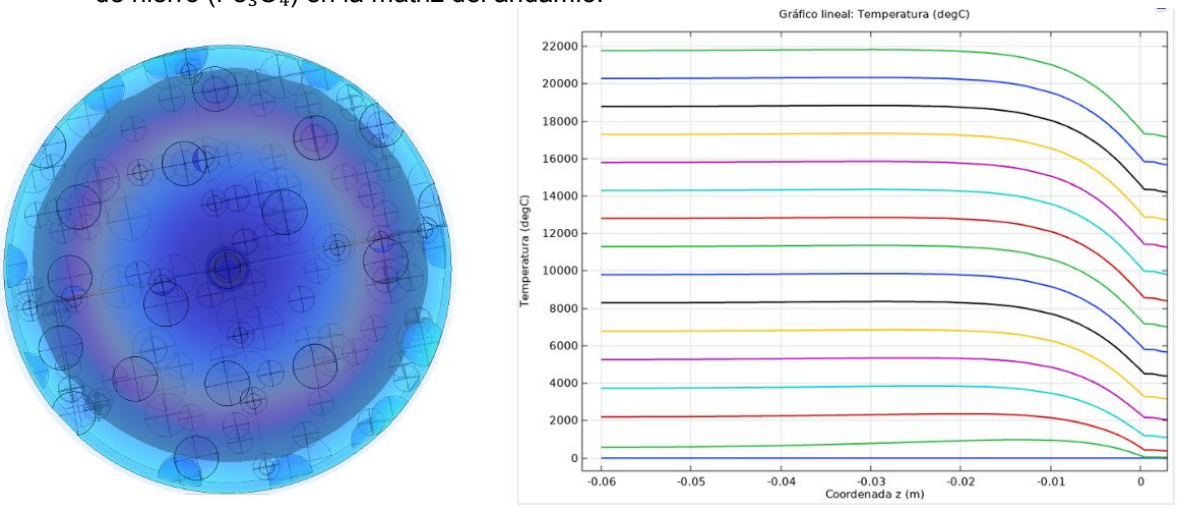


Figura 4. Gráfico de distribución de calor generado por la intervención del CM sobre el andamio con NPM.

Se observó que, bajo condiciones óptimas, la temperatura deseada puede alcanzarse en menos de 20 segundos, lo que es adecuado para aplicaciones terapéuticas seguras y efectivas.

También se evaluó el efecto de la porosidad del andamio en la disipación térmica. Se encontró que poros más grandes favorecen una disipación más rápida, mientras que una red de poros más cerrada mantiene el calor confinado durante más tiempo. Esta información es clave para el diseño personalizado de andamios en función del tipo de tejido a tratar.

CONCLUSIONES

Las simulaciones mostraron que la concentración y distribución de nanopartículas magnéticas influyen directamente en la generación y propagación del calor. Se logró un control térmico localizado mediante campos magnéticos, confirmando el potencial de estos andamios en ingeniería de tejidos e hipertermia. La respuesta térmica fue rápida, precisa y dependiente de la geometría porosa.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. A. Guzman Rocha, B. Aranda Herrera, L. S. Acosta Torres, M. C. Arenas Arrocena, R. Garcia Contreras, "Modified Scaffolds With Magnetic Nanoparticles in Periodontal Tissue Regeneration".
2. Enrique, G. N., Hugo, M. C., I., & F, D. L. D. (2013). Análisis del desempeño estructural de andamios de hidroxiapatita utilizados en ingeniería tisular. Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo, 4(2), 5–12.
3. Zhao, Y., Wang, X., Zhang, L., & Chen, Y. (2020). Gelatin–Chitosan Hydrogel: Biological, Antimicrobial and Mechanical Properties for Dental Applications. Gels, 8(8), 575. https://doi.org/10.3390/gels8080575.

4. Ghosh, S., et al. (2024). 3D printing of stimuli-responsive and self-reporting magnetic nanocomposite scaffolds for remote thermal actuation and monitoring. Nano Select, 5(5), 202400077. https://doi.org/10.1002/nano.202400077

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO EN EL LABORATORIO DE MANUFACTURA FLEXIBLE DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LA CIÉNEGA

Saúl Gutiérrez Pérez[1], Pedro Tule Murillo[1], María Eugenia Sánchez Morales,[1] Cuauhtémoc Acosta Lúa[1], Claudia Carolina Vaca García[1] y Maria Fernanda González Aviña[1]

[1]Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara
carolina.vaca@academicos.udg.mx

RESUMEN

El análisis de las condiciones de trabajo en el laboratorio de manufactura flexible del Centro Universitario de la Ciénega se centró en evaluar la iluminación, el ruido, las vibraciones y la calidad del aire en un entorno con maquinaria de procesos de manufactura metalmecánicos, factores clave para la seguridad, el confort y el desempeño de los usuarios. Se aplicó un enfoque metodológico basado en mediciones instrumentales y observaciones directas, utilizando luxómetros para evaluar la iluminación, sonómetros para el ruido, vibrómetros para las vibraciones y sensores ambientales para determinar la calidad del aire. Los resultados indicaron que la iluminación general cumplía con los estándares mínimos recomendados, aunque se identificaron áreas con sombras que podrían afectar la visibilidad en tareas de precisión. En cuanto al ruido, se registraron niveles elevados durante el funcionamiento simultáneo de varias máquinas, superando en algunos momentos los límites recomendados por normativas de seguridad laboral, lo que podría representar un riesgo para la salud auditiva. Las mediciones de vibraciones revelaron que algunas máquinas generaban vibraciones superiores a los umbrales de confort ergonómico, especialmente en ciertas frecuencias que podrían inducir fatiga en los operarios con exposición prolongada. Respecto a la calidad del aire, se detectó una concentración de partículas en suspensión y vapores metálicos en niveles que, aunque dentro de los límites permisibles, podrían incrementarse en ausencia de una ventilación adecuada. En conclusión, el estudio evidenció que, si bien las condiciones generales del laboratorio son aceptables, existen áreas de mejora en la distribución de la iluminación, la reducción del ruido y vibraciones, así como el control más eficiente de la calidad del aire para garantizar un entorno de trabajo más seguro y confortable. Se recomienda la implementación de medidas correctivas como la optimización de la disposición lumínica, el uso de barreras acústicas, el mantenimiento periódico de maquinaria para reducir vibraciones y la mejora del sistema de ventilación, con el fin de prevenir riesgos a largo plazo en la salud y desempeño de los trabajadores.

INTRODUCCIÓN

En el centro Universitario de la Ciénega (CUCIÉNEGA) se realizó la investigación sobre el análisis de las condiciones de trabajo en entornos industriales es fundamental para garantizar la seguridad, el bienestar y la eficiencia de los usuarios. En este contexto, el Laboratorio de Manufactura Flexible del Centro Universitario de la Ciénega representa un espacio académico y práctico donde se desarrollan actividades con maquinaria propia de procesos metalmecánicos, lo que implica la exposición a diversos factores ambientales y físicos que pueden influir en la salud y el desempeño de los operadores. Este estudio se enfocó en evaluar de manera sistemática las condiciones de iluminación, niveles de ruido, vibraciones mecánicas y calidad del aire dentro del laboratorio, con el objetivo de identificar posibles riesgos y proponer mejoras. A través de un enfoque metodológico basado en mediciones instrumentales y observaciones directas, se obtuvieron datos relevantes que permitieron caracterizar el entorno de trabajo y establecer recomendaciones orientadas a la mejora continua de las condiciones laborales en dicho espacio académico.

MARCO TEORICO

El estudio de las condiciones de trabajo es una disciplina fundamental en la ingeniería industrial, especialmente en contextos donde se busca la mejora continua de los procesos productivos sin

comprometer la salud y seguridad de los operarios. En los laboratorios de manufactura flexible, donde se integran tecnologías de automatización, robótica y mecanizado, el análisis del entorno físico cobra especial relevancia, ya que estos espacios replican condiciones industriales reales en un contexto académico.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, este análisis implica la aplicación de herramientas de ergonomía, higiene industrial y normativas específicas, con el fin de garantizar entornos de trabajo eficientes, seguros y sostenibles.

Iluminación en entornos industriales

La iluminación constituye un factor clave en la productividad y precisión de las tareas manuales, especialmente en procesos de manufactura que implican el uso de maquinaria como tornos, fresadoras, robots y sistemas neumáticos. Una iluminación deficiente puede aumentar la tasa de errores humanos, la fatiga visual y el riesgo de accidentes. La NOM-025-STPS-2008 establece los niveles mínimos de iluminancia en función de la actividad realizada, por ejemplo, 500 lux para tareas de detalle y 300 lux para trabajos generales de mecanizado (STPS, 2008). Además, la distribución uniforme de la luz y el control de sombras y reflejos son aspectos críticos que deben considerarse en los laboratorios.

Ruido ocupacional y fatiga auditiva

La exposición prolongada al ruido generado por maquinaria industrial es uno de los riesgos más comunes en talleres y laboratorios de manufactura. El ruido no solo puede provocar pérdida auditiva, sino también efectos fisiológicos como aumento del ritmo cardíaco, estrés y disminución de la concentración, lo cual impacta negativamente en el desempeño operativo. Según la NOM-011-STPS-2001, los límites permisibles de exposición varían dependiendo del nivel de presión sonora y del tiempo de exposición, estableciendo como umbral general los 85 dB(A) para jornadas de 8 horas (STPS, 2001). Instrumentos como sonómetros permiten caracterizar las condiciones acústicas del entorno, identificando momentos críticos de exposición durante el funcionamiento simultáneo de varias máquinas.

Vibraciones mecánicas y confort ergonómico

Las vibraciones, tanto en cuerpo completo como en extremidades superiores, representan un riesgo ergonómico que puede desencadenar fatiga, entumecimiento, lesiones musculoesqueléticas y pérdida de destreza motora. En contextos académicos como los laboratorios de manufactura flexible, la exposición puede ser intermitente pero significativa, especialmente en la operación de maquinaria antigua o mal calibrada. La ISO 2631-1:1997 y la NOM-024-STPS-2001 proporcionan parámetros técnicos para la evaluación del impacto de vibraciones sobre el cuerpo humano, considerando factores como frecuencia, dirección y duración de la exposición (ISO, 1997; STPS, 2001). El uso de vibrómetros permite obtener datos objetivos que orientan acciones correctivas, como el aislamiento de vibraciones, mantenimiento preventivo o rediseño del puesto de trabajo.

Calidad del aire y ventilación industrial

El ambiente respirable dentro de un espacio industrial debe mantenerse libre de contaminantes que superen los límites permisibles. En el laboratorio de manufactura flexible, las partículas en suspensión, los vapores metálicos, el humo de corte o lubricantes en aerosol son subproductos comunes de procesos como el maquinado, la soldadura o el uso de químicos industriales. La NOM-010-STPS-2014 establece límites de exposición para agentes químicos contaminantes y define los métodos de evaluación y control para preservar la salud del trabajador (STPS, 2014). En este sentido, los sensores ambientales y sistemas de extracción localizada son herramientas

indispensables para asegurar una ventilación adecuada que mantenga los niveles de exposición dentro de rangos aceptables.

Enfoque sistémico de la ingeniería industrial

Desde un enfoque sistémico, el análisis de condiciones de trabajo en entornos educativos-industriales como el Laboratorio de Manufactura Flexible debe integrar elementos de la

La implementación de medidas como el rediseño de estaciones de trabajo, la redistribución lumínica, el uso de barreras acústicas, el mantenimiento preventivo de equipos y la ventilación por desplazamiento son acciones basadas en principios de mejora continua y prevención de riesgos, que no sólo cumplen con las normas vigentes, sino que también optimizan la experiencia formativa en entornos universitarios.

METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos esenciales que se detallan a continuación:

- Los instrumentos utilizados para este análisis son los siguientes (figura 1):
  1. **Medidor de iluminación (luxómetro).** Este instrumento nos permite medir la intensidad de luz en la que se está trabajando en esa estación.
  2. **Medidor de ruido (decibelímetro).** Es esencial para medir los niveles sonoros en la que se llega a trabajar y asegurar el cumplimiento normativo.
  3. **Medidor de vibraciones (Vibrómetro).** Requerido para medir las vibraciones de las estructuras en funcionamiento.
  4. **Medidor de la calidad del aire AQI (Air Quality Monitor).** Podemos evaluar diversas funciones respecto a la calidad del aire.



Figura 1. Instrumentos utilizados para la obtención de datos exactos. Luxómetro, decibelímetro, vibrómetro y Air Quality Monitor.

Estos instrumentos se calibraron previamente a efectuar las mediciones.

El lugar y los equipos de trabajo de los cuales se tomaron las mediciones de las condiciones de trabajo fue en el Centro Universitario de la Ciénega en el laboratorio de manufactura flexible (figura 2), y los equipos fueron los siguientes:

1. Torno.
2. Taladro.
3. Fresadora Lunan.

4. Fresadora vertical
5. Sierra.
6. Esmeril.



Figura 2. Laboratorio de manufactura flexible.

- Para obtener los datos deseados, se deberá activar y operar el instrumental conforme a las especificaciones para cada medición.
- Las mediciones se realizaron en tres periodos claves del día, que son en la mañana, tarde y noche. Este enfoque busca proporcionar un margen más amplio de datos sobre las condiciones de trabaja en el laboratorio de manufactura flexible.

RESULTADOS

Una vez obtenidas las mediciones correspondientes a los niveles de iluminación, la calidad del aire y el porcentaje de humedad relativa en cada una de las estaciones de trabajo donde se encuentran las máquinas evaluadas, se procedió a la representación gráfica de los datos recopilados. Este procedimiento permitió analizar de manera integral y comparativa la variación de dichas condiciones ambientales en distintos días.

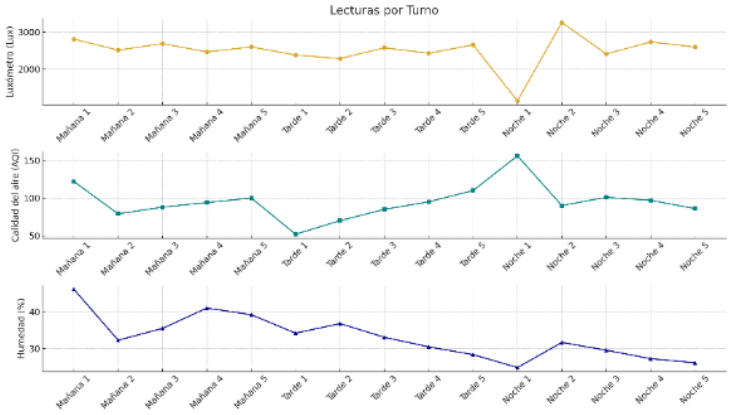


Figura 3. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos del torno.

La Figura 3 muestra la variación registrada en cada una de las mediciones realizadas en el torno, destacando los niveles elevados de iluminación bajo los cuales se efectúan habitualmente las operaciones.

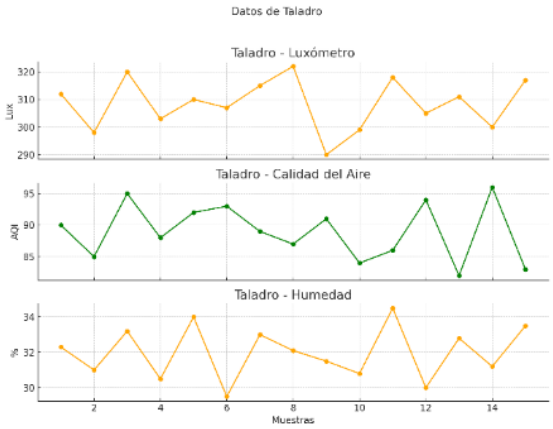


Figura 4. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos del taladro.

En la Figura 4 se presenta la variación de las mediciones obtenidas en el área de trabajo del taladro, evidenciando las fluctuaciones en los parámetros registrados durante su operación. El valor máximo de luminosidad registrado fue de 320 lux, nivel que se encuentra dentro del rango recomendado para actividades laborales, conforme a los estándares establecidos en materia de iluminación industrial.

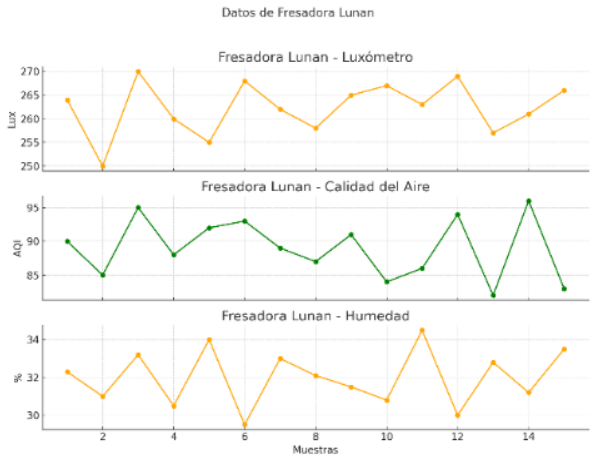


Figura 5. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos de la fresadora lunan.

En la Figura 5 se muestra la variación de las mediciones obtenidas en el área de trabajo de la fresadora lunan, en donde se observan los cambios de los parámetros registrados durante su operación. El valor máximo de luminosidad registrado fue de 270 lux, nivel que se encuentra por debajo del rango recomendado para actividades laborales.

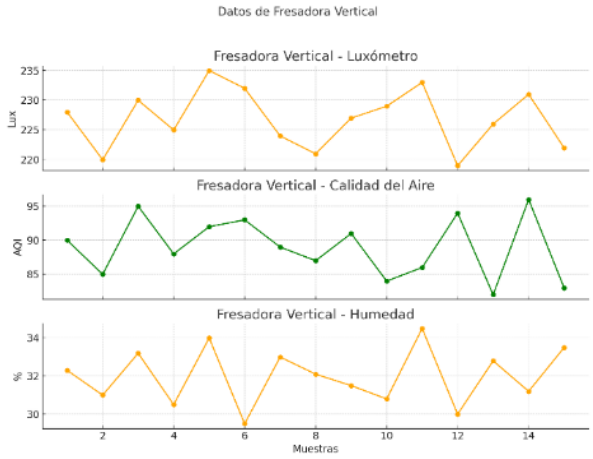


Figura 6. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos de la fresadora vertical.

La Figura 6 presenta la variación de las mediciones realizadas en el área de trabajo de la fresadora vertical. El nivel máximo de iluminación registrado fue de 235 lux, valor inferior al mínimo recomendado para tareas laborales.

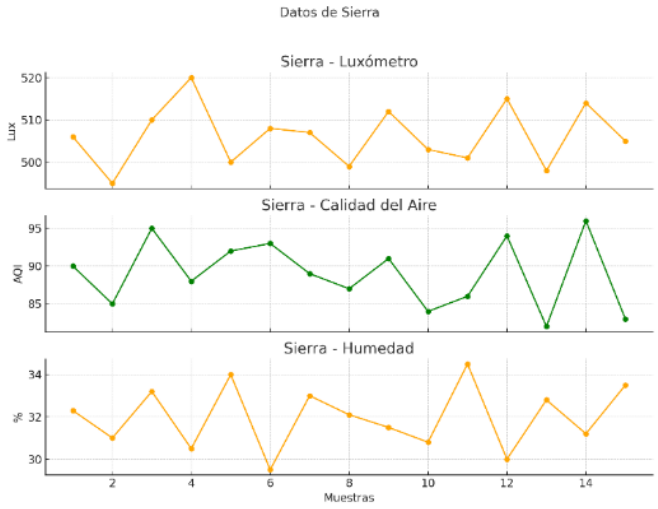


Figura 7. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos de la sierra.

En la Figura 7 se presenta la variación de las mediciones obtenidas en el área de trabajo de la sierra, mostrando los cambios de los parámetros registrados durante su operación. El valor máximo de luminosidad registrado fue de 520 lux, nivel que se encuentra por encima del rango recomendado para actividades laborales.

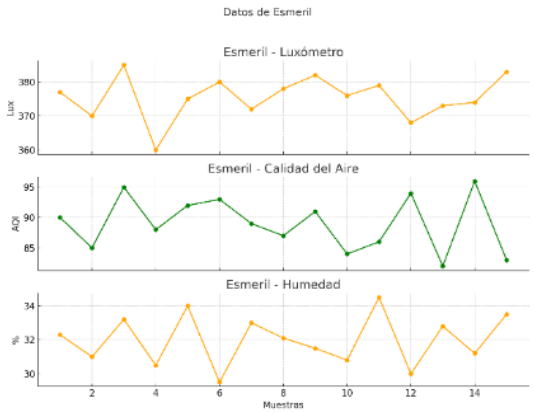


Figura 8. Datos de iluminación, AQI y humedad, obtenidos del esmeril.

La Figura 8 muestra la variación de las mediciones realizadas en el área de trabajo del esmeril, evidenciando los cambios en los parámetros registrados durante su funcionamiento. El valor máximo de iluminación fue de 390 lux, situándose dentro del rango recomendado para la realización de actividades laborales, de acuerdo con los estándares de iluminación en entornos industriales.

Dado que los equipos se encuentran ubicados dentro del mismo laboratorio, las variaciones en los niveles de humedad relativa y calidad del aire no presentan cambios significativos entre sí. La humedad se mantiene dentro del rango establecido por la normativa aplicable; sin embargo, la calidad del aire excede los límites permisibles conforme a los criterios normativos, lo cual podría representar un riesgo para la salud del personal y afectar las condiciones del ambiente laboral.

Se calcularon los valores promedio de los datos recolectados (tabla 1) y, posteriormente, se llevará a cabo un análisis detallado de los resultados con el fin de verificar su cumplimiento con la normativa aplicable (tabla 2). Este proceso es fundamental para evaluar la conformidad de las condiciones actuales del entorno laboral respecto a los estándares establecidos.

Tabla 1. Promedio de mediciones de las condiciones de trabajo en el laboratorio de manufactura flexible.

	Torno	Taladro	Fresadora Lunan	Fresadora Vertical	Sierra	Esmeril
Luxometro	2421.2 l	318.2 Lux	291.86 Lux	231.4 Lux	522.8 Lux	371.8 Lux
Decibelimetro	81 dB	67 Db	75 dB	80 dB	97 dB	83.7 dB
Calidad del aire	99.8 AQ	99.8 AQI	99.8 AQI	99.8 AQI	99.8 AQI	99.8 AQI
Vibrómetro	2.3 m/s	2.8 m/s2	2 m/s2	2.8 m/s2	10.6 m/s2	22 m/s2
Humedad	33.44%	33.44%	33.44%	33.44%	33.44%	33.44%

Tabla 2. Cumplimiento normativo de los aparatos de trabajo en el laboratorio de manufactura flexible.

	Torno	Taladro	Fresadora Lunan	Fresadora Vertical	Sierra	Esmeril
Luxometro	No	Si	Si	Si	No	Si
Decibelimetro	Si	Si	Si	Si	No	Si
Calidad del aire	No	No	No	No	No	No
Vibrómetro	Si	Si	Si	Si	No	No
Humedad	Si	Si	Si	Si	Si	Si

CONCLUSIONES

Que las condiciones generales del laboratorio se encuentran dentro de parámetros aceptables para el desarrollo de las actividades, también se identificaron diversas áreas de oportunidad que requieren atención para optimizar el entorno laboral. Entre los aspectos a mejorar se encuentra la distribución de la iluminación, ya que se detectaron zonas con niveles de lux por debajo de lo recomendado, lo cual puede afectar la visibilidad y aumentar el riesgo de errores operativos o accidentes. En conjunto, estas mejoras permitirán no solo cumplir con las disposiciones normativas vigentes, sino también elevar los niveles de seguridad, confort y productividad dentro del laboratorio.

REFERENCIAS

- Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). (2008). NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2001). NOM-011-STPS-2001, Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2001). NOM-024-STPS-2001, Vibraciones. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2014). NOM-010-STPS-2014, Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral. Diario Oficial de la Federación.
- International Organization for Standardization. (1997). ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1999). Guidelines for community noise. World Health Organization.
- Konz, S., & Johnson, S. (2019). Work Design: Occupational Ergonomics (8th ed.). Waveland Press.
- Salvendy, G. (2012). Handbook of Human Factors and Ergonomics (4th ed.). Wiley.

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO EN LAS OFICINAS DEL EDIFICIO ADMINISTRATIVO DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE LA CIÉNEGA

Saúl Gutiérrez Pérez[1], Pedro Tule Murillo[1], María Eugenia Sánchez Morales,[1] Cuauhtémoc Acosta Lúa[1], Claudia Carolina Vaca García[1] y Maria Fernanda González Aviña[1]

[1]Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara
carolina.vaca@academicos.udg.mx

RESUMEN

El estudio sobre las condiciones laborales en las oficinas del edificio administrativo del Centro Universitario de la Ciénega tuvo como propósito examinar la iluminación, el nivel de ruido, la calidad del aire y la ergonomía de las estaciones de trabajo, con el fin de identificar posibles impactos en la salud y productividad del personal. Para ello, se aplicó una metodología basada en mediciones directas y observaciones, utilizando un luxómetro para analizar la iluminación, un sonómetro para registrar el ruido ambiental, sensores especializados para evaluar la calidad del aire y una lista de verificación ergonómica para revisar la adecuación del mobiliario y las posturas adoptadas por los trabajadores. Los hallazgos revelaron que la mayoría de las oficinas contaban con niveles de iluminación adecuados, aunque algunas áreas con escasa luz natural presentaban deficiencias que podían generar fatiga visual. En lo que respecta al ruido, se detectaron variaciones según la ubicación, con niveles más elevados en espacios cercanos a zonas de alto tránsito o donde había equipos electrónicos con emisión constante de sonido, lo que podía afectar la concentración del personal. En cuanto a la calidad del aire, aunque en general se encontraba dentro de parámetros aceptables, en algunas oficinas se evidenció una ventilación inadecuada, lo que podría ocasionar acumulación de dióxido de carbono y disminuir la sensación de confort térmico. Respecto a la ergonomía, se identificaron problemas en la altura y ajuste de sillas y escritorios, la falta de apoyo lumbar y una disposición inadecuada de los monitores, factores que podrían provocar molestias musculoesqueléticas a largo plazo. En conclusión, aunque las condiciones en las oficinas son en su mayoría satisfactorias, se requiere optimizar la distribución de la iluminación artificial, reducir el impacto del ruido en ciertas áreas, mejorar la ventilación y proporcionar mobiliario ergonómico para minimizar riesgos de fatiga y lesiones. Se sugiere implementar medidas como reorganizar los espacios de trabajo en función de la iluminación disponible, utilizar materiales que absorban el ruido, fortalecer la ventilación con sistemas de renovación de aire y dotar al personal de sillas y escritorios ajustables para favorecer posturas saludables.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se llevó a cabo con el propósito de evaluar las condiciones laborales en las oficinas del edificio administrativo del Centro Universitario de la Ciénega, considerando que el entorno físico de trabajo influye directamente en la salud, el bienestar y la productividad del personal. Desde un enfoque propio de la ingeniería industrial, se analizaron cuatro factores clave del ambiente laboral: iluminación, nivel de ruido, calidad del aire y ergonomía en las estaciones de trabajo. Estos elementos forman parte fundamental de las condiciones ambientales que inciden en el desempeño de los trabajadores, así como en la prevención de riesgos a largo plazo.

Para obtener datos objetivos y confiables, se utilizó una metodología basada en mediciones directas y observación estructurada. Se emplearon instrumentos específicos como luxómetro para evaluar la iluminación, sonómetro para registrar el nivel de ruido, sensores para analizar la calidad del aire, y una lista de verificación ergonómica para revisar la adecuación del mobiliario y las posturas adoptadas por los usuarios. Esta metodología permitió identificar desviaciones respecto a los niveles recomendados por normas y estándares aplicables en materia de salud ocupacional.

MARCO TEORICO

Condiciones laborales y su impacto en la productividad

Las condiciones laborales son todos aquellos factores físicos, ambientales, organizativos y psicosociales que rodean al trabajador durante la realización de sus tareas. En el ámbito de la ingeniería industrial y la gestión del trabajo, estas condiciones son consideradas determinantes para la eficiencia, la calidad del trabajo y la salud ocupacional. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2019), un entorno laboral adecuado debe garantizar la seguridad, el confort y el bienestar físico y mental del trabajador.

Diversos estudios han demostrado que un ambiente físico desfavorable puede generar efectos negativos tanto en la salud como en la productividad del personal. Factores como la iluminación inadecuada, el ruido excesivo, la mala ventilación o el mobiliario deficiente son responsables de una amplia gama de problemas, que van desde la fatiga y el estrés hasta enfermedades musculoesqueléticas o afecciones respiratorias (González y Rivera, 2020).

Iluminación en el entorno laboral

La iluminación es un factor clave en cualquier espacio de trabajo, ya que afecta directamente la capacidad visual, la concentración y el rendimiento del trabajador. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, la iluminación en los centros de trabajo debe ser suficiente y adecuada al tipo de tarea que se realiza, evitando contrastes excesivos y deslumbramientos.

Estudios como los de Vega et al. (2018) indican que una deficiente iluminación puede provocar fatiga visual, dolores de cabeza, disminución del rendimiento y errores en la ejecución de tareas. La combinación de luz natural y artificial es recomendada para asegurar una distribución uniforme y adecuada del nivel de iluminación

Ruido ambiental y su efecto en el rendimiento

El ruido es otro factor ambiental que afecta el desempeño laboral, especialmente en oficinas donde se requiere concentración. La NOM-011-STPS-2001 establece los límites permisibles de exposición al ruido, destacando que niveles superiores a los recomendados pueden provocar estrés, irritabilidad, fatiga auditiva e incluso pérdida de audición en casos prolongados.

Según Morales y López (2021), los niveles de ruido en oficinas generalmente se deben a fuentes como impresoras, aire acondicionado, conversaciones simultáneas y tráfico exterior. Cuando estos niveles superan los 55 dB en ambientes de oficina, pueden interferir con la concentración y aumentar los errores.

Calidad del aire y confort térmico

La calidad del aire en interiores es un factor esencial para el confort y la salud de los trabajadores. Una ventilación deficiente puede provocar acumulación de contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), polvo y compuestos orgánicos volátiles, generando síntomas como somnolencia, irritación ocular, dolor de cabeza y reducción del rendimiento cognitivo (Hernández et al., 2017).

De acuerdo con la ASHRAE Standard 62.1 (2022), los espacios cerrados deben contar con sistemas adecuados de ventilación.

Ergonomía en estaciones de trabajo

La ergonomía busca la adaptación del entorno laboral al trabajador, para prevenir lesiones y mejorar la eficiencia en las tareas. Una estación de trabajo mal diseñada puede provocar posturas forzadas, movimientos repetitivos y esfuerzos innecesarios, originando trastornos musculoesqueléticos a mediano y largo plazo (Rodríguez y Álvarez, 2019).

Normas como la NOM-036-1-STPS-2018 y lineamientos de organismos internacionales como la ISO 9241-5 ofrecen criterios para la evaluación y diseño ergonómico del mobiliario, la distribución de

herramientas y la postura adecuada frente a computadoras. Una evaluación ergonómica incluye la revisión de la altura de sillas y escritorios, el apoyo lumbar, la ubicación de pantallas y el uso de accesorios como descansabrazos o reposapiés.

METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos esenciales que se detallan a continuación:

- Las herramientas utilizadas para este análisis son los siguientes (figura 1):
  1. **Medidor de iluminación (luxómetro).** Este instrumento nos permite medir la intensidad de luz en la que se está trabajando en esa estación.
  2. **Medidor de ruido (decibelímetro).** Es esencial para medir los niveles sonoros en la que se llega a trabajar y asegurar el cumplimiento normativo.
  3. **Medidor de la calidad del aire AQI (Air Quality Monitor).** Podemos evaluar diversas funciones respecto a la calidad del aire.
  4. **Lista de verificación para evaluar estaciones de trabajo.** Es una herramienta que permite identificar riesgos ergonómicos, de seguridad e higiene en el área de trabajo (figura 2).



Figura 1. Instrumentos utilizados para la obtención de datos exactos. Luxómetro, decibelímetro y Air Quality Monitor.

Estación de trabajo-sentado	Sí	No
1. ¿Se ajusta fácilmente la silla de acuerdo con las características siguientes?:	❑	❑
a) ¿Es ajustable la altura de la silla de 15 a 22 pulgadas?	❑	❑
b) ¿Tiene la silla una ancho mínimo de 18 pulgadas?	❑	❑
c) ¿Es la profundidad de la silla de 15 a 16 pulgadas?	❑	❑
d) ¿Se puede reclinar la silla ±10° respecto a la horizontal?	❑	❑
e) ¿Se proporciona un respaldo con soporte lumbar?	❑	❑
f) ¿Es el tamaño mínimo del respaldo de 8 × 12 pulgadas?	❑	❑
g) ¿Puede moverse el respaldo de 7 a 10 pulgadas sobre el asiento?	❑	❑
h) ¿Puede moverse el respaldo de 12 a 17 pulgadas con respecto al frente de la silla?	❑	❑
i) ¿Tiene la silla cinco patas de soporte?	❑	❑
j) ¿Tienen ruedas y cabezas giratorias para realizar tareas móviles?	❑	❑
k) ¿Puede respirar la cubierta de la silla?	❑	❑
l) ¿Se proporciona descansapies (grande, estable y ajustable en cuanto a altura e inclinación)?	❑	❑
2. ¿Se ha ajustado adecuadamente la silla?	❑	❑
a) ¿Está ajustada la altura de la silla a la altura poplítea con los pies sobre el piso?	❑	❑
b) ¿Existe un ángulo de aproximadamente 90° entre el tronco y los muslos?	❑	❑
c) ¿Está el área lumbar del respaldo en la parte pequeña de la espalda (–línea de la cintura)?	❑	❑
d) ¿Hay suficiente espacio para las piernas (es decir, hacia la parte de atrás de la estación de trabajo)?	❑	❑
3. ¿Es ajustable la cubierta de la estación de trabajo?	❑	❑
a) ¿Está la superficie de la estación de trabajo aproximadamente a la altura del descanso del codo?	❑	❑
b) ¿Se puede bajar la superficie de 2 a 4 pulgadas para el trabajo pesado?	❑	❑
c) ¿Se puede elevar (o inclinar) de 2 a 4 pulgadas para el ensamblado a detalle o para tareas en la que se requiera mucho la vista?	❑	❑
d) ¿Hay suficiente espacio para los muslos (es decir, con respecto al fondo de la superficie de trabajo)?	❑	❑
4. ¿Se alternan periodos de trabajo con periodos de descanso?	❑	❑

Estación de trabajo con computadora	Sí	No
1. ¿Se ha ajustado la silla, el teclado y el ratón y, por último, la pantalla?	❑	❑
2. ¿Está el teclado lo más bajo posible (sin que tope con las piernas)?	❑	❑
a) ¿Están relajados los hombros, los brazos superiores cuelgan cómodamente y los antebrazos por debajo de la horizontal (es decir, el ángulo del codo es >90°)?	❑	❑
b) ¿Se utiliza una repisa para el teclado (es decir, por debajo de la superficie de escritura normal a 28 pulgadas)?	❑	❑
c) ¿Está reclinado el teclado hacia abajo de tal manera que se conserve una posición neutral de las muñecas?	❑	❑
d) ¿Está colocado el ratón en la cercanía del teclado a la misma altura?	❑	❑
e) ¿Se proporcionan descansabrazos (ajustables en cuanto a altura al menos 5 pulgadas)?	❑	❑
f) Si no se proporcionan descansabrazos, ¿se ofrecen descansamuñecas?	❑	❑
3. ¿Está colocada la pantalla de 16 a 39 pulgadas (aproximadamente la longitud del brazo) de distancia con respecto a los ojos?	❑	❑
a) ¿Está la parte superior de la pantalla ligeramente por debajo del nivel de los ojos?	❑	❑
b) ¿Está la parte inferior de la pantalla a aproximadamente 30° por debajo del nivel horizontal de los ojos?	❑	❑
c) ¿Se encuentra la pantalla ubicada en un ángulo de 90° con respecto a las ventanas para minimizar el reflejo?	❑	❑
d) ¿Se pueden colocar cortinas o persianas en las ventanas con el fin de reducir la luz brillante?	❑	❑
e) ¿Está la pantalla lo suficientemente inclinada para minimizar las reflexiones de luz provenientes del techo?	❑	❑
f) Si todavía hay reflejo, ¿se utiliza un filtro antirreflejante?	❑	❑
g) ¿Se utiliza un soporte para documentos para copiar información de artículos?	❑	❑
h) ¿Está colocada la tarea visual principal (pantalla o documentos) directamente enfrente?	❑	❑

Figura 2. Lista de verificación para evaluar estaciones de trabajo

- Las mediciones de las condiciones de trabajo se llevaron a cabo en las oficinas ubicadas en el edificio administrativo del Centro Universitario de la Ciénega. Se identificaron tres tipos de espacios laborales: en primer lugar, las oficinas correspondientes a las jefaturas de departamento (Figura 3); en segundo lugar, las áreas compartidas ocupadas por las auxiliares administrativas de dichas jefaturas (Figura 4); y, en tercer lugar, las oficinas destinadas a las coordinaciones de carrera.



Figura 3. Área de trabajo en la oficina de la jefatura del departamento de Ciencias Tecnológicas.



Figura 4. Área de trabajo en la oficina de las áreas compartidas ocupadas por las auxiliares administrativas de la jefatura del departamento de Ciencias Tecnológicas.

- Las mediciones se realizaron en tres periodos claves del día, que son en la mañana, tarde y noche. Este enfoque busca proporcionar un margen más amplio de datos sobre las condiciones de trabaja en las oficinas del edificio administrativo del Centro Universitario de la Ciénega.

RESULTADOS

Una vez obtenidas las mediciones correspondientes a los niveles de iluminación, ruido, la calidad del aire y el porcentaje de humedad relativa en cada una de las estaciones de trabajo ubicadas en las oficinas evaluadas se procedió a la representación gráfica de los datos recopilados. Este procedimiento permitió realizar un análisis integral y comparativo de la variación de dichas condiciones ambientales a lo largo de distintos días.

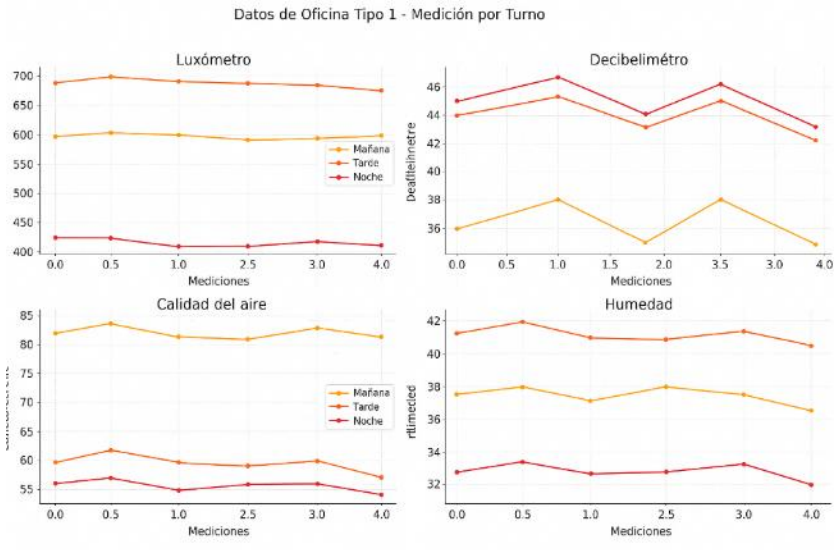


Figura 5. Datos de iluminación, ruido AQI y humedad, obtenidos de tipo 1 de las oficinas.

Se analizaron un total de 8 oficinas de tipo 1 – áreas de jefaturas de departamento, a partir de los datos finales de cada oficina, se hizo un promediado y se obtuvieron los datos presentados anteriormente en la figura 5.

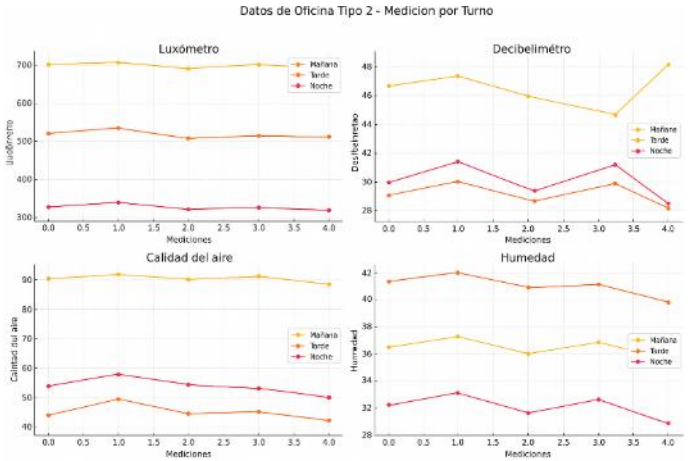


Figura 6. Datos de iluminación, ruido AQI y humedad, obtenidos de tipo 2 de las oficinas.

Se analizaron un total de cuatro oficinas de tipo 2, correspondientes a las áreas compartidas ocupadas por las auxiliares administrativas de las jefaturas de departamento. A partir de las mediciones realizadas en cada una de estas estaciones de trabajo, se realizó un promediado de los valores obtenidos, lo que permitió consolidar los datos presentados en la Figura 6.

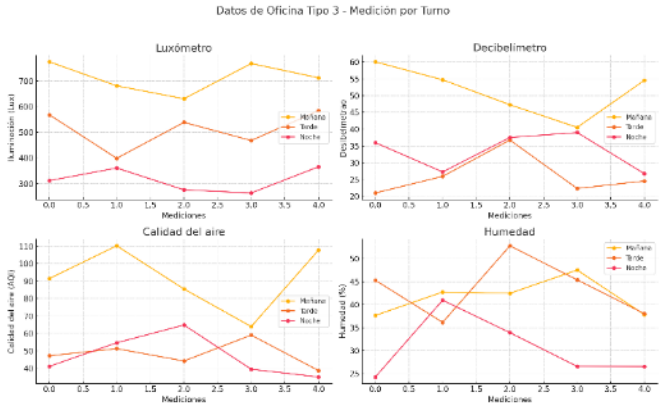


Figura 7. Datos de iluminación, ruido AQI y humedad, obtenidos de tipo 3 de las oficinas.

Se analizaron ocho oficinas de tipo 3, correspondientes a los espacios destinados a las coordinaciones de carrera. A partir de las mediciones realizadas en cada una de estas estaciones de trabajo, se efectuó un promediado de los valores obtenidos, lo que permitió consolidar la información presentada en la Figura 7.

Se calcularon los valores promedio de los datos recolectados durante los turnos matutino, vespertino y nocturno en cada tipo de oficina (Tabla 1 a 3). Posteriormente, se llevó a cabo un análisis detallado de los resultados con el objetivo de verificar su cumplimiento con la normativa aplicable (Tabla 4 a 5). Este procedimiento resulta fundamental para evaluar la conformidad de las condiciones actuales del entorno laboral respecto a los estándares establecidos.

Tabla 1. Promedio de mediciones de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 1.

Oficina tipo 1	Mañana	Tarde	Noche
Luxometro	550 Lux	682 Lux	329 Lux
Decibelimetro	35 dB	50 dB	40 dB
Calidad del aire	86 AQI	54 AQI	51 AQI
Humedad	35.10%	40.00%	27.30%

Un aspecto relevante por destacar es que los niveles de iluminación y de la calidad del aire registrados en este tipo de oficinas sobrepasan el rango permisible establecido por la normativa que se aplica en su respectiva medición.

Tabla 2. Promedio de mediciones de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 2.

Oficina tipo 2	Mañana	Tarde	Noche
Luxometro	664 LUX	470 LUX	262 Lux
Decibelimetro	46 dB	37 dB	37 dB
Calidad del aire	91 AQI	51 AQI	57 AQI
Humedad	34.50%	41.10%	29.20%

Cabe destacar que los niveles registrados durante el turno matutino fueron los más elevados en comparación con los demás turnos en este tipo de oficina.

Tabla 3. Promedio de mediciones de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 3.

Oficina tipo 3	Mañana 1	Tarde 1	Noche 1
Luxometro	637 Lux	328 Lux	288 Lux
Decibelimetro	53 dB	43 dB	29 dB
Calidad del aire	90 AQI	52 AQI	52 AQI
Humedad	34.27%	39.20%	27.74%

Un punto importante que considerar es que tanto los niveles de iluminación como los parámetros relacionados con la calidad del aire registrados durante el turno matutino superan los rangos permisibles establecidos por sus respectivas normas oficiales.

Tabla 4. Cumplimiento normativo de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 1.

	Mañana	Tarde	Noche
Luxometro	No	No	Si
Decibelimetro	Si	Si	Si
Calidad del aire	no	Si	Si
Humedad	Si	Si	si

Tabla 5. Cumplimiento normativo de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 2.

	Mañana	Tarde	Noche
Luxometro	No	si	Si
Decibelimetro	Si	Si	Si
Calidad del aire	no	Si	no
Humedad	Si	Si	si

Tabla 6. Cumplimiento normativo de las condiciones de trabajo en oficinas de tipo 3.

	Mañana	Tarde	Noche
Luxómetro	No	si	Si
Decibelimetro	Si	Si	Si
Calidad del aire	no	Si	si
Humedad	Si	Si	si

Durante la aplicación de la lista de verificación (figura 2) en los distintos tipos de oficinas evaluadas —incluyendo las oficinas tipo 1 (jefaturas de departamento), tipo 2 (áreas compartidas de auxiliares administrativas) y tipo 3 (coordinaciones de carrera)— se observó que todas presentaron un cumplimiento homogéneo respecto a los criterios establecidos. Es decir, no se identificaron diferencias significativas en cuanto al cumplimiento de los aspectos evaluados entre un tipo de oficina y otro. Por tal motivo, se determinó que no era necesario presentar una lista de verificación individual por cada tipo de oficina, y en su lugar, se consolidó la información en un único formato. Esta lista general de verificación, que refleja los hallazgos comunes en todas las áreas analizadas, se presenta en la Imagen 8.

Estación de trabajo-sentado	Sí	No
1. ¿Se ajusta fácilmente la silla de acuerdo con las características siguientes?:	●	❑
a) ¿Es ajustable la altura de la silla de 15 a 22 pulgadas?	●	❑
b) ¿Tiene la silla una ancho mínimo de 18 pulgadas?	●	❑
c) ¿Es la profundidad de la silla de 15 a 16 pulgadas?	●	❑
d) ¿Se puede reclinar la silla ±10° respecto a la horizontal?	●	❑
e) ¿Se proporciona un respaldo con soporte lumbar?	●	❑
f) ¿Es el tamaño mínimo del respaldo de 8 × 12 pulgadas?	●	❑
g) ¿Puede moverse el respaldo de 7 a 10 pulgadas sobre el asiento?	●	❑
h) ¿Puede moverse el respaldo de 12 a 17 pulgadas con respecto al frente de la silla?	●	❑
i) ¿Tiene la silla cinco patas de soporte?	●	❑
j) ¿Tienen ruedas y cabezas giratorias para realizar tareas móviles?	●	❑
k) ¿Puede respirar la cubierta de la silla?	●	❑
l) ¿Se proporciona descansapies (grande, estable y ajustable en cuanto a altura e inclinación)?	❑	●
2. ¿Se ha ajustado adecuadamente la silla?	●	❑
a) ¿Está ajustada la altura de la silla a la altura poplítea con los pies sobre el piso?	●	❑
b) ¿Existe un ángulo de aproximadamente 90° entre el tronco y los muslos?	●	❑
c) ¿Está el área lumbar del respaldo en la parte pequeña de la espalda (~línea de la cintura)?	●	❑
d) ¿Hay suficiente espacio para las piernas (es decir, hacia la parte de atrás de la estación de trabajo)?	●	❑
3. ¿Es ajustable la cubierta de la estación de trabajo?	❑	❑
a) ¿Está la superficie de la estación de trabajo aproximadamente a la altura del descanso del codo?	●	❑
b) ¿Se puede bajar la superficie de 2 a 4 pulgadas para el trabajo pesado?	●	❑
c) ¿Se puede elevar (o inclinar) de 2 a 4 pulgadas para el ensamblado a detalle o para tareas en la que se requiera mucho la vista?	●	❑
d) ¿Hay suficiente espacio para los muslos (es decir, con respecto al fondo de la superficie de trabajo)?	●	❑
4. ¿Se alternan periodos de trabajo con periodos de descanso?	●	❑

Estación de trabajo con computadora	Sí	No
1. ¿Se ha ajustado la silla, el teclado y el ratón y, por último, la pantalla?	●	❑
2. ¿Está el teclado lo más bajo posible (sin que tope con las piernas)?	●	❑
a) ¿Están relajados los hombros, los brazos superiores cuelgan cómodamente y los antebrazos por debajo de la horizontal (es decir, el ángulo del codo es >90°)?	●	❑
b) ¿Se utiliza una repisa para el teclado (es decir, por debajo de la superficie de escritura normal a 28 pulgadas)?	❑	●
c) ¿Está reclinado el teclado hacia abajo de tal manera que se conserve una posición neutral de las muñecas?	❑	●
d) ¿Está colocado el ratón en la cercanía del teclado a la misma altura?	●	❑
e) ¿Se proporcionan descansabrazos (ajustables en cuanto a altura al menos 5 pulgadas)?	●	❑
f) Si no se proporcionan descansabrazos, ¿se ofrecen descansamuñecas?	●	❑
3. ¿Está colocada la pantalla de 16 a 39 pulgadas (aproximadamente la longitud del brazo) de distancia con respecto a los ojos?	●	❑
a) ¿Está la parte superior de la pantalla ligeramente por debajo del nivel de los ojos?	●	❑
b) ¿Está la parte inferior de la pantalla a aproximadamente 30° por debajo del nivel horizontal de los ojos?	●	❑
c) ¿Se encuentra la pantalla ubicada en un ángulo de 90° con respecto a las ventanas para minimizar el reflejo?	●	❑
d) ¿Se pueden colocar cortinas o persianas en las ventanas con el fin de reducir la luz brillante?	●	❑
e) ¿Está la pantalla lo suficientemente inclinada para minimizar las reflexiones de luz provenientes del techo?	●	❑
f) Si todavía hay reflejo, ¿se utiliza un filtro antirreflejante?	❑	●
g) ¿Se utiliza un soporte para documentos para copiar información de artículos?	●	❑
h) ¿Está colocada la tarea visual principal (pantalla o documentos) directamente enfrente?	●	❑

Figura 8. Lista de verificación de la estación de trabajo en las oficinas tipo1, 2 y 3.

CONCLUSIONES

En términos generales, las condiciones ambientales y ergonómicas observadas en las oficinas evaluadas pueden considerarse satisfactorias; sin embargo, el análisis integral evidencia áreas de oportunidad que deben ser atendidas para asegurar el bienestar del personal y el cumplimiento pleno de la normativa aplicable. Específicamente, se recomienda optimizar la distribución de la iluminación artificial, ya que en algunos espacios se registraron niveles por encima del rango permisible, lo cual puede generar deslumbramiento y fatiga visual. Asimismo, se identificaron zonas con niveles de ruido que podrían interferir con la concentración y el desempeño laboral, por lo que es necesario implementar medidas de control acústico. En cuanto a la ventilación, se sugiere mejorar la circulación del aire en oficinas con deficiencias en la renovación, a fin de mantener una adecuada calidad del aire interior. Finalmente, se destaca la importancia de proporcionar mobiliario ergonómico, especialmente sillas y escritorios ajustables, con el propósito de prevenir la aparición de trastornos musculoesqueléticos asociados a posturas inadecuadas y a la permanencia prolongada en estaciones de trabajo mal adaptadas.

RERERENCIAS

- ASHRAE (2022). *Standard 62.1-2022: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- González, M., & Rivera, J. (2020). *Condiciones laborales y productividad: un enfoque ergonómico*. Revista Latinoamericana de Ergonomía, 14(2), 23–35.
- Hernández, L., Pérez, R., & Castillo, J. (2017). *Impacto de la calidad del aire en oficinas cerradas sobre el rendimiento laboral*. Revista Salud y Ambiente, 9(1), 55–66.
- Morales, A., & López, D. (2021). *Análisis del ruido ambiental en espacios administrativos universitarios*. Revista de Ingeniería y Sociedad, 12(3), 48–59.
- NOM-011-STPS-2001. *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido*. Secretaría del Trabajo y Previsión Social (México).
- NOM-025-STPS-2008. *Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*. STPS, México.
- NOM-036-1-STPS-2018. *Factores de riesgo ergonómico en el trabajo*. STPS, México.
- OIT (2019). *Entornos laborales saludables y productividad sostenible*. Organización Internacional del Trabajo.
- Rodríguez, A., & Álvarez, C. (2019). *Ergonomía aplicada al diseño de estaciones de trabajo en oficinas administrativas*. Revista de Ciencias Aplicadas, 6(1), 12–21.
- Torres, M., Vargas, S., & Ledezma, H. (2020). *Relación entre el ambiente físico de trabajo y la eficiencia organizacional*. Revista de Ingeniería Industrial, 18(4), 32–44.
- Vega, J., Martínez, S., & Franco, L. (2018). *Evaluación de iluminación en oficinas: implicaciones ergonómicas y visuales*. Revista Técnica de Seguridad y Salud en el Trabajo, 7(3), 19–27.
- Freivalds, A., & Niebel, B. W. (2014). Ingeniería industrial de Niebel: Métodos, estándares y diseño del trabajo (13.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIAL COMPUESTO POLIMÉRICO Y CENIZA VOLCÁNICA DEL POPOCATÉPETL

N. Mosiño Barbosa[1], F. de J. Torres del Carmen [2], J. M. García Guzman[3], J. P. Razón Gonzalez[4], H. Juárez Rios[5,] M. Cano Lara[6]

[1,3,4,6] TecNM-ITESI, [2]DICIS-UG. [5]IPN-UPIIG.

RESUMEN

La ceniza volcánica está formada por partículas que conllevan fragmentos de rocas y presenta una mejora a la resistencia por sus propiedades puzolánicas. Si bien se considera un material sostenible, tras la gran cantidad de ceniza que expulsa el volcán Popocatépetl por sus propiedades se pueden emplear desde los cultivos hasta materiales de construcción mayormente incorporado para casas ecológicas permitiendo producir materiales novedosos con una durabilidad mejorada porque hace impedimento en estructuras ambientales extremas y protege en caso de exposición de sulfatos, reduciendo costos en el sector civil y de construcción. En este trabajo se estudia el comportamiento de propiedades mecánicas de flexión y compresión de ensayos de MC (material compuesto) conformado por resina poliéster (RP) y ceniza volcánica del Popocatépetl (CV) en base a la norma ASTM D790 para propiedades de flexión de tres puntos y la norma ASTMD695 para propiedades de compresión respectivamente. Las probetas se caracterizan por su forma prismática y variación de concentraciones equitativas de la matriz y su refuerzo. Las probetas se secaron durante un periodo aproximado de 3 a 4 días en un espacio con adecuada ventilación. Posteriormente, se expusieron a la radiación solar para asegurar la cohesión de las partículas y obtener mejores características de resistencia mecánica, durabilidad y tenacidad. En las pruebas mecánicas, la maquina universal Shimadzu AG-X-300KN demuestra en los resultados de la prueba de flexión una estimación de 102.949 N – 537.062 N por variaciones de dimensión/peso. En cambio, en las pruebas de compresión se determina una fuerza de 2418.47- 20321.9 N por el cambio de las concentraciones, se demostró que es esencial tener las proporciones ecuánimes entre los dos materiales si no puede variar a la fuerza y también favoreció los valores por el proceso de lijado adecuado. Por último, en la prueba de flexión presenta un valor máx. de 537.062 N, en cambio en la prueba de compresión se obtuvo un valor de 20321.9 N.

Finalmente, la caracterización mecánica en RP/CV confirma como un material compuesto de refuerzo de ceniza volcánica demuestra calidad para experimentar en paneles o bloques ligeros en la construcción en comparación al cemento portland. El MC sustentable es viable para seguir explorando diversas aplicaciones como las industrias aeronáuticas, automotriz y de construcción civil, esto tomando en cuenta con el proceso de fabricación de dichos componentes como paneles, bloques y ladrillos ligeros.

INTRODUCCIÓN

La naturaleza provee numerosos materiales con potencial para ser utilizados en aplicaciones industriales, científicas y tecnológicas. Considerado el caso de la ceniza volcánica (C.V) como elemento de refuerzo por ser un subproducto natural de la actividad de los volcanes, la cual ha despertado el interés de investigadores debido a sus propiedades fisicoquímicas. Se cataloga un material fragmentado expulsado durante las erupciones volcánicas explosivas. Estas partículas pueden tener un tamaño menor a 2 milímetros y suelen estar compuestas por silicatos, minerales, fragmentos de lava solidificada y gases atrapados [Fig.1]. Debido a su estructura química y física, la ceniza volcánica es ligera, porosa y posee una alta resistencia a temperaturas extremas, características que la hacen atractiva para múltiples usos industriales, como la fabricación de cementos, cerámicas, y más recientemente, en materiales compuestos.

El volcán Popocatépetl, uno de los más activos de México, ha sido objeto de diversos estudios que han permitido identificar los elementos presentes en su ceniza [Fig.2]. Entre los principales

componentes químicos se encuentran: dióxido de silicio (SiO_2), óxidos de aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3), calcio (CaO), sodio (Na_2O), potasio (K_2O), magnesio (MgO) y titanio (TiO_2) [1]. Además, se pueden encontrar trazas de otros minerales y elementos como el azufre y el cloro. Esta composición química le da a la ceniza propiedades particulares como una alta resistencia térmica, baja densidad, y capacidad de interactuar con matrices poliméricas.



Figura 1: Partículas microscópicas de la ceniza volcánica Popocatépetl. (Fuente: Autoría propia)



Figura 2: Infografía del Popocatépetl (Fuente: CEPC)

Tras un chequeo de estudios, uno en concreto es la Universidad Transformadora (UPAEP) afirma que la ceniza volcánica del Popocatépetl se plantea como un sustituto parcial del cemento Portland, ya que mejora la resistencia y durabilidad del concreto en ambientes agresivos gracias a su actividad puzolánica. Además, su uso reduce la emisión de CO_2, promoviendo prácticas más sustentables en la ingeniería civil [2].

El elemento de matriz, la resina es una sustancia viscosa o sólida que puede ser de origen natural o sintético, utilizada como aglutinante en la fabricación de plásticos, adhesivos, recubrimientos y compuestos estructurales. Las resinas son polímeros que, una vez curados (endurecidos) por acción química o térmica, forman materiales duros y resistentes. Las resinas naturales se obtienen de plantas, como la resina de pino, mientras que las resinas sintéticas son fabricadas a partir de derivados del petróleo. Las resinas se pueden clasificar en naturales y sintéticas, en las resinas sintéticas se encuentran las más conocidas que consta la resina époxica y la resina poliéster (R.P), mayormente son útiles para distintas aplicaciones, como la construcción, la fabricación de automóviles, aeronáutica, y la creación de materiales compuestos [Fig.3]. La resina poliéster insaturada es ampliamente utilizada en la industria debido a su excelente relación costo-beneficio y sus notables propiedades fisicoquímicas.

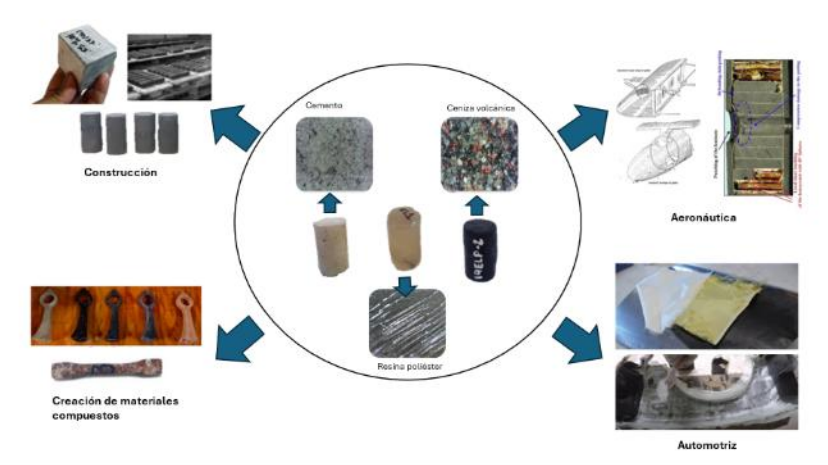


Figura 3: Aplicaciones de M.C-R.P-C.V.

Destaca por su buena resistencia mecánica, térmica y química, lo que la hace adecuada para aplicaciones exigentes. Una de sus principales ventajas es que puede curarse a temperatura ambiente mediante el uso de un catalizador, comúnmente peróxido de metiletilcetona (MEKP), lo que simplifica y abarata los procesos de manufactura.

La resina poliéster en ingeniería civil se usa principalmente como material compuesto junto con fibra de vidrio (PRFV) para fabricar tuberías, revestimientos, elementos prefabricados y refuerzos estructurales. Además, esta resina muestra una alta compatibilidad con diferentes materiales de refuerzo, como la fibra de vidrio, fibras naturales y rellenos minerales, entre ellos la ceniza volcánica, permitiendo su uso en la fabricación de materiales compuestos con propiedades mejoradas. Su versatilidad y facilidad de moldeo la convierten en una opción preferida tanto en contextos industriales como en investigaciones científicas. El estudio de Pratiwi [1] evalúa la ceniza volcánica de Mt. Kelud como refuerzo en resinas poliéster y epóxica. En epóxica, mejora la resistencia a la tracción hasta con 40% de ceniza, mientras que en poliéster esta disminuye. La resistencia al impacto, en cambio, aumenta en ambas matrices, más notablemente en poliéster. Se detectaron problemas de dispersión y adhesión, lo que afectó el rendimiento mecánico. El estudio concluye que la ceniza volcánica tiene potencial como refuerzo si se mejora su integración con la matriz.

Este trabajo se enfoca en el estudio experimental del comportamiento mecánico en específico de prueba de compresión y flexión de material compuesto con resina poliéster (R.P) y ceniza volcánica del Popocatépetl (C.V), esto cumpliendo normas estandarizadas para la caracterización de probetas, con el fin de evaluar la viabilidad de este material como opción ecológica y funcional en la industria de la construcción, determinar parámetros fundamentales como la resistencia, rigidez, relevantes con otras aplicaciones estructurales que se pueden ejecutar.

PARTE EXPERIMENTAL

Se realizaron probetas de material compuesto (M.C) de R.P y C.V con el fin de estudiar sus propiedades, al revisar diversas referencias se constató en estructurarlo en forma de cilíndrica y prismática de menor longitud para las probetas de compresión [Fig.4] y probetas de mayor longitud para el estudio de flexión [Fig.5].



Figura 4: Probetas para compresión.
(Fuente: Autoría propia)



Figura 5: Probetas en flexión.
(Fuente: Autoría propia)

Las etiquetas de las probetas de compresión son:

- E24-2…P24-1 probetas controladas por día de elaboración.
- 19PR2030-5…RL1 probetas de resina poliester (R20-30 y EPSA)
- PMG11KO1…PMG11K2002 probetas MC con catalizador (KO y K200)
- 19ELP-2… probetas MC con resina EPSA

Las etiquetas de las probetas de flexión son:

- PS-1… probetas de MC con resina local
- P29-1… probeta de MC

Las pruebas mecánicas se recopilaron en la Tabla 1 para la prueba de compresión y la Tabla 2 basada en las probetas de la prueba de flexión.

Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga aplicada	Deformación (mm)	Módulo de Young $(\frac{N}{mm^2})$
E24-2	18.48	5.44	2418.47	2.18982	203.0174586
E24-3	18.01	6.29	3134.87	0.70386	708.0804523
E24-3	20.75	6.74	3220.37	1.66581	286.8272512
P24-1	21.82	6.65	20321.9	0.61828	4942.622779
P24-3	20.82	6.92	16437.5	0.55813	4255.928317
P24-4	21.19	6.78	11886.7	0.30565	5735.97448
19PR2030-5	22.23	37.45	2203.27	0.00943	13382.17436
RL1	22.26	42.8	16066.7	0.00902	101883.7932
RL2	23.92	51.34	19870	0.00837	126363.4145
PMG11KO1	22.53	39.93	14013.4	0.00818	96814.21802
PMC11KO1	17.47	28.5	6121.87	0.02975	14997.34377
PMG11K2002	19.47	38.73	9289.41	0.31389	1932.329063
PMG11K2003	19.71	37.63	19696.4	0.01078	118029.7776

Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga aplicada	Deformación (mm)	Módulo de Young $(\frac{N}{mm^2})$
19ELP-2	22.54	37.68	32913.8	0.14141	13147.83092
19ELP-3	20.4	41.83	13044.6	0.07892	10316.29235
19ELP-4	22.6	38.99	22161.1	0.1056	11823.03771
19ELP-5	20.8	40.79	19900.2	0.00815	149467.4468
19ELP-6	22.6	37.59	26077.8	0.00827	177650.7806
19ELP-8	23.21	38.19	26827.2	0.01229	119745.2906
19ELP-9	22.62	37.54	21956.4	0.01149	107561.9392
19EIP-1	22.16	37.77	11592.2	0.01031	64602.23789
19EIP-2	23.13	36.35	8734.56	0.01405	34221.51201
19EIT-1	18.52	37.46	8636.57	0.40432	1468.538068
19EIT-3	21.84	38.01	5414.44	0.19062	1655.932252
19EIT-4	16.47	26.59	4705.19	0.01134	32076.03142
19EIT-5	16.73	28.53	3810.12	0.02062	14062.55295

Tabla 1: Análisis de probetas de compresión.

Probetas	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Carga aplicada	Deformación (mm)	Módulo de Young $(\frac{N}{mm^2})$
PS-1	20.59	8.78	1.59474	1304.933567	30.45240211
PS-2	20.75	6	1.66581	1919.938656	31.98253012
PS-3	21.19	6.78	1.08969	2826.010351	33.0741804
P29-1	20	6.6	0.92854	3330.645007	34.01900826
P29-2	21.32	7.08	1.30037	1146.000741	17.58465481
P29-3	20.17	7.27	0.20376	3520.366094	8.691403687

Tabla 2: Análisis de probetas de flexión.

Después de recopilar los resultados obtenidos en cada una de las probetas, estos se clasificaron según la cantidad de lotes, diferenciados por colores para facilitar su interpretación. Posteriormente, se utilizaron tablas elaboradas en el software Matlab® para mostrar el comportamiento de las probetas en función de dos pruebas mecánicas. En el caso de la prueba de compresión, se graficó

la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento generado, así como el módulo de Young y la deformación longitudinal al momento de la compresión. Estos parámetros son fundamentales para determinar lote de probetas M.C con resina EPSA resulta ser el óptimo para su selección.
En la cuestión de la prueba mecánica Flexión de igual manera se analizó que el lote de probetas enumerada P29 presenta un desempeño mecánico más favorable que otras probetas.

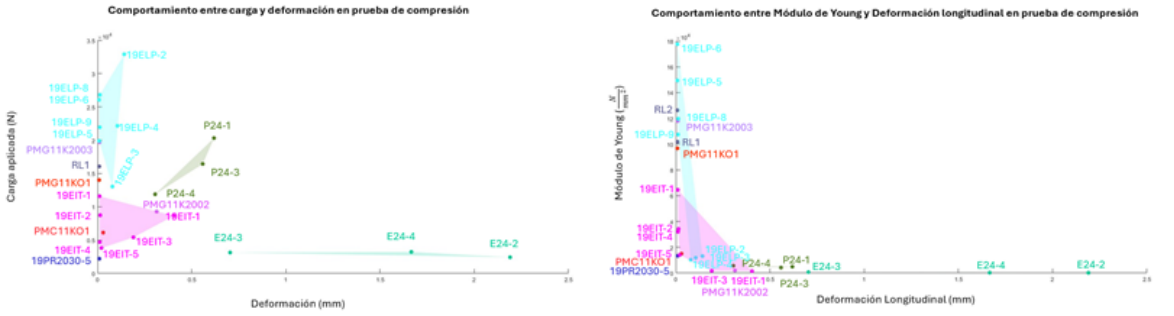


Figura 6: Graficas de comportamiento de prueba de compresión.

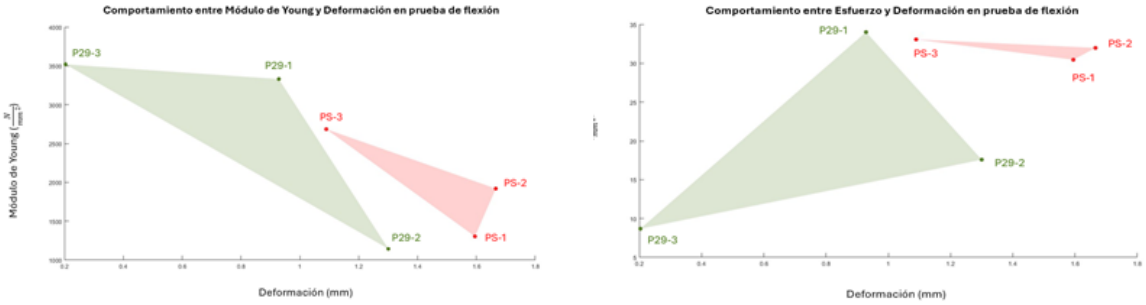


Figura 7: Graficas de comportamiento de prueba de flexión.

CONCLUSIONES

Las pruebas indican que la matriz EPSA León es más rígida, con menor deformación y mayor resistencia, lo que resalta su durabilidad en el material compuesto de ceniza volcánica. Factores como el tiempo de uso, catalizador y dimensiones afectan su desempeño mecánico, y comparable con concretos o cementos de alta resistencia inicial Tipo III /R (>52.5 MPa) es adecuada para aplicaciones estructurales. Sus ventajas incluyen peso ligero, resistencia química y uso sostenible de ceniza volcánica para ayudar a la elaboración de materiales sustentables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cruz-Sánchez, M., Cruz-Santos, M., Ángeles-García, S., & Girón-García, P. (2021). Caracterización de cenizas volcánicas depositadas en la ciudad de Puebla. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 8(8), 65–76. https://doi.org/10.29057/aactm.v8i8.7667
2. Dámazo Juárez, J. D. (2023, mayo 30). Las voces de Ingenierías: La ceniza volcánica en la construcción. *UPRESS*. https://upress.mx/innovacion-y-tecnologia/10684-las-voces-de-ingenierias-la-ceniza-volcanica-en-la-construccion-2?form=MG0AV3:contentReference[oaicite:3]{index=3}
3. Pratiwi, Henny. (2017). morphological and mechanical properties of mt. kelud volcanic ash reinforced polyester and epoxy composites. Jurnal Teknik Mesin. 6. 47. 10.22441/jtm.v6i2.1189.

MODELO DE DATOS EN POWER BI PARA LA INTEGRACIÓN Y VISUALIZACIÓN EN LA TOMA DE DECISIONES

Dennise Ivonne Gallardo Alvarez[1], Israel Duran Belman[1], Elizabeth Gabriela Vargas Espinoza[1] y Juan Pablo Razón González[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
dennise.ga@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

La integración y visualización eficiente de datos son factores clave para mejorar la toma de decisiones en cualquier organización, incluyendo las instituciones educativas. Sin embargo, la dispersión y el volumen de información dificultan su análisis estratégico, lo que puede afectar la identificación de áreas de mejora y el cumplimiento de estándares de calidad. Este artículo presenta el desarrollo de un modelo de datos en Power BI diseñado para centralizar, estructurar y visualizar información académica, facilitando el acceso a indicadores clave y optimizando el proceso de análisis institucional. Como caso de estudio, se aplicó al programa de Ingeniería en Gestión Empresarial del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. La metodología incluyó cuatro fases: integración y transformación de datos desde diversas fuentes, modelado semántico para estructurar la información de manera eficiente, desarrollo de un modelo conceptual en Power BI y diseño de dashboards interactivos con funcionalidades avanzadas de análisis dinámico, segmentación automatizada y filtros inteligentes. Estas herramientas permiten a los responsables académicos obtener una visión más clara del desempeño del programa y tomar decisiones fundamentadas en datos precisos y actualizados. Los resultados muestran que la implementación de este modelo mejora significativamente la capacidad de análisis y gestión de la información, reduciendo tiempos de procesamiento y minimizando errores en la interpretación de datos. Además, permite una identificación proactiva de áreas de mejora, facilitando la planeación estratégica y el cumplimiento de criterios de evaluación académica, como los establecidos por los CIEES (Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior). Se concluye que el uso de tecnologías de inteligencia de negocios (BI) y análisis avanzado de datos representa un factor clave para la modernización de los procesos de gestión académica. La adopción de modelos de datos en plataformas como Power BI no solo optimiza la integración y visualización de información, sino que también impulsa la mejora continua, la eficiencia operativa y la toma de decisiones basada en evidencia, contribuyendo así a una administración educativa más innovadora y estratégica.

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la educación superior, la gestión eficiente de la información se ha convertido en un elemento esencial para la mejora continua de los programas académicos. La disponibilidad de grandes volúmenes de datos provenientes de distintas fuentes —como sistemas escolares, evaluaciones institucionales y encuestas de seguimiento— plantea importantes desafíos para su análisis estratégico. Esta situación se vuelve aún más crítica en procesos clave como la acreditación de programas educativos, en los que se requiere demostrar, mediante evidencia concreta, el cumplimiento de indicadores de calidad establecidos por organismos evaluadores como los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior (CIEES).

La dispersión y desorganización de la información pueden dificultar el acceso a datos confiables, actualizados y relevantes, lo que limita la toma de decisiones informadas por parte de los cuerpos directivos y académicos. Ante este panorama, la adopción de herramientas tecnológicas basadas en inteligencia de negocios (BI, por sus siglas en inglés) representa una oportunidad estratégica para transformar la forma en que se recopila, estructura y analiza la información institucional.

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un modelo de datos en Power BI, enfocado en centralizar, visualizar y analizar la información académica del programa de Ingeniería en Gestión

Empresarial del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. El objetivo principal fue facilitar el monitoreo de indicadores clave de desempeño, apoyar la toma de decisiones y optimizar la preparación de evidencias para procesos de acreditación, mediante el uso de paneles interactivos, filtros dinámicos y análisis automatizados.

TEORÍA

Inteligencia de Negocios en la educación superior

La Inteligencia de Negocios (BI, por sus siglas en inglés) se refiere al conjunto de tecnologías, procesos y herramientas que permiten transformar datos en información útil para la toma de decisiones estratégicas. En el ámbito educativo, la implementación de BI ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la gestión académica, al facilitar el análisis de indicadores clave y promover una cultura de mejora continua. Según (Quintana Armas, 2022), la adopción de herramientas de BI en instituciones de educación superior permite optimizar procesos académicos y administrativos, al proporcionar información en tiempo real que respalda la toma de decisiones informadas.

Power BI como herramienta de visualización de datos

Power BI, desarrollado por Microsoft, es una plataforma de análisis de datos que permite la creación de informes interactivos y paneles de control personalizados (Microsoft, 2024). Su integración con otras herramientas de Microsoft y su capacidad para conectarse a diversas fuentes de datos la convierten en una opción atractiva para instituciones educativas. (López Robledo, 2023), destaca que el uso de Power BI en universidades facilita la presentación de datos institucionales, resultados de investigaciones y evaluaciones del aprendizaje estudiantil, lo que contribuye a una planificación más efectiva y centrada en datos.

Acreditación educativa y evaluación de indicadores

La acreditación de programas académicos es un proceso fundamental para garantizar la calidad educativa y la mejora continua. En México, los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior (CIEES) establecen criterios y estándares que las instituciones deben cumplir para obtener la acreditación. La evaluación de indicadores como la retención estudiantil, la eficiencia terminal y la inserción laboral de egresados requiere de sistemas de información robustos y actualizados. (Carballo Mendívil, Arellano González, & Lizardi Duarte, 2025), señalan que el uso de herramientas como Power BI permite visualizar de manera clara y dinámica los logros en relación con los objetivos educacionales, facilitando la identificación de áreas de mejora y la toma de decisiones estratégicas.

Modelado semántico y estructuración de datos

El modelado semántico es una técnica que permite organizar y representar datos de manera coherente, facilitando su interpretación y análisis. En el contexto de Power BI, el modelado semántico implica la creación de relaciones entre diferentes conjuntos de datos, lo que permite una visualización más intuitiva y significativa de la información. (Quintana Armas, 2022), enfatiza la importancia de una estructura de datos bien definida para garantizar la precisión y relevancia de los análisis realizados, especialmente en procesos de evaluación y acreditación.

METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se trabajó con datos numéricos provenientes de registros institucionales. Fue de tipo descriptivo porque no se buscó establecer relaciones causales, sino caracterizar el estado actual de los indicadores académicos. El diseño fue no experimental, pues no se manipularon variables, sino que se analizaron tal como se presentaban en los sistemas existentes. El objetivo fue construir un modelo de datos en Power BI que facilitara el análisis estratégico y el cumplimiento de indicadores para la acreditación académica del programa de Ingeniería en Gestión Empresarial. El proceso metodológico se organizó en cuatro fases:

Integración y transformación de datos

La primera fase del proyecto consistió en integrar y transformar datos relevantes provenientes de diferentes fuentes internas del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Entre los datos recopilados se encuentran archivos en Excel, reportes institucionales, resultados de evaluaciones internas, registros de matrícula, egresados y titulación. La calidad de los datos fue verificada con base en su integridad, consistencia y actualidad.

Considerando los ejes clave establecidos por los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior (CIEES, 2025), se propuso que estos datos se consolidaran en una base de datos que cubriera seis áreas fundamentales. Estas áreas, representadas en la figura 1, permiten organizar la información alineándola con los principales criterios de evaluación utilizados en procesos de acreditación.



Figura 1. Áreas que se alinean con los principales ejes de evaluación de los CIEES

La organización de los datos en estas categorías facilita su análisis desde una perspectiva integral y estratégica, fortaleciendo la estructura del modelo y su utilidad en la evaluación institucional.

Modelado semántico

Con el fin de representar de manera clara y estructurada la información del programa, cada una de las seis áreas mencionadas fue incorporada como una tabla dentro del modelo de datos (ver figura 2). En esta etapa, se prepararon los datos para ser utilizados en Power BI mediante procesos de estandarización de nombres de campos, definición de jerarquías y llaves primarias y foráneas.



Figura 2. Modelo semántico

Desarrollo del modelo conceptual en Power BI

Una vez realizado el modelo semántico, se diseñó el modelo conceptual en Power BI que permitió establecer relaciones entre las tablas creadas, organizando la información en dimensiones relevantes del programa. Esta estructura relacional permitió construir visualizaciones interactivas que facilitaran la interpretación de los datos. La figura 3 muestra el modelo relacional desarrollado.

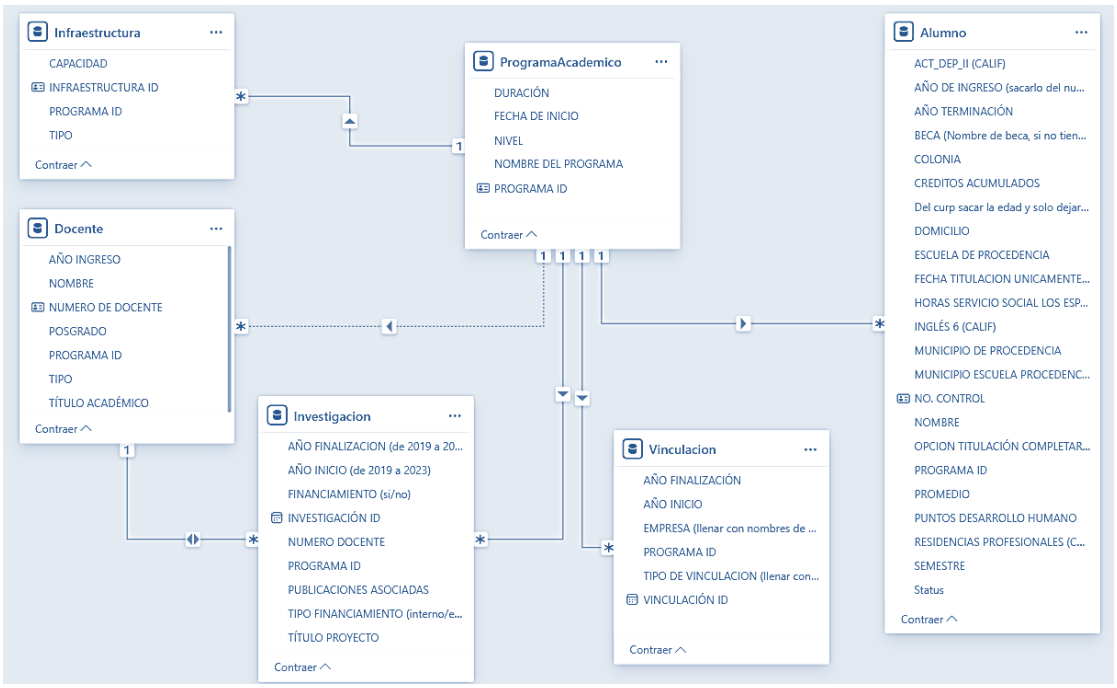


Figura 3. Modelo relacional

Diseño y construcción de dashboards interactivos
Finalmente, se diseñaron paneles visuales interactivos utilizando Power BI, los cuales integran funciones de segmentación dinámica, filtros personalizados, botones de navegación, y gráficos avanzados como líneas de tendencia, mapas y tarjetas de indicadores clave. Estos dashboards fueron diseñados con enfoque en la accesibilidad y usabilidad, permitiendo el análisis de información estratégica para la gestión del programa académico.

La metodología empleada no solo permitió centralizar grandes volúmenes de información, sino que también redujo significativamente el tiempo de procesamiento, mejoró la precisión de los análisis y promovió una toma de decisiones fundamentada en datos objetivos y actualizados.

RESULTADOS

La implementación del modelo de datos en Power BI permitió transformar un proceso tradicionalmente complejo y manual en un sistema eficiente, dinámico y visualmente accesible para la gestión académica. Uno de los principales resultados fue la centralización de información en un entorno único, alineado con los ejes de evaluación de los CIEES, que facilita el acceso inmediato a datos clave, mejora la transparencia institucional y fortalece la toma de decisiones estratégicas.

El uso de dashboards interactivos permitió identificar áreas críticas del programa académico, tales como la eficiencia terminal, el seguimiento de la trayectoria estudiantil y la participación docente en actividades académicas y de investigación. A través de visualizaciones claras, segmentaciones dinámicas y filtros inteligentes, se pueden explorar los datos de forma intuitiva, apoyando el diseño de estrategias de mejora basadas en evidencia. A modo de ejemplo, en las siguientes figuras se muestran algunas de las visualizaciones generadas para tres de estos ejes: Docente, Alumno e Investigación.
En la Figura 4 se presenta la visualización correspondiente al eje Docente, donde se integran datos sobre el año de ingreso del profesorado, tipo de contrato, participación en proyectos y publicaciones realizadas. Esta vista permite analizar la composición de la plantilla docente sin revelar información personal, respetando los principios de confidencialidad institucional.

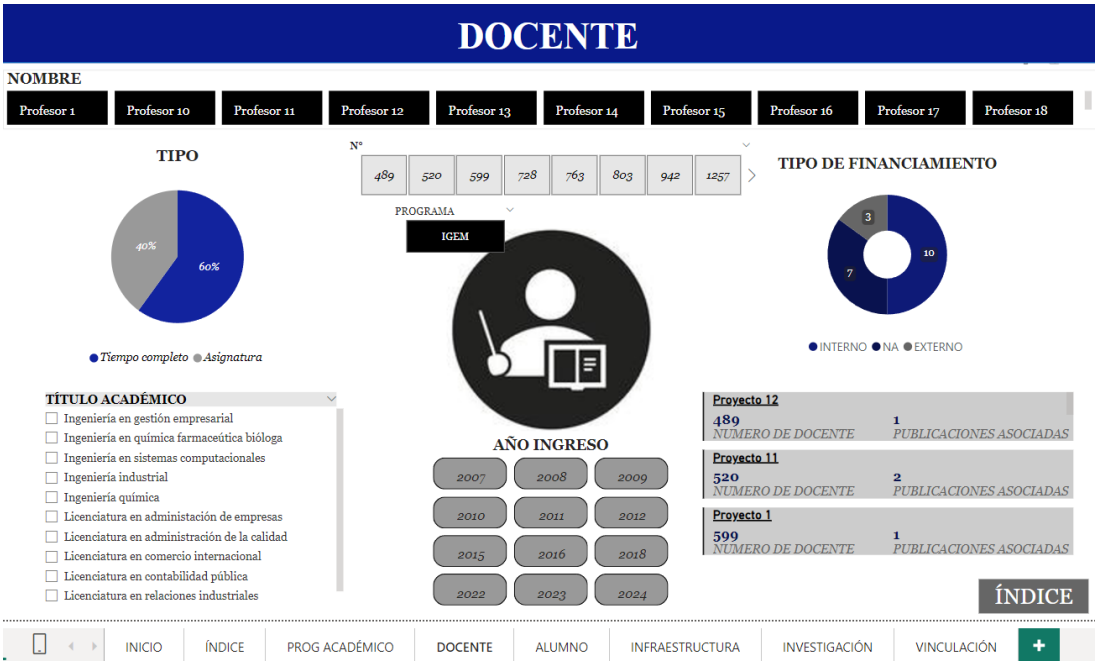


Figura 4. Panel de visualización del eje Docente

La Figura 5 muestra el dashboard correspondiente al eje Alumno, el cual incluye datos como la escuela de procedencia, semestre actual, estatus académico (vigente, baja temporal, etc.) y número de control. Este último campo funciona como una herramienta de segmentación que permite filtrar datos individuales para análisis más específicos sin comprometer la privacidad del estudiante.

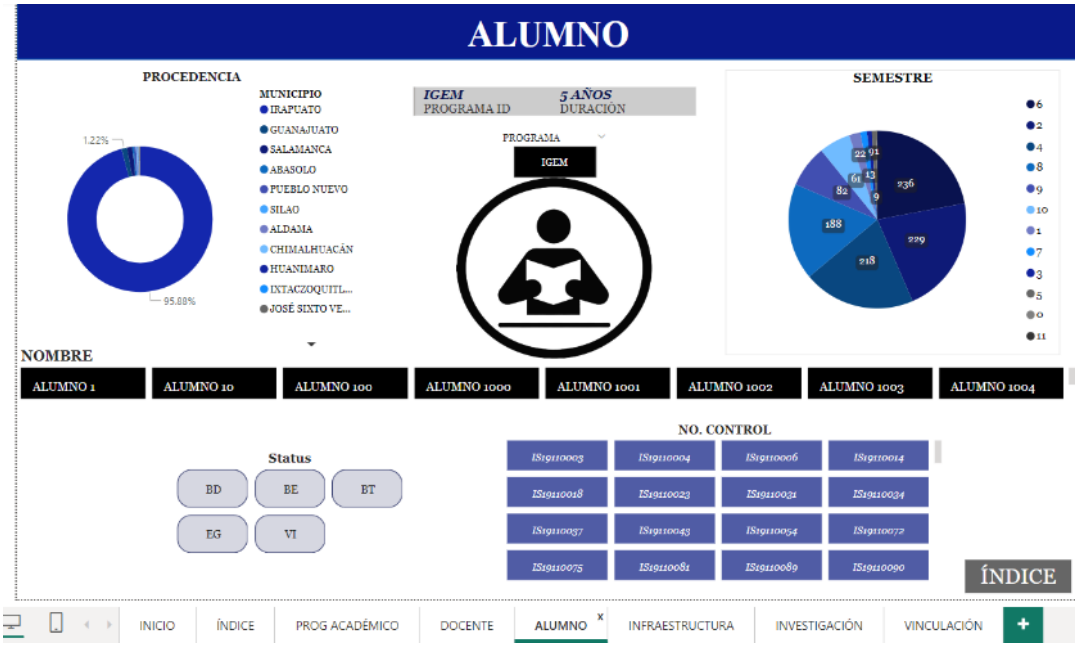


Figura 5. Visualización del eje Alumno

En la Figura 6 se observa la visualización correspondiente al eje de Investigación, en la cual se integran indicadores como el número total de proyectos desarrollados por el programa, así como la distinción entre proyectos con o sin financiamiento. Esta información facilita la evaluación de la capacidad del programa para generar y aplicar conocimiento, en concordancia con los criterios de acreditación.



Figura 6. Visualización del eje Investigación

Además de facilitar la exploración de datos clave, el modelo permitió la automatización de reportes, reduciendo significativamente el tiempo invertido en tareas manuales y minimizando errores en la generación de evidencias. También se observó una mejora en la accesibilidad del sistema, con un diseño amigable que alcanzó un nivel estimado de comprensión del 90% entre los usuarios no especializados.

En conjunto, estos resultados demuestran que la herramienta desarrollada no solo mejora la eficiencia operativa del proceso de evaluación académica, sino que también sienta las bases para un sistema de monitoreo institucional proactivo, adaptable y basado en datos confiables y actualizados.

CONCLUSIONES

El desarrollo del modelo de datos en Power BI representó un avance significativo en los procesos de análisis y gestión de la información académica, al facilitar la integración, estructuración y visualización de datos clave para la acreditación. La herramienta permitió optimizar el acceso a información estratégica, reducir tiempos de procesamiento y mejorar la precisión de los reportes generados.

Además, el modelo fortaleció la capacidad institucional para evaluar y monitorear el cumplimiento de los criterios establecidos por los CIEES, al ofrecer una visión clara y actualizada de los indicadores del programa académico. Esto contribuyó directamente a la identificación oportuna de áreas de mejora y a la priorización de acciones correctivas.

Se concluye que el uso de plataformas de inteligencia de negocios como Power BI impulsa la transformación digital de los procesos de gestión académica, promoviendo una toma de decisiones basada en datos y una cultura de mejora continua. Se recomienda mantener actualizada la base de datos, capacitar a los usuarios clave en el uso del tablero y explorar nuevas funcionalidades que permitan seguir ampliando su impacto en la administración educativa.

BIBLIOGRAFÍA

Carballo Mendívil, B., Arellano González, A., & Lizardi Duarte, M. d. (2025). Evaluación de objetivos educacionales en educación superior: una experiencia para visualizar los logros con Power BI. *Revista Digital de la Unidad Académica de Docencia Superior*. Obtenido de www.filha.com.mx/publicaciones/edicion/2025-01/evaluacion-de-objetivos-educacionales-en-educacion-superior-una-experiencia-para-visualizar-los-logros-con-power-bi-por-blanca-carballo-mendivil-alejandro-arellano-gonzalez-y-maria-del-pilar-lizardi-duarte

CIEES. (2025). *CIEES Mejor Educación Superior*. Obtenido de https://www.ciees.edu.mx/?seccion=acreditacion&area=programas

López Robledo, D. M. (2023). Power BI para la Visualización de Datos en Instituciones Educativas. *HETS Online Journal*. Obtenido de https://hets.org/ojournal/index.php/hoj/article/view/118/102

Microsoft. (2024). *¿Qué es Power BI? - Power BI | Microsoft Learn*. Obtenido de https://learn.microsoft.com/es-es/power-bi/fundamentals/power-bi-overview

Quintana Armas, F. E. (2022). *Propuesta tecnológica de herramientas de business intelligence para la mejora de la gestión académica en la educación superior.* Obtenido de https://repositorio.puce.edu.ec/items/b18c1ae7-925d-483d-9367-1b9d0e3b901f

EVALUACION TERMODINAMICA DE LA INCORPORACION DE UN COLECTOR SOLAR FRESNEL EN EL PROCESO DE CAPTURA DE CO_2

Miriam Navarrete Procopio[1], Andrea Yatziri García Ocampo[2], O.A. Jaramillo [3], Laura Castro[4], J.C Garcia[5]

[1,2] Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, [3]Instituto de Energías Renovables (IER), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [4,5] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
jcgarcia@uaem.mx.

RESUMEN

Una de las alternativas para mitigar el calentamiento global es la captura del CO_2 post-combustión en las plantas de generación eléctrica que requieren del uso de combustibles fósiles en su proceso de producción. La captura del CO_2 de los gases de combustión requiere de dos etapas básicas: la recuperación del CO_2 con un solvente en una torre de absorción y la separación del CO_2 del solvente en una torre de desorción. En la etapa de desorción se requiere de vapor de agua, que si se obtiene a través de la energía térmica de los combustibles fósiles, se contribuye a la generación de CO_2 y disminuye la eficiencia global del proceso de generación de energía eléctrica. En este trabajo se presenta la evaluación termodinámica de la incorporación de un pequeño colector solar Fresnel para generar el vapor de agua requerido en el proceso de desorción del proceso de captura de CO_2 post-combustión a escala piloto en un laboratorio de operaciones unitarias. Los flujos másicos y las temperaturas de las entradas y salidas de la torre de desorción se realizaron de forma experimental, mientras que la evaluación termodinámica para el colector solar se realizó con Octave y CoolProp. Por la parte superior de la torre de desorción entra un flujo 28 g/min de solución de monoetanolamina (MEA) al 30% p/p saturada con CO_2. Por la parte inferior de la columna entran 50 g/min de vapor de agua en condiciones de saturación (0.8 bar y 94.5°C) proporcionando 2221J/s para la desorción. Un colector Fresnel con un reflector primario de 6 m^2 tiene la capacidad de proporcionar esa cantidad de energía, evitando de esta forma que el proceso de captura del CO_2 utilice energía que proviene de fuentes de energía que producen CO_2 adicional.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y el cambio climático representan desafíos críticos para nuestro planeta, impulsados por el aumento de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono (CO_2), en la atmósfera. Una estrategia prometedora para mitigar estos efectos es la captura de CO_2 post-combustión, donde el CO_2 se separa de los gases de escape de plantas industriales y energéticas [1]. Actualmente las 1000 centrales eléctricas más grandes de todo el mundo emiten el 22% de los 10 GtC/año de CO_2 [2]. El proceso de captura de CO_2 post-combustión utiliza columnas empacadas de desorción que permiten la recuperación y almacenamiento del CO_2, reduciendo así su liberación a la atmósfera y contribuyendo a la disminución del impacto ambiental de las actividades humanas [3], [4]. Estudios destacan la importancia de los experimentos a escala laboratorio para comprender los mecanismos de desorción, optimizar las tecnologías de tratamiento y garantizar la precisión del monitoreo ambiental. Investigaciones recientes han explorado diversos disolventes y técnicas para optimizar el proceso de desorción, centrándose en mejorar la eficiencia energética, reducir los costos y minimizar las emisiones de carbono. Se ha encontrado que una mezcla de metildietanolamina y piperazina puede reducir los costos anuales y las emisiones de carbono hasta en un 30% en comparación con otros disolventes [5], [6], [7], [8]. Además, optimizar los parámetros del proceso, como el consumo de vapor y la relación líquido-gas, ha demostrado ser efectivo para minimizar la energía de regeneración, alcanzando consumos bajos de 2.85 GJ/t CO_2 [9]. También se han evaluado soluciones avanzadas, como la solución tampón promovida por aminas (APBS), que lograron reducir la energía de regeneración a través de la integración de calor y el reciclaje de CO_2 [10], [11]. Estudios con monoetanolamina (MEA) y modelos mejorados utilizando

software como Aspen Plus han proporcionado datos precisos sobre la dinámica y la eficiencia del proceso, permitiendo un mejor control y optimización de las operaciones [12]. Los estudios han demostrado que la elección del solvente, los parámetros de operación y el empaque de la columna impactan significativamente la eficiencia energética del proceso de desorción [13], [14], [15], [16]. Una de las soluciones para hacer sostenible la tecnología de captura de CO_2 post-combustión es el uso de la energía solar térmica [17], [18], [19]. Se han implementado colectores solares para gestionar el servicio de calor del rehervidor para la generación del vapor requerido en la columna de desorción [20]. El presente trabajo propone la incorporación de un colector solar tipo Fresnel para sustituir el generador de vapor en una columna de desorción para el proceso de captura de CO_2 post-combustión a escala laboratorio. Los flujos másicos y las temperaturas de operación en las corrientes de proceso se obtuvieron de manera experimental, desorbiendo una solución MEA-H2O al 30% en peso saturada con CO_2. La propuesta del colector solar tipo Fresnel incluye el área de transferencia de calor y las condiciones de operación para obtener de manera constante el flujo de vapor saturado que ingresa a la columna de desorción. Además, se presenta el análisis termodinámico para operar el colector solar de 9 a 16 horas del día.

TEORÍA

Las ecuaciones de balance de materia y energía, aplicadas en los cálculos de la columna de desorción, se derivan del principio de conservación, que establece la masa o la energía ni se crea o ni se destruye, sólo se transforma. En el siguiente diagrama (Figura 1) se muestra una columna empacada con sus respectivas corrientes de entrada y salida, siendo: la corriente 1 la entrada del líquido (L_{in}), la corriente 2 (G_{in}) la entrada del gas, la corriente 3 la salida del líquido (L_{out}) y la corriente 4 la salida del gas (G_{out}).

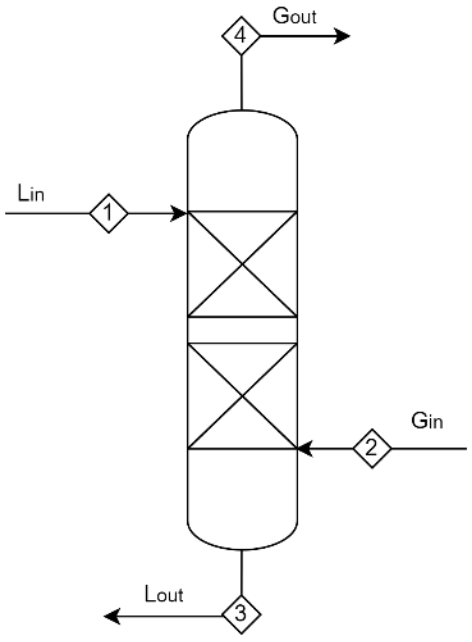


Figura 1. Esquema de las corrientes de entrada y salida en una columna de desorción para el balance de masa y energía en una columna de desorción.

Las ecuaciones fundamentales utilizadas en el análisis energético son los balances de masa y de energía para volumen de control en estado estacionario:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_e x_i = \sum \dot{m}_s x_i \quad (2)$$

$$0 = Q_{vc} - W_{vc} + \sum Fm_e \left(h_e + \frac{1}{2}V_e^2 + gZ_e\right) - \sum Fm_s \left(h_s + \frac{1}{2}V_s^2 + gZ_s\right) \quad (3)$$

Donde h es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que este puede intercambiar con su entorno, llamada entalpía, Q_{vc} es el flujo de calor en un volumen de control, V es la velocidad, W_{vc} es la tasa de trabajo en un volumen de control, x es la composición del componente i, $\dot{m}$ es el flujo másico de entrada, g es la gravedad y Z la elevación en un punto determinado.

Para la ecuación de la conservación de la energía se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El flujo es estacionario.
- El flujo es uniforme en cada sección de la columna.
- El cambio en energía cinética es despreciable.
- El cambio en energía potencial es despreciable.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores la ecuación (3) puede reescribirse como:

$$Q_{vc} - w_{vc} = Fm_s h_s - Fm_e h_e \quad (4)$$

La fuente fototérmica, para generar el vapor saturado para la columna de desorción está compuesta por un colector linear Fresnel (CLF) y se usó la Ecuación (5) para calcular la carga térmica Q_u obtenida de la radiación incidente en la superficie de los espejos del CLF:

$$Q_u = \eta_{th} * A_a * DNI \quad (5)$$

Donde A_a es la superficie total de los espejos del CLF y DNI es la Irradiancia Directa Normal. La eficiencia térmica η_{th} es la razón de la energía transferida al fluido de trabajo con respecto a la radiación incidente en la superficie de la superficie de los espejos del colector Fresnel.

El flujo másico del fluido de trabajo que pasa por el tubo colector del CLF se puede calcular a partir de:

$$Q_u = \dot{m}(h_o - h_i) \quad (6)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico del agua, h_o y h_i son las entalpias a T_0 =20 °C y T_i =100 °C sus temperaturas de entrada y salida.

Las propiedades termodinámicas se obtienen de Coolprop a través de comandos en Octave como en la Ecuación 7:

$$[x, y] = CoolProp(a, b) \quad (7)$$

PARTE EXPERIMENTAL

Descripción del sistema desorción de la solución saturada MEA-H_2O-CO_2

El sistema de desorción físico se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. El proceso de desorción es una operación unitaria que separa un soluto gaseoso disuelto en una solución a través de un agente desorbente, el cual disuelve el soluto que se desea separar. El proceso de desorción del CO_2 se lleva a cabo en una columna empacada con flujos de vapor de agua y solución de monoetanolamina (MEA) al 30% p/p saturada con CO_2. en contracorriente. Como fluido desorbedor se utiliza vapor de agua para después ser condensado. La Figura 2 muestra el sistema de desorción (a) unidad experimental, (b) y su diagrama. La alimentación al sistema de desorción consta de dos corrientes, en la corriente 1 se bombea (P-101) la solución a desorber del tanque de almacenamiento (T.K.-101) y en la corriente 2 se suministra el vapor saturado mediante un generador de vapor (C.V.-101). El vapor ingresa por la parte inferior de la columna empacada (P.T.-101). En la corriente 3 sale el líquido del proceso de desorción y se colecta en un tanque de almacenamiento (T.K.-103). Posteriormente en la salida de la corriente 4 el vapor se condensa a través del sistema de intercambio de calor (C.N.-101) y se almacena (T.K.-102). La temperatura se midió utilizando cuatro sensores ubicados en las corrientes de entrada y salida del vapor y en las corrientes de entrada y salida de la solución. El sistema de desorción cuenta con un flujómetro para medir y controlar el fluido de enfriamiento proveniente de un criotermostáto (E-101).

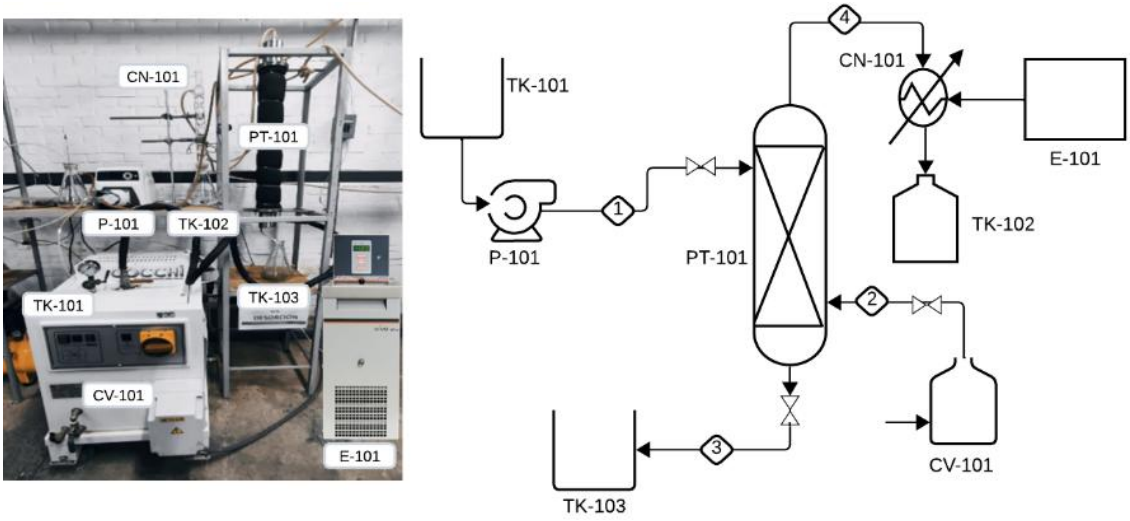


Figura 2. Sistema de desorción del laboratorio de operaciones unitarias (UAEM-FCQel), (a) Unidad experimental y (b) Diagrama del sistema de desorción.

La solución de monoetanolamina (MEA) es el disolvente más utilizado en los procesos de captura de CO_2 de los gases de combustión en las centrales termoeléctricas, con el inconveniente de que es caro y corrosivo a altas concentraciones, por lo tanto, se desarrolló una metodología experimental que asegure la máxima capacidad de absorción de la solución de MEA. La cantidad de solución absorbente desorbida fueron 165 g al 30% en peso de Monoetanolamina saturada con CO_2. La Tabla 1 muestra las condiciones de operación de la columna de desorción del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Tabla 1. Condiciones físicas y de operación de la columna de desorción del LOU-UAEM

Variable	Valor	Unidades
Presión	0.8	atm
Tipo de empaque	Monturas berl de cerámica ½ in	
Diámetro de la columna	0.065	m
Altura de sección empacada	0.68	m
Flujo de la solución	28	mL/min
Concentración de la solución absorbente saturada	30	% wt.
Presión del generador	4.8	bar
Carga de solución	165	g
Temperatura de solución	25	°C
Humedad	45	%
Temperatura ambiente	20	°C
Flujo de fluido de fluido de enfriamiento	1100	mL/min

Descripción del sistema fototérmico para generar vapor saturado de agua

El sistema CLF-generador de vapor está compuesto por dos circuitos: el circuito CLF y el del generador de vapor. La Figura 3 muestra que el circuito fototérmico está compuesto por un CLF de 6 m^2, un termotanque para almacenar el fluido de trabajo (cuando no tiene la carga térmica necesaria para operar el generador o cuando tiene un excedente de carga térmica) y de dos intercambiadores de calor, el I1 para transferir la carga térmica al generador de vapor y el I2 para transferir energía a algún proceso que requiera agua caliente. El circuito fototérmico se encuentra presurizado a 2 bar, para que el fluido trabajo (agua líquida) puede tener una temperatura de 100 °C sin cambiar de fase, ya que la temperatura de saturación del agua para esa presión es de 120 °C.

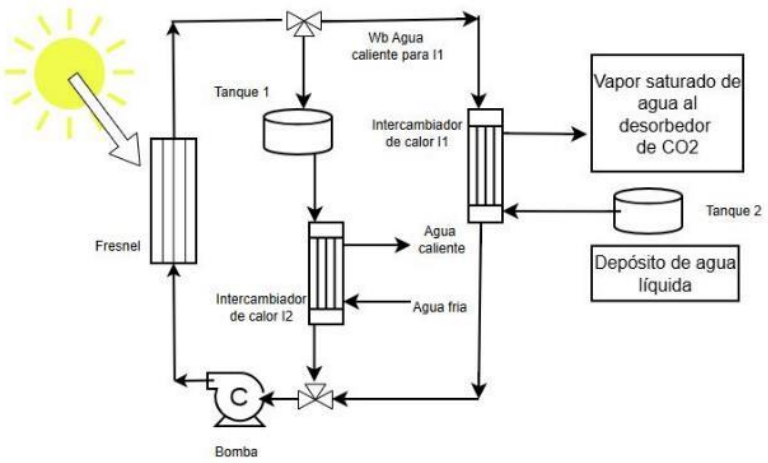


Figura 3 Diagrama de flujo para sistema CLF acoplado al generador de vapor de la columna de desorción de CO_2

Las características técnicas del CLF se muestran en la Tabla 2, mientras que las características principales del circuito CLF se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Características técnicas del CLF

Condición o característica	Descripción o capacidad
Superficie del colector	6 m2
Cantidad de espejos	81 (Longitud de espejos=2.5 m Ancho de espejos=0.03 m)
Distancia de los espejos al tubo colector	2 m
Diámetro del tubo colector	0.03 m

Tabla 3. Condiciones generales de operación del circuito fototérmico

Condición	Descripción o capacidad
Carga térmica que entrega (el CLF) a intercambiador de calor I1 acoplado al desorbedor	2613 W
Flujo másico Wb de agua caliente en intercambiador de calor I1	7.8x10-03 (kg/s)
Eficiencia de intercambiadores de calor I1 y I2	0.85
Temperatura de agua en entrada de concentrador solar CLF	20 °C
Temperatura de agua en salida de concentrador solar	100 °C
Presión del circuito fototérmico	2 bar

La Figura 4 muestra la irradiancia solar directa del día 27 de enero de 2025 de la estación de la Red Solarimétrica Mexicana [21], ubicada en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos (latitud 18° 50’ 25.62’’ N, longitud 99 °14’ 10.49’’ O). Los datos de irradiancia que se muestran la figura se usaron en los cálculos termodinámicos de este trabajo.

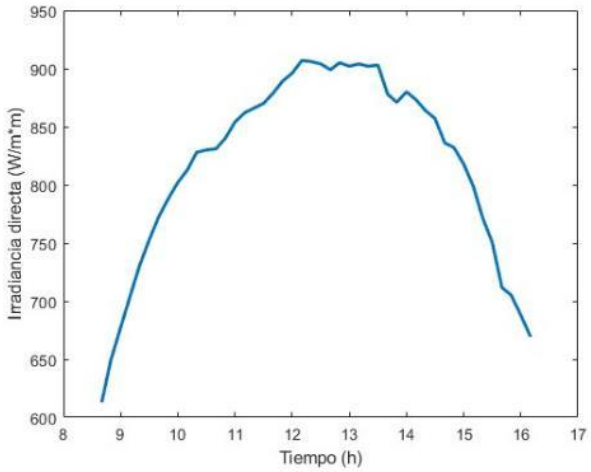


Figura 4 Irradiancia Directa Normal utilizada para calcular la carga térmica que entrega el CLF acoplado al generador de vapor de la columna de desorción de CO_2

RESULTADOS

La Tabla 4 muestra los valores termodinámicos de entalpia (h) para cada una de las corrientes en el proceso de desorción para proceder con el análisis energético.

Tabla 4. Valores termodinámicos para el balance de energía

Corriente	T (°C)	m (g min-1)	h (kJ kg-1)
30% p/p			
1	23.40	28	98.14
2	94.50	50	2666.81
3	83.06	51.5	347.86
4	93.69	26	2665.51

Por el tubo colector del CLF debe circular un Flujo másico de agua $7.8x10^{-03}$ kg/s para producir 2613 W de energía térmica para el circuito del Generador de vapor de LOU. Sin embargo, debido a que la irradiación solar no es constante durante el día, sino que es una parábola, en el CLF se establece que el flujo másico sea de flujo variable, donde las temperaturas de salida del tubo colector se mantienen constantes a 100 °C.

Las variables como la eficiencia del colector (Figura 5), el flujo másico (Figura 6) o la carga térmica (Figura 7) en el CLF tienen un comportamiento de una función parabólica y se corresponde con el comportamiento de la irradiancia solar. Para la irradiancia del día 27 de enero de 2025, el campo fototérmico puede proporcionar 2613 W desde las 9 a 16 horas.

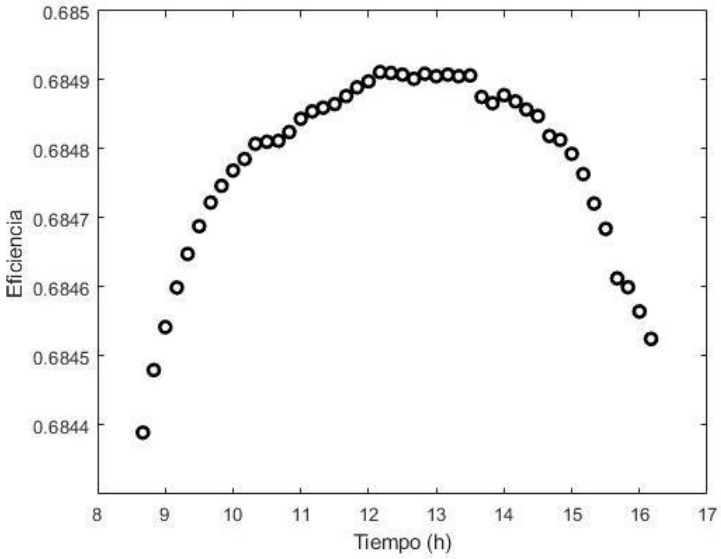


Figura 5 Eficiencia del CLF durante un el horario de operación del sistema fototérmico-generador de vapor.

La Figura 6 muestra los flujos de agua que se calientan en el campo fototérmico CLF. La curva con puntos representa al flujo másico a través del tubo del colector solar. El flujo es variable con la finalidad de que la temperatura de salida del colector solar se mantenga constante a 100 °C, de esta forma la temperatura y el flujo a través del intercambiador I1 son contantes, permitiendo generar los 50 g/min vapor saturado de forma constante, cantidad requerida por la columna de desorción. La línea continua es el flujo másico que no pasa por el intercambiador I1 (que suministra la carga térmica al generador de vapor) y que se puede destinar a calentar otro proceso. La diferencia de flujo de las dos curvas es constante y representa la cantidad de agua caliente que pasa por el intercambiador I1. El excedente de masa total de agua caliente que se puede usar para calentamiento en turno del colector es de 0.03 (kg/s)(h). La carga térmica para otro proceso se obtiene del intercambiador de calor I2.

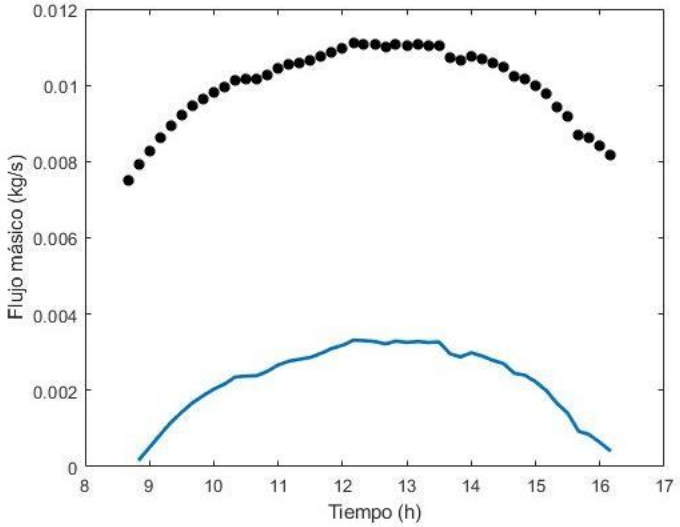


Figura 6 Flujos de agua caliente durante el horario de operación del sistema fototérmico-generador de vapor, a) a través del tubo colector del CLF (curva con puntos) y b) en línea continua el flujo másico para calentamiento de procesos diferentes a la generación de vapor para la columna de desorción

La Figura 7 muestra la energía térmica total (curva con símbolo +) que el CLF puede entregar durante un día, mientras la línea continua muestra la energía térmica que no se usará en el generador de vapor y que está disponible para calentamiento de otros procesos que requieran de energía térmica. La diferencia térmica entre las dos curvas corresponde a la energía térmica que se envía al generador de forma constante, para no causar variaciones en la generación de vapor saturado para la columna de desorción. El excedente de energía térmica total que se puede usar para calentamiento en un turno del colector es de 10 507 (W)(h).

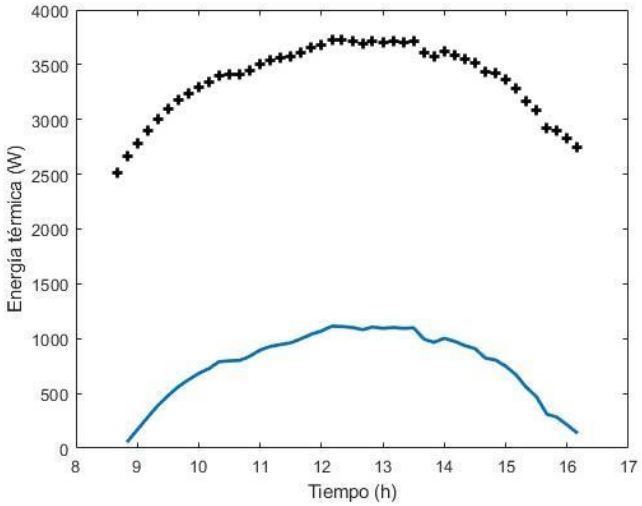


Figura 7 Energía térmica durante el horario de operación del sistema fototérmico-generador de vapor, a) carga térmica total a la salida del tubo colector del CLF (curva con signos +) y b) la línea punteada representa la carga térmica que se puede usar para calentar otros procesos

CONCLUSIONES

El sistema fototérmico basado en un colector lineal Fresnel (CLF) suministra la carga térmica necesaria para generar de manera constante 50 g/min de vapor de agua en condiciones de saturación a 0.8 atm y 94.5°C, esta cantidad de vapor se requiere en la columna de desorción a escala laboratorio.

El horario de operación del generador de vapor usando el CLF es de 9 h a 16.5 h y durante este horario se genera un excedente de energía térmica de 10 507 (W)(h) por turno, que se puede usar para calentamiento de otros procesos. Esa cantidad de energía térmica excedente está contenida en una cantidad de agua caliente de 0.03 (kg/s)(h) por turno de operación, que se puede usar para calentamiento de otros procesos del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

BIBLIOGRAFÍA

[1] C. F. Heuberger, I. Staffell, N. Shah, and N. MacDowell, “What is the Value of CCS in the Future Energy System?,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 7564–7572. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1888.

[2] C. F. Heuberger, I. Staffell, N. Shah, and N. Mac Dowell, “Quantifying the value of CCS for the future electricity system,” *Energy Environ Sci*, vol. 9, no. 8, 2016, doi: 10.1039/c6ee01120a.

[3] K. Ummel, “Carma Revisited: An Updated Database of Carbon Dioxide Emissions from Power Plants Worldwide, available at: http://doi.org/10.2139/ssrn.2226505,” *SSRN Electronic Journal*, no. August 2012, 2012.

[4] L. Borges Hernández, “Tecnologías de captura y almacenamiento de CO2 como vía hacia la descarbonización,” 2023, Accessed: Apr. 29, 2025. [Online]. Available: http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33898

[5] S. Holloway, J. M. Pearce, V. L. Hards, T. Ohsumi, and J. Gale, “Natural emissions of CO2 from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide,” *Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1194–1201, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.ENERGY.2006.09.001.

[6] B. R. Strazisar, R. R. Anderson, and C. M. White, “Degradation pathways for monoethanolamine in a CO2 capture facility,” *Energy and Fuels*, vol. 17, no. 4, 2003, doi: 10.1021/ef020272i.

[7] N. Agarwal, L. Cao Nhien, and M. Lee, “Rate-Based Modeling and Assessment of an Amine-Based Acid Gas Removal Process through a Comprehensive Solvent Selection Procedure,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 18, 2022, doi: 10.3390/en15186817.

[8] B. H. Li, N. Zhang, and R. Smith, “Simulation and analysis of CO2 capture process with aqueous monoethanolamine solution,” *Appl Energy*, vol. 161, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.010.

[9] Y. Ye, X. Zhao, J. Chen, and M. Fang, “Pilot-Scale Experimental Study of a New High-Loading Absorbent for Capturing CO2 from Flue Gas,” *Processes*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/pr10030599.

[10] R. A. Frimpong, H. Nikolic, D. Bahr, G. Kiran, and K. Liu, “Pilot scale testing of an advanced solvent in a 0.7 MWe post-combustion CO2 capture unit,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 106, 2021, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103290.

[11] J. Hwang *et al.*, “An experimental based optimization of a novel water lean amine solvent for post combustion CO2 capture process,” *Appl Energy*, vol. 248, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.135.

[12] M. Bui, I. Gunawan, V. Verheyen, P. Feron, and E. Meuleman, “Flexible operation of CSIRO’s post-combustion CO2 capture pilot plant at the AGL Loy Yang power station,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 48, 2016, doi: 10.1016/j.ijggc.2015.12.016.

[13] M. Fang *et al.*, “Experimental study on the novel direct steam stripping process for postcombustion CO2 capture,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 53, no. 46, 2014, doi: 10.1021/ie503517y.

[14] Y. S. Yusri, R. Mohd. Zin, and R. Mohd Salleh, “Energy Saving through Modeling of Integrated Distillation Column (Side-Stripper) in Natural Gas Liquid Processing,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 699, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.699.822.

[15] J. Liu and D.-S. Chen, “Advance Stripper Configuration for Energy-Saving Designs Using Standard Monoethanolamine Absorbent for Post-Combustion Carbon Capture,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 333, 2021, doi: 10.1051/matecconf/202133316002.

[16] J. Gao *et al.*, “Experimental study of regeneration performance for CO2 desorption from a hybrid solvent MEA-methanol in a stripper column packed with three different packing: Sulzer BX500, mellapale Y500 and pall rings 16 × 16,” *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 36, no. 3, 2017, doi: 10.1002/ep.12516.

[17] J. Wang, J. Zhao, Y. Wang, S. Deng, T. Sun, and K. Li, “Application potential of solar-assisted post-combustion carbon capture and storage (CCS) in China: A life cycle approach,” *J Clean Prod*, vol. 154, pp. 541–552, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.021.

[18] F. Wang, J. Zhao, H. Li, S. Deng, and J. Yan, “Preliminary experimental study of post-combustion carbon capture integrated with solar thermal collectors,” *Appl Energy*, vol. 185, pp. 1471–1480, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.02.040.

[19] F. Hosseinifard, M. Hosseinpour, M. Salimi, and M. Amidpour, “Toward a greener future: Solar solutions for industrial carbon capture,” *Solar Energy*, vol. 271, p. 112436, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.SOLENER.2024.112436.

[20] A. Ayyad, A. Abbas, and N. Elminshawy, “A simulation study of the effect of post-combustion amine-based carbon-capturing integrated with solar thermal collectors for combined cycle gas power plant,” *Discover Sustainability*, vol. 2, no. 1, p. 9, Dec. 2021, doi: 10.1007/s43621-021-00018-x.

[21] “Red Solarimétrica Mexicana,” http://esolmetdata.ier.unam.mx/Esolmet2/index.html. Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: http://esolmetdata.ier.unam.mx/Esolmet2/index.html

DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE ELECTROCULTIVO PARA MAÍZ Y PEPINO

Berenice Noriega Luna, Paola Karina Álvarez López, Diego Armando Rivas Ojeda, María Jesús Puy Y Alquiza, Alma Hortensia Serafín Muñoz y Luis Ángel Rodríguez Montelongo

Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@ugto.mx

RESUMEN

El electrocultivo se presenta como una técnica innovadora para optimizar el crecimiento de cultivos mediante la aplicación de campos eléctricos de baja intensidad. Este trabajo describe el diseño y funcionamiento de un sistema de electrocultivo basado en un campo eléctrico estático aplicado a la germinación de semillas de maíz y pepino y al crecimiento de sus plántulas. La innovación de este sistema radica en la combinación de una disposición circular en 2D de electrodos, lo que permite una estimulación más eficiente y precisa en la germinación de semillas y en el crecimiento de las plantas.Para el desarrollo del electrocultivo, se emplearon seis electrodos cilíndricos de cobre como ánodos, dispuestos alrededor de un cátodo cilíndrico de aluminio. Cada electrodo tenía una longitud de 10 cm y un diámetro de 1 cm, y fueron introducidos en el suelo a una profundidad de 5 cm, donde se colocaron las semillas de maíz y pepino. Se aplicó un campo eléctrico de 0.8 V/cm para las semillas de pepino y de 0.4 V/cm para las semillas de maíz. La germinación de las semillas de maíz se aceleró en un 30% con el tratamiento eléctrico, mientras que la germinación de las semillas de pepino se aceleró en un 14.3%. No obstante, el desarrollo del sistema radicular, del área foliar y del hipocótilo no mostró diferencias significativas comparados con cultivos control sin tratamiento eléctrico. Este estudio demuestra que el electrocultivo puede ser una herramienta útil para optimizar la germinación de semillas de maíz y pepino. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para comprender completamente los mecanismos de acción del electrocultivo y para determinar la intensidad óptima del campo eléctrico para cada cultivo.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de alimentos, exacerbada por la escasez de agua y el uso excesivo de fertilizantes en la agricultura tradicional, exige el desarrollo de técnicas de cultivo más eficientes y sostenibles. El electrocultivo, que utiliza campos eléctricos de baja intensidad para estimular el crecimiento vegetal, se presenta como una alternativa prometedora para mitigar estos desafíos. Este estudio se centra en la evaluación del efecto de un rango específico de intensidades de campo eléctrico (0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm) en la germinación y el crecimiento inicial de semillas de maíz (*Zea mays*) y pepino (*Cucumis sativus*). A diferencia de investigaciones previas que han explorado el electrocultivo de manera general, este trabajo se enfoca en determinar la intensidad óptima que maximice tanto la tasa de germinación como la longitud de la raíz en ambas especies. Mediante la comparación de los resultados con un grupo control sin estimulación eléctrica, se busca identificar la intensidad de campo que promueva un crecimiento vigoroso sin afectar negativamente los procesos celulares. Los resultados de este estudio contribuirán a una mejor comprensión del potencial del electrocultivo para el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente, especialmente en regiones con escasez de agua y donde se busca reducir el uso de fertilizantes químicos.

TEORÍA

El electrocultivo, o electrocultura, se basa en la aplicación de campos eléctricos de baja intensidad para estimular el crecimiento vegetal. Su efecto se manifiesta a nivel celular y molecular, influyendo en diversos procesos fisiológicos. Los campos eléctricos interactúan con las membranas celulares, modificando su permeabilidad y activando canales iónicos. Esta interacción puede modular la expresión génica, influyendo en la síntesis de proteínas y la producción de metabolitos. Además, se ha observado la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), que pueden actuar como señales secundarias en la respuesta de las plantas a la estimulación eléctrica. Diversos estudios han

demostrado la influencia de los campos eléctricos en la germinación, el crecimiento radicular, el desarrollo foliar, la fotosíntesis y la absorción de nutrientes. Estos efectos se relacionan con cambios en el metabolismo energético, incluyendo la producción de ATP, la actividad enzimática y la síntesis de compuestos bioactivos. La señalización celular juega un papel crucial en la respuesta de las plantas a la estimulación eléctrica, activando o inhibiendo diferentes vías de señalización, como las vías de respuesta al estrés y las vías hormonales relacionadas con el ácido abscísico y el ácido jasmónico. La influencia en la expresión de genes relacionados con el crecimiento y el desarrollo también ha sido investigada en diferentes estudios (Sandia et al., 1998; Gurovich, 2012; Goldsworthy, 2008; Santos, 2018; Li et al., 2019; Alegría-Marroquín et al., 2020; Sellanes, 2023).

En el contexto del electrocultivo en maíz (*Zea mays*) y pepino (*Cucumis sativus*), la revisión de la literatura científica revela resultados diversos. Algunos estudios muestran efectos positivos en la germinación, el crecimiento y el rendimiento de ambos cultivos, mientras que otros reportan efectos negativos o nulos. Estas discrepancias pueden atribuirse a diferentes factores, incluyendo la intensidad del campo eléctrico, la duración de la exposición, la frecuencia, el tipo de electrodos, las condiciones ambientales y las características de las semillas. Los parámetros clave que se miden en los estudios de electrocultivo incluyen la tasa de germinación, la longitud y el número de raíces, el área foliar, el peso seco, el contenido de clorofila y otros indicadores de crecimiento y desarrollo. La intensidad del campo eléctrico es un factor crítico, ya que intensidades demasiado altas pueden inhibir el crecimiento, mientras que intensidades bajas pueden no tener un efecto significativo. La duración de la exposición también es importante, ya que exposiciones prolongadas pueden ser perjudiciales. La frecuencia del campo eléctrico, el tipo de electrodos utilizados, y las condiciones ambientales (temperatura, humedad, luz) también influyen en la eficacia del electrocultivo. Las características de las semillas, como su edad, tamaño y estado fisiológico, también pueden afectar la respuesta a la estimulación eléctrica (Arista et al., 2012; Florez et al., 2007; Mahmood & Usman, 2014; Mendoza-Elos et al., 2006).

El electrocultivo se presenta como una técnica agrícola sostenible y eficiente, con el potencial de reducir el uso de fertilizantes y pesticidas químicos, además de ahorrar agua y aumentar la productividad. Sin embargo, existen limitaciones. Se requiere de equipos especializados, lo que incrementa el costo de implementación. Es necesario optimizar las condiciones de aplicación para cada especie y cultivo, y aún existe una falta de conocimiento sobre los mecanismos de acción a largo plazo. Estos aspectos deben considerarse para una implementación exitosa y sostenible del electrocultivo en la agricultura.

PARTE EXPERIMENTAL

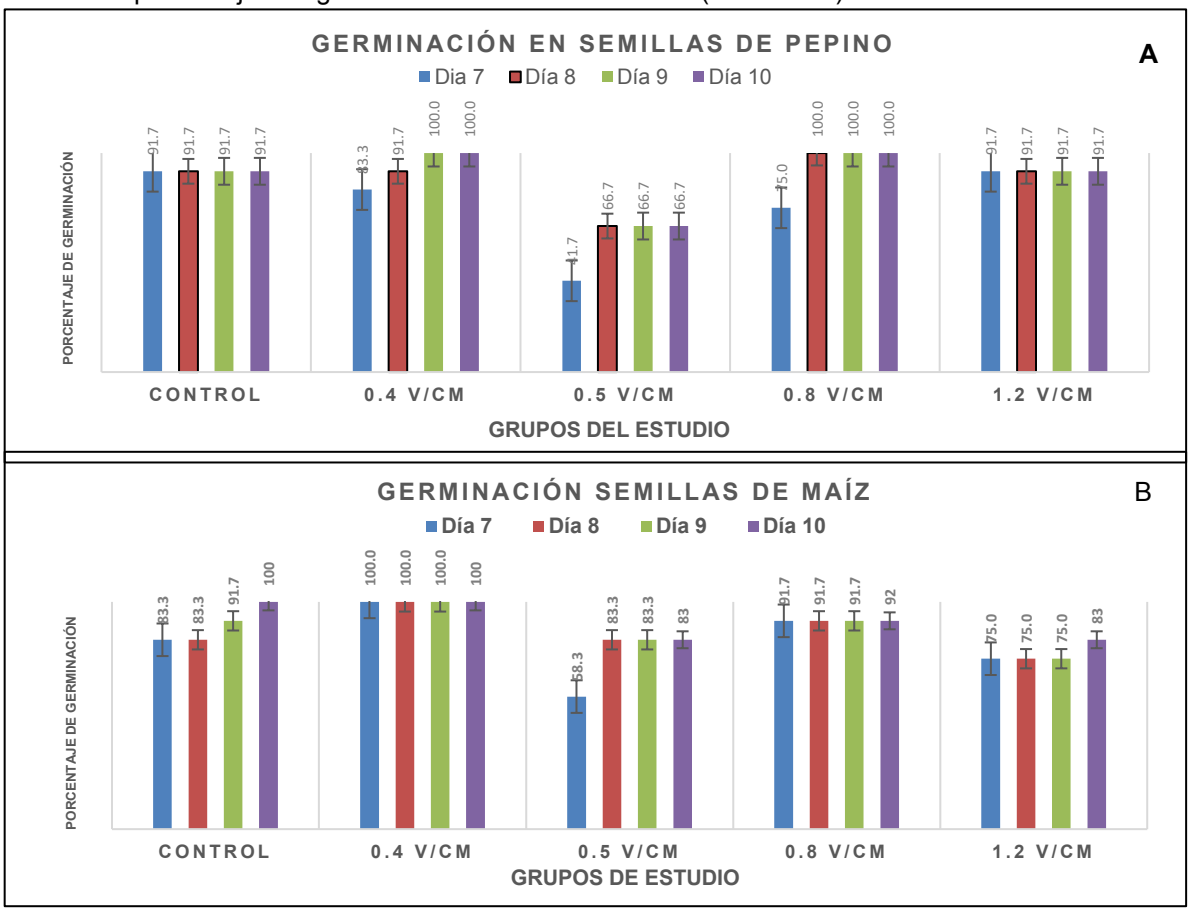
Se diseñó un sistema de electrocultivo utilizando corriente directa (CD) para aplicar campos eléctricos de baja intensidad (0.4, 0.5, 0.8, 1.0, y 1.2 V/cm) a semillas de maíz (*Zea mays*) y pepino (*Cucumis sativus*). Electrodos de alambre de cobre se insertaron en recipientes con 1000 g de suelo humedecido al 40%, donde se sembraron las semillas, previamente esterilizadas con hipoclorito de sodio, a 2.5 cm de profundidad. Tras un periodo de adaptación de 24 horas, se aplicaron los campos eléctricos durante 4 horas. Los cultivos se mantuvieron a 25-28 °C y 50% de humedad con un fotoperiodo de 8 horas de luz LED. Se incluyó un grupo control sin estimulación eléctrica. Doce días después, se evaluaron el porcentaje de germinación (registrado diariamente), la longitud de la raíz principal y el número de raíces secundarias, la longitud de cotiledones/hojas, la longitud y el grosor del coleoptilo/hipocótilo, y el contenido de clorofila mediante la técnica de Lichtenthaler & Buschmann, 2001.

RESULTADOS

a) Germinación

El porcentaje de germinación se registró diariamente durante 10 días. En el pepino, el campo eléctrico de 0.8 V/cm aceleró significativamente la germinación, alcanzando el 100% en el octavo día, mientras que el grupo control llegó al 91.7% en el mismo día. Otras intensidades mostraron resultados variables. (Gráfica 1A). En el maíz, la intensidad de 0.4 V/cm produjo una germinación

del 100% en el séptimo día, superando al grupo control (100% en el décimo día). Otras intensidades mostraron porcentajes de germinación alrededor del 80%. (Gráfica 1B).



Gráfica 1. Porcentaje de germinación de semillas en los grupos control y expuestos a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm durante un período de cultivo de 10 días. A) Pepino y b) Maíz.

b) Desarrollo Radicular

En el pepino, la longitud de la raíz principal fue mayor en el grupo control (7.7 cm) que en los grupos tratados con campos eléctricos (entre 5.6 y 6.7 cm). El número de raíces secundarias fue ligeramente mayor en el grupo de 0.8 V/cm (Gráfica 2A). En el maíz, la longitud de la raíz principal fue significativamente mayor en el grupo de 0.8 V/cm (21.26 cm) que en el grupo control (12.02 cm). El número de raíces secundarias también fue mayor en el grupo de 0.8 V/cm (Gráfica 2B).

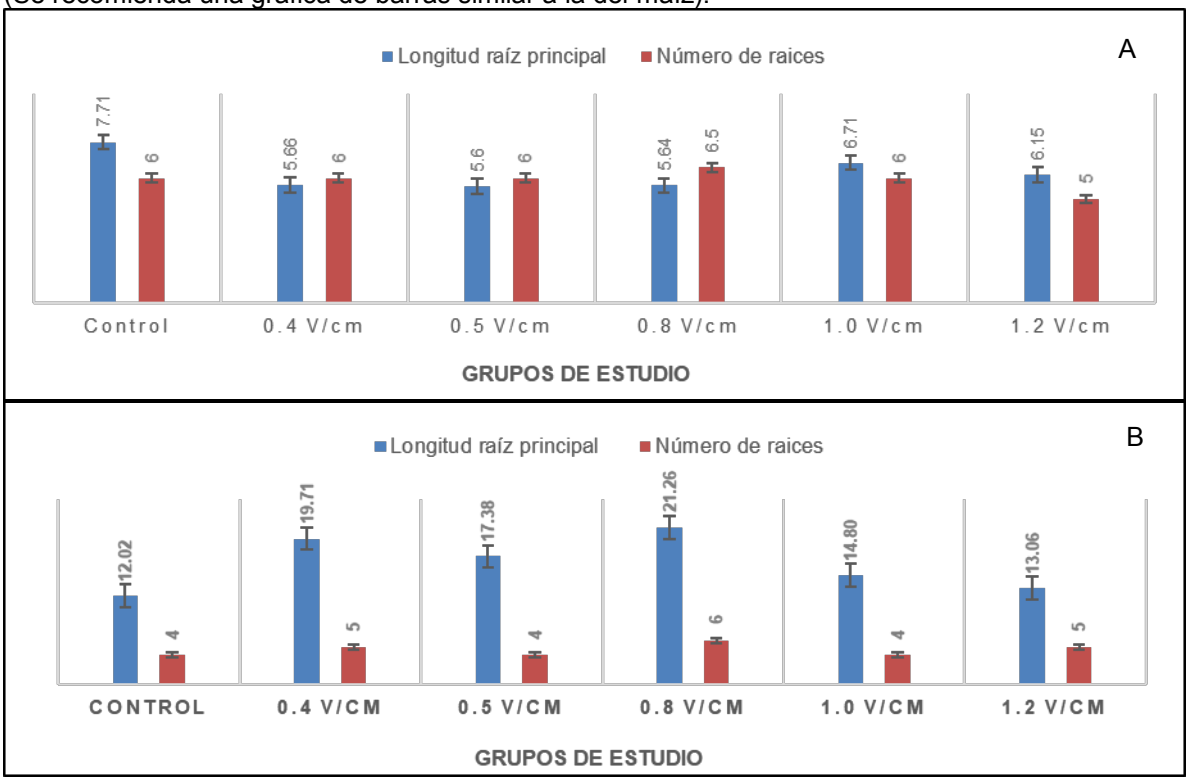
c) Desarrollo Foliar

En el pepino, la longitud de los cotiledones fue mayor en el grupo de 0.5 V/cm (2.63 cm) que en el grupo control (2.51 cm). La intensidad de 1.0 V/cm mostró los valores más bajos. En el maíz, las plantas expuestas a 0.8 y 1.0 V/cm no desarrollaron la segunda hoja después de 12 días, a diferencia del grupo control y los demás grupos. Sin embargo, la primera hoja fue más larga en los grupos de 0.4, 0.8 y 1.2 V/cm.

d) Desarrollo del Coleoptilo/Hipocótilo

En el maíz, la longitud del coleoptilo fue similar en la mayoría de los grupos, siendo menor en los grupos de 0.4 y 1.0 V/cm. El grosor del coleoptilo fue ligeramente mayor en los grupos tratados con campos eléctricos. En el pepino, la longitud del hipocótilo fue mayor en el grupo de 1.0 V/cm (7.5

cm) que en el grupo control (7.0 cm). El grosor del hipocótilo mostró poca variación entre los grupos. (Se recomienda una gráfica de barras similar a la del maíz).



Gráfica 2. Desarrollo del sistema radicular de las semillas en los grupos control y expuestos a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm durante un período de cultivo de 10 días.

e) Contenido de Clorofila

Se midió el contenido de clorofila a, b y total (a+b) en ambos cultivos (Tabla 1 y 2). Los resultados mostraron variaciones en los contenidos de clorofila para cada tratamiento y especie en comparación con el control. En ambos cultivos, las variaciones en el contenido de clorofila sugieren que la estimulación eléctrica puede influir en la fotosíntesis. Sin embargo, la respuesta no es uniforme y depende de la intensidad del campo eléctrico aplicado. Un aumento en la clorofila a y total generalmente se asocia con una mayor eficiencia fotosintética, mientras que una disminución en la clorofila b podría ser un indicador de estrés. Se necesita un análisis más profundo para comprender completamente la relación entre la estimulación eléctrica, la síntesis de clorofila, y la eficiencia fotosintética en estas especies. Es importante considerar que factores como la edad de la planta, las condiciones ambientales, y la disponibilidad de nutrientes pueden influir en los niveles de clorofila. Por lo tanto, la interpretación de los resultados debe considerar estos factores adicionales.

Tabla 1. *Contenido de clorofila en hojas de plántulas de maíz (Zea mays).*

Clorofila (mg/g)	Control	0.4 V/cm	0.5V/cm	0.8V/cm	1.0V/cm	1.2 V/cm
Clorofila a	6.25	10.31	2.93	3.86	6.29	6.67
Clorofila b	9.25	8.62	10.9	10.43	9.63	9.93
Clorofila a+b	8.21	13.21	3.96	4.96	7.68	8.28

Tabla 2. *Contenido de clorofila en hojas de plántulas de pepino (Cucumus sativus)*

Clorofila (mg/g)	Control	0.4 V/cm	0.5V/cm	0.8V/cm	1.0V/cm	1.2 V/cm
Clorofila a	6.25	10.54	8.09	8.12	7.05	8.33
Clorofila b	9.87	7.67	9.59	9.94	8.73	8.23
Clorofila a+b	8.83	11.53	6.99	10.5	9.04	11.54

CONCLUSIONES

Este estudio investigó el efecto de diferentes intensidades de campo eléctrico en la germinación y crecimiento inicial de semillas de pepino (*Cucumis sativus*) y maíz (*Zea mays*). Los resultados obtenidos muestran que la estimulación eléctrica puede influir significativamente en diversos parámetros de crecimiento, aunque la respuesta varía según la especie y la intensidad del campo aplicado. En el pepino, la intensidad de 0.8 V/cm aceleró la germinación, alcanzando el 100% en el octavo día, mientras que el grupo control llegó al 92% en el séptimo día. Sin embargo, esta intensidad tuvo un efecto negativo en la longitud de la raíz principal. En contraste, la intensidad de 0.5 V/cm promovió un mayor desarrollo foliar. En el maíz, una intensidad de 0.4 V/cm aceleró la germinación, alcanzando el 100% en el séptimo día (frente al décimo día del control), mientras que la intensidad de 0.8 V/cm estimuló el desarrollo radicular, mostrando una longitud de raíz principal significativamente mayor que el grupo control. Sin embargo, las intensidades de 0.8 y 1.0 V/cm inhibieron el desarrollo de la segunda hoja. En ambos cultivos, se observaron variaciones en el contenido de clorofila, sugiriendo una influencia de la estimulación eléctrica en la fotosíntesis. Estos resultados indican que la aplicación de campos eléctricos puede ser una herramienta útil para optimizar la germinación y el crecimiento de plantas, pero la intensidad óptima debe ser determinada cuidadosamente para cada especie y parámetro, considerando un balance entre la aceleración de la germinación y el desarrollo adecuado de las plántulas. Estudios futuros podrían explorar la influencia de otros parámetros como la duración de la exposición, la frecuencia del campo eléctrico, y las condiciones ambientales, para optimizar aún más la técnica del electrocultivo. Finalmente, se deben realizar estudios a mayor escala para evaluar la viabilidad y la rentabilidad del electrocultivo en condiciones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

Alegría-Marroquín, J., Castillo-Ruíz, O., & Saldaña-Trinidad, S. (2020). Caracterización fisicoquímica de maíz (Zea mays L.) pigmentado para potenciar su consumo. Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos. 5: 272–276.

Arista, J., y González, A. (2012). El potencial de mercado de semillas mejoradas de maíz en México.B. J. D. Etchevers, “Useful Techniques of Diagnosis in the Measurement of the Soil Fertility and the Nutrient Status of Crops,” Terra Latinoam. vol. 17 (3): 209–219.

Florez, M., Carbonell, M., & Martinez, E. (2007). Exposure of maize seeds to stationary Magnetic fields: Effects on germination and early growth. Environmental and Experimental Botany, 59(1): 68–75.

Goldsworthy, A. (2008). Effects of Electrical and Electromagnetic Fields on Plants and Related Topics. In Plant Electrofisiology, Theory and Methods. Pp: 247-265.

Gurovich, L. A., (2012) Electrophysiology of woody plants. In book: Electrophysiology – From plants to heart.

Li, Z. G., Gou, H. Q., & Li, R. Q. (2019). Electrical stimulation boosts seed germination, seedling growth, and thermotolerance improvement in maize (Zea mays L.). Plant Signaling and Behavior, 14(12). https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1681101

Lichtenthaler HK, Buschmann C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, F4.3.1-F4: 1-8.

Mahmood, S., & Usman, M. (2014). Consequences of Magnetized Water Application on Maize Seed Emergence in Sand Culture. In J. Agr. Sci. Tech (Vol. 16).

Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagómez, C., Rangel-Lucio, J. A., López-Benítez, A., Rodríguez-Herrera, S. A., Latournerie-Moreno, L., & Moreno-Martinez, E. (2006). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. Agricultura técnica en México.

Sandia, L., Cabeza, M., Arandia, J y Bianchi, G. (1998). Agricultura, salud y ambiente. Caracas: CIDIAT-FUNDACIÓN POLAR.

Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación. 2(14), 25-32.

Sellanes, L. M. (2023). Manual práctico de electrocultivos: Una guía útil para obtener la soberanía alimentaria. Independently Published.

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA LSEESC Y LA IA EN EL APRENDIZAJE DE VECTORES EN INGENIERÍA

Erika Cervantes Juárez[1], Daniel Sánchez Guzmán [2], José Alfonso Catana Castellanos[1] y Graciela Gallegos Martínez[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional, UPIIAP, [2]Instituto Politécnico Nacional, UPIIG
ecervantesj@ipn.mx

RESUMEN

La propuesta metodológica LSEESC ha sido implementada en la enseñanza del tema de vectores en estudiantes de nivel ingeniería, complementada con herramientas de Inteligencia Artificial (IA) con la finalidad de proponer una estrategia de enseñanza activa e integral, combinando el desarrollo conceptual con la experimentación práctica y el uso de tecnología, particularmente simuladores y hojas de cálculo. Esta propuesta, se implementado en la enseñanza de diferentes programas de ingenierías en un total de 140 estudiantes que fueron evaluados previa y posteriormente a la implementación de la metodología son evaluados aplicando un cuestionario conformado por preguntas estandarizadas. Además de este análisis cuantitativo, la estrategia incluye una práctica de laboratorio, donde los estudiantes aplican los conceptos de vectores en un entorno experimental, reforzando su comprensión a través de la experiencia directa. La integración de herramientas de IA, está enfocada en su uso como tutor o guía en la búsqueda de información ya que permite, bajo una guía adecuada puede proporcionar retroalimentación personalizada lo cual favorece la construcción del conocimiento. Los resultados fueron analizados a través de diversas métricas: la ganancia conceptual normalizada, que permitió identificar el progreso del aprendizaje de los estudiantes; el factor de concentración, que evaluó la dispersión del conocimiento adquirido y el índice de Rasch, mediante el cual se valoró la dificultad de las preguntas del cuestionario en relación con las habilidades del estudiante. Tales resultados sugieren que la combinación de la metodología LSEESC con el apoyo de IA contribuye a una mejora significativa en la comprensión de vectores, promoviendo un aprendizaje más profundo y significativo en los estudiantes de ingeniería.

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de conceptos fundamentales en ciencias exactas, particularmente en Física y Matemáticas, tales como vectores, representa un reto significativo en la formación de estudiantes de ingeniería, dado que, su correcta comprensión es esencial para el dominio de múltiples áreas de aplicación. Tradicionalmente, la enseñanza se ha centrado en métodos expositivos que privilegian la memorización sobre la comprensión, lo que limita el desarrollo del pensamiento analítico requerido en la práctica profesional. En este contexto, es necesario replantear estrategias didácticas que incorporen enfoques activos, experimentales y con el apoyo de diversas tecnologías.

Estudios recientes destacan los desafíos comunes que enfrentan los estudiantes al aprender sobre vectores. Latifa, Purwaningsih y Sutopo (2021) [1] identificaron dificultades específicas mediante una "Prueba de Comprensión de Vectores". Sus hallazgos sugieren que los estudiantes a menudo luchan por captar la naturaleza fundamental de los vectores, especialmente al aplicarlos en diversos contextos físicos. De manera similar, Sabah (2023) [2] exploró las dificultades experimentadas por estudiantes de ciencias e ingeniería, observando que muchos tienen problemas con las operaciones vectoriales, la descomposición y la visualización de cantidades vectoriales en tres dimensiones. Por otro lado, comprender conceptos complejos en física, especialmente los teóricos, presenta su propio conjunto de obstáculos. Liu (2019) [3] discute varias dificultades de aprendizaje encontradas en la física teórica y propone estrategias de reforma educativa para mejorar la comprensión de los estudiantes. Esto sugiere que la naturaleza abstracta de algunos temas de física, incluyendo aplicaciones avanzadas de vectores, contribuye a las barreras de aprendizaje.

Otro aspecto de la educación moderna en física implica el pensamiento computacional. Handayani et al. [4] investigaron las habilidades de pensamiento computacional de los estudiantes en el aprendizaje de la física, específicamente en el contexto de los conceptos de cinemática. Este estudio señala la creciente importancia de las habilidades computacionales para comprender y resolver problemas de física, que a menudo involucran cálculos vectoriales.

La metodología LSEESC, propuesta por Cervantes y Sánchez [7] como una alternativa integral que promueve la participación activa del estudiante en el proceso de creación del conocimiento. Esta metodología se fortalece recientemente con la incorporación de herramientas de Inteligencia Artificial (IA), con la finalidad de generar experiencias de aprendizaje personalizadas y enfocadas en objetivos específicos. Particularmente se hace uso de modelos de inteligencia artificial en modalidad de chats, para fungir como tutores digitales que brindan retroalimentación inmediata y apoyo durante las fases de exploración conceptual y resolución de problemas [2-5].

El presente trabajo analiza el impacto de la implementación conjunta de la metodología LSEESC y herramientas de IA en el aprendizaje del tema de vectores, evaluando el progreso conceptual y la aplicación práctica del conocimiento. A través de un enfoque de análisis cuantitativo y cualitativo, se busca determinar la efectividad de esta estrategia en la mejora del desempeño académico de estudiantes de ingeniería, así como en el fortalecimiento de habilidades clave para su formación profesional.

TEORÍA

La enseñanza de los vectores en contextos de educación en ingeniería representa un desafío persistente debido a su naturaleza abstracta y su vínculo directo con fenómenos físicos y aplicaciones técnicas. Para abordar esta dificultad, es necesario recurrir a enfoques metodológicos que favorezcan el aprendizaje significativo, mediante estrategias activas y la integración de múltiples representaciones (gráficas, algebraicas y experimentales) del conocimiento.

La metodología LSEESC es una propuesta didáctica centrada en el estudiante que estructura el proceso de aprendizaje en etapas [6]. Esta metodología busca promover el pensamiento crítico, la apropiación activa del conocimiento y la integración progresiva de contenidos a través de actividades colaborativas, prácticas experimentales y momentos de reflexión individual y grupal. Su enfoque se alinea con los principios del constructivismo social, donde el aprendizaje se concibe como un proceso activo de construcción en interacción con otros y con el entorno.

Por otro lado, la Inteligencia Artificial en la educación ha ganado relevancia en los últimos años como una herramienta que permite personalizar la enseñanza y brindar retroalimentación adaptativa. En el contexto de la enseñanza de la física y la ingeniería, la IA puede actuar como un asistente inteligente o tutor virtual, capaz de guiar a los estudiantes en la resolución de problemas, explicar conceptos de forma dinámica y ofrecer sugerencias basadas en el desempeño individual.

En términos de evaluación del aprendizaje, el presente estudio incorpora tres herramientas analíticas como la ganancia conceptual normalizada y el factor de concentración para medir el progreso del aprendizaje como la diferencia entre el conocimiento inicial y final, normalizado respecto al máximo posible de mejora, lo cual permite evaluar el impacto de intervenciones educativas, la homogeneidad del aprendizaje en un grupo, identificando la dispersión de los logros individuales respecto al promedio, lo que permite valorar si la mejora fue equitativa entre los estudiantes y se utilizó el índice de Rasch como herramienta psicométrica utilizada para valorar la calidad de los ítems de evaluación y su correspondencia con las habilidades del estudiante, brindando información sobre la validez y confiabilidad del instrumento aplicado [8-10].

PARTE EXPERIMENTAL

La fase experimental del estudio se diseñó con el objetivo de evaluar la efectividad de la metodología LSEESC complementada con herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en el aprendizaje del tema de vectores. Esta etapa se llevó a cabo con una muestra de 140 estudiantes pertenecientes a distintos programas de ingeniería de los primeros semestres de dos unidades del Instituto Politécnico Nacional, UPIIG y UPIIAP localizadas en Guanajuato y Puebla respectivamente.

La intervención experimental se dividió en tres momentos clave:

1. DIAGNÓSTICO (PRETEST)

Antes de la implementación de la estrategia didáctica, se aplicó un cuestionario diagnóstico compuesto por preguntas estandarizadas que abarcaban aspectos teóricos y prácticos del tema de vectores (representación gráfica, suma y resta, descomposición, aplicación en fuerzas, etc.) y otro cuestionario que se refiere a preguntas directamente sobre el manejo de las hoajs de cálculo.

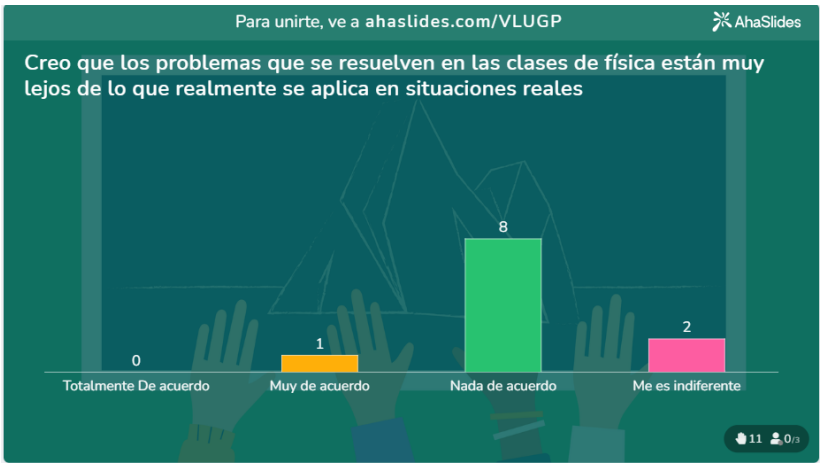


Figura 1.- Ejemplo de las preguntas realizadas en el cuestionario sobre uso de hojas de cálculo.

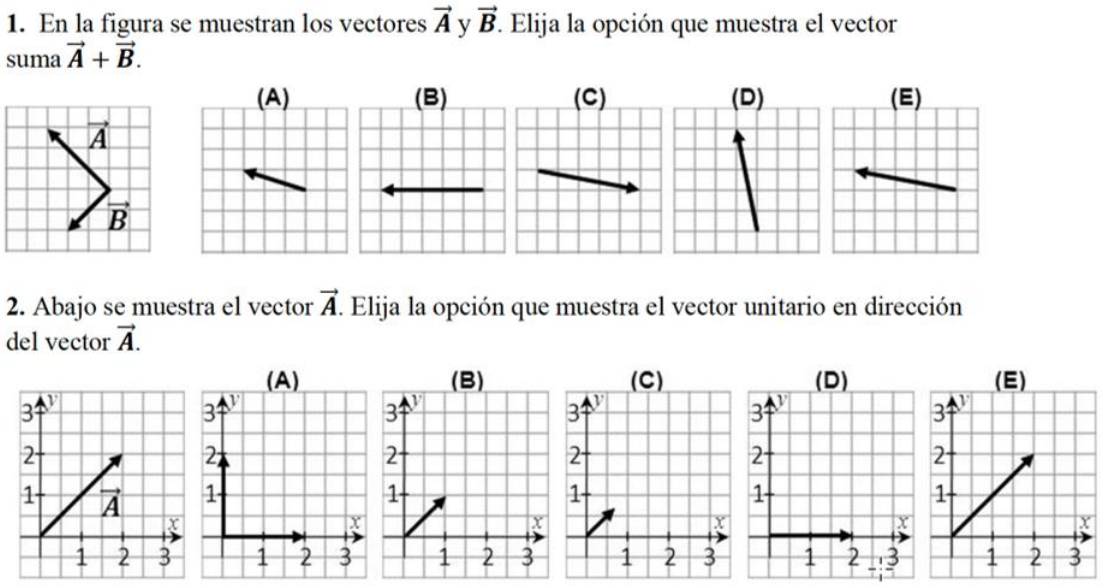


Figura 2.- Ejemplo de las preguntas realizadas en el PRETEST sobre vectores.

2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LSEESC CON APOYO DE IA

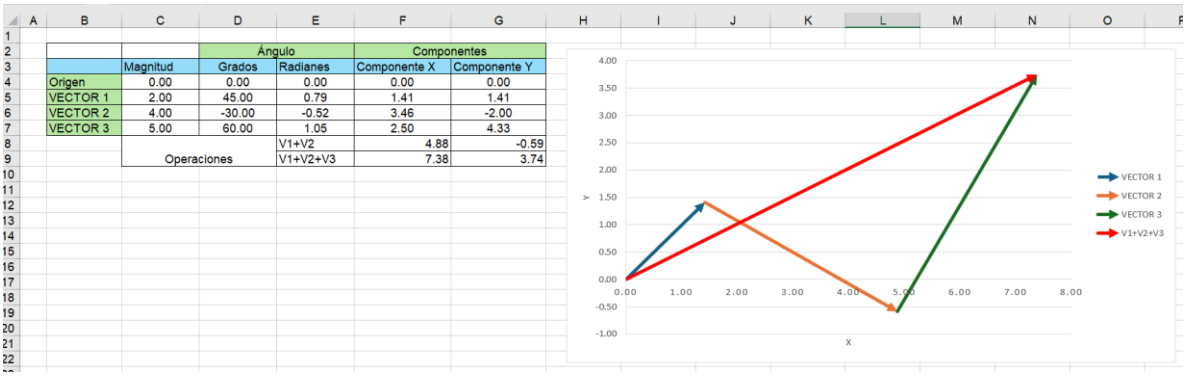
Durante varias sesiones, los estudiantes participaron en un proceso estructurado en las siguientes fases:

1. Aplicación de PRETEST: Introducción al concepto de vectores a través de material didáctico y discusión grupal facilitada por el docente.
2. Experimentación: Se desarrolló una práctica de laboratorio, en la que los estudiantes aplicaron conceptos vectoriales utilizando equipos como tableros de fuerza, poleas y pesas. Esto les permitió observar la composición de fuerzas y comprobar experimentalmente la resultante de varios vectores.



Figura 3.- Fotografías de estudiantes realizando la práctica de vectores.

3. Ejercitación: Los estudiantes resolvieron problemas utilizando simuladores interactivos y hojas de cálculo, apoyados por sistemas de IA que ofrecían retroalimentación inmediata y sugerencias adaptadas a su progreso.
4. Sistematización y Consolidación: Los aprendizajes fueron integrados a través de actividades de reflexión individual y trabajo colaborativo guiado por rúbricas específicas de evaluación.



		Ángulo		Componentes	
	Magnitud	Grados	Radianes	Componente X	Componente Y
Origen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VECTOR 1	2.00	45.00	0.79	1.41	1.41
VECTOR 2	4.00	-30.00	-0.52	3.46	-2.00
VECTOR 3	5.00	60.00	1.05	2.50	4.33
			V1+V2	4.88	-0.59
	Operaciones		V1+V2+V3	7.38	3.74

Figura 4.- Ejemplo del uso de hojas de cálculo para la comprensión de operaciones entre vectores.

La IA fue utilizada principalmente como tutor virtual mediante chatbots o asistentes inteligentes, los cuales ayudaban en la búsqueda de información, verificación de respuestas y orientación en la resolución de ejercicios, bajo supervisión docente.

Finalizada la intervención, se aplicó el mismo cuestionario estandarizado utilizado en el pretest. Los resultados fueron comparados para calcular:

1. Ganancia conceptual normalizada (Hake): permitiendo cuantificar la mejora del aprendizaje.
2. Factor de concentración: para observar si el aprendizaje fue homogéneo en todo el grupo.
3. Análisis Rasch post-intervención: verificando si los cambios en el rendimiento reflejaban una mejora real en habilidades cognitivas.

Este enfoque experimental permitió no solo evaluar el impacto de la propuesta metodológica, sino también validar la viabilidad de incorporar tecnologías emergentes como la IA en contextos educativos formales. Además, la práctica de laboratorio funcionó como un puente entre la teoría y la aplicación, facilitando una comprensión más profunda y duradera del concepto de vectores.

2. Aplicación de la Metodología LSEESC + IA
Durante varias sesiones, los estudiantes participaron en un proceso de enseñanza-aprendizaje que involucra desde una introducción al concepto de vectores a través de material didáctico y discusión grupal facilitada por el docente, seguida por la interacción por pares mediante la resolución de ejercicios guiados por el docente, otros resueltos en equipos.
Se desarrolló una práctica de laboratorio, en la que los estudiantes aplicaron conceptos vectoriales utilizando equipos como tableros de fuerza, poleas y pesas. Esto les permitió observar la composición de fuerzas y comprobar experimentalmente la resultante de varios vectores.

Para complementar la consolidación y comprensión de los conceptos, los estudiantes resolvieron problemas utilizando simuladores interactivos y hojas de cálculo, apoyados por sistemas de IA que ofrecían retroalimentación inmediata y sugerencias adaptadas a su progreso. La IA fue utilizada principalmente como tutor virtual mediante chatbots o asistentes inteligentes, los cuales ayudaban en la búsqueda de información, verificación de respuestas y orientación en la resolución de ejercicios, bajo supervisión docente. Finalmente, los aprendizajes fueron integrados a través de actividades de reflexión individual y trabajo colaborativo guiado por rúbricas específicas de evaluación.

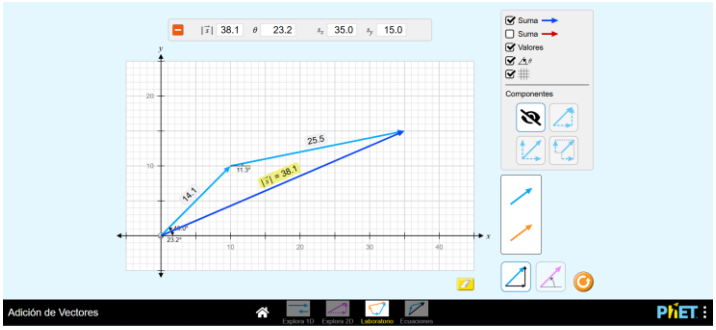
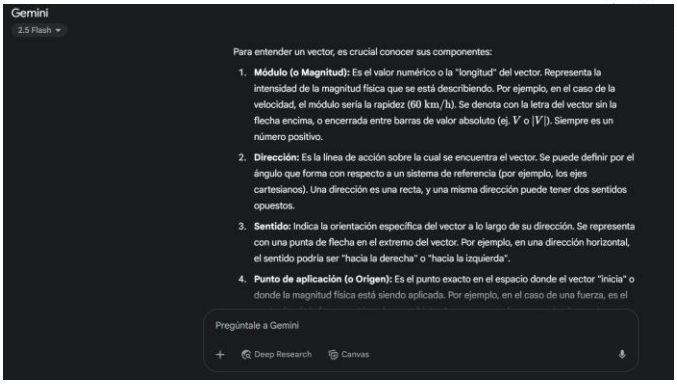
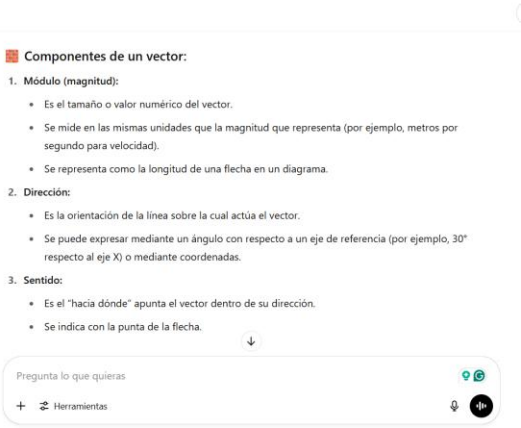


Figura 5.- Ejemplo del uso del simulador PHET para graficación de suma y resta de vectores.





Finalizada la intervención, se aplicó el mismo cuestionario estandarizado utilizado en el pretest y un cuestionario diferencial semántico. Los resultados fueron comparados para calcular mediante la Ganancia conceptual normalizada la mejora del aprendizaje, por medio del Factor de concentración determinar si el aprendizaje fue homogéneo en todo el grupo. Y finalmente, se realizó el análisis deis Rasch post-intervención.

Este enfoque experimental permitió no solo evaluar el impacto de la propuesta metodológica, sino también validar la viabilidad de incorporar tecnologías emergentes como la IA en contextos educativos formales. Además, la práctica de laboratorio funcionó como un puente entre la teoría y la aplicación, facilitando una comprensión más profunda y duradera del concepto de vectores.

RESULTADOS

La implementación de la metodología LSEESC, complementada con herramientas de Inteligencia Artificial (IA), arrojó resultados positivos y estadísticamente significativos en el aprendizaje del tema de vectores en los estudiantes de ingeniería participantes. A continuación, se detallan los principales hallazgos obtenidos tras el análisis cuantitativo y cualitativo de los datos recopilados:

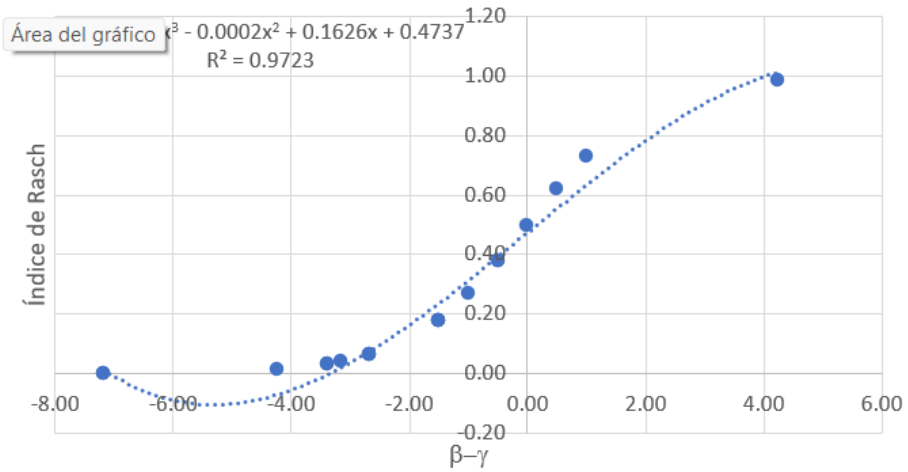


Figura 6.- Índice de Rasch

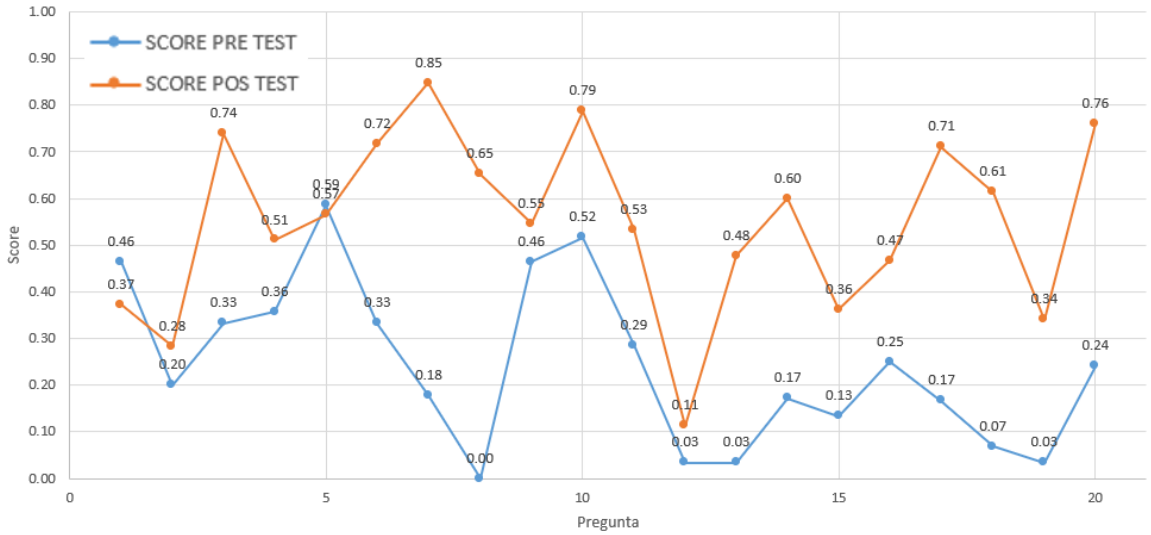


Figura 7.- Comparación de resultados obtenidos en el pre y pos test.

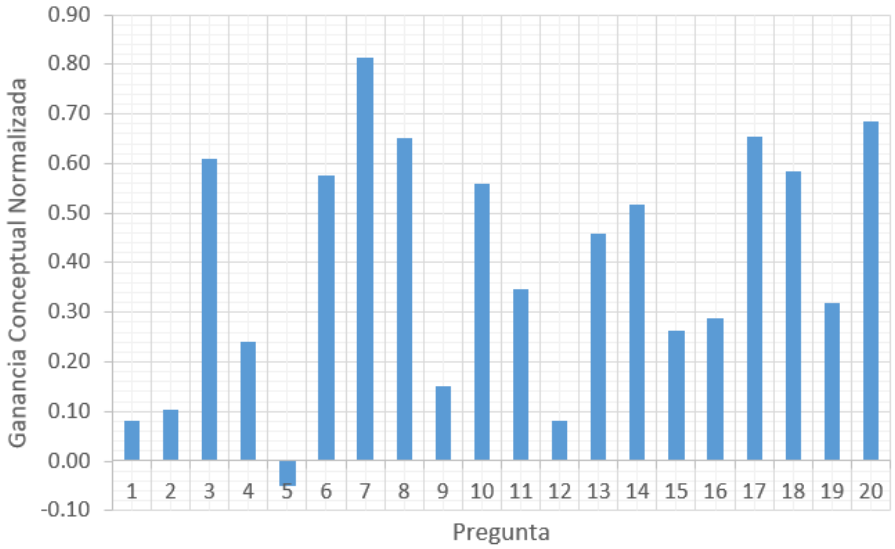


Figura 8.- Ganancia conceptual normalizada por pregunta.

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología LSEESC, en combinación con herramientas de Inteligencia Artificial (IA), demostró ser una estrategia efectiva para el fortalecimiento del aprendizaje del tema de vectores en estudiantes de ingeniería. Esta integración permitió no solo una mejora significativa en la comprensión conceptual, evidenciada mediante el análisis de la ganancia conceptual normalizada, sino también una reducción en la dispersión del conocimiento adquirido, reflejada en el factor de concentración.

El uso de IA como herramienta de apoyo, especialmente en su función de tutor virtual, facilitó la retroalimentación inmediata y personalizada, lo cual contribuyó a un aprendizaje más autónomo y significativo. Asimismo, la inclusión de una práctica experimental permitió a los estudiantes aplicar

los conceptos teóricos en un entorno realista, favoreciendo la transferencia del conocimiento y el desarrollo de competencias prácticas.

La evaluación mediante el modelo de Rasch mostró una alineación adecuada entre el nivel de dificultad de las preguntas del cuestionario y las habilidades adquiridas por los estudiantes, reforzando la validez de los resultados obtenidos. En conjunto, estos hallazgos respaldan la pertinencia de metodologías activas, integradoras y mediadas por tecnología para abordar contenidos complejos en la formación en ingeniería.

Finalmente, se concluye que la combinación de la metodología LSEESC con herramientas de IA no solo mejora el rendimiento académico, sino que también fomenta un cambio en la actitud de los estudiantes hacia el aprendizaje, promoviendo una mayor motivación, participación y apropiación del conocimiento. Estos resultados abren nuevas perspectivas para la incorporación de enfoques similares en otros temas del currículo de ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Latifa, B. R. A., Purwaningsih, E., & Sutopo, S. (2021). Identification of students' difficulties in understanding of vector concepts using test of understanding of vector. Journal Of Physics Conference Series, 2098(1), 012018. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2098/1/012018

[2] Sabah, S. (2023). Science and engineering students' difficulties in understanding vector concepts. Eurasia Journal Of Mathematics Science And Technology Education, 19(8), em2310. https://doi.org/10.29333/ejmste/13431

[3] Liu, T. (2019). Learning difficulties in theoretical physics and teaching reform strategies. Modern Applied Science, 13(11), 97. https://doi.org/10.5539/mas.v13n11p97

[4] Handayani, R. D., Lesmono, A. D., Prastowo, S. H. B., Supriadi, B., & Dewi, N. M. (2023b). Students' Computational Thinking Skills In Physics Learning: A Case study of Kinematic Concepts. Indonesian Review Of Physics, 6(1), 1-9. https://doi.org/10.12928/irip.v6i1.6464

[5] Redish, E. F. (2003). Teaching Physics with the Physics Suite. Wiley.

[6] Bao, L., & Redish, E. F. (2006). Model analysis: Representing and assessing the dynamics of student learning. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 2(1). https://doi.org/10.1103/physrevstper.2.010103

[7] Juárez, E. C., & Guzmán, D. S. (2023). Learning science and engineering with electronic spreadsheets cycle: a methodological proposal. Physics Education, 58(2), 025010. https://doi.org/10.1088/1361-6552/acad5a

[8] C., & Guzman, D. S. (2022). Developing the computational thinking process in Physics courses, an empirical study for the learning of the rigid body concept in engineering students. 2021 IEEE Frontiers In Education Conference (FIE), 7, 1-6. https://doi.org/10.1109/fie56618.2022.9962398

9] Smith, T. I., Wittmann, M. C., & Carter, T. (2014). Applying model analysis to a resource-based analysis of the Force and Motion Conceptual Evaluation. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 10(2). https://doi.org/10.1103/physrevstper.10.020102

[10] Handayani, R. D., Lesmono, A. D., Prastowo, S. H. B., Supriadi, B., & Dewi, N. M. (2023). Students' Computational Thinking Skills In Physics Learning: A Case study of Kinematic Concepts. Indonesian Review Of Physics, 6(1), 1-9. https://doi.org/10.12928/irip.v6i1.6464

[11] PhysPort: Supporting physics teaching with research-based resources. (s. f.). PhysPort. https://www.physport.org/

12] Oberkampf, W. L., Trucano, T. G., & Hirsch, C. (2004). Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics. Applied Mechanics Reviews, 57(5), 345-384. https://doi.org/10.1115/1.1767847

ÓXIDO DE GRAFENO COMO SOPORTE DE TIO_2 Y TIO_2-N

Veronica Janette Cedeño Garcidueñas, Omar Augusto Sánchez Ortiz, Félix Manuel López Avilés, Guillermo Andrade Espinosa, Yarithzy Michelle Pesqueda Juárez, Bricia Elena Corona Pacheco.

Departamento de Ingenierías, Tecnológico Nacional de México/IT del Valle de Morelia
veronica.cg@vmorelia.tecnm.mx

RESUMEN

El desarrollo de materiales se emplea para diversas aplicaciones como en el área del medio ambiente, de esta manera se posibilita la aplicación de nuevas tecnologías para la remoción de contaminantes que por tratamientos convencionales es complejo eliminar y que es imprescindible removerlos debido a que tienen efectos sobre el medio ambiente y la salud humana. Algunas de las tendencias actuales en la investigación de nuevos materiales, proponen al Óxido de Titanio (TiO_2) para esta tarea, siendo un material económico y que de acuerdo con sus características de óxido metálico semiconductor posee propiedades fotocatalíticas, lo que permite emplearlo en la degradación de componentes altamente tóxicos, como alcoholes alifáticos, ácidos carboxílicos alifáticos, colorantes, PCB's, alcanos halogenados, aromáticos simples, surfactantes y pesticidas, y la reducción del depósito de algunos metales pesados. Añadido a esto, la impurificación de Óxido de Titanio con Nitrógeno (TiO_2-N) coadyuva al proceso de fotocatálisis a través de la disminución de la banda de energía prohibida, requiriendo menor energía para el salto de electrones de una banda a otra. Por otro lado, el Óxido de Grafeno (OG) es un material novedoso, entre algunas de sus propiedades se encuentra la alta movilidad de electrones, de esta manera en conjunto el OG con el TiO_2 pueden representar una alternativa para incrementar aún más las propiedades fotocatalíticas del material evitando la recombinación de pares hueco-electrón, originando una reacción directa con la superficie de la molécula orgánica adsorbida o la oxidación indirecta de los contaminantes orgánicos, por la formación de radicales hidroxilo, logrando la eliminación de contaminantes con un alto grado de persistencia. El objetivo de este trabajo es soportar en el OG el TiO_2 y TiO_2-N y caracterizar el material resultante, para ello se sintetiza el TiO_2, a través del método Sol-Gel y su impurificación se lleva a cabo mediante el método hidrotérmico usando como precursor de nitrógeno etilendiamina, por otro lado, el OG se obtiene mediante el método de Hummers modificado, finalmente el TiO_2 y TiO_2-N se soportan en el OG en una proporción de 20/80 por ciento respectivamente, colocándose en un baño de ultrasonido durante un tiempo determinado y se seca por 24 horas. El material soportado obtenido es un polvo fino, que a simple vista muestra una coloración grisácea debido a la combinación de los materiales. Las micrografías obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido muestran la morfología de los materiales, evidenciando hojuelas afiladas, el mapeo precisa que la distribución del TiO_2 y TiO_2-N en el OG no fue homogéneo, por otro lado, también se puede apreciar que el contenido atómico de los materiales soportados muestra la presencia del titanio.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas convencionales de potabilización del agua incluyen procesos como aireación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, adsorción y desinfección [1]. No obstante, durante las etapas, pueden generarse subproductos (SP), cuyo origen está estrechamente vinculado con la presencia de precursores como la materia orgánica natural, compuestos provenientes de algas, contaminantes de origen antropogénico (pesticidas, fármacos, productos de cuidado personal, entre otros), así como iones halogenados difíciles de remover en las etapas tradicionales de tratamiento [2]. Estos compuestos, al reaccionar con agentes desinfectantes, incrementan la formación de subproductos en los sistemas de distribución, generando preocupaciones ambientales y sanitarias.

Frente a estas limitaciones, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) han surgido como tecnologías eficientes para la remoción de contaminantes persistentes y precursores de SP. En particular, estos procesos representan un método eficaz y de bajo costo para la degradación de

contaminantes orgánicos [2]. Entre estas técnicas, la fotocatálisis heterogénea basada en semiconductores de óxidos metálicos de transición ha sido ampliamente desarrollada, con aplicaciones destacadas en la eliminación de contaminantes emergentes (CE) presentes en cuerpos de agua [3,4].

El Dióxido de Titanio (TiO_2), se encuentra entre los fotocatalizadores más estudiados, presenta una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes en aguas residuales, siendo especialmente atractivo por su baja toxicidad, bajo costo, estabilidad en un amplio rango de pH y carácter ambiental [3,4,5]. La fotocatálisis con TiO_2 se basa en la generación de pares electrón-hueco (e^-/h^+) en la superficie del semiconductor al ser irradiado con luz cuya energía excede su banda prohibida (3.0–3.2 eV), lo que promueve la formación de radicales hidroxilos (•OH) y otras especies reactivas de oxígeno (ROS), responsables de la degradación de los contaminantes hasta su conversión en CO_2, H_2O y productos intermedios [5,6]. Debido al alto potencial de oxidación del radical hidroxilo (2.8 eV), este proceso es considerado una de las estrategias más eficaces dentro de los POA [7].

No obstante, una de las principales limitaciones del TiO_2 es su limitada capacidad de absorción de radiación solar, ya que solo aprovecha una pequeña fracción del espectro visible. Para superar esta barrera, se han desarrollado nanomateriales compuestos, como el TiO_2 impurificado con nitrógeno (TiO_2-N) y su soporte sobre óxido de grafeno (OG). El impurificado con elementos no metálicos permite reducir la banda prohibida del TiO_2, ampliando su actividad hacia longitudes de onda visibles. Por su parte, el OG mejora la separación de los pares e^-/h^+ y facilita el transporte electrónico gracias a su alta superficie específica y buena conductividad. Así, los materiales híbridos como TiO_2/OG y TiO_2-N/OG representan alternativas prometedoras para incrementar la eficiencia fotocatalítica bajo irradiación solar, ofreciendo una solución potencialmente efectiva y sostenible para el tratamiento avanzado de aguas residuales.

TEORÍA

El óxido de grafeno (OG) es un material bidimensional derivado del grafito, caracterizado por una estructura en láminas ultradelgadas compuesta por una red de carbono con una abundante funcionalización superficial con grupos oxigenados (como epóxidos, hidroxilos, carbonilos y carboxilos). esta estructura le confiere una elevada área superficial específica y una alta densidad de sitios activos, lo que lo convierte en un soporte ideal para mejorar la capacidad de adsorción de los fotocatalizadores. además, las regiones aromáticas presentes en el OG permiten interacciones de apilamiento π−π con compuestos orgánicos que contienen anillos bencénicos u otras estructuras aromáticas, favoreciendo una adsorción eficiente de contaminantes orgánicos sobre la superficie del material compuesto.

Como resultado, los adsorbatos se concentran sobre la superficie del fotocatalizador soportado en OG, lo cual facilita su interacción con los sitios activos del fotocatalizador, incrementando así la eficiencia del proceso fotoredox. Esta acumulación localizada promueve reacciones más rápidas y eficaces, debido a una mayor disponibilidad de especies reactivas en la interfase sólido−solución. En particular, el OG, gracias a su extensa red conjugada π, exhibe una excelente capacidad de adsorción y actúa como una plataforma efectiva en procesos fotocatalíticos, mejorando tanto la dispersión del fotocatalizador como la transferencia de electrones [8].

Por otro lado, el TiO_2 es uno de los semiconductores más ampliamente investigados en aplicaciones ambientales, debido a su alta eficiencia fotocatalítica, bajo costo, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión fotoquímica. El TiO_2 puede presentarse en tres fases cristalinas principales: anatasa, rutilo y brookita. De estas, la fase anatasa es la más apropiada para procesos fotocatalíticos, debido a su mayor actividad catalítica, relacionada con una mayor movilidad de los portadores de carga y una menor tasa de recombinación electrón−hueco. Esta fase presenta una banda prohibida de aproximadamente 3.2 eV, lo que limita su actividad al rango de radiación ultravioleta [9].

Con el objetivo de extender la absorción de TiO_2 hacia el espectro visible, se han explorado estrategias de impurificación con elementos no metálicos, como nitrógeno y azufre. Estas impurificaciones introducen niveles de energía intermedios dentro de la banda prohibida del TiO_2, reduciendo así su brecha de energía y permitiendo la activación del material bajo luz visible [10]. Esta modificación amplía su aplicabilidad en ambientes con iluminación natural, haciendo del TiO_2 impurificado un candidato aún más prometedor en tecnologías avanzadas de tratamiento de agua y aire.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis del TiO_2

La síntesis del TiO_2 se llevó a cabo mediante la ruta sol-gel (ver Figura 1), empleando isopropóxido de titanio (IV) [$Ti(OCH(CH_3)_2)_4$] como precursor, monoetilenglicol ($C_2H_6O_2$) como agente controlador del crecimiento y agua destilada como medio de reacción. El procedimiento experimental inició con la preparación de dos soluciones precursoras. En un vaso de precipitado se añadieron 13 mL de isopropóxido de titanio (IV), seguido de la incorporación lenta de 15 mL de agua destilada bajo agitación constante para evitar una hidrólisis rápida. Paralelamente, en un segundo vaso de precipitado, se mezclaron 1.5 mL de monoetilenglicol con 15 mL de agua destilada.

Ambas soluciones se mantuvieron bajo agitación continua a 60 ± 5 °C durante 4 horas para favorecer la hidrólisis y la nucleación inicial del sol. Posteriormente, las soluciones se combinaron cuidadosamente y la mezcla resultante se mantuvo a 80 ± 5 °C durante 2 horas adicionales, promoviendo la gelificación.

El gel formado fue sometido a un proceso de secado en estufa a 100 °C durante 24 horas. Una vez seco, el material se pulverizó utilizando un mortero de ágata con el fin de homogeneizar el tamaño de partícula. Finalmente, el polvo fue calcinado en una mufla a 480 °C durante 3 horas, seguido de un enfriamiento controlado hasta alcanzar la temperatura ambiente. El producto final obtenido fue TiO_2 en forma de polvo fino, apto para su posterior caracterización estructural y morfológica.

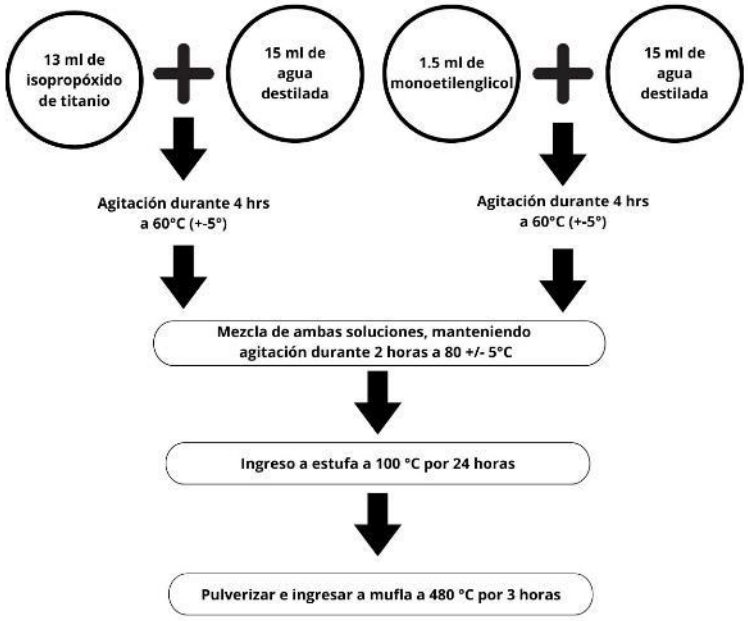


Figura 1.- Metodología para síntesis de TiO_2. Elaboración propia.

Impurificación del TiO_2 con Nitrógeno

En la Figura 2, se exhibe el proceso de impurificación del TiO_2 que inicia con la preparación de la solución precursora, para ello se agregaron 30 mL de agua destilada (pH neutro) a un vaso de precipitado, también se añadieron 8 mL de etilendiamina ($C_2H_8N_2$, 99% de pureza) bajo agitación constante. Posteriormente, se incorporó 1 g de TiO_2 sintetizado previamente (obtenido mediante el método sol-gel descrito en la sección anterior).

Posteriormente, se realizó la homogeneización de la mezcla en a través de agitación y un baño de ultrasonido. Esta se agitó en una placa calefactora durante 30 minutos a temperatura ambiente (25 ± 2 °C). Para asegurar una dispersión uniforme del nitrógeno en la matriz de TiO_2, el vaso fue cubierto con un vidrio de reloj y sometido en un baño de ultrasonido (40 kHz) durante 60 minutos.

La mezcla resultante fue sometida a un tratamiento hidrotérmico. Para ello, se transfirió a un vaso de teflón de 50 mL, el cual fue sellado dentro de una autoclave y tratado a 100 °C durante 12 horas. Finalizado el tratamiento, el producto se filtró y se secó en estufa a 80 °C durante 6 horas. Finalmente, el sólido seco fue pulverizado en un mortero de ágata, obteniéndose así dióxido de titanio impurificado con nitrógeno (TiO_2-N).

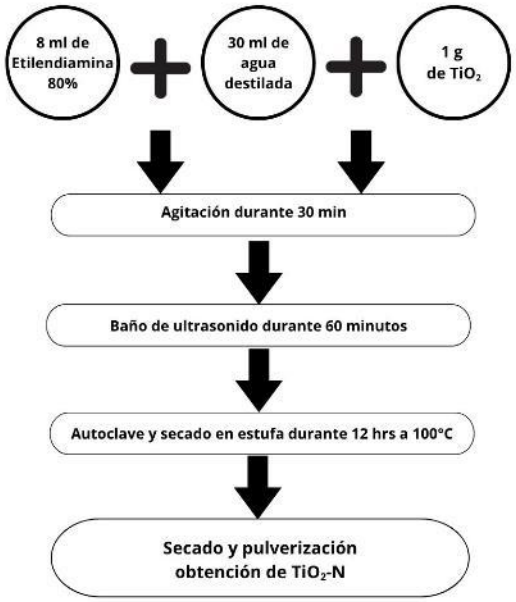


Figura 2.- Metodología para impurificar el TiO_2 con N. Elaboración propia.

Síntesis de óxido de grafeno (OG)

Para la síntesis del OG (ver Figura 3), se prepararon dos baños térmicos: uno frío (baño de hielo) y otro caliente (baño de aceite). En un vaso de precipitados, se añadieron 70 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), al cual se incorporaron 3 g de grafito natural bajo agitación constante. Posteriormente, se agregaron gradualmente 9 g de permanganato de potasio ($KMnO_4$) en pequeñas porciones, manteniendo la mezcla en un baño de hielo para controlar la temperatura por debajo de 20 °C. Durante esta etapa, la agitación se mantuvo a 200 rpm durante 10 minutos para asegurar una oxidación controlada.

Tras este periodo, la mezcla se transfirió a un baño de aceite precalentado a una temperatura entre 30 y 40 °C. Durante esta etapa, se continuó la agitación constante por 30 minutos, añadiendo lentamente 150 mL de agua desionizada. Posteriormente, se incorporaron 500 mL adicionales de agua y 15 mL de agua oxigenada (H_2O_2) al 30 %, propiciando el cambio de coloración de la mezcla.

La mezcla fue agitada durante 10 minutos adicionales. Finalmente, se procedió a una etapa de lavado ácido, añadiendo una disolución de ácido clorhídrico (HCl) al 10 %, previamente preparada, con el fin de eliminar impurezas. El producto obtenido después de ser lavado con agua destilada se colocó en una estufa de secado a 90 °C durante 24 horas para obtener el óxido de grafeno en forma de sólido seco.

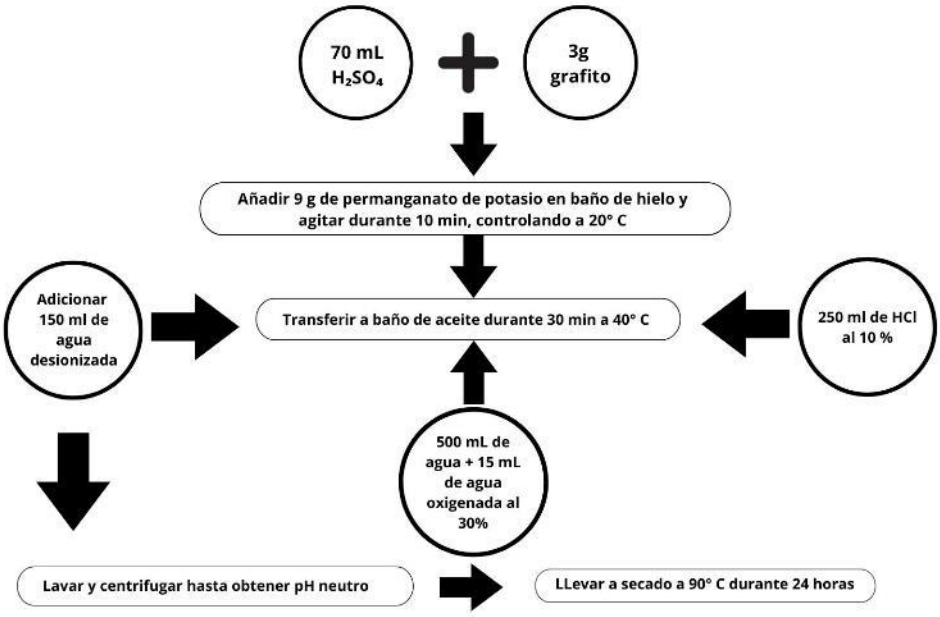


Figura 3.- Metodología para la síntesis del OG. Elaboración propia.

Soporte de TiO_2/OG

Para la preparación del material compuesto TiO_2/OG (ver Figura 4), se pesaron 0.04 g de OG y se colocaron en un vaso de precipitado. Posteriormente, se añadieron 5 mL de alcohol isopropílico como medio dispersante, seguido de la incorporación de 0.01 g de dióxido de titanio (TiO_2). La mezcla fue cubierta con un vidrio de reloj y sometida a un proceso de ultrasonido (baño ultrasónico, 40 kHz) durante 60 minutos, con el objetivo de favorecer la dispersión homogénea y la formación del soporte TiO_2 sobre la superficie del óxido de grafeno.

El procedimiento para la preparación del compuesto TiO_2-N/OG fue análogo, utilizando en este caso 0.01 g de óxido de titanio impurificado con nitrógeno (TiO_2-N) en lugar de TiO_2 puro.

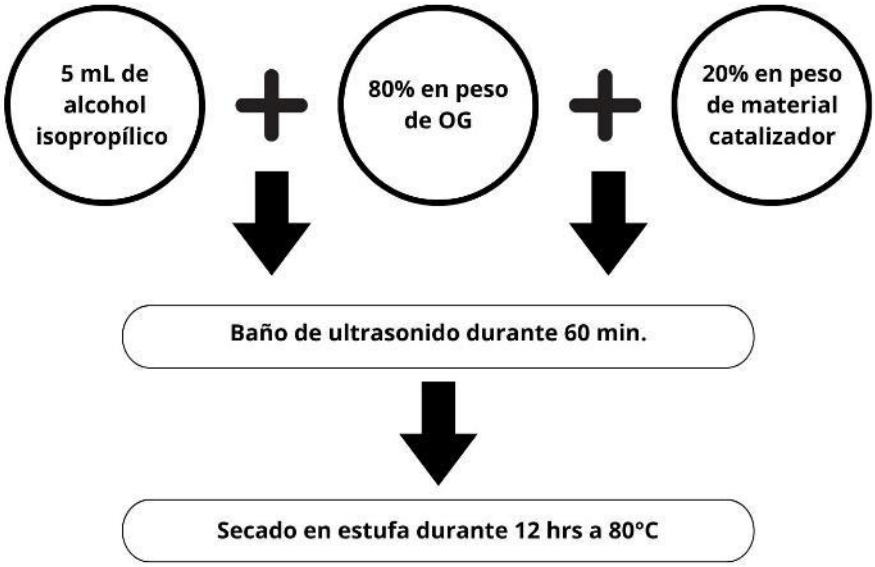


Figura 4.- Metodología para soportar el TiO_2 y TiO_2-N, en OG. Elaboración propia.

RESULTADOS

En la Figura 5 se presentan las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales permiten observar las características morfológicas y la distribución elemental de los materiales analizados. En la Figura 5(A) se aprecian claramente las hojuelas del óxido de grafeno, que aparecen aglomeradas y con bordes bien definidos, mostrando una morfología de láminas delgadas con superficies onduladas y corrugadas, características típicas de este material bidimensional. Esta topografía sugiere una alta relación superficie/volumen, lo que favorece su desempeño como soporte en aplicaciones fotocatalíticas.

La Figura 5(B) muestra el mapeo elemental correspondiente al OG, donde se evidencia una distribución homogénea de carbono y oxígeno, los principales elementos constituyentes del material. El análisis cuantitativo por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) revela una composición atómica de 71.2 % de carbono y 28.8 % de oxígeno, lo cual es consistente con la presencia de grupos funcionales oxigenados en la estructura del OG.

En la Figura 5(C) se observa la micrografía del material óxido de titanio soportado sobre óxido de grafeno (TiO_2/OG), donde es posible distinguir partículas de tamaño superior a 5 micrómetros que están recubiertas por partículas esféricas de menor tamaño, inferiores a 1 micrómetro, lo que indica una interacción efectiva entre el TiO_2 y el soporte de OG. El mapeo elemental mostrado en la Figura 5(D) evidencia una distribución localizada del titanio, indicando que el TiO_2 se encuentra principalmente en forma de agregados sobre ciertas regiones del soporte. El análisis químico por EDS determina que el material contiene 62.6 % de oxígeno, 23.8 % de titanio, 11.3 % de carbono, y una pequeña cantidad de azufre (2.6 %). Esta disminución en la proporción de carbono, en comparación con el OG puro, puede atribuirse a la cobertura parcial de la superficie del grafeno por partículas de TiO_2, lo que reduce la señal relativa del carbono durante el análisis EDS.

Finalmente, la Figura 5(E) muestra la micrografía correspondiente al compuesto TiO_2 impurificado con nitrógeno y soportado sobre OG (TiO_2-N/OG). Se identifican partículas de tamaño superior a 5 micras con una morfología más redondeada en sus bordes, lo que sugiere una modificación en la estructura superficial respecto al TiO_2/OG sin impurificar. El mapeo elemental presentado en la

Figura 5(F) muestra una distribución localizada del titanio sobre la superficie del material compuesto, con partículas dispersas de tamaño aproximado entre 1 y 4 micras. Asimismo, se observa una distribución homogénea del nitrógeno, sin embargo, esta distribución se observa sobre la superficie de las hojuelas de óxido de grafeno. El análisis EDS revela una composición atómica de 56.7 % de carbono, 32.2 % de oxígeno, 2.26 % de titanio y 8.85 % de nitrógeno, lo cual confirma la presencia del impurificante sobre la superficie del carbono.

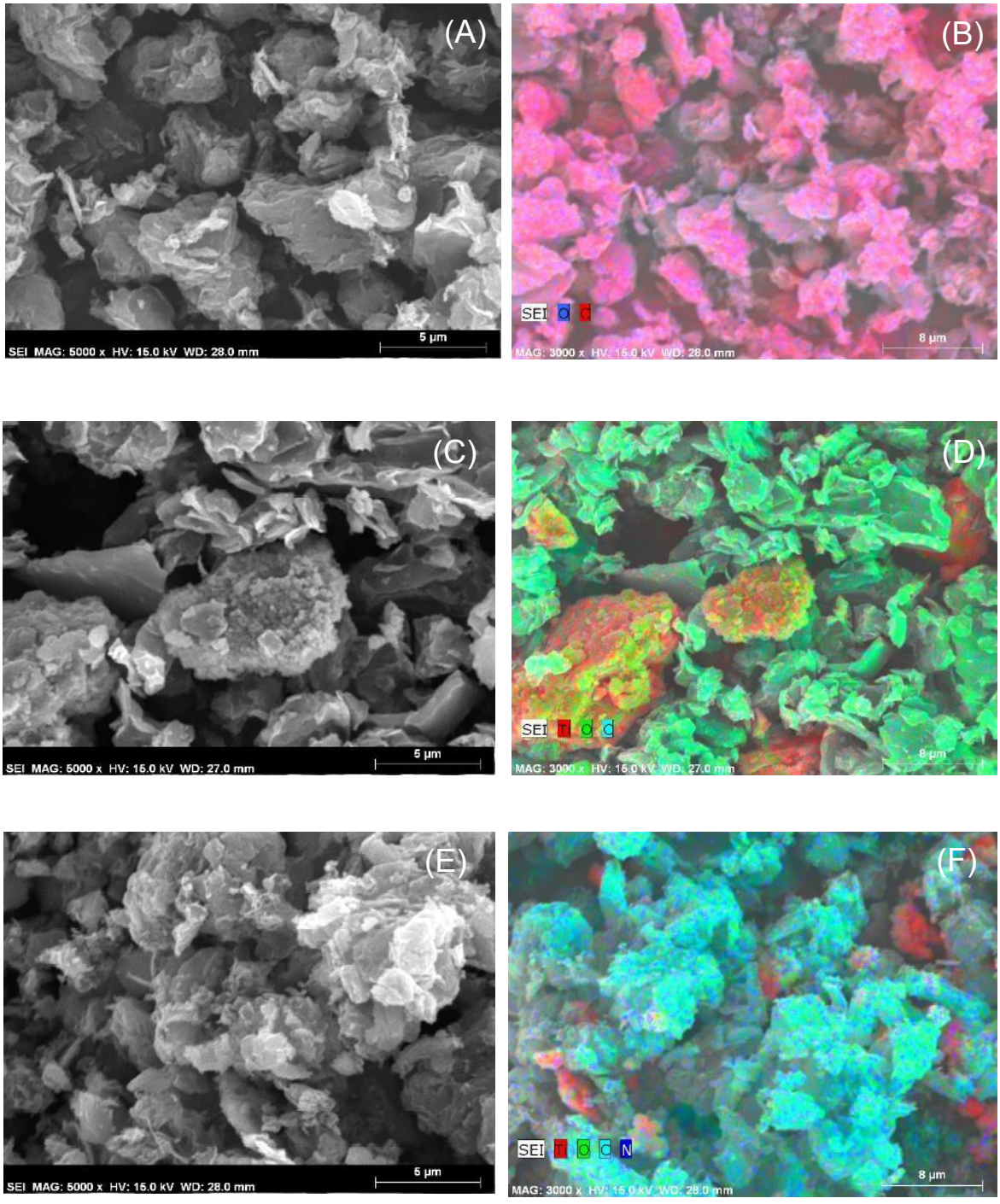


Figura 5.- (A) OG; (B) Mapeo OG; (C)TiO_2/OG; (D) Mapeo TiO_2/OG; (E)TiO_2-N/OG; (F)TiO_2-N/OG

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se confirma que el TiO_2 ha sido efectivamente soportado sobre la superficie del OG. No obstante, las micrografías obtenidas mediante SEM, así como los mapas de distribución elemental, evidencian que tanto el TiO_2 puro como el TiO_2 impurificado con nitrógeno (TiO_2-N) presentan una dispersión heterogénea sobre el soporte de OG. Esta distribución no uniforme sugiere que se requiere optimizar las condiciones de síntesis para lograr una mejor integración y cobertura del fotocatalizador sobre el sustrato de grafeno.

Por otro lado, las micrografías del OG muestran su morfología característica de láminas delgadas, mientras que el análisis elemental por EDS revela que aproximadamente el 71 % de la composición atómica del OG corresponde a carbono, lo cual concuerda con su naturaleza rica en regiones conjugadas.

En el caso del material TiO_2, el análisis químico confirma la presencia de titanio como componente principal. Para la muestra de TiO_2-N, los resultados obtenidos mediante espectroscopía EDS evidencian la incorporación exitosa de nitrógeno al sistema, con una proporción atómica del 8.85 %. Por otra parte, el mapeo elemental realizado a esta muestra indica que, tras el tratamiento por ultrasonido, el nitrógeno se depositó sobre la superficie del óxido de grafeno. No obstante, para confirmar esta distribución con mayor precisión y emitir una conclusión más robusta, sería necesario complementar el análisis con técnicas de caracterización adicionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ariffin M, Hon WT, Johari WLW, Adnan MS. Chlorination disinfection byproducts (DBPs): a review of Malaysian drinking water policy and consumers' perception. In: Aris A, Tengku Ismail T, Harun R, Abdullah A, Ishak M, editors. *From sources to solution*. Singapore: Springer; 2014. p. 421–5. doi:10.1007/978-981-4560-70-2_76
2. Dong F, Zhu J, Li J, Fu C, He G, Lin Q, Li C, Song S. The occurrence, formation and transformation of disinfection byproducts in the water distribution system: a review. *Sci Total Environ*. 2023;867:161497. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.161497
3. López-Muñoz MJ, Aguado J, Arencibia A, Pascual R. Mercury removal from aqueous solutions of $HgCl_2$ by heterogeneous photocatalysis with TiO_2. *Appl Catal B Environ*. 2011;104(3–4):220–8. doi:10.1016/j.apcatb.2011.03.029
4. Peñas-Garzón M, Moreno-Medina I, Bedia J, Belver C. Síntesis y evaluación de fotocatalizadores TiO_2/carbón activo: un enfoque multidisciplinar y cooperativo para estudiantes de ingeniería química. Educación Química. 2023;34(1):128–155. doi:10.22201/fq.18708404e.2023.1.82972
5. Sinha R, Ghosal PS. A comprehensive appraisal on status and management of remediation of DBPs by TiO_2-based photocatalysts: insights of technology, performance and energy efficiency. *J Environ Manage*. 2023;328:117011. doi:10.1016/j.jenvman.2022.117011
6. O'Shea KE, Dionysiou DD. Advanced oxidation processes for water treatment. J Phys Chem Lett. 2012;3(15):2112–2113. doi:10.1021/jz300929x
7. Gora S, Andrews S, Sokolowski A. Effects of nanotechnologies on disinfection byproduct formation. In: Dionysiou DD, editor. Advanced oxidation processes for water treatment: Fundamentals and applications. Cham: Springer; 2014. p. 199–222. doi:10.1007/978-3-319-06578-6_9.
8. Lu KQ, Li YH, Tang ZR, Xu YJ. Roles of graphene oxide in heterogeneous photocatalysis. *ACS Mater Au*. 2021;1:37–54. doi:10.1021/acsmaterialsau.1c00011
9. Zhao Y, Qiu X, Burda C. The effects of sintering on the photocatalytic activity of N-doped TiO_2 nanoparticles. *Chem Mater*. 2008;20(8):2629–36. doi:10.1021/cm703478d

10. Mrowetz M, Balcerski W, Colussi AJ, Hoffmann MR. Oxidative power of nitrogen-doped TiO_2 photocatalysts under visible illumination. *J Phys Chem B*. 2004;108(45):17269–73. doi:10.1021/jp046563f

ANALISIS ESTADISTICO SOBRE EL EFECTO DE LA DISOLUCIÓN DE ZINC EN EL SISTEMA $O_3/HNO_3/ZnS$ Al UTILIZAR CINCO DIFERENTES IMPULSORES MECANICOS DE AGITACIÓN

[*1]Carolina Rodríguez-Rodríguez, [1]Juan Carlos Baltazar-Vera, [1]Joel Everardo Valtierra-Olivares [1]Ricardo Solís-Rodríguez, [1]Roberto Ontiveros-Ibarra, [1]Ma. del Rosario Abraham-Juárez, [1]Ma. Mercedes Salazar-Hernández, [1]Luz Elena Lucio-Sánchez

[1]Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología Ex-Hacienda de San Matías s/n, Col. San Javier, 36020, Guanajuato, Gto., México. [2]Universidad de Guanajuato, Departamento de Alimentos, Ex Hacienda El Copal k.m. 9; carretera Irapuato-Silao; A.P. 311, 36500, Irapuato, Gto., México
*carolina.rodriguez@ugto.mx

RESUMEN

El zinc es un metal esencial en numerosas aplicaciones, como la fabricación de aleaciones, la galvanización y la producción de baterías. Una de las técnicas más comunes para extraer el zinc de minerales o residuos es la lixiviación con ácido nítrico, debido a su capacidad de oxidación y su alta solubilidad en agua. Así que, para mejorar la eficiencia de esta lixiviación, se ha estado empleando un sistema asistido con ozono, con la finalidad de mejorar la reactividad del proceso y minimizar los residuos tóxicos. Por lo que en este trabajo de investigación se pretende entender el efecto que tiene la variación de 5 diferentes diseños de impulsores mecánicos sobre el impacto que tiene en la disolución de zinc contenida en un sulfuro de zinc (ZnS) a partir de O_3/HNO_3.Se realizo un diseño de experimentos factorial de múltiples niveles, 2 factores y 5 niveles. El resultado del ANOVA muestra que el tipo de impulsor presenta muy baja significancia, sin embargo, el tiempo en la disolución de zinc si es significativo, ya que se observa que la mayor diferencia significativa en la disolución de zinc se encuentra en los minutos 5, 15 y 30. Por otra parte, también se observa que existe una ligera variación en la disolución del zinc cuando el impulsor cuenta con 6 paletas que cuando el impulsor presenta 2. Con estos resultados se puede sugerir que la dinámica de flujo creada por cada impulsor es significativa para el sistema $O_3/HNO_3/ZnS$ en los primeros minutos de la lixiviación.

ABSTRACT

Zinc is an essential metal in numerous applications, such as alloy manufacturing, galvanizing, and battery production. One of the most common techniques for extracting zinc from ores or waste is leaching with nitric acid, due to its oxidizing capacity and the high water solubility. Therefore, to improve the efficiency of this leaching, ozone was added to the system in order to enhance the process reactivity and minimize the toxic waste. This research aims to understand the effect of varying five different mechanical impeller designs on the zinc disolution, which is contained in zinc sulfide (ZnS) for the O_3/HNO_3 system. A multi-level design of experiments was performed. The ANOVA result shows that the type of impeller has very low significance, however, the time of zinc dissolution is significant. It is observed that the greatest significant difference in zinc dissolution is found at 5, 15 and 30 minutes. On the other hand, it is also observed that there is a slight variation in zinc dissolution when the impeller has 6 blades compared to when it has 2. With these results, it can be suggested that the flow dynamics created by each impeller is significant for the $O_3/HNO_3/ZnS$ system in the first minutes of leaching.

INTRODUCCIÓN

El zinc es un metal esencial en numerosas aplicaciones industriales, y su extracción eficiente es crucial para satisfacer la demanda en sectores como la fabricación de aleaciones, la galvanización y la producción de baterías. Es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre y se encuentra en una variedad de minerales, principalmente en forma de óxidos y sulfuros de zinc, sin

embargo, los sulfuros son la principal fuente de zinc, siendo la esfalerita (ZnS) la principal mena de zinc (Huang y col., 2019)

El procesamiento de la esfalerita involucra varias etapas como trituración, molienda y concentración mediante flotación, con la finalidad de producir un concentrado de zinc, para posteriormente convertirlo en zinc metálico de alta pureza a través de procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. Los procesos hidrometalúrgicos de Zn son una buena opción para contrarrestar los problemas de contaminación por SO_2 y los problemas económicos asociados a los tratamientos pirometalúrgicos (Shiel y col., 2010; Graydon y Kirk., 1988). Recientemente, algunas alternativas hidrometalúrgicas que se han estudiado para la posible disolución y recuperación del zinc se enfocan en la disolución de los concentrados de zinc con ácido sulfúrico mezclados con soluciones amoniacales (Huang y col., 2018), disolución de esfalerita en soluciones de sales férricas (Muravyov, y Panyushkina, 2023; Lorenzo-Tallafigo y col., 2018), dióxido de manganeso, cloruro cúprico, ácido clorhídrico (Santos y col., 2010), soluciones alcalinas (Chenglong y Youcai, 2009) y oxidación a presión (Li y col., 2010).

Actualmente el zinc es uno de los seis principales metales que produce México ocupando el 6° lugar en producción mundial, produciendo el 21% de la producción global de zinc (SGM, 2024). De acuerdo con el INEGI (2025), Zacatecas, Durango y Chihuahua son los principales estados con los volúmenes de producción más altos, sin embargo, Zacatecas produce el 43.6% de la producción nacional de este metal. Así que, debido a la importancia que tiene la actividad minera para el país, cualquier mejora a los procesos ya establecidos para el procesamiento de minerales es de gran importancia

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo principal mejorar la disolución de zinc en una lixiviación de sulfuro de zinc mediante el uso combinado de ácido nítrico y ozono como agente oxidante, a través de realizar diferentes configuraciones a un impulsor de flujo axial convencional (propela), el cual es el más utilizado en lixiviaciones a escala laboratorio, ya que la agitación es un factor clave que afecta la transferencia de masa como la homogeneización de los reactivos en el medio, impactando directamente en la eficiencia del proceso. Dicha comparación nos permite evaluar la eficiencia general del sistema, para así lograr la mayor disolución de zinc, para ofrecer una tecnología innovadora que podría ser aplicable en la recuperación de zinc de manera más rápida, económica y sostenible.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó se utilizó sulfuro de zinc (ZnS) grado reactivo (Sigma Aldrich 333271-50G) el cual fue reducido de tamaño manualmente en un mortero de ágata, utilizándose la fracción de -25µm.

Se realizó la lixiviación para cada impulsor mecánico bajo las siguientes condiciones experimentales: 0.2 g de ZnS, 250 mL de HNO_3 al 1%, 0.014 g O_3/L con un flujo volumétrico de 1 L/min, 700 rpm y una temperatura constante de 25°C (± 2°C). Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor de vidrio, cerrado herméticamente y con agitación mecánica, equipado con un difusor poroso para la adición del gas (ver diagrama de equipo experimental Figura 1). El ozono fue producido a partir de oxígeno puro y seco. En un inicio se vierte la solución de HNO_3, y se calibra la corriente gaseosa posteriormente se procede a añadir la muestra de ZnS y se da inicio a la generación de ozono, iniciando el cronometraje del tiempo y la agitación mecánica. Al minuto 15, 30, 45 y 60 se procede a tomar una muestra, la cual es filtrada para posteriormente analizar zinc en la solución mediante espectroscopía de absorción atómica (Perkin Elmer Analyst 200). Al término del experimento, se recuperan los sólidos que no reaccionaron para una futura caracterización. El tiempo de tratamiento con ozono fue de 60 minutos. Se realizó una réplica para cada lixiviación.

La Figura 2 muestra la identificación y la configuración de los 5 diferentes impulsores empleados durante este trabajo de investigación. El impulsor 1 y 3, son los impulsores axiales más utilizados en agitación convencional, teniendo 6 y 2 paletas. El impulsor 2, es prácticamente similar al impulsor 1, con la diferencia que las paletas tienen una ligera inclinación. Los impulsores 4 y 5, presentan

modificaciones del tipo punzante en las terminaciones exteriores de las paletas, así como también modificaciones sobre la paleta. La manufactura de los impulsores 1, 2, 4 y 5 fue realizada con impresión 3D (impresora Ultimaker).

Al termino de la experimentación se realizó un análisis de varianza para evaluar si había algún efecto significativo sobre la disolución de zinc al realizar alguna modificación a la configuración del impulsor axial, en donde se indica el valor calculado de F, comparando los valores reportados en las tablas de distribución de Fisher.

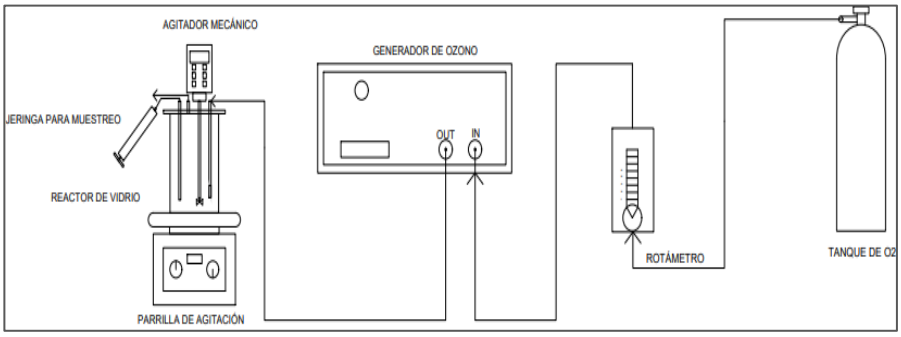


Figura 1. Esquema del equipo experimental para la lixiviación del ZnS en el sistema HNO_3/O_3



Figura 2. Impulsores axiales convencionales (1 y 3) e impulsores axiales con modificación en su diseño (2, 4 y 5).

RESULTADOS

En estudios previos (Rodríguez-Rodríguez y col., 2024) se llevó a cabo una lixiviación de sulfuro de zinc en una lixiviación ácida y asistida con ozono en donde se observó que al utilizar el sistema $ZnS/HNO_3/O_3$ se obtuvo una disolución efectiva de zinc. Por lo que la finalidad de este trabajo es mejorar las condiciones cinéticas de este proceso, así que se decidió modificar la configuración del impulsor con la finalidad de mejorar la difusión del ozono hacia el seno de la solución mediante convección para que la cantidad de ozono disponible fuera mayor y así promover la lixiviación de este sistema.

Se llevaron a cabo 10 experimentos los cuales fueron utilizados para realizar un diseño de experimentos factorial de múltiples niveles (2 factores y 5 niveles), en donde los factores o variables de interés abordados son el tipo de configuración del impulsor y el efecto en el tiempo de lixiviación. La Tabla 1 presenta el Resumen del diseño experimental y la Información de los factores de impacto, así como la Figura 3 y la Tabla 2 muestran las cinéticas y los porcentajes de disolución de zinc.

Tabla 1. Resumen del diseño de experimentos y la información de los factores analizados.

Resumen del Diseño				Información del Factor		
Factores:	4	Replicas:	1	**Factor**	**Niveles**	**Valores**
Corridas base:	16	Total de corridas:	8	Impulsor	5	1, 2, 3, 4, 5
Bloques base:	2	Total de bloques:	1	Tiempo	5	5, 15, 30. 45. 60

Tabla 2. Resumen de las disoluciones de zinc obtenidas, para cada configuración de impulsor y su respectiva replica

	Disolución de Zinc, %									
	Impulsor1		Impulsor 2		Impulsor 3		Impulsor 4		Impulsor 5	
Tiempo, min	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2	Replica 1	Replica 2
5	10.70	14.20	13.20	16.20	7.05	23.55	17.05	23.55	17.55	15.42
15	31.48	34.51	30.66	36.86	25.54	38.60	31.34	40.48	30.01	28.92
30	57.91	52.99	53.98	61.35	49.11	57.26	59.11	62.54	52.93	49.01
45	68.90	68.57	64.81	66.19	60.11	67.30	64.12	72.98	63.60	60.32
60	69.20	73.90	68.17	68.95	65.00	70.35	73.39	70.72	66.56	64.88

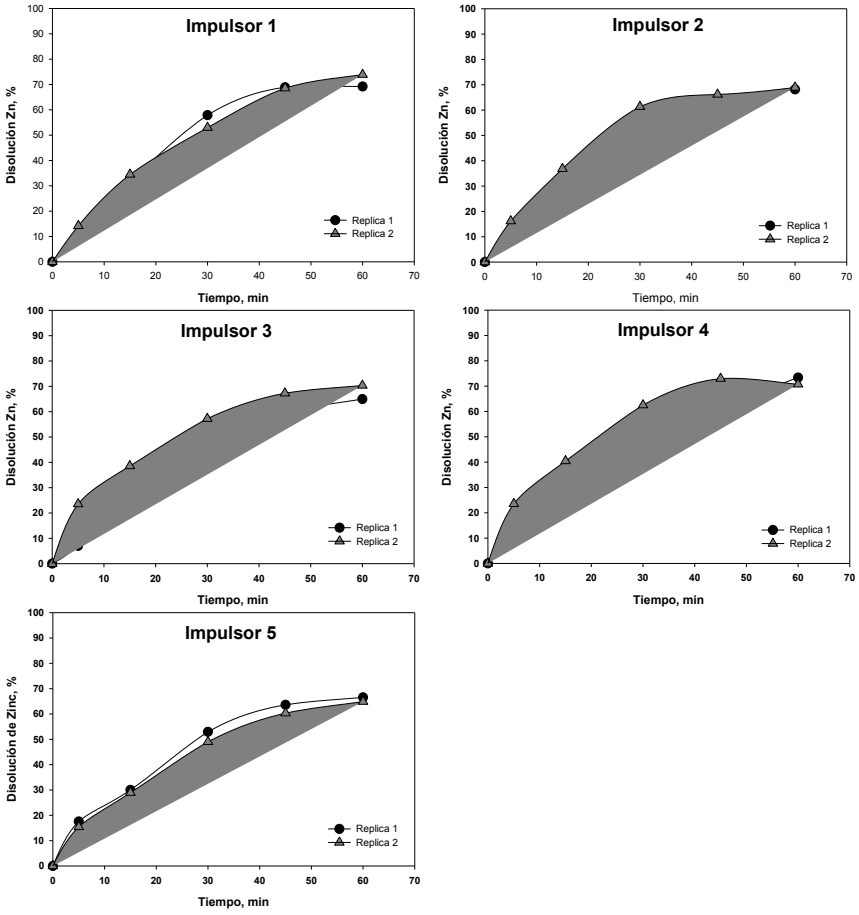


Figura 3. Cinéticas de disolución para cada configuración de impulsor utilizado en este trabajo.

Esta estrategia experimental busca examinar la influencia de estas 2 variables en la disolución del zinc en el sistema $Zn/HNO_3/O_3$. La variación sistemática en los niveles permitirá una evaluación detallada de sus efectos individuales y sus posibles interacciones, brindando así una comprensión más profunda de cómo cada factor contribuye al comportamiento del sistema en su conjunto.

Con el objetivo de identificar cual de nuestras 2 variables tiene un efecto significativo se utilizó un gráfico de Pareto, la cual se representa en la Figura 4, este grafico proporciona una representación clara de los efectos significativos en orden descendente, mostrando cada uno mediante barras horizontales que indican la magnitud de la influencia de cada variable especifica. De este grafico se puede indicar que el tiempo en la lixiviación es el que muestra un efecto significativo sobre la disolución de zinc en la lixiviación, sin embargo, se observa que el tipo de impulsor presenta un ligero efecto significante sobre la disolución de zinc.

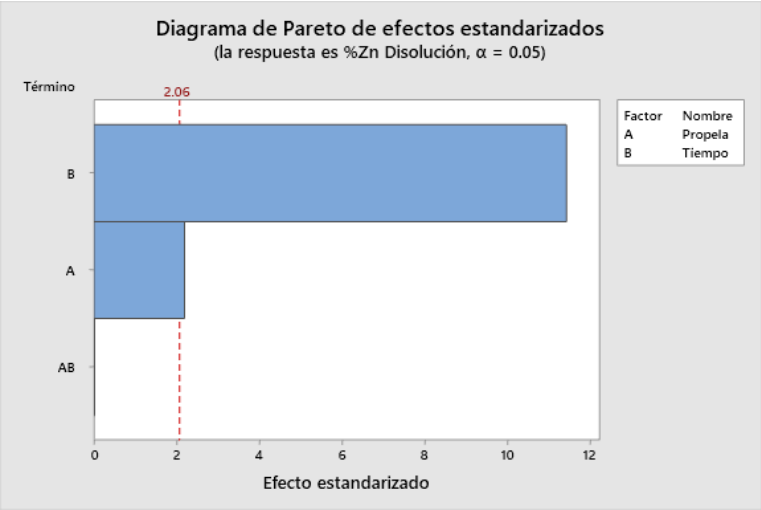


Figura 4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados cuando la respuesta es el porcentaje de zinc disuelto.

La Tabla 3 muestra el análisis de varianza con respuesta al porcentaje de disolución de zinc, este análisis se calculo con un nivel de confianza del 95% y α=0.05 y considera como variable significativa aquella cuyo valor de F, es mayor al F de tablas, por lo que, se observa que la variable significativa al igual que el diagrama de Pareto es el tiempo en la lixiviación, ya que presenta un valor de F calculado mayor que el de la tabla de distribución de Fisher. El tipo de configuración de impulsor muestra una significancia menor a comparación que el tiempo de disolución. Por otra parte, la interacción de las dos variables no muestra ninguna significancia para este sistema, por lo que se descarta el efecto significativo de una posible interacción de variables tiempo y tipo de impulsor.

Tabla 3. Análisis de Varianza para la respuesta de % de Zn

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	24	21157.6	881.57	43.25	0.000
Lineal	8	21045.3	2630.66	129.06	0.000
Impulsor	4	244.3	61.08	3.00	0.038
Tiempo	4	20801.0	5200.24	255.12	0.000
Interacciones de 2 términos	16	112.3	7.02	0.34	0.985
Impulsor*Tiempo	16	112.3	7.02	0.34	0.985
Error	25	509.6	20.38		
Total	49	21667.2			

*La F de Tablas de distribución de Fisher para Grados Libertad 4 y 16 es 2.76 y 2.069 respectivamente

La Figura 5 presenta la gráfica de efectos principales para la disolución de zinc, en donde se puede observar que efectivamente el tiempo es el efecto con mayor significancia, indicando que conforme aumenta el tiempo en la lixiviación se incrementa la disolución de zinc, Por otra parte, para el tipo de configuración del impulsor, se observa que el impulsor numero 4 es el que presenta un efecto significante en la disolución de zinc; por el contrario las configuraciones 3 y 5 son las que no presentan algún efecto significante en la disolución de zinc.

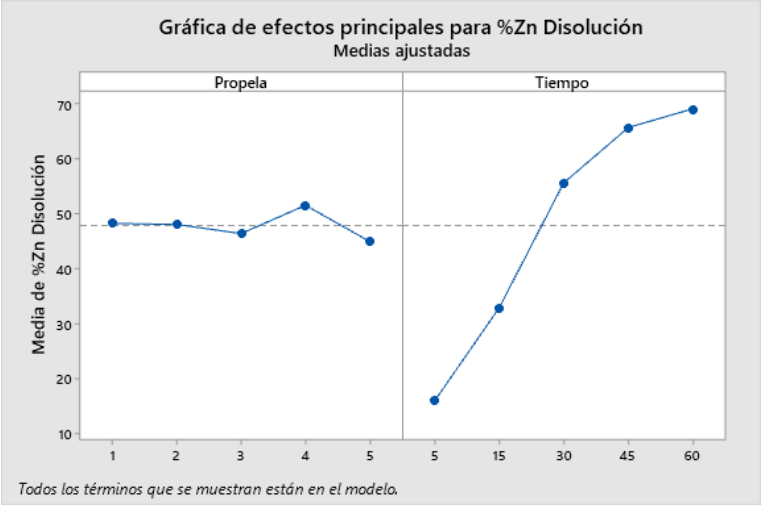


Figura 5. Grafica de efectos principales para la disolución de zinc.

Para finalizar se presenta la Figura 5, en donde se muestra el grafico de interacción para la disolución de zinc, en donde se puede observar que, la interacción entre el tipo de impulsor y el tiempo se ve afectada de manera significativa por la configuración del impulsor 4, debido a que es donde se obtienes las disoluciones máximas disoluciones de zinc, en los diferentes tiempos propuestos.

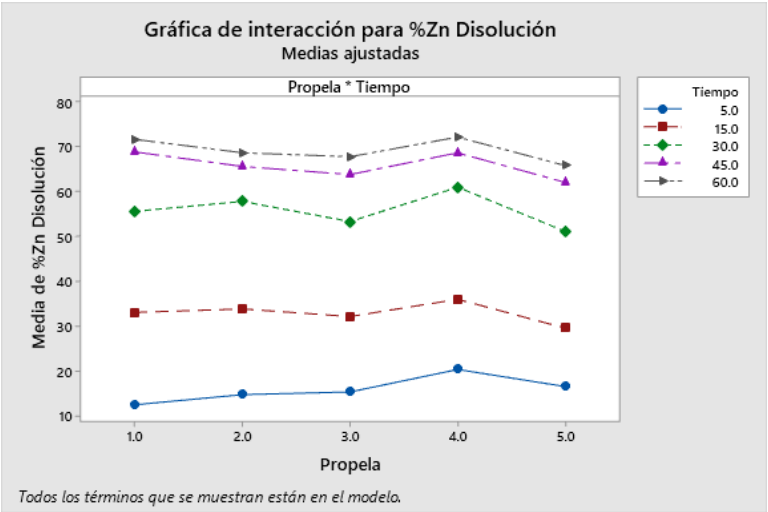


Figura 6. Grafico de la interacción de variables para la disolución de Zn.

CONCLUSIONES

La investigación realizada en este trabajo fue enfocada en determinar principalmente el efecto que tiene la modificación a la configuración de un impulsor axial convencional sobre la lixiviación de zinc en un sistema HNO_3/O_3 para observar si la turbulencia que se genera mejoraría la difusión del ozono hacia el seno de la solución y esto a su vez impactaría sobre la cinética de disolución de zinc. En este sentido se analizaron cinco configuraciones de impulsores y los resultados se analizaron mediante un diseño de experimentos factorial de múltiples niveles (2 factores y 5 niveles), en donde

las principales variables a estudiar fueron el tipo de configuración del impulsor y el tiempo de lixiviación, siendo la respuesta principal la disolución de zinc.

El análisis de varianza, la gráfica de Pareto, la gráfica de efectos principales y la grafica de interacción de variables, permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- El efecto del tiempo en la lixiviación es el que tiene el efecto más significativo sobre la disolución de zinc, ya que se observa que se alcanza una mayor disolución a menor tiempo en la mayoría de los impulsores (3 y 4). Aunque el análisis de varianza indica que el tipo de configuración del impulsor también presenta una ligera significancia, el análisis estadístico posterior presenta que no existe significancia relevante en la interacción de las variables impulsor-tiempo.
- En la gráfica de interacción de variables se muestra que el impulsor 4 es el que tiene una mayor significancia sobre la disolución de zinc, ya que presenta los porcentajes de zinc mas altos a lo largo de todo el tiempo de lixiviación.

Por lo que se puede concluir que una innovación a la configuración del impulsor axial convencional, beneficiaria a la cinética de la disolución de zinc para el sistema HNO_3/O_3. Sin embargo, aunque este trabajo muestra una mejoría a la cinética de disolución, se observa claramente que la reacción sigue estando controlada por la reacción química

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONAHCYT por el financiamiento recibido para la realización de este proyecto con el numero CB 2017-2018 A1-S-35079. Por otra parte, se agradece también al técnico-académico Martínez-Barrón J.C. por el soporte técnico.

BIBLIOGRAFIA

1. A.E. Shiel, D. Weis, K.J. Orians, Evaluation of zinc, cadmium and lead isotope fractionation during smelting and refining, Sci. Total Environ. 408 (11), 2010, 2357–2368.
2. B. Huang, H. Lai, J. Deng, H. Xu, G. Fan, Study on the interaction between galena and phalerite during grinding based on the migration of surface components, ACS Omega 4 (7), 2019, 12489–12497.
3. C. Li, C. Wei, H. Xu, M. Li, X. Li, Z. Deng, G. Fan, Oxidative pressure leaching of sphalerite concentrate with high indium and iron content in sulfuric acid medium, Hydrometallurgy, Vol. 102, 2010, 91-94, https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.009
4. C. Rodríguez-Rodríguez, J. C. Baltazar-Vera, J. E. Valtierra-Olivares, R. Ontiveros-Ibarra, M R. Abraham-Juárez, Analisis cinetico preliminar de una lixiviación directa de sulfuro de zinc (ZnS) asistido con ozono, Avances Cientificos y Tecnologicos en México I, TOMO VI, 2024, 41-46.
5. INEGI, Estadistica de la Industria Minerometalurgica-Boletin de Indicador 2025, 2025.
6. J.W. Graydon, D.W. Kirk, A microscopic study of the transformation of sphalerite particles during the roasting of zinc concentrate, Met. Trans. B 19, 1988. 141–146
7. J. Lorenzo-Tallafigo, N. Iglesias-Gonzalez, R. Romero, A. Mazuelos, F. Carranza, Ferric leaching of the sphalerite contained in a bulk concentrate: Kinetic study, Minerals Engineering, Vol. 125, 2018, 50-59, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.026
8. .M. Muravyov, A. Panyushkina, Comparison of sphalerite, djurleite, and chalcopyrite leaching by chemically and biologically generated ferric sulfate solutions, Hydrometallurgy, Vol. 224, 2023, https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106067
9. SGM, Servicio Geologico Mexicano, Anuario Estadistico de la Minería Mexicana 2023-Edición 2024, 2024.

10. S.M.C. Santos, R. M. Machado, M. J. N. Correia, M. T. A. Reis, M. R. C. Ismael, J. M.R. Carvalho, Ferric sulphate/chloride leaching of zinc and minor elements from a sphalerite concentrate, Minerals Engineering, Vol. 23, Issue 8, 2010, 606-615, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.02.005.
11. Y. Huang, Z. Yin, Z. Ding, J. Feng, C. Liu, First-principle study on the oxidative leaching mechanism of sphalerite in Ammoniacal solution, Hydrometallurgy, Vol. 179, 2018, 198-206, https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.010.
12. Z. Chenglong, Z. Youcai, Mechanochemical leaching of sphalerite in an alkaline solution containing lead carbonate, Hydrometallurgy, Vol. 100, 2009, 56-59, https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.10.004.

PROTOTIPO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN UNA COMUNIDAD RURAL

Leticia Montoya Herrera[1], Jesús Cárdenas Mijangos[1], Mario Mora Mancilla[1] y Eugenia Josefina Aldeco Pérez[1].

1 Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.
letimontoya@cideteq.mx

RESUMEN

Una comunidad rural es considerada como tal, cuando su población es menor a 2,500 habitantes y se encuentra en lugares remotos o de difícil acceso (1). Son mayores los esfuerzos para dotar agua para uso y consumo humano, pero no para su tratamiento, especialmente en las comunidades rurales (1 y 2); dado que es todo un reto por carencia de drenajes, lejanía, dispersión, altos costos en la conducción del agua a un sistema central y en la operación y mantenimiento (3). Según el INEGI, EL 25% de las localidades rurales no cuentan con drenaje y por lo tanto el saneamiento de sus aguas (3). Los diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales requieren de grandes espacios como las lagunas, humedales combinados con fosas sépticas y últimamente, biodigestores (1,2 y 4)). El presente trabajo muestra lo realizado con un Municipio de Querétaro y CIDETEQ, para implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliares en una comunidad rural sin drenaje. El objetivo fue seleccionar un sistema apropiado a las características de las viviendas y del número de habitantes, de bajo consumo energético, bajo mantenimiento y de fácil operación. CIDETEQ, planteó varias actividades como censar a la comunidad, analizar los datos del censo, proponer diferentes esquemas de tratamiento y la selección del mismo, determinación del costo total de la implementación y el calendario de ejecución. Los resultados del censo corroboraron por domicilio: número de habitantes, disponibilidad y características de terreno, volumen de agua residual generada, presencia de domicilios unifamiliares y multifamiliares; mayormente, el aprovechamiento de aguas grises para lavar pisos y riego, y el almacenamiento de las aguas negras en fosas sépticas que deben vaciarse al menos una vez por mes, implicando costos por dicha actividad; en otros casos, descarga en la calle agua residual cruda. Los resultados mostraron que existían tres grupos de domicilios que coincidían en la generación promedio de 600, 1,300 y 3,000 L/d cada uno. Por tal motivo, se seleccionó un sistema de tratamiento acorde al caudal y número de habitantes por domicilio más común. Dichos resultados se reportaron al Municipio y se mostraron los trenes de tratamiento y su secuencia que mejor se acoplaba, así como los costos y el tiempo de ejecución para su instalación en toda la comunidad. Conociendo lo anterior, el Municipio determinó la instalación y operación de tres sistemas de tratamiento de 600, 1,300 y 3,000 L/d en una casa unifamiliar, escuela primaria y casa multifamiliar, respectivamente, con el fin de mostrar a la población y sensibilizarla sobre los beneficios de estos sistemas *in situ*. Durante la operación del sistema de tratamiento se capacitó a la población en el conocimiento, manejo, operación y mantenimiento del mismo. El reporte final contempló, los resultados del censo, desglose de costos, programa de ejecución, los planos de los sistemas, archivo fotográfico de la instalación y operación de los tres sistemas.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al INEGI una localidad rural se considera así por tener una población menor a 2,500 personas y pueden ubicarse en lugares remotos de difícil acceso y en muchas ocasiones faltas de servicios básicos como electricidad, agua potable, recolección de basura, entre otros (1). La generación de residuos de las comunidades rurales, no reciben el tratamiento adecuado, en especial las aguas residuales generadas; ya que no se cuenta con infraestructura para realizarlo o se encuentra limitada; por lo que la descarga de aguas residuales domésticas sin tratar aumenta, pudiendo contaminar suelo, cuerpos de agua y afectar la salud de los habitantes (3). Por aguas residuales se entiende, conforme a la Ley de Aguas Nacionales, como a las aguas de composición

variada provenientes de las descargas de usos públicos, urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (5). Las aguas domésticas son consideradas como aquellas que se generan en las viviendas familiares, en los edificios públicos y pequeños establecimientos comerciales (6). Son las aguas procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas. Estas aguas frescas, emergen como un líquido turbio, gris o amarillento, con olor séptico, con partículas suspendidas, heces residuos y se clasifican de acuerdo a su procedencia en aguas negras y aguas grises (4). Las aguas negras provienen de las descargas del inodoro se componen de materia orgánica, especialmente heces, orina y microorganismos. Mientras que las aguas grises provienen del aseo personal, lavado de ropa y la higiene del hogar. Aguas grises: higiene personal. Otra fuente importante son las operaciones de higiene personal, como la ducha o lavado diario, afeitado y lavado de manos. Según la organización Mundial de la Salud, en promedio se estima que se consumen 95 litros/persona de agua en una ducha de 5 minutos (7).

El tratamiento de las aguas residuales domésticas pretende como principal objetivo la eliminación de los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales para poder reusar o verter el agua sin peligro (8). Conforme el Inventario de PTAR 2020 de la CONAGUA (9), al fin del año 2020 existían registradas en el país, 2,786 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 196,749.51 l/s, las que daban tratamiento a 144,710.0 l/s, equivalentes al 67.2% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Sin embargo, queda un gran porcentaje sin tratar, acorde a estos datos, alrededor del 32.5%.

De acuerdo al Diario Oficial de la Nación (8), el 30% de las aguas residuales municipales que se colectan en los drenajes no reciben ningún tipo de tratamiento, Es un reto dar servicio de bajo costo al tratamiento de aguas residuales de forma confiable y asequible en zonas rurales. el INEGI indica que 58.0% de los municipios en México no tienen servicio de tratamiento de aguas residuales y que en el país al año 2020 el 21% de la población es rural (10 y 11).

Los tratamientos de aguas residuales para zonas rurales surgen de las propuestas alternas que se han establecido en distintos puntos del territorio nacional y que requieren de sencillez, eficacia, eficiencia y adaptabilidad a las condiciones locales de aislamiento donde las redes de drenaje no llegan. Localidades que requieren soluciones económicas, que cuentan con poco capital; pero sí disponen de mano de obra (12 y 13). Entre los sistemas de tratamiento más utilizados en las comunidades rurales sin drenajes han sido los humedales, biofiltros y últimamente los biodigestores que cumplen con las características mencionadas en este párrafo.

En este trabajo se utilizó como proceso principal de tratamiento de aguas residuales domésticas en una localidad rural, un biodigestor, conforme al caudal generado por el número de habitantes por domicilio de la localidad.

TEORÍA

En México, al igual que en otras partes del mundo, centralizar las aguas residuales por medio de drenaje de una zona rural o dispersa y conducirlas hacia una planta de tratamiento central no ha sido prioridad; al contrario, se ha primado la cobertura de agua potable (3). De acuerdo a la CONAGUA se considera que el 90.3% de las necesidades de agua potable del país está cubierto y 86.4% del alcantarillado y tan sólo el 40.2% de las aguas residuales son tratadas (9). Los sistemas descentralizados, son considerados los más idóneos para las comunidades en donde hay baja densificación urbana, tales como las zonas rurales o periurbanas (10).
Con el fin de evitar los altos consumos energéticos, la complejidad de los sistemas de tratamientos centralizados, la necesidad de personal altamente calificado para la operación y mantenimiento y a los altos costos, se han utilizados propuestas alternas de depuración natural, emulando lo hecho en la naturaleza tales como las lagunas de estabilización, humedales, biofiltros o biodigestores anaerobios, que se han establecidos en diferentes puntos del territorio nacional por su sencillez,

economía, de fácil manejo y operación de los usuarios y la cultura de los mismos en zonas descentralizados (3, 10, 12 y 13).

Los procesos anaerobios se han utilizado para la remoción de materia orgánica, con una eficiencia de entre el 40 al 90% de DQO. La remoción dependerá del tipo de reactor y del agua residual a tratar, obteniéndose una mayor remoción con aguas residuales concentradas (14 y 15). Los diferentes tipos de procesos anaerobios pueden ser tanques sépticos, biodigestores, lagunas anaerobias, filtros anaerobios, reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), entre otros (15).

Biodigestores anaerobios

Para fines de saneamiento ambiental es la reducción de parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales domésticas, después de un tiempo de retención que permite obtener al final un efluente con una menor concentración de estos parámetros (14). Para el manejo de los residuos humanos y animales se han empleados biodigestores en comunidades rurales. La descripción de un biodigestor es un tanque cerrado, hermético e impermeable, llamado reactor, en el que se deposita el material orgánico a tratar como el excremento animal, residuos vegetales, aguas residuales, etc. (4). El uso de esta tecnología en comunidades rurales con la participación de los habitantes permite la autonomía y sostenibilidad en el manejo y tratamiento del agua *in situ* para comunidades rurales sin drenaje.

PARTE EXPERIMENTAL

Se realizó un censo poblacional para conocer el número de personas por domicilio, espacio disponible, manejo y forma de disposición final del agua residual generada. Con base a los resultados del censo, se conoció el caudal de agua residual promedio generado por domicilio más común y se estableció un tren de tratamiento para los tres caudales más representativos. Se hizo un informe con los resultados del censo y los planos correspondientes a los tres diferentes caudales del tren de tratamiento. Se determinaron los costos de inversión y tiempo requerido para dotar a la población con este tren de tratamiento. Se instalaron tres sistemas para caudales de 600, 1,300 y 3,000 L/d en tres diferentes domicilios: una casa unifamiliar, una escuela primaria y un domicilio multifamiliar. Los sistemas fueron conectados y actualmente están funcionando. Se dio capacitación de operación y mantenimiento de los sistemas a los usuarios de cada domicilio, también se hizo una capacitación a la comunidad. Se entregó un reporte final con todas las acciones al Municipio de Pedro Escobedo, Qro.

RESULTADOS

El resultado obtenido después del censo a la comunidad rural permitió conocer el tipo de terreno, la cultura ambiental, el manejo del agua, así como el número de habitantes por domicilio y se observó que cuenta con suministro de agua potable; pero no con un sistema de desalojo de sus aguas residuales generadas en el uso de sus actividades cotidianas y en la mayoría de los domicilios, 131, cuentan con fosa séptica, que en algunos casos no se han desazolvado durante al menos 20 años. Con la información recabada por el censo, Tabla 1, se procedió a calcular el número de biodigestores necesarios, cuya capacidad depende del número de habitantes por domicilio y bajo las siguientes consideraciones de la Tabla 2.

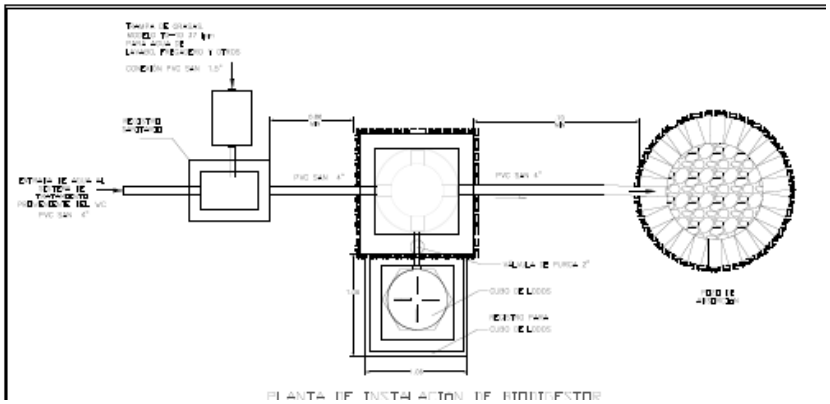
Tabla 1. Información obtenida por el censo.

	Av. Revolución	16 de diciembre	Calle Unión	Ampliación	Justo Sierra	2 de febrero	Francisco I. Madero	TOTALES
Número de casas visitadas:	38	48	36	12	13	5	3	155
Número de casas censadas:	31	43	29	11	13	5	3	135
Casas que cuentan con terreno:	22	37	25	10	11	5	3	113
Casas con terreno con loza:	9	12	5	1	2	0	0	29
Casas con terreno de tierra:	13	25	20	9	9	5	3	84
Casas con fosa séptica:	31	42	28	10	12	5	3	131
Casas con letrina:	0	1	1	1	1	0	0	4
Casas con otro sistema:	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2. Volumen de biodigestor acorde al aporte de agua por usuario en zona rural.

CAPACIDAD (L)	Altura máxima (m)	Diámetro (m)	No. De usuarios Zona rural (Aportación diaria a 130L/d)	No. De usuarios Zona rural (Aportación diaria a 260L/d)	No. De usuarios Zona rural (Aportación diaria a 30L/d)
600	1.6	0.86	5	2	20
1300	1.9	1.15	10	5	43
3000	2.1	2	25	10	100
7000	2.6	2.4	60	23	233

Con la información anterior, se determinó el tren de tratamiento instalado como se muestra a continuación, interconectados hidráulicamente, un registro receptor de aguas de sanitarios, regaderas y agua del lavado de trastes que pasaba por un separador de grasas y aceites, después un biodigestor anaerobio, un tanque receptor de lodos digeridos y un pozo de absorción, para este último se hicieron pruebas de infiltración conforme lo indica la norma NOM-006-CNA-1997 (16).



Esquema del sistema de tratamiento.

Con el tren de tratamiento seleccionado, se instalaron 3 de diferente capacidad: uno de 600L, uno de 1,300L y otro de 3,000L, tal como se muestra en las siguientes fotografías. La instalación de estos sistemas tuvo el propósito de que la población se familiarizara con ellos, que observaran la facilidad de operación para lo cual se realizó una capacitación a los habitantes de la localidad y de quienes contarían con ellos para que conocieran sus partes, su funcionamiento, las bondades del tratamiento, la operación y mantenimiento.

CONCLUSIONES

La selección e implementación de un sistema como el aquí mostrado ayudaría a las comunidades rurales carentes de drenaje; ya que, al no tener uno para conducir sus aguas residuales a un sistema central y ser tratadas ahí, hace que los habitantes busquen la forma que les facilite deshacerse de ellas por el medio que sea, generando condiciones insalubres en su entorno, así como focos de infección. La adopción de un sistema similar permitiría a los habitantes tener una solución a esta problemática de forma puntual, domicilio por domicilio. Las aguas tratadas por este sistema evitan focos de infección y contaminación; ya que se evita la descarga a la vía pública de las aguas sin tratar. También, se permitiría que las aguas tratadas puedan infiltrarse o ser aprovechadas para riego, siempre y cuando al sistema se le adicionen otros complementos como filtración y desinfección para su reuso. Al menos este sistema prototipo permitió a una familia ahorrarse el monto mensual por el desalojo de sus aguas residuales crudas y ella misma ha visto los beneficios que le ha traído contar con un sistema como este; ya que se evita la fecalización que existe cuando se desalojan las aguas residuales crudas por el escurrimiento al realizar dicho procedimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. INEGI, Comunicado de prensa Núm. 161/23, 17 de marzo 2023, 7 pp. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P.
2. Díaz-cuenca, E., Alvarado-Granados, A.R., Camacho-Calzada, K.E., El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel de Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales [en línea]. 2012, 14 (1) 78-97, ISSN:1405-8625. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?ide=40123894005.
3. Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O.A., Rodríguez-Sahagún, A., El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Núm. 1, 1 de julio-31 de agosto, 2011, p. 139-150.

4. Menchaca-Dávila, S, Lozada, R.M., Tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales: una propuesta para las zonas rurales, Observatorio del agua para el estado de Veracruz, UVserva, No. 3, enero-junio 2017, pág. 14-22.
5. Ley de Aguas Nacionales, DOF 24-03-2016, Cámara de Diputados, Secretaría de Diputados del H. Congreso de la Unión.
6. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos, 31, Comisión Nacional del Agua, ISBN: 978-607-626-032-7, www.conagua.gob.mx
7. apps1.semarnat.gob.mx8443/dgeia/indicadores/ilac18/02_gestion/2.4.1.1.html
8. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020#gsc.tab=0,
9. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, diciembre 2021, CONAGUA, 360 pp.
10. De Anda-Sánchez, J., Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las residuales municipales en México, Sociedad y Ambiente, 2017, año 5, núm. 14, ISSN:2007-6576, pp. 119-143.
11. INEGI, Comunicado de prensa Núm. 161/23, 17 de marzo 2023, 7 pp. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P.
12. Lahera Ramón, V., Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales, Quivera, vol. 12, núm. 2, 2010, pp. 58-69.
13. Salazar Noguera, A., & Martínez González, R. (2013). Comparación técnico-económica de alternativas de tratamiento de aguas residuales para asentamientos humanos en zonas rurales, tesis, https://ciencias.lasalle.edu.co/ing_civil/267
14. Lineamientos técnicos: sistemas de tratamiento de aguas a nivel vivienda en zona rural, Programa de agua potable, alcantarillado, saneamiento y tratamiento de aguas residuales. Sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda, abril de 2016, Versión 1.0, CONAGUA, SEMARNAT.
15. Garzón-Zúñiga M.A., Buelna, G., Moeller-Chávez, G.E., La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias, Tecnología y Ciencias del Agua, vol. III, núm. 3. Julio-septiembre de 2012, pp. 153-161.
16. NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-especificaciones y métodos de prueba.

DISPOSITIVO DE LOCALIZACIÓN DE BAJO COSTO PARA PERSONAS DE LA TERCERA EDAD CON PADECIMIENTOS MENTALES

Daniel Jimenez-Mendoza, Maria Fernanda Hernandez-Gonzalez, Julio Cesar Funes-Tapia, Jose Luis Lopez-Ramirez y Juan De anda-Suarez

Tecnologico Nacional de Mexico/ITS de Purisima del Rincon.
Jmd_pepe@yahoo.com.mx

RESUMEN

En la actualidad se ha incrementado la incidencia de padecimientos mentales como el alzheimer, especialmente en personas de la tercera edad. El aumento de lagunas mentales hace que poco a poco las personas vayan teniendo complicaciones cognitivas a tal punto que son totalmente dependientes de otras personas. El presente proyecto pretende ayudar a minimizar el riesgo de extravío de personas con alguna enfermedad mental como el alzheimer, manteniendo su localización en un radio de cobertura de 300m, utilizando microcontroladores de doble núcleo. Un transmisor en el paciente envía constantemente la información de localización y el receptor evalua el radio de cobertura programado. Si la/el paciente se sale del radio de cobertura, emite una alarma para localizarlo lo mas pronto posible antes de que pueda extraviarse. El receptor se conecta mediante Bluetooth a una App mostrando la posición del paciente. Mediante módulos LoRa, se envía la información a baja latencia hacia el módulo receptor. Los resultados muestran una detección de hasta 400m con un radio de cobertura de 300m, sin embargo con antenas de mayor capacidad se puede incrementar el alcance. El dispositivo puede tener otras aplicaciones por ejemplo en la localización de niños para evitar que se extravien o de objetos. La ventaja de usar módulos LoRa es la larga distancia de cobertura que puede ser alcanzada.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades mentales son trastornos que afectan el funcionamiento emocional, cognitivo y de conducta de las personas. El Alzheimer es una de las enfermedades neurodegenerativas más comunes que afectan a las personas de la tercera edad, el cual se caracteriza por la perdida gradual de la memoria y las capacidades cognitivas[1,2,3]. Las personas con esta enfermedad tienen un alto riesgo de extraviarse si salen a la calle solos, debido a que son altamente dependientes de sus cuidadores o familiares. En el mercado existen dispositivos de localización basados en conexiones Bluetooth, sin embargo solo tienen un alcance de unos pocos metros y requieren de la conexión con un smartphone. Otras opciones de dispositivos son los basados en GPS(Global positioning system), los cuales requieren de una plataforma y conexión a internet mediante una micro tarjeta SIM(Subscriber Identity Module) de una empresa de telefonía local[4,5]; H.A Abdallah Dafallah en 2014, presentó un sistema basados en esta idea que utiliza una versión libre de google maps de un sistema de rastreo[6, 7, 8]. En 2019 se presentó una aplicación libre para smartphone de rastreo y localización para fines de investigación social, en donde se registra la localización y almacena los datos de forma segura, en este caso solo se requiere de un teléfono con internet que en algunos casos no es posible debido a la cobertura de comunicaciones[9,10]. La idea principal de nuestro proyecto, es dotar de tecnología de localización asequible para las personas, el cual emite una alarma cuando éstas se alejan de un radio de cobertura predeterminado. El sistema utiliza transceptores con tecnología LoRa(Long Range) y un modulo GPS que constantemente esta actualizando la posición de la persona. El dispositivo transmisor se comunica a un receptor principal que emite una alarma en caso de que el paciente se salga del radio de cobertura. Los dispositivos LoRa alcanzan comunicaciones de hasta 1Km y distancias mayores con antenas de alta ganancia, sin embargo los dispositivos más comunes alcanzan un radio de cobertura de aproximadamente 400 m, distancia suficiente para localizar rápidamente a una persona en caso de extravío. Un dispositivo microcontrolador de doble núcleo como receptor, es el encargado de controlar y monitorear la distancia recorrida de la persona y emitir una alarma al cuidador, de esta manera no se tiene que

estar constantemente a lado del paciente para mantenerlo a la vista, brindando tiempo al cuidador para que pueda realizar otras tareas mientras esta cerca de su objetivo.

TEORÍA

El Alzheimer es una enfermedad que destruye progresiva y lentamente la memoria, la capacidad de pensar y en última instancia la habilidad para realizar tareas sencillas de la vida cotidiana. Es el resultado de cambios en el cerebro por la acumulación de las proteínas beta-amiloide y tau, en el exterior e interior respectivamente, que ocasionan el deterioro y pérdida de conexiones neuronales[2,11,12], si bien se ha hecho importantes avances en medicina para retardar el avance de la enfermedad, aun hay personas que no tienen acceso a estos tratamientos, especialmente en países en vías de desarrollo. Uno de los problemas más comunes en las personas con esta enfermedad, es la desorientación o perdida de referencia espacial, ocasionando que se extravíen fácilmente, para lo cual un sistema GPS(Sistema de posicionamiento global), es un elemento esencial para obtener la ubicación geoespacial del paciente. El GPS es un servicio estadounidense que proporciona información de posicionamiento y navegación a un dispositivo receptor sobre la tierra con una precisión básica de pocos metros y para determinar la posición relativa utiliza el método de trilateración con cuatro o mas satélites en órbita. Un sistema de localización para personas no solamente requiere de la posición GPS que puede variar de un punto a otro o incluso no ser detectado por los satélites en lugares muy cerrados, si no que también necesita de un método adicional para medir distancias, por lo que se decidió utilizar la potencia de señales inalámbricas; en este contexto es posible medir la distancia relativa entre dos objetos, tomando en cuenta la intensidad de la señal de transmisión a la recepción.
El RSSI(Received Signal Strength Indicator). Es la intensidad con la que el receptor detecta la señal inalámbrica de un emisor, esta intensidad depende de la distancia y de la potencia del dispositivo transmisor. Una fórmula para medir la distancia entre dos dispositivos es mediante la siguiente expresión (ecuación 1).

$$\text{Distancia} \approx 10^{\left(\frac{PM-RSSI}{10 \cdot N}\right)} \qquad (1)$$

Donde,
Distancia: Valor de distancia aproximado en metros.
RSSI: Indicador de potencia de la señal recibida.
PM: Potencia de la señal medida, es el valor de RSSI a una distancia de 1 metro para calibración.
N: Constante de valor ambiental en un rango de 2 a 4.

Tomando en cuenta la posición GPS, se obtiene la orientación del paciente y con la intensidad de la señal recibida se calcula su distancia aproximada de su ubicación.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo del sistema de localización planteado, consiste de dos partes principales, la primera es la conexión del módulo GPS GPS6MV2 de Ublox(M.R) y el transceptor LoRa RYLR998 de Reyax Technology(M.R) al ESP32 transmisor. Los datos de latitud y longitud se enmascaran en una cadena de texto que son enviados por el módulo LoRa cada 2 segundos. La segunda parte consta de la conexión del módulo LoRa al ESP32 receptor, junto con el display Oled y el buzzer piezoeléctrico que actúa como alarma.

Conexión del dispositivo transmisor

El modulo GPS6MV2 se conecta a los pines 14 y 27 del microcontrolador de doble núcleo ESP32 de Espressif systems(M.R) en los cuales se ha configurado como pines Tx y Rx de comunicaciones. El módulo LoRa RYLR898 se conecta al puerto serie número 2 para enviar la información de la posición GPS del paciente. Los dispositivos se los alimenta con un voltaje de 3.3V y se conectan los pines de tierra(GND). La dirección configurada para el LoRa transmisor es la 0x01. Una vez se obtiene los valores del latitud y longitud del módulo GPS, son enviados a través del transceptor LoRa hacia el

dispositivo receptor. Se configuró la banda de comunicación en 915MHz en ambos dispositivos LoRa. En la Figura 1 se muestra la conexión física del transmisor que porta el paciente.

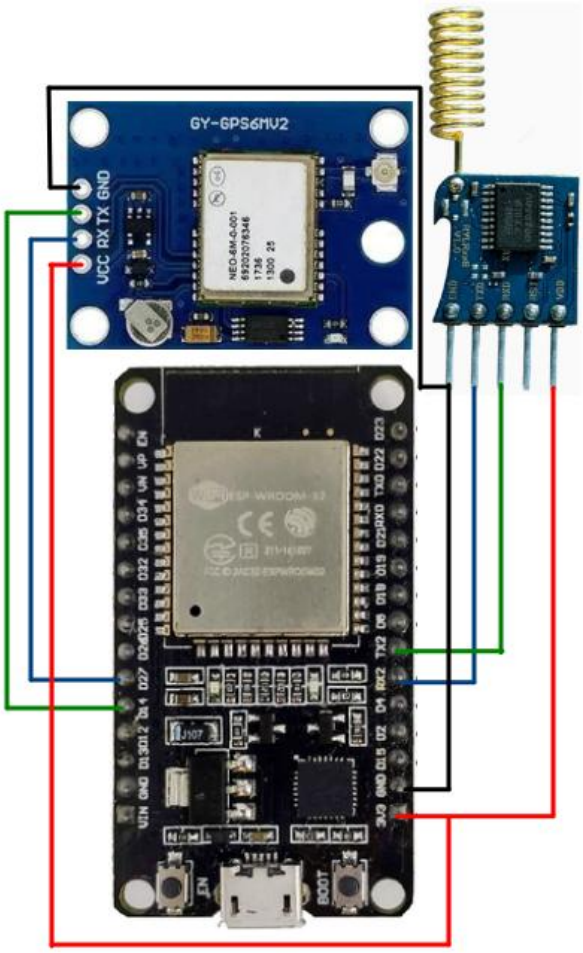


Figura 1: Conexión física del ESP32 con el modulo GPS y el transceptor LoRa.

Conexión del dispositivo receptor

El dispositivo receptor consta de un display Oled de 0.9” conectado mediante I2C a un ESP32, un transceptor LoRa con configurado con la dirección 0x02 y un buzzer piezoeléctrico como alarma sonora. El ESP32 recibe los datos de la dirección del transmisor, los datos de la latitud y longitud GPS del paciente y la intensidad RSSI de la señal. El algoritmo constantemente evalúa la recepción de los datos, un contador se incrementa cada segundo, si después de 10 segundos no se ha recibido datos o si el radio de cobertura se ha alcanzado, entonces se activa la alarma y el cuidador puede revisar en el mapa de la App para smartphone diseñada para este propósito, la última posición GPS del paciente. En el display Oled se muestra la dirección del transmisor, la distancia calculada, latitud y longitud del GPS y los mensajes abuelo fuera de rango o alarma, sin señal recibida. En la Figura 2 se ilustra la conexión física del dispositivo receptor que esta vinculado por Bluetooth al smartphone del cuidador.

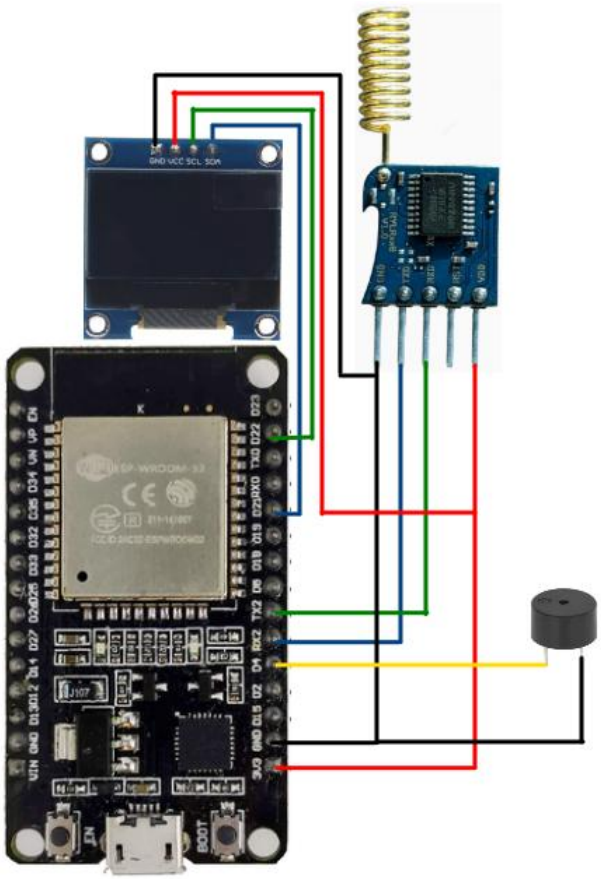


Figura 2: Conexión física del ESP32 receptor con el display Oled, el transceptor LoRa y el buzzer de alarma.

Aplicación móvil para control del dispositivo

La aplicación para control del dispositivo y despliegue de las coordenadas GPS en un mapa fue desarrollado en App Inventor(M.R), el cual es un ambiente gráfico para desarrollar aplicaciones móviles. En la Figura 3, se observa la App desarrollada. El botón Connect sirve para conectarse por Bluetooth con el ESP32 receptor, el botón Activa monitor permite iniciar el dispositivo y envía el comando al ESP32 para iniciar el envío de datos hacia la App. La etiqueta Dato muestra la cadena de información recibida, los cuales son separadas en las etiquetas Transmisor ID, Distancia, Latitud y Longitud. La etiqueta programado muestra el radio de cobertura programado al pulsar el botón Set, que toma el valor ingresado en el campo de texto debajo del mismo. El botón programar envía el valor del radio de cobertura al ESP32 receptor para ser comparado con la distancia entre el transmisor y receptor utilizando la ecuación 2. El botón Borrar limpia los registros del radio de cobertura para ingresar un nuevo dato. El botón Ver Mapa muestra en una página web de google maps el puntero con la posición GPS recibida. Es importante mencionar que mientras el sistema esta activo, el circulo de la parte superior derecha cambia de color, caso contrario muestra un color opaco. Debido a la conexión por Bluetooth del receptor al smartphone, se debe respetar una distancia máxima de 9 metros entre ambos dispositivos para no perder el enlace. El dispositivo transmisor en el paciente puede alcanzar un enlace con el receptor de una distancia máxima de 400 metros con su antena integrada.

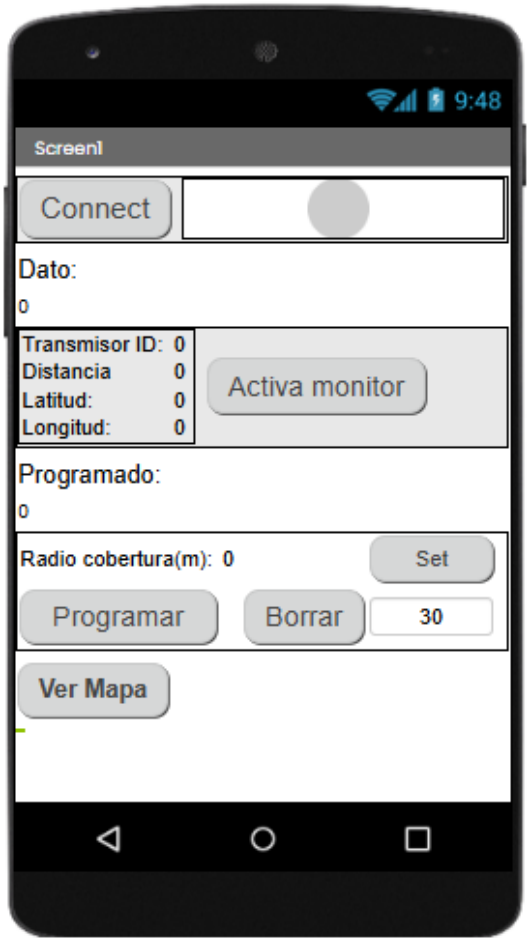


Figura 3: Imagen de la aplicación monitor para el control del dispositivo desarrollada en la plataforma App Inventor.

Cálculo de la distancia entre el transmisor y receptor

La medición de las distancias se realiza mediante la ecuación 1, la calibración para calcular el valor de PM se realizó midiendo el RSSI a una distancia de separación de 1 metro, el valor PM obtenido es de -72 db, el valor de N empleado es de 3. Debido a los obstáculos en la trayectoria, el valor de RSSI cambia un poco, por lo que se toma un promedio de 3 mediciones y este valor es el que se utiliza en la ecuación 2.

$$\text{Distancia} \approx 10^{\left(\frac{-72-RSSIP}{10\cdot 3}\right)} \qquad (2)$$

Donde, RSSIP es el promedio de mediciones de potencia de la señal recibida.

Integración del sistema de localización

El ESP32 transmisor envía la posición GPS del paciente hacia el ESP32 receptor mediante el transceptor LoRa con espacio de 2 segundos entre cada envío. Para evitar comunicaciones no deseadas con otros transceptores, el transmisor tiene la dirección 0x01 y el receptor la dirección 0x02, de tal forma que el receptor solamente toma en cuenta los datos recibidos si la dirección origen corresponde a la 0x01. El receptor toma 3 lecturas de la intensidad RSSI recibida, obtiene el promedio y calcula la distancia mediante la ecuación 2 descrita anteriormente. Si la distancia calculada es mayor a la distancia registrada en el radio de cobertura provisto mediante la App

monitor, entonces se activa un buzzer piezoeléctrico como alarma sonora y en el display Oled aparece el mensaje indicando que el paciente esta fuera de rango. El ESP32 receptor envía la posición GPS a la App mediante Bluetooth para que el cuidador pueda visualizarlo en un mapa de google.

Una vez se activa la alarma, el cuidador fácilmente puede ver la última posición GPS del paciente y la distancia aproximada de donde se encuentra para pronta localización, cabe aclarar que aunque la App tiene prefijada un valor de 30 metros, el transmisor del paciente sigue enviando datos con una cobertura de hasta 400 metros, sin embargo esta distancia puede aumentarse cambiando las antenas por una de mayor ganancia.

RESULTADOS

La Figura 3 muestra los valores de distancia real y calculada mediante la ecuación 2, se observa que para distancias cortas de 20 o 30 metros, los valores aproximados son cercanos, mientras que para distancias mayores a 60 metros los valores aproximados se van separando de la medida real. Para asegurar un rango de detección adecuado, la distancia óptima del radio de cobertura es de 20 metros, si se requiere mayor distancia entonces se necesita incluir un factor de ajuste en la ecuación 2 para obtener valores confiables. En la gráfica se observa una linea con el ajuste de un polinomio de segundo grado que pasa por los puntos medidos, esta curva podría ser empleado para ajustar el cálculo de distancias mayores.

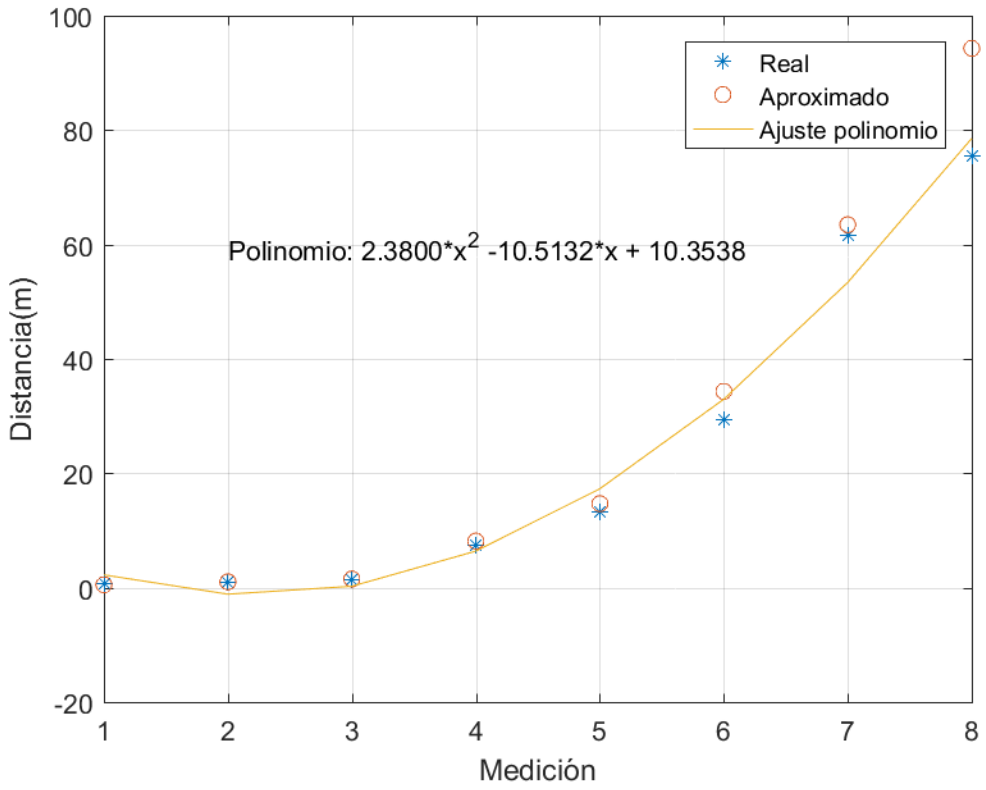


Figura 4: Datos de distancia real y calculada mediante la ecuación 2.

CONCLUSIONES

Las personas que padecen de alzheimer requieren de atención continua, la cual es una tarea ardua para la familia o un cuidador especial, sin embargo en ocasiones ante algún pequeño descuido las personas con esta condición se salen de sus casas y no saben como regresar, este dispositivo puede

utilizarse como una herramienta para evitar el extravío de las personas con alzheimer o incluso como medida de localización de mascotas. Si bien a una distancia calculada de 20 o 30 metros corresponde aproximadamente con los valores reales de distancia, no sucede así con distancias por arriba de los 60 metros, sin embargo en este punto se puede hacer uso del polinomio de ajuste para calcular distancias mayores. La posición GPS proporcional una orientación relativa de la ubicación del paciente, mientras que la distancia indica que tan cercano esta el objetivo desde su última ubicación. Con antenas de alta ganancia se pueden obtener enlaces con mayor distancia entre transmisor y receptor que envían la posición GPS de la persona para localización, sin embargo en estos casos el cálculo de la distancia presenta variaciones más notorias debido a la atenuación de la señal a la recepción.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón por facilitar sus instalaciones y laboratorios para el desarrollo de este proyecto. Especial agradecimiento a las personas que participaron en la evaluación del dispositivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Reynolds CF 3rd, Jeste DV, Sachdev PS, Blazer DG. “Mental health care for older adults: recent advances and new directions in clinical practice and research”. World Psychiatry. 2022, 21(3):336-363. doi: 10.1002/wps.20996.
2. A.R. Monteiro, D.J. Barbosa, F. Remião, R. Silva, “Alzheimer’s disease: Insights and new prospects in disease pathophysiology, biomarkers and disease-modifying drugs”, Biochemical Pharmacology, Vol. 211, 2023. https://doi.org/10.1016/j.bcp.2023.115522.
3. K. Johnson and M.Y. Son, "MENTAL HEALTH ISSUES AMONG THE ELDERLY POPULATION", Electronic Theses, Projects, and Dissertations, 2021. pp. 1214.
4. S. Pooja, “Vehicle Tracking System Using GPS”. International Journal of Science and Research, India, 2(9), 2013, pp. 128-130.
5. F. Satyamarda, N. Novembri & B. Yohanes, “Multimedia Vehicular Smartphone Docking with GPS Tracking”. Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika, 20,2021, pp. 27-34. 10.31358/techne.v20i1.255.
6. N. Chadil, A. Russameesawang and P. Keeratiwintakorn, "Real-time tracking management system using GPS, GPRS and Google earth," 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, Thailand, 2008, pp. 393-396, doi: 10.1109/ECTICON.2008.4600454.
7. H. A. Abdallah Dafallah, “Design and implementation of an accurate real time GPS tracking system”, The Third International Conference on e-Technologies and Networks for Development (ICeND2014), Beirut, Lebanon, 2014, pp. 183-188, doi: 10.1109/ICeND.2014.6991376.
8. P. Verma & J.S. Bhatia, “Design and development of GPS-GSM based tracking system with Google map based monitoring”, International Journal of Computer Science Engineering and Applications, 3(3), 2013, pp. 33-40. https://doi.org/10.5121/ijcsea.2013.3304.
9. K. Geyer, D.A. Ellis & L. Piwek, “A simple location-tracking app for psychological research”, Behav Res 51, 2019, pp. 2840–2846. https://doi.org/10.3758/s13428-018-1164-y
10. R. Maddison & C. Ni Mhurchu, “Global positioning system: a new opportunity in physical activity measurement”, Int J Behav Nutr Phys Act 6, 73. 2009. https://doi.org/10.1186/1479-5868-6-73.
11. S. Gra Menéndez, N. Padrón Pérez & J. de J. Llibre Rodríguez, “Péptido beta amiloide, proteína Tau y enfermedad de Alzheimer”, Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, 21(4), 2002, pp. 253-261
12. A.S. Schachter & K.L. Davis, “Alzheimer's disease”, Dialogues Clin Neurosci, 2(2), 2000, pp. 91-100. doi: 10.31887/DCNS.2000.2.2/asschachter.

ANÁLISIS DE LA POSTURA DE CICLISTA POR MEDIO DE VISIÓN COMPUTACIONAL

Flores Cu L. A., Gutiérrez Onesto M., Sierra Vargas J., Razón González J., Villaseñor Aguilar M. J., Rostro González H., Cano Lara M.*

[a] Depto. Mecatrónica, Depto. Electromecánica, ITESI/ TecNM , [b] Depto. Electrónica, DICIS/ Universidad de Guanajuato
miroslava.cl@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

En este trabajo se emplea visión computacional y un láser para analizar la biomecánica del ciclista, se identifica el comportamiento del cuerpo en diversas etapas de pedaleo y se estudian los ángulos formados por las articulaciones. Se requiere ajuste de bicicleta en relación con la altura del ciclista, mediante una cámara Kinect lateral y trasera se realiza un escaneo para el seguimiento esquelético y representación de articulaciones del ciclista y por medio de visión computacional se adquiere videos en etapas de rendimiento donde se analiza la posición del cuerpo del ciclista. La localización de los nodos en cada articulación es representativa para identificar de manera dinámica el rango de apertura de cada extremidad, de esta manera se analiza si el ciclista se encuentra en posición correta. En caso de ser necesario se corrige cualquier desviación en bicicleta- posición de ciclista que pueda afectar su eficiencia y salud. Una incorrecta posición puede provocar dolor en articulaciones, problemas de rendimiento y exceso de presión en los músculos.

INTRODUCCIÓN

Una mala postura del cuerpo en la bicicleta puede llegar a provocar dolor en las articulaciones, problemas de rendimiento y demasiada presión en los músculos. Por este motivo es importante hacer un estudio biomecánico (Figura 1) de evaluación de la correcta posición de un ciclista y corregir cualquier desviación que pueda afectar su eficiencia y salud.



Figura 1. Parámetros de posición angular correcta para el ciclista.

Para analizar la biomecánica del ciclista existen estudios profesionales, pero su costo es elevado y poco accesibles. En literatura previa, se realiza un análisis del movimiento del cuerpo sobre la bicicleta en diferentes circunstancias, con lo cual se busca tener la postura ideal para maximizar el rendimiento sin descuidar la salud del ciclista. Se integra la cinética en el caso de la aplicación de fuerzas voluntarias y residuales sobre la bicicleta, y la cinemática que abarca el estudio de movimiento en las diferentes posiciones con ángulos generados por la actividad del ciclista como se muestra en la Figura 2, considerando también la altura de la bicicleta y estructura de acuerdo con la fisiología del usuario.



Figura 2. Estudio biomecánico posición del ciclista[1].

En el presente trabajo se desarrolló un algoritmo en Python complementado con la aplicación SDK 2.0 de Kinect la cual permite crear aplicaciones compatibles con el reconocimiento de gestos y voz, así se define un modelo 2D para la asignación de nodos en las zonas de las articulaciones del ciclista. Con la finalidad de visualizar parámetros angulares, en conjunto se empleó un sensor Kinect en su versión 1.8 para aplicar técnicas de visión computacional con la finalidad de adquirir información del mundo físico por medio de la recolección de imágenes, ser procesadas para obtener histogramas, umbrales y patrones, con esto se buscó monitorea los ángulos en las articulaciones del ciclista para analizar su postura y correcto desempeño. Con el barrido de imágenes y datos obtenidos lateral y trasera se realiza esquelético y representación de articulaciones del ciclista adquiriendo la base de datos de imágenes extraídas de videos en etapas de rendimiento donde se analiza la posición del cuerpo del ciclista. Por medio del algoritmo donde se realiza la asignación de nodos en las zonas de las articulaciones siguiendo con una comparación con parámetros biomecánicos definidos (Tabla 1) para saber si se requiere de modificaciones en la postura, altura de asiento o la bicicleta misma.

Zona	Posición de nodo	Ángulo ideal (grados)
Superior	Cuello (Cabeza respecto al torso)	15-20
	Torso respecto al Brazo (Manillar)	90
	Codo	160-165
Media	Cadera	90-110
	Muslo (Fémur) y Torso (Caja Torácica)	45-50
Baja	Pantorrilla y Muslo (Femoral)	110-120
	Peroné y Tibia	70-90
	Rodilla (Flexión máxima)	70-80
	Rodilla (Extensión máxima)	140-145
	Tobillo	15-20

Tabla 1. Ángulos de interés en nodos de las articulaciones.

TEORÍA

La biomecánica es el estudio y análisis del movimiento del cuerpo humano, tienen como finalidad caracterizar y mejorar las técnicas de movimiento basándose en el conocimiento científico. Una de las principales aplicaciones es en la mejora de técnicas deportivas, realizando estudios para prevenir lesiones y mejorar el rendimiento del deportista. Estos sistemas proporcionan a los profesionales la herramienta para el registro, análisis y captura de datos en movimiento [2].

En el ciclismo los nodos de ángulos esta basada en el pedaleo, ya que como el objetivo es hacerlo de forma eficiente y rendimiento optimo sin generar tensión en el musculo ni lesiones en las articulaciones, generando una correcta alineación y teniendo como resultado una transmisión de potencia eficiente y segura [3]. El estudio del pedaleo consiste en el análisis del desplazamiento en los ángulos formados en las articulaciones generados al realizar la acción del pedaleo [5]. Partiendo de este análisis se puede determinar si la manera en la que se está ejecutando la acción con los

ángulos generados se encuentran dentro de los parámetros estandarizados para la prevención de lesiones y es la correcta. Para este fin el software muestra diagramas de movimiento de 20 puntos distribuidos por el cuerpo en los planos sagital, frontal y rotacional, buscando ser un sistema portátil, no invasivo y económico que permite que la interacción de los pacientes sea natural al ejecutar la actividad, además de su fácil manejo por parte de los profesionales de la salud.

PARTE EXPERIMENTAL

A continuación, en la Figura 3 se presenta el diagrama de etapas para la aplicación del sistema.



Figura 3. Diagrama de etapas de porceso.

El desempeño del ciclista estará dependiente del estudio computacional en cada ciclo de trabajo en la bicicleta. Analizando en tiempo real la dependencia de las angulaciones en los nodos posicionados en los puntos de interés como se muestra en la Figura 4. Los datos de visión computacional se comparan con parámetros biomecánicos definidos para saber si se requiere de modificaciones en la postura, altura de asiento o la bicicleta misma.

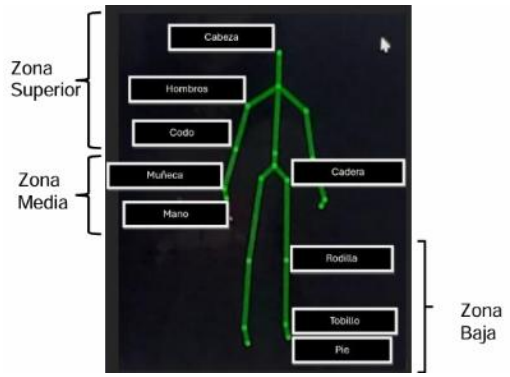


Figura 4. Nodos de interés en el cuerpo del ciclista.

Para la aplicación del estudio biomecánico se ajustó la altura del asiento de una bicicleta de montaña R26 mediante un láser colocado a una altura específica como se observa en la Figura 5. Para a) se muestra el ajuste de altura colocando el nivel láser de acuerdo con la altura de pie a cadera del usuario y en b) el nivel de burbuja para posición de asiento respecto a la horizontal.



a) Nivel láser. b) Nivel de burbuja.

Figura 5. Calibración del asiento.

Para el láser se toma en cuenta la altura de piso a entrepierna del cilista y para el nivel del asiento se coloca el nivel de burbuja en el borde del asiento, buscando que la posición del mismo mantenga la burbuja en medio del nivel. Posteriormente el usuario comienza a realiza el pedaleo para generar por visión artificial (cámara y el sensor Kinect) el registro de los ángulos máximos y mínimos en las zonas de interés (ver Figura 6). Los datos de angulos en cada extremidad permiten valorar la técnica de pedaleo los cuales son validados con un goniómetro. Para esta finalidad se emplearon las librerías cv2, mediapipe y numpy en Python las cuales facilitan la interacción e interpretación y aplicación de la visión computacional para la detección de presencia y ubicación de la morfología del ciclista.

En las imágenes de los sujetos de prueba 1 y 2 en la pantalla se muestra la variación de la medida en el ángulo en codo y rodilla, disminuyendo o aumentando de acuerdo con la parte del ciclo que se esté ejecutando. Los resultados obtenidos tienen una alta efectividad ya que los casos donde se detectó variación en la identificación de los nodos y caracterización computacional fueron debido al uso de ropa holgada, lo cual nos permitió establecer como condición inicial que el ciclista para el uso optimo del sistema utilice ropa más ceñida al cuerpo para que las cámaras identifiquen correctamente los nodos de interés. La información generada ayuda al usuario a detectar anomalías en la postura y distribución del peso para prevenir lesiones.

<table>
<tr><th colspan="2">Sujeto de prueba 1</th></tr>
<tr><td>Vista frontal
Ang. codo: 167°
Ang. rodilla: 179°
  </td><td>Vista lateral
Ang. codo: 172°
Ang. rodilla: 93°
  </td></tr>
<tr><th colspan="2">Sujeto de prueba 2</th></tr>
<tr><td>Vista lateral
Ang. codo: 164°
Ang. rodilla: 60°
  </td><td>Vista lateral
Ang. codo: 160°
Ang. rodilla: 75°
  </td></tr>
</table>

Figura 6. Analisis de ángulos en articulaciones con vista frontal y lateral.

CONCLUSIONES

Se demuestra la capacidad de utilizar la visión artificial en el ámbito deportivo y biomecánico, utilizando captura de video para identificar la correcta posición de una persona al montar una bicicleta respecto de los ángulos formados entre las articulaciones. Siendo las de principal interés cadera, rodilla y tobillo, ya que son las que se encuentran en un movimiento constante. Este análisis tecnológico amplía las posibilidades de crear aplicaciones prácticas y rápidas para evaluar la postura y rendimiento de ciclistas por medio de visión computacional. Ya que como se presento previamente, existe un estándar de parámetros para la posición de las articulaciones el realizar la actividad aplicando la visión artificial resulta fácil identificar si hay alguna anomalía en la cadencia del ciclista notificarlo para realizar las acciones pertinentes de acuerdo con la necesidad del usuario para

prevenir lesiones y, en este caso como lo vimos en los 2 sujetos de prueba se tuvieron para el codo: 160-170°, para la rodilla 60-70°. El estudio se encuentra dentro de los parámetros estandarizados de la Tabla 1. Como continuación del presente trabajo se pretende complementar la parte de la visión computacional con un estudio de fuerza y posición ejercida sobre el pedal, además de monitoreo de ritmo cardiaco, esto con la finalidad de generar un análisis mas completo donde acorde a la posición ángulos y fuerza, se determine si la actividad se esta ejecutando de la forma correcta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Martín, V. (2019, febrero 27). *La biomecánica, una herramienta para mejorar rendimiento y salud*. AS.com. https://as.com/opinion/2019/02/27/blogs/1551262858_561976.html
2. Kleinpaul, J. F., Mann, L, Diefenthaeler, F., Pereira Moro, A. R. y Pivetta Carpes, F. (2010). Aspects determinants of body positioning for cycling, a systematic review. Motriz. 16 (4).
3. García-López, J., Díez-Leal, S., Rodríguez Marroyo, J. A., Larrazábal, J., De Galceano, I. G., & Villa, J. G. (2009). Eficiencia mecánica de pedaleo en ciclistas de diferente nivel competitivo. *Biomecánica*, *17*(2), 9-20.
4. Garcia-Lopez, J. y de Galdeano, I. G. (2009). Ventajas e inconvenientes de ajustar la bicicleta tomando como referencia las medidas corporales, altura, retroceso y ángulo del tubo del sillín. Fundación Ciclista Euskadi. Facultad de Ciencias del Deporte y la Salud. Universidad de León
5. Bini, R. R., & Hume, P. (2016). A comparison of static and dynamic measures of lower limb joint angles in cycling: Application to bicycle fitting. *Human Movement*, *17*(1), 36-42.

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL PROCESÓ DE FOTOELECTROLISIS UTILIZANDO SEMICONDUCTORES

Evelyn Yolotzin Gonzalez Garnica[1] , Juan Daniel Garcia Gonzalez [1] y Ernesto Flores Rojas [1]

1 Instituto Politécnico Nacional - Unidad Profesional Interdisciplinaria en Energía y Movilidad
egonzalezg1901@alumno.ipn.mx

RESUMEN

En la actualidad una alta demanda de energía, productos y servicios ha provocado un impacto negativo en el medio ambiente debido a la contaminación generada para satisfacer dichas necesidades, por lo cual se han buscado alternativas como las fuentes de energía renovables. La energía que puede ser obtenida del hidrógeno se considera eficiente y amigable con el medio ambiente ya que los procesos de conversión y/o almacenamiento no presentan emisiones de carbono. El hidrógeno posee una densidad energética 2.4 veces más grande que el metano y 2.8 veces más que la gasolina. El método más común y eficiente para la producción del hidrogeno es mediante la electrolisis la cual consiste en disociar la molécula de agua en oxigeno e hidrógeno molecular aplicando energía externa al sistema (1.229 V), sin embargo, existe una necesidad de aplicar sobrepotencial y calor para lograr la electrólisis, además de la liberación de electrones los cuales irían a la fuente que se quiere alimentar de energía. Aunque este método es uno de los menos contaminantes, su principal desafío radica en que la electricidad utilizada para la electrólisis no siempre proviene de fuentes renovables, por lo que puede comprometer su sostenibilidad. Para abordar este problema, se han desarrollado nuevas alternativas, como la producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica de agua, un proceso en el que la luz solar se utiliza para separar el hidrógeno del oxígeno, reduciendo así la dependencia de fuentes energéticas no renovables y haciendo el proceso aún más limpio y eficiente. Este proceso consiste en una reacción fotoquímica que sucede cuando un fotón incide sobre un catalizador, al encontrase con moléculas de agua estos radicales logran separar los componentes del agua obteniendo oxígeno e hidrógeno. En dicho proceso el catalizador determina la eficiencia del proceso por lo cual se deben contemplar las características del material como sus interacciones a distintas temperaturas y como estas afectan, ya sea de manera positiva o negativa su eficiencia esto hará que varíen los costos, sin embargo, también es necesario un material que ayude al proceso de producción en este caso se proponen semiconductores que tienen brechas de banda pequeñas. En los últimos años se han diseñado fotocatalizadores diferentes logrando un progreso continuo hacia procesos más eficientes, uno de los desafíos de esta tecnología son los materiales usados como semiconductores ya que no todos son viables ya sea porque el material a usar no es eficiente o su producción sea de alto costo y difícil de obtener ,teniendo en cuenta que aun si las investigaciones han avanzado a grandes pasos las mayores eficiencias logradas siguen siendo bajas , teniendo problemas de estabilidad , es decir que ,algunas veces necesitan estar en condiciones controladas para ser eficientes. Este innovador enfoque en el cual pude producir energía a través de agua y luz solar dos elementos abundantes en el planeta aseguran que la energía esté disponible a cualquier hora del día, la investigación y desarrollado podría traer consigo una optimización y ser económicamente más viable, produciendo energía sostenible y de más fácil obtención.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la población mundial ha incrementado de manera significativa la demanda de energía, lo que ha derivado en un mayor consumo de combustibles fósiles. Este fenómeno ha generado diversas consecuencias ambientales, entre las que destacan la emisión de gases de efecto invernadero y el agotamiento de recursos no renovables. En respuesta a esta problemática, se han intensificado los esfuerzos por desarrollar fuentes de energía alternativas, sostenibles y limpias, entre las cuales sobresalen la energía solar, eólica, geotérmica y mareomotriz.

No obstante, en este tipo de energías, los procesos de conversión y almacenamiento aún presentan limitaciones en cuanto a eficiencia, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones complementarias. En este sentido, la generación de energía a través de dispositivos electroquímicos se perfila como una de las alternativas más viables. Particularmente, el hidrógeno ha cobrado relevancia como vector energético, debido a que es limpio, versátil y con alto contenido energético de 237J.mol [1], lo cual ha despertado un creciente interés en su producción y aprovechamiento.

La producción de hidrógeno los cuales se dividen en; procesos químicos los cuales consisten en reacciones químicas entre hidrocarburos para así poder separar el hidrogeno, procesos electroquímicos los cuales consisten en mediante energía externa separar al hidrogeno y procesos térmicos el cual usa energía térmica intensa. Los procesos térmicos son los más eficientes el problema de estos es que al utilizar como fuentes materiales los cuales producen un gran impacto en el medio ambiente buscado otras alternativas. Depende del uso de materiales avanzados que permitan su obtención de manera eficiente. Uno de los métodos más utilizados es la electrólisis del agua, la cual requiere de una fuente externa de energía para inducir la reacción química. No obstante, la producción eficiente y sostenible de hidrógeno sigue representando un reto técnico y económico.

$2H_2O\ (l) \rightarrow O_2\ (g) + 4\boldsymbol{H}^+ + 4e^-$

$4\boldsymbol{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2\ (g)$

$2H_2O\ (l) \rightarrow O_2\ (g) + 2H_2\ (g)$

Una de las rutas más limpias para obtener hidrógeno es la división del agua mediante un proceso denominado fotoelectrolisis, el cual utiliza la energía solar para inducir la separación del agua en hidrógeno y oxígeno. Ha llamado la atención por su potencial en el desarrollo de tecnologías energética y limpia. Sin embargo, lograr foto ánodos de alto rendimiento sigue siendo un desafío ya que encontrar materiales de electrodos adecuados con una gran estabilidad química y a la vez un rendimiento catalítico bueno , los que se conocen hasta ahora como lo son los óxidos metales de transmisión tienen propiedades optoelectricos y de transporte de electrones demasiado pobres es por eso que los materiales semiconductores han demostrado ser candidatos ideales para actuar como fotocatalizadores, debido a su capacidad para absorber fotones de la luz solar. Al recibir suficiente energía lumínica, los electrones en la banda de valencia de estos materiales se excitan y pasan a la banda de conducción, dejando vacantes (huecos) que pueden participar en potenciar la separación de oxígeno y el hidrogeno.

Este trabajo consiste en una revisión de distintos tipos de materiales (semiconductores) con un ban gap de 1.5 a 2 voltios para ser utilizados como fotocatalizadores eficientes, con el fin de facilitar las

TEORÍA

Electrolisis

La Electrolisis es un proceso electrolítico cuya reacción no es espontanea, por lo que requiere del uso de corriente externa para llevarse acabo, este tipo de proceso es útil para diferentes compuestos el cual su objetivo es lograr descomponer las moléculas en componentes más básicos. Una de las aplicaciones más comunes es la separación del agua ya que tiene una gran capacidad para producir hidrogeno el cual es un recurso energético que puede usarse como combustible.
Reacción química de la electrolisis del agua

$2H_2O\ (l) \rightarrow O_2\ (g) + 4\boldsymbol{H}^+ + 4e^-$

$4\boldsymbol{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2\ (g)$

$2H_2O\ (l) \rightarrow O_2\ (g) + 2H_2\ (g)$

La teoría de bandas explica los niveles de energía de los electrones en un átomo. En lugar de niveles se forman bandas las cuales se dividen en valencia y de conducción, la banda de valencia es la banda mas llena de electrones de valencia, mientras que la de conducción está vacía o parcialmente vacía. Dependiendo del material pude variar la cercanía de las dos bandas.

Metales: Las bandas de valencia y conducción están a una pequeña distancia facilitando el intercambio de electrones.

Aislantes: Las bandas de valencia y conducción están a una gran distancia lo que provoca que los electrones no tengan la energía suficiente para hacer el salto entre ellas.

Los semiconductores son materiales con características que caen en conductividad y aislamiento. Dichos materiales son esenciales para la manipulación con respecto al control del flujo de la corriente eléctrica. Esto gracias a que la conductividad eléctrica de los semiconductores puede cambiar eso al doparlos con impurezas.

Foto electrolisis
“Es un proceso en el cual se hace uso de radiación (usualmente longitudes de onda de UV-Visible) para impulsar una reacción de disociación de alguna molécula, por ejemplo el hidrógeno, a partir del agua.

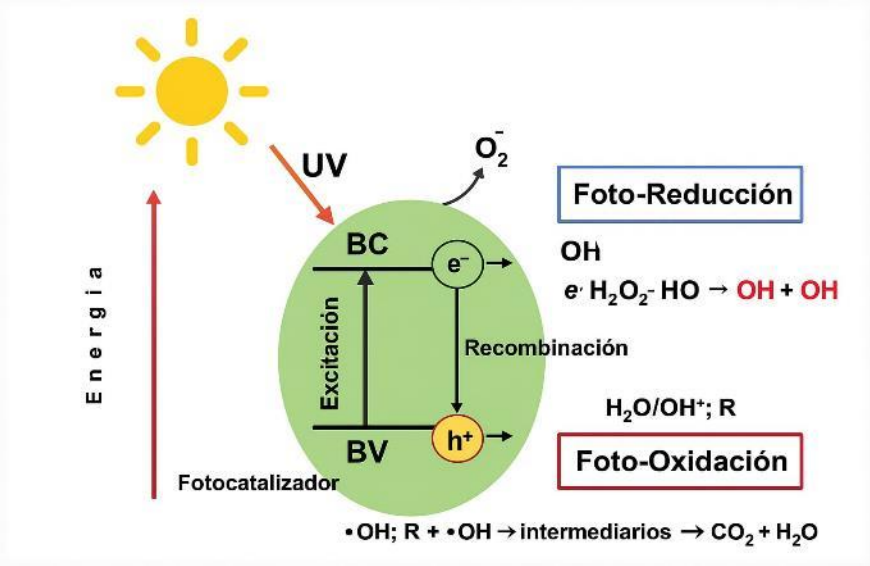


Figura 1.1 celda fotoelectrolica (imagen) Department of Mining and Materials Engineering

Una celda fotoelectroquímica está compuesta por:
Fotocátodo: Captura electrones y reduce protones para asi formar hidrogeno
Foto ánodo: Este hecho de un material semiconductor el cual absorberá la luz solar lo cual generara guecos los cuales oxidaran el agua.
Membrana: Permite el paso selectivo de iones y evita que el hidrogeno y el oxígeno se mezcle
Electrolito: Conducctor que conecta el foto-anado con el foto-catodo

“Un material semiconductor absorbe la luz solar, la energía proporcionada por el sol excita los electrones en el material, logrando así la generación de pares electrón-hueco, los electrones libres se mueven hacia la banda de conducción mientras que los huecos dejan una vacante que posteriormente serán usadas por el material como portadores de cargas positivas, todo esto en alguno de los electrodos, ánodo o cátodo, dependiendo del tipo y la naturaleza de la reacción
Los electrones excitados en el material facilitan la oxidación del agua.

$$S_{emiconductor} + hv \rightarrow S_{emiconductor}\left(e_{CB}^{\mp} h_{VB}^{+}\right)$$

$$e_{CB}^{-} + h_{VB}^{+} \rightarrow calor$$
$$e_{CB}^{-} + O_2 \rightarrow \cdot O_2^{-}$$
$$h_{VB}^{+} + OH^{-} \rightarrow \cdot OH$$
$$\cdot OH + R - H \rightarrow R'^{\cdot} + H_2O$$
$$h_{VB}^{+} + R \rightarrow R^{+\cdot} \rightarrow Intermediates$$
$$e_{CB}^{-} + O_2 \rightarrow \cdot O_2^{\mp} H^{+} \rightarrow HOO \cdot + \cdot O_2^{-} \rightarrow HOO \cdot + O^{-}$$
$$HOO \cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$$
$$H_2O_2 + \cdot O_2^{-} \rightarrow \cdot OH + OH^{\mp} O2$$

PARTE EXPERIMENTAL

La ventaja de las celdas fotoelectroquímicas es el aprovechamiento de algún tipo de radiación, como pueden ser algunas de las emitida por la energía solar (e.g. UV-Vis). Dentro de la celda se utilizan materiales semiconductores como electrodos ya que al irrádialos se forman pares electrones-hueco. Este proceso conduce a la división de las moléculas de oxígeno e hidrogeno. Cuando hablamos de semiconductores para una celda fotoelectroquímica debemos tener en cuenta que no todos los semiconductores son candidatos para su utilización, es por eso que en este trabajo se explorarán tres semiconductores que satisfacen el mayor número de condiciones.

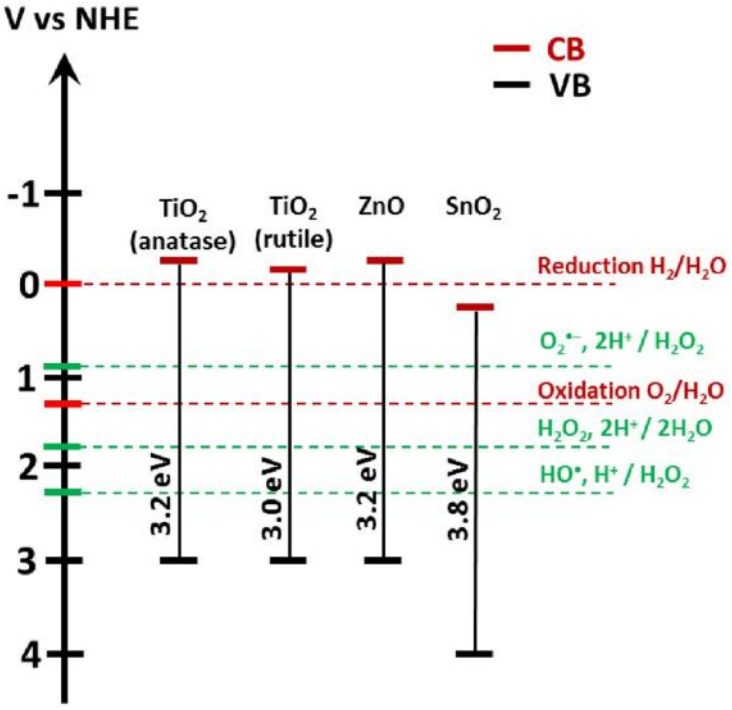


Figura 1. La energía del band gap para TiO2, ZnO y SnO2 en una escala de potencial (V) en relación con el electrodo de hidrógeno normal (NHE) [2].

$$TiO_2$$

El TiO_2 tiene cuatro fases las cuales son rutilo, tetragonal y anatasa, brookita ortorrombica. Los cuales de los cuatro solo dos se han reportado

El dióxido de titanio posee un alto índice de refracción, a su vez también una alta estabilidad en forma de solución acuosas bajo radiación UV también una gran capacidad oxidante y reductora

De las 2 fases que se comentan en la figura 1 la fase anatasa presenta mayor movilidad de electrones siendo mejor para separar y transportar los portadores de cargas esto derivado de su masa efectiva electrónica gracias a esto contribuye al proceso de reducción del agua ya que si la masa efectiva fuera mayor esto provocaría una baja movilidad de electrones
Pero también una de sus mas grandes desventajas es la rápida recombinación electrón-hueco que a pesar de poder controlarse con la ayuda de reactivos de sacrificios o dopajes.

$\boldsymbol{Oxido\ de\ zinc\ ZnO}$

El ZnO es el segundo semiconductor más estudiado para el uso en fotoelectrolisis del agua ya que comparte casi el mismo band gab que él $\boldsymbol{TiO_2}$ lo que se prevé que su capacidad fotocatalítica sea similar. Las propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas pueden ser alteradas o mejoradas mediante el uso de nanoscala lo cual da como resultados la buena absorción de luz y actividad fotocatalítica, pero a la vez sus propiedades piezoeléctricas lo hacen candidato para diodos de emisores de luz o materiales piezoeléctricos. Al ser compatible con los organismos vivos se considera un material con bajo impacto ambiental.
Su estructura cristalina es bien definida siendo de tipo salina o cubica. Una estructura cristalina tipo salina genera baja alta presión ¿?? siendo así una estructura rara [referencia], mientras que la cubica es la más común El ZnO es un semiconductor de banda ancha con gran energía de unión, con un band gap de 3.4 eV. Su banda de valencia y de conducción se encuentra en el punto de simetría G al igual que la banda de Valencia se encuentra dentro del punto de energía cero [referencia]. Su capacidad de absorción en un amplio rango del espectro solar y la luz de óxidos metálicos semiconductores es una de las ventajas. Aunque su limitada absorción de la región visible debido a su amplia energía del bandgab
Las reacciones comienzan cuando las nanopartículas de ZnO absorben fotones con la energía superior de la banda prohibida de la iluminación lo cual hace que un electrón inducido por la luz es promovido de la banda de valencia (VB) a la banda de conducción (CB) lo cual forma pares electrones-hueco. Para logra su eficiencia fotocatalítica, las recombinaciones deben de ser mínimas.

(eq.1)
$$\boldsymbol{ZnO + Uv \rightarrow ZnO(e_{CB}^{-} + h_{VB}^{+})} \quad (1)$$

El hueco de la banda de valencia (VB)reacciona con el agua o el ion hidróxido para generar un radical hidroxilo (OH) el cual es un oxidante lo cual conduce a la degradación parcial o completa de los compuestos orgánicos al igual que la oxidación de contaminantes reactivos, a la vez el electrón excitado en la banda de conducción se combina con el $\boldsymbol{O_2}$ formando una unión radical libre ($\boldsymbol{O_2}-$) junto con radicales de hidroperóxido y peróxido de hidrogeno. (eq.2-8)

$$\boldsymbol{h^+ + H_2O \rightarrow OH + H^+} \quad (2)$$
$$\boldsymbol{h^+ + HO^- \rightarrow \bullet OH} \quad (3)$$
$$\boldsymbol{O_2 + e- \rightarrow \bullet O_2} \quad (4)$$
$$\boldsymbol{\bullet O_2 + H^+ \rightarrow \bullet O2H} \quad (5)$$
$$\boldsymbol{2 \bullet O_2H \rightarrow H_2O_2 + O_2} \quad (6)$$
$$\boldsymbol{H_2O_2 + \bullet O_2 \rightarrow \bullet OH + OH \mp O_2} \quad (7)$$
$$\boldsymbol{H_2O_2 + e- \rightarrow \bullet OH + OH^-} \quad (8)$$

La actividad principal es la introducción de portadores de carga, su captura y la recombinación. La mejora de las propiedades del ZnO se han convertido en un trabajo desafiante. Por lo que se han utilizado diferentes métodos para mejorar su fotocatálisis

El óxido de estaño SnO_2 tiene una mayor banda prohibida, junto a su alta constante dieléctrica como densidad de estado de igual manera facilita la separación de cargas, también posee una facilidad al dopaje para mejorar su característica conductiva, el hecho de tener una transparencia óptica y también alta conductividad lo hace destacar en aplicaciones optoelectrónicas, fotocatalíticas y fotovoltaicas.

Los parámetros cristalográficos son cercanos al TiO2 en su fase rutilo

CONCLUSIONES

El uso de semiconductores para la generación de hidrogeno es prometedora más sin en cambio se deben de tener en cuenta varias características de los mismos como sus propiedades fotocatalíticas en este caso así como los costos también las ventajas que se presentan entre ellos y a su vez como dicha ventaja puede igualarse o superarse con la ayuda de diferentes métodos que modifiquen sus propiedades como dopajes entre otros con la búsqueda de obtener un material con buen rendimiento y a su vez como.

BIBLIOGRAFÍA

1. Constantinoiu, I., y Viespe, C. (2020). Semiconductor de óxido metálico de ZnO en sensores de ondas acústicas de superficie: una revisión. *Sensores*, *20*(18), 5118. https://doi.org/10.3390/s20185118
2. Ishchenko, O., Rogé, V., Lamblin, G., Lenoble, D., & Fechete, I. (2021). TiO 2 , ZnO, and SnO 2 -based metal oxides for photocatalytic applications: principles and development. *Comptes Rendus Chimie*, *24*(1), 103-124. https://doi.org/10.5802/crchim.64
3. Kavan, L. (2024). Electrochemistry and band structure of semiconductors (TiO2, SnO2, ZnO): Avoiding pitfalls and textbook errors. *Journal Of Solid State Electrochemistry*, *28*(3-4), 829-845. https://doi.org/10.1007/s10008-023-05770-w
4. Arunachalam, P., Nagai, K., Amer, M. S., Ghanem, M. A., Ramalingam, R. J., & Al-Mayouf, A. M. (2021). Desarrollos recientes en el uso de materiales heterogéneos basados en fotocatalizadores semiconductores para un sistema de división de agua inducido por luz visible: una breve revisión. *Catalizadores*, *11*(2), 160. https://doi.org/10.3390/catal11020160
5. Wang, M., Zhou, H., & Wang, F. (2023). Photocatalytic Production of Syngas from Biomass. *Accounts Of Chemical Research*, *56*(9), 1057-1069. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00039
6. Zhang, H., Liu, J., Xu, T., Ji, W., & Zong, X. (2023). Recent Advances on Small Band Gap Semiconductor Materials (≤2.1 eV) for Solar Water Splitting. *Catalysts*, *13*(4), 728. https://doi.org/10.3390/catal1304072
7. EPatel, M. Y., Mortelliti, M. J., & Dempsey, J. L. (2022). A compendium and meta-analysis of flatband potentials for TiO_2, ZnO, and SnO_2 semiconductors in aqueous media. *Chemical Physics Reviews, 3*(1), 011303. https://doi.org/10.1063/5.0063170
8. Zhang, X., Zhang, S., Cui, X., Zhou, W., Cao, W., Cheng, D., & Sun, Y. (2022). Recent Advances in TiO_2-based Photoanodes for Photoelectrochemical Water Splitting. *Chemistry – An Asian Journal, 17*(20), e202200668. https://doi.org/10.1002/asia.202200668aces.onlinelibrary.wiley.com
9. Ramírez Ortega, D., Guerrero Araque, D. C., Acevedo Peña, P., & Zanella, R. (2022). Avances en materiales semiconductores prometedores para la producción eficiente de hidrógeno fotoelectrocatalítico. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*. Recuperado de https://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/69825
10. Kochuveedu, S. T. (2016). Photoelectrochemical water splitting cell based on n-type semiconductor TiO_2 photoanode. *Journal of Nanomaterials*. https://www.researchgate.net/figure/Photoelectrochemical-water-splitting-cell-based-on-n-type-semiconductor-TiO2-photoanode_fig3_30752353

SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA PARA EL MULTISENSADO DE PARÁMETROS FÍSICOS UTILIZANDO UNA REJILLA DE PERIODO LARGO SIMÉTRICA

Marco Antonio Contreras-Teran[1*], Natali Mancera-Campos[2], Adriana Bueno-Gasca[1], Juan Manuel Sierra-Hernandez[1], Daniel Jauregui-Vazquez[3].

[1] Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., C.P. 36885, México, [2]Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingeniería Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca - Valle de Santiago Km. 3.5 + 1.8; Comunidad de Palo Blanco; Salamanca, Gto. 36885, México, [3]Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), División de Física Aplicada, Departamento de Óptica, Carretera Ensenada-Tijuana, No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, BC, México.

ma.contrerasteran@ugto.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta un sistema experimental para el monitoreo de rejillas de periodo largo en el cercano infrarrojo, demostrando la capacidad de multisensado, que responden a cambios de temperatura, deformación y curvatura. El arreglo propuesto logró obtener dos picos de absorción en 1505.7 y 1576.3 nm. Las variaciones de los parámetros físicos permitieron lograr un comportamiento lineal, alcanzando ajustes R^2 de 0.9952, 0.9449 y 0.9745 en temperatura, deformación y curvatura respectivamente. Además, los picos espectrales registrados presentan una señal bien definida con una amplia posibilidad de ser utilizado como señal de control y referencia.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sensores basados en fibra óptica ha despertado un gran interés debido a su alta sensibilidad, bajo costo de fabricación [1, 2] y su amplia aplicabilidad en campos como la tecnología biomédica [3], el monitoreo óptico [4], la espectroscopía [5] y las telecomunicaciones [6]. Estos avances y aplicaciones han sido impulsados mediante el uso de diversos interferómetros de fibra, tales como el interferómetro de Sagnac [7], el interferómetro de Michelson [8], el interferómetro de Mach-Zehnder [9] y las rejillas de Bragg [10].

De estas últimas se derivan variantes como las Rejillas de Fibra de Período Largo (RFPL), las cuales son especialmente útiles debido a que operan completamente en transmisión. Esto permite evitar de forma eficaz la inestabilidad en la potencia generada por la reflexión de la señal de entrada.

Recientemente, las RFPL han sido utilizadas para demostrar sensibilidad a variaciones de curvatura [11], donde se logró un corrimiento espectral de 12 nm al aplicar una curvatura en el rango de 0 a 0.266 m^{-1}.

En este trabajo, se presenta un sistema experimental de fibra óptica en el cual se emplea una RFPL como filtro seleccionador de longitud de onda, que a su vez funciona como transductor. Esto permite aplicar variaciones controladas de temperatura, deformación y curvatura directamente sobre la rejilla. Los rangos alcanzados para cada parámetro fueron: 25 °C a 100 °C para temperatura, 0 a 500 με para deformación, y 0 a 0.286 m^{-1} para curvatura.

El análisis espectral de los picos de absorción frente a los distintos cambios físicos mostró comportamientos lineales, con coeficientes de correlación R^2 de 0.9952 para temperatura, 0.9449 para deformación y 0.9745 para curvatura.

TEORÍA

La fabricación de rejillas utilizando un láser de CO_2 comúnmente presenta una asimetría en su geometría, causada por una absorción no uniforme de la potencia del láser en la fibra óptica [12, 13]. En este estudio, la rejilla fue fabricada mediante un sistema de procesado de vidrio LZM-100 con láser de CO_2. Este sistema permite modificar tanto el índice de refracción del núcleo como el del revestimiento, mediante una deformación superficial controlada. Dicha deformación se genera por la deposición uniforme de calor sobre una fibra que, rota de forma constante, lo cual permite obtener una geometría simétrica a lo largo de toda la RFPL [14].

En la Figura 1 se muestra el arreglo experimental utilizado para la fabricación de la rejilla. El sistema de fabricación consta de dos partes. La primera involucra el sistema de bombeo, el cual emplea un láser de CO_2 (modelo LZM-100 de AFL); en este, el haz láser es enfocado mediante un arreglo de lentes y redirigido a través de un divisor de haz. Los haces divididos son luego redirigidos mediante espejos hacia un punto de superposición, el cual se utiliza como zona de fabricación de la rejilla.

La segunda parte del sistema emplea el patrón de interferencia generado por el láser de CO_2 para inducir la modulación periódica. La periodicidad de la RFPL se obtiene controlando la velocidad de desplazamiento de dos plataformas que soportan la fibra. Cada sección de la fibra monomodo (SMF-28) fue irradiada durante 120 ms, lo que permitió generar una estructura compuesta por 36 conos separados equidistantemente, con un período Λ = 600 µm, alcanzando una longitud total aproximada de 21 mm.

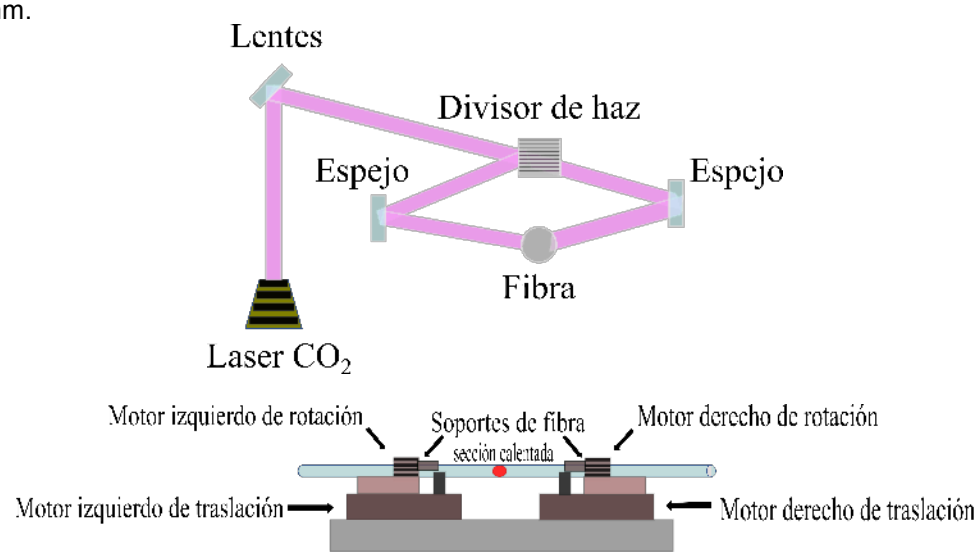


Figura 1. Sistema láser para la división del haz y deposición de calor en la fibra (arriba), esquema de fabricación de la RFPL (abajo).

La longitud de la RFPL es calculada mediante la ecuación 1, donde Λ es el periodo y *N* corresponde al número de conos generados en la fibra óptica [15]. Cuando generamos un cambio sobre la geometría de la fibra óptica obtenemos una variación del índice de refracción efectivo, además al obtener una simetría a lo largo de la RFPL nos garantiza un acoplamiento uniforme entre los modos del núcleo y del revestimiento [16].

$$\boldsymbol{L = N\Lambda} \qquad (1)$$

La respuesta de la RFPL está basada en una condición de resonancia, descrita mediante la teoría de modos acoplados entre núcleo y revestimiento de la fibra [17]. En este sentido, la longitud de onda de resonancia puede ser descrita de la siguiente manera:

$$\lambda_r = (n_{co}^i - n_{cl})\Lambda \quad (2)$$

Donde el índice ***i*** representa las variaciones del índice de refracción del revestimiento a través de su eje lento y rápido y n_{co} hace referencia al índice de refracción del núcleo. En la figura 2 podemos apreciar el esquema de la RFPL manufacturada mediante el sistema láser de CO_2, observando el periodo de los conos fabricados en la fibra monomodo estándar.

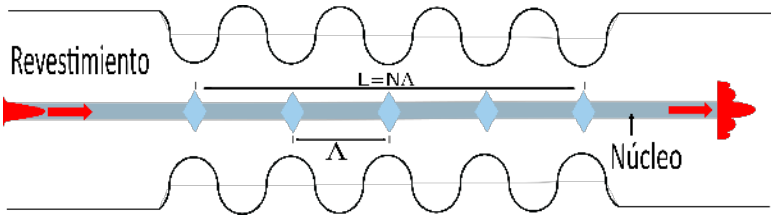


Figura 2. Esquema de la RFPL fabricada.

PARTE EXPERIMENTAL

En la figura 3 se presenta el esquema del arreglo experimental utilizado para monitorear las variaciones en la RFPL; el sistema de fibra de emisión espontánea, consta de una fuente de bombeo mediante un diodo láser operando a 261 mW (Q-photonics), la salida es conectada a un multiplexor por división de longitud de onda (WDM) 980/1550 nm, así la señal entra a un medio de ganancia de Erbio de 5 m con una concentración del dopante de 300 ppm y una absorción de la señal de 11.5 dBm (Thorlabs model m12-980-125), a la salida del medio amplificante se fusiona la RFPL, su respuesta fue monitoreada mediante un analizador de espectros ópticos (OSA Yokogawa AQ6370B). La RFPL fue sometida a variaciones de temperatura, deformación y curvatura. El esquema representativo, del experimento ante los distintos parámetros físicos mencionados, se puede observar en la figura 4.

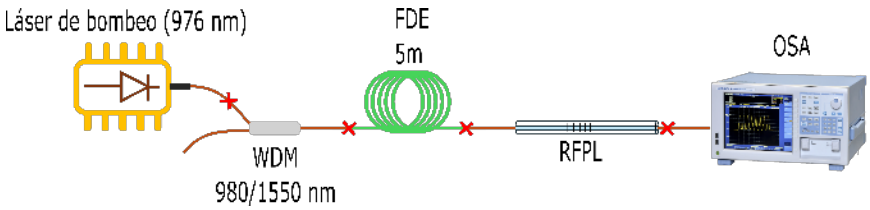


Figura 3. Arreglo experimental.

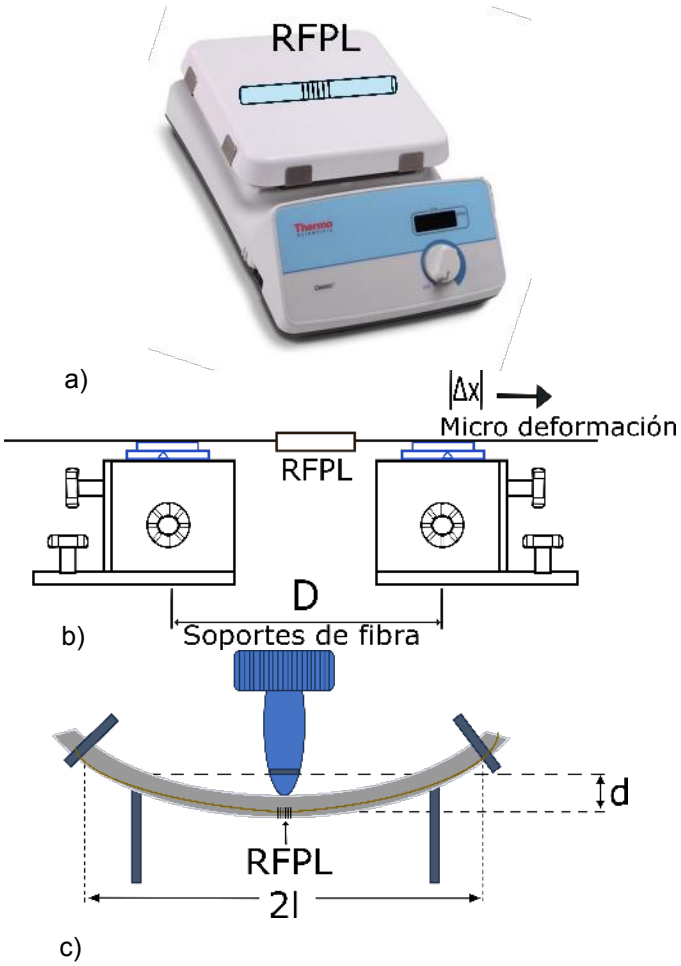


Figura 4. a) Placa controladora de temperatura, b) sistema mecánico de deformación. c) Sistema mecánico de curvatura.

Como se muestra en la Figura 4, la medición de la temperatura se realizó utilizando una placa térmica controlable (Thermo Scientific). En este arreglo, la rejilla fue colocada en contacto directo con la superficie de la placa. La variación de temperatura aplicada se llevó a cabo en un rango de 25 °C a 100 °C.

Por otro lado, la curvatura fue inducida mediante un mecanismo basado en una placa de acero sostenida por dos fijaciones mecánicas. En el centro del sistema, un controlador milimétrico permite ajustar el radio de curvatura aplicado sobre la placa metálica (véase Figura 4). El valor del radio de curvatura puede ser calculado utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2d}{(d^2 + l^2)} \qquad (3)$$

Donde ***R*** es el radio de curvatura, ***d*** es el desplazamiento medido en el centro de la placa y ***l*** es la mitad de la distancia entre los dos soportes de metal, la RFPL es posicionada justo al centro de la tira metálica.

Finalmente, en la Figura 4 también podemos observar el controlador mecánico de deformación aplicado sobre la RFPL, esta deformación es aplicada mediante una estación de movimiento de

traslación axial, donde de esta manera se puede evaluar la deformación aplicada sobre la rejilla mediante la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{D} \quad (4)$$

D es la distancia entre los sostenedores de la fibra (30 cm), y ***Δx*** son las micro variaciones axiales generadas sobre la rejilla.

RESULTADOS

Al analizar el espectro de transmisión de la rejilla al pasar a través de amplio espectro de erbio se obtienen dos picos de resonancia, presentes en λ_{r1}=1505.7 nm y λ_{r2}=1576.3 nm. con una profundidad máxima de 10.4 dB.

La figura 5 muestra la respuesta inicial de la fuente (ASE) de amplio espectro de erbio y los picos de transmisión presentes al insertar la rejilla.

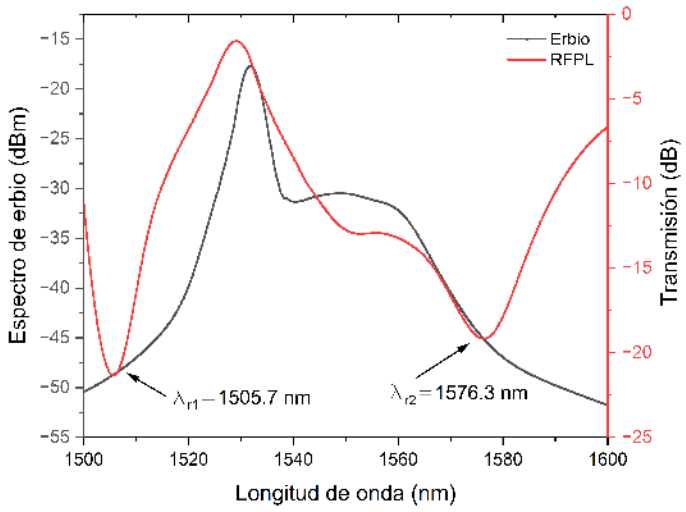
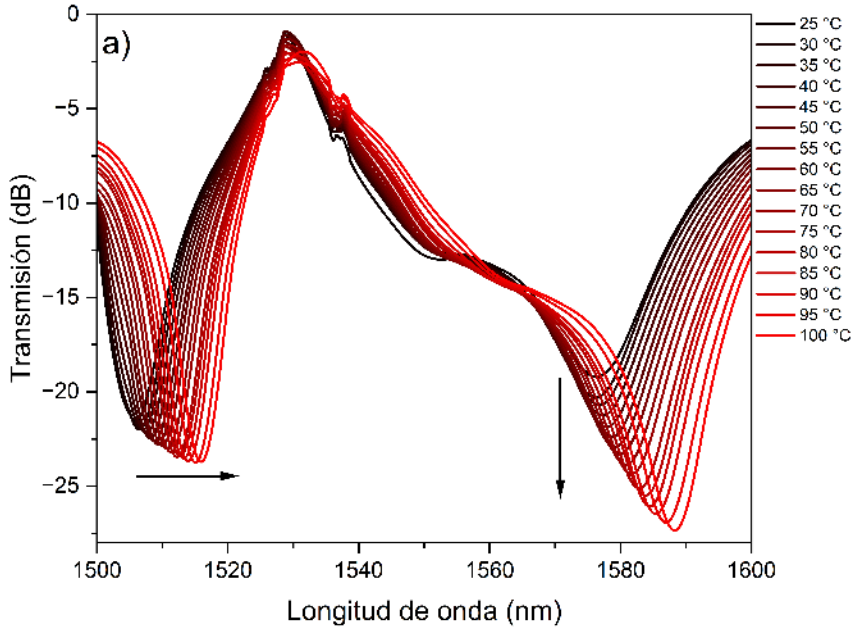
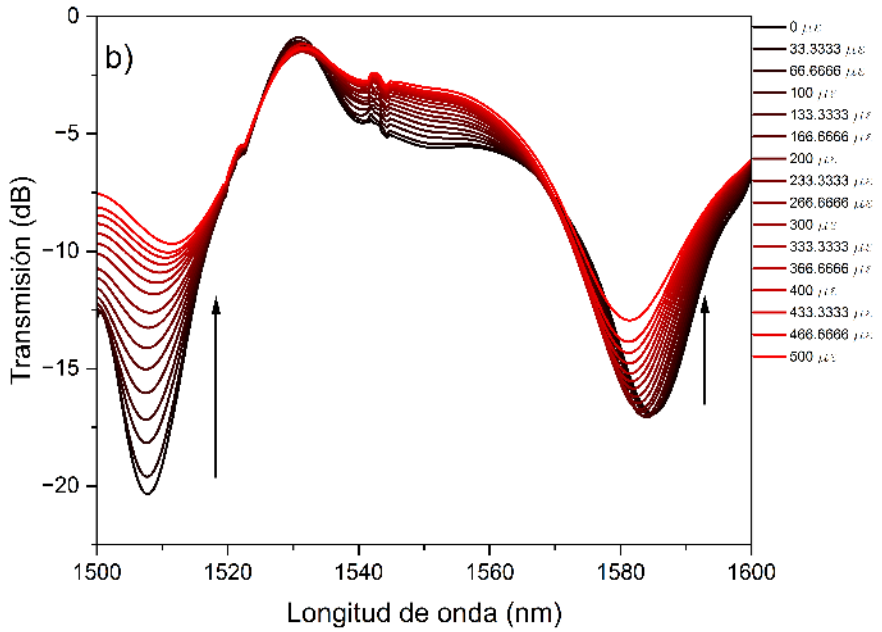


Figura 5. Respuesta espectral de la RFPL.

Los resultados de la respuesta espectral ante variaciones de temperatura, deformación y curvatura se presentan en la Figura 6 a–c). Se puede observar una doble respuesta de la rejilla cuando es sometida simultáneamente a curvatura y temperatura; es decir, los picos de resonancia no solo se desplazan espectralmente en longitud de onda, sino que también varían en su potencia de salida. En el caso de la deformación, se observa un incremento en la potencia de los picos de resonancia al aplicar una deformación axial sobre la rejilla.

Por otro lado, al analizar la sensibilidad del sistema, se obtuvieron valores máximos de: S_P=-0.1098 dB/°C, S_λ=162.6666 pm/°C en temperatura, S_P=-0.0213 dB/με, S_λ=7.6 pm/ με para deformación y S_P=23.1506 dB/m^{-1}, S_λ=51.7482 nm/ m^{-1} al aplicar curvatura. Finalmente, fue realizado un ajuste lineal arrojándonos resultados de 0.9952, 0.9449 y 0.9745 para temperatura, deformación y curvatura respectivamente.


a)
Transmisión (dB)
Longitud de onda (nm)
25 °C
30 °C
35 °C
40 °C
45 °C
50 °C
55 °C
60 °C
65 °C
70 °C
75 °C
80 °C
85 °C
90 °C
95 °C
100 °C


b)
Transmisión (dB)
Longitud de onda (nm)

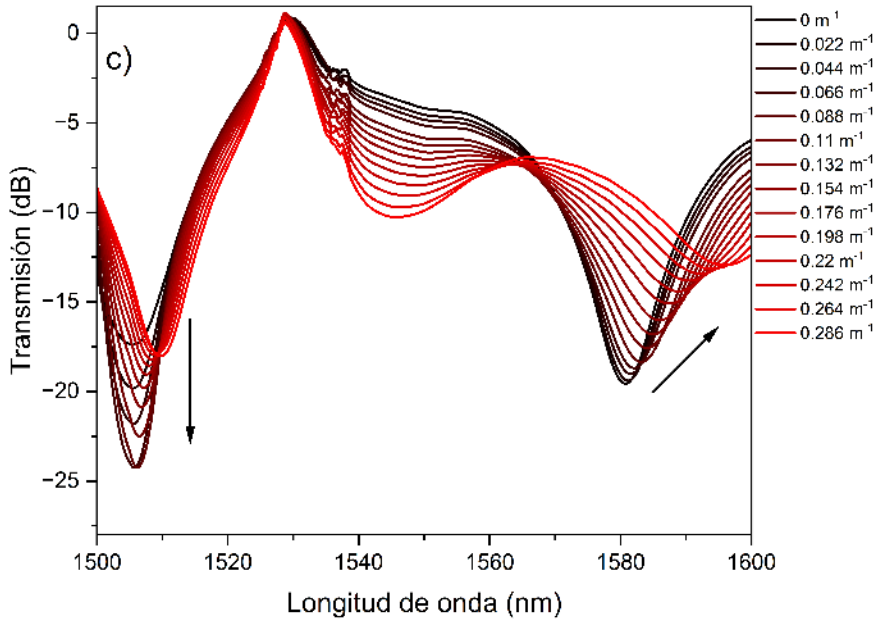


Figura 6. Parámetros físicos aplicados sobre la RFPL. a) Respuesta a temperatura. b) Respuesta a deformación. c) Respuesta a curvatura.

CONCLUSIONES

El esquema de monitoreo, presentado en este trabajo, se basa completamente en fibra óptica, y la fuente de banda ancha, generada mediante erbio ha mostrado que puede ser utilizada en una amplia variedad de interferómetros. La rejilla de período largo monitoreada muestra una forma bien definida en sus picos de resonancia, lo que la hace adecuada para su uso como señal de control y referencia, especialmente en aplicaciones donde es fundamental mantener la estabilidad del sistema.

A través del estudio desarrollado, se demostró la capacidad de multisensado de las rejillas de período largo, evidenciando su potencial en sistemas de monitoreo de múltiples variables físicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Zhang, Y., Yan, Y., Song, K., & Lv, M. (2019, December). Tunable and switchable multi-wavelength ytterbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation effect. In AOPC 2019: Advanced Laser Materials and Laser Technology (Vol. 11333, pp. 316-321). SPIE.
2. Bianchetti, M., Sierra-Hernandez, J. M., Mata-Chavez, R. I., Gallegos-Arellano, E., Estudillo-Ayala, J. M., Jauregui-Vazquez, D., ... & Rojas-Laguna, R. (2018). Switchable multi-wavelength laser based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer with non-zero dispersion-shifted fiber. Optics & Laser Technology, 104, 49-55.
3. Chun-Rui Hu, Mikhail N. Slipchenko, Ping Wang, Pu Wang, Jiandie D. Lin, Garth Simpson, Bing Hu, and Ji-Xin Cheng, "Stimulated Raman scattering imaging by continuous-wave laser excitation," Opt. Lett. 38, 1479-1481 (2013)
4. Sierra‐Hernandez, J. M., Castillo‐Guzman, A., Selvas‐Aguilar, R., Vargas‐Rodriguez, E., Gallegos‐Arellano, E., Guzman‐Chavez, D. A., ... & Rojas‐Laguna, R. (2015). Torsion

sensing setup based on a three beam path Mach‐Zehnder interferometer. Microwave and Optical Technology Letters, 57(8), 1857-1860.
5. Metcalf, A. J., Anderson, T., Bender, C. F., Blakeslee, S., Brand, W., Carlson, D. R., ... & Ycas, G. (2019). Stellar spectroscopy in the near-infrared with a laser frequency comb. Optica, 6(2), 233-239.
6. Mina, D. G., Haus, J. W., Chong, A., Khanolkar, A., Sarangan, A., & Hansen, K. (2017). Bi-tapered fiber sensor using visible to near infrared light. Sensors and Actuators A: Physical, 263, 285-290.
7. He, W., Zhu, L., Meng, F., Song, Y., & Dong, M. (2019). Selectable and stable C-band multi-wavelength ring cavity erbium-doped fiber laser employing Sagnac loop and tunable filter. Optik, 176, 528-534.
8. Luo, X., Tuan, T. H., Saini, T. S., Nguyen, H. P. T., Suzuki, T., & Ohishi, Y. (2018). Spacing-adjustable multi-wavelength erbium-doped fiber laser using a fiber Michelson interferometer. Applied Physics Express, 11(8), 082501.
9. He, W., Zhu, L., Dong, M., Lou, X., & Luo, F. (2018). Wavelength-switchable and stable-ring-cavity, erbium-doped fiber laser based on Mach–Zehnder interferometer and tunable filter. Laser Physics, 28(4), 045104.
10. Gao, S., Luo, M., Jing, Z., & Chen, H. (2020). A tunable dual-wavelength fiber ring-cavity laser based on a FBG and DFB laser injection. Optik, 203, 163961.
11. Liu, S. X., Wang, C. H., Zhu, X. J., Bu, C. X., & Zhang, G. J. (2012). Arbitrarily switchable multi-wavelength Yb-doped fiber lasers with phase-shifted long-period fiber grating. Laser Physics, 22, 1260-1264.
12. Wang, Y. (2010). Review of long period fiber gratings written by CO2 laser. Journal of Applied Physics, 108(8).
13. Martinez-Rios, A., Monzon-Hernandez, D., Salceda-Delgado, G., & Torres-Gomez, I. (2012). Long period fibre gratings. INTECH Open Access Publisher.
14. Porraz-Culebro, T. E., Martinez-Rios, A., Toral-Acosta, D., Madrazo-de-la-Rosa, K., Enriquez-Gomez, L. F., Sierra-Hernandez, J. M., & Salceda-Delgado, G. (2019). Characteristics of LPFGs Written by a CO_2-Laser Glass Processing System. Journal of Lightwave Technology, 37(4), 1301-1309.
15. Contreras-Teran, M. A., Gallegos-Arellano, E., Jauregui-Vazquez, D., Martinez-Rios, A., Hernandez-Garcia, J. C., Reyes-Ayona, J. R., & Sierra-Hernandez, J. M. (2024). Spacing mode multi-wavelength erbium doped fiber laser based on a symmetrical long-period fiber grating. Physica Scripta, 99(9), 095517.
16. Block, U. L., Dangui, V., Digonnet, M. J., & Fejer, M. M. (2006). Origin of apparent resonance mode splitting in bent long-period fiber gratings. Journal of lightwave technology, 24(2), 1027.
17. Erdogan, T. (2002). Fiber grating spectra. Journal of lightwave technology, 15(8), 1277-1294.

EL ESTADO DE ESFUERZOS UNIAXIAL DEL CONCRETO REFORZADO

Oscar Eduardo Martínez Sánchez [1], Jatziri Y. Moreno Martínez [2], Arturo Galván Chávez [2], Edgar Mauricio Acosta García [3]

[1] Universidad Autónoma de Querétaro, [2]Univeridad de Guanajuato, [3]Universidad Autónoma Metropolitana.

oscarmtzsanchez98@outlook.com

RESUMEN

El comportamiento mecánico y físico de las estructuras de concreto reforzado ante diferentes tipos de carga desempeña un papel primordial y su negligencia conduciría a una respuesta estructural deficiente que podría ocasionar una falla en la estructura. El empleo de modelos numéricos en estas estructuras, utilizando el Método de los Elementos Finitos, permite "predecir" su respuesta estructural conduciendo a un diseño más eficiente. Este estudio se basa en un ensayo de un prisma sujeto al desempeño de una prueba uniaxial como una alternativa sencilla de simular el comportamiento a compresión de estos elementos. El modelo propuesto toma en cuenta las hipótesis que involucran al agrietamiento bajo un enfoque difuso el cual considera la influencia de la no linealidad del material. La presencia de una grieta en un punto de integración se representa modificando la relación esfuerzo-deformación unitaria, mediante un plano débil en la dirección normal a la cara de la grieta. Para simular el concreto se utilizaron elementos finitos tridimensionales isoparamétricos que tienen la capacidad de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión. El criterio de falla es descrito por la formulación de Willam y Warnke para materiales cuasifrágiles. No obstante, se utilizó el criterio de Drucker Prager para tomar en cuenta las deformaciones plásticas sufridas por el material. Por otra parte, el acero de refuerzo se modeló usando elementos finitos unidimensionales tipo barra, es decir, se utilizó un enfoque discreto, considerando la curva de endurecimiento isotrópico multilineal, de esta manera es posible obtener la deformación unitaria que presenta el acero de refuerzo y la carga asociada. La simulación numérica mediante el Método de Elemento Finito permitió validar el desarrollo del agrietamiento y aplastamiento en las zonas esperadas en pruebas experimentales reportadas de laboratorio, así como la curva esfuerzo-deformación unitaria la cual mostró buena similitud. Con lo que es posible concluir que la estrategia de modelación empleada predice de manera correcta lo sucedido en pruebas experimentales que a su vez representan el comportamiento más cercano a la realidad de elementos de concreto reforzado.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto han sido estudiadas durante varias décadas mediante investigaciones analíticas, experimentales y modelación numérica considerando la influencia del acero de refuerzo longitudinal, transversal u otro tipo de arreglo de refuerzo.

El modelo numérico es una herramienta que permite replicar pruebas experimentales y realizar más casos de análisis que no implican volver a realizar inversión de gastos en construcción de nuevos especímenes. El programa ANSYS cumple con los criterios anteriores y es bien conocido por su uso en distintas áreas de la ingeniería para modelar fenómenos y elementos mediante el Método de Elemento Finito (MEF) (Avci & Bhargava, 2019, Barbosa & Riberio, 1998, Dahmani & Khennane, 2010). Este programa muestra las fallas en una superficie de concreto. Esta se presenta en forma de grietas y si se utiliza un modelo de sólidos capaz de reproducir el agrietamiento disperso para evaluar el daño causado por las cargas aplicadas al modelo.

Se han utilizado otros programas de análisis para estructuras de concreto reforzado (Mordini, 2006). Algunos ejemplos son el programa LS-DYANA (Hallquist, 2016) y ABAQUS (2000). Sin embargo, se optó por utilizar el programa ANSYS por la accesibilidad, y efectividad comprobada en la modelación de elementos estructurales de concreto reforzado al compararlo con resultados experimentales y teóricos (Fanning, 2001, Joshuva, *et al.*, 2014).

MODELOS CONSTITUTIVOS DE MATERIALES

Un modelo constitutivo es una formulación matemática que describe el comportamiento físico macroscópico de un sólido ideal, que resulta de aplicar hipótesis sobre un sólido real. Por lo que la formulación de modelos constitutivos solo representa una realidad condicionada para ciertas hipótesis y por tanto su utilización debe realizarse consecuentemente con ellas (Oller, 2001).

El desarrollo e implantación de un modelo constitutivo que represente el comportamiento del concreto es una tarea difícil, como es bien sabido el concreto es un material cuasi-frágil con un comportamiento a compresión que difiere de su comportamiento a tensión (Kachlakev *et al*., 2001). De acuerdo con la Figura 1, donde se muestra una curva típica esfuerzo-deformación unitaria del concreto bajo un estado de esfuerzos uniaxial, el concreto exhibe un comportamiento elástico-lineal hasta un valor aproximado del 30% de su resistencia máxima a compresión. Posterior a ese punto, el esfuerzo aumenta no-linealmente hasta alcanzar su resistencia máxima a compresión *f'c*.

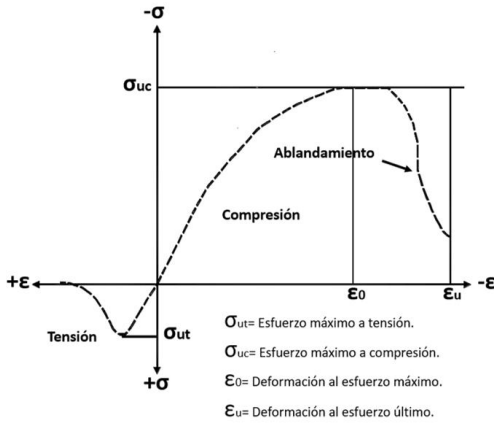


Figura 1. Curva esfuerzo-deformación típica del concreto.

Finalmente, se presenta una zona de ablandamiento donde la curva desciende y eventualmente se presentan la falla por aplastamiento a compresión al alcanzarse su deformación última. Sin embargo, a tensión la curva es aproximadamente elástica-lineal hasta desarrollar su resistencia máxima a tensión f_t. Posterior a este punto, el concreto se agrieta y su resistencia disminuye (ablandamiento) hasta llegar a cero.

Por lo tanto, existen distintos tipos de modelos constitutivos cada uno con su respectivo grado de dificultad y exactitud al momento de representar el comportamiento físico macroscópico del material que deseamos estudiar. De manera "general" los modelos constitutivos se pueden clasificar como: a) elásticos (elástico lineal o elástico no-lineal), b) elastoplástico y c) daño (mediante degradación del material con ablandamiento) mostrados en la Figura 2.

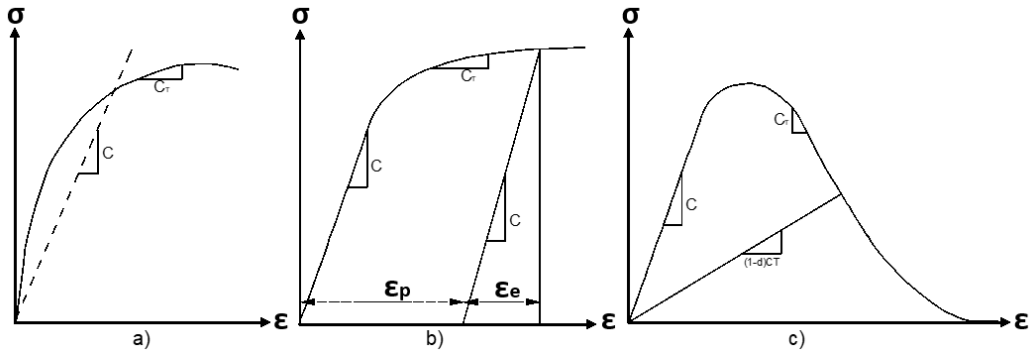


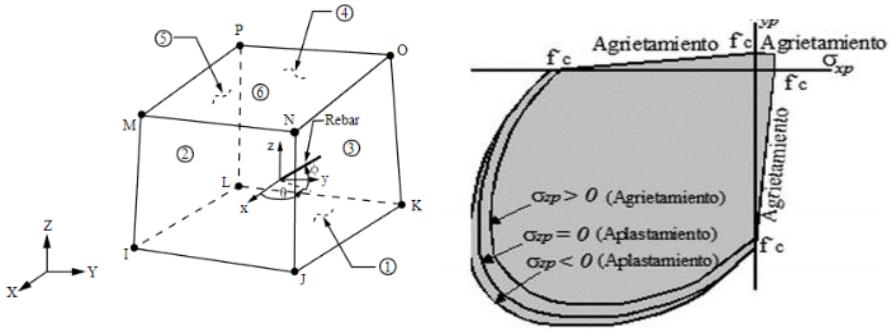
Figura 2. Modelos constitutivos: a) elástico; b) plástico; c) daño.

Se pueden considerar y utilizar modelos empíricos, cuyos datos y leyes constitutivas se obtienen de experimentos de laboratorio realizados al material deseado.

Modelado del concreto

Existen diversas técnicas utilizadas para el modelado de elementos estructurales de concreto reforzado empleando el MEF. Estos se basan generalmente en reemplazar el material continuo original por un ensamble de sólidos que representen al concreto y la unión de nodos mediante elementos barra que representan el acero de refuerzo.

Uno de los elementos sólidos, disponible en ANSYS, más utilizados es el SOLID65, este es comúnmente usado para la modelación de concreto reforzado. El elemento SOLID65 (Figura 3a) es un elemento sólido isoparamétrico de 8 nodos al cual se le pueden asignar propiedades mecánicas elásticas e inelásticas del material, incluso tiene la capacidad de considerar al acero de refuerzo mediante cuantías en tres diferentes direcciones. Con este elemento es posible modelar la capacidad que tiene el concreto de agrietarse en tensión y aplastarse en compresión, incluyendo el desarrollo de deformaciones plásticas lo cual se logra combinando el modelo de daño que utiliza este elemento, el modelo constitutivo para el concreto sometido un estado de esfuerzos triaxiales propuesto por Willam & Warnke (1975) (Figura 3b),La modelación considera el criterio de Drucker Prager para tomar en cuenta las deformaciones plásticas sufridas por el material.



a) b)

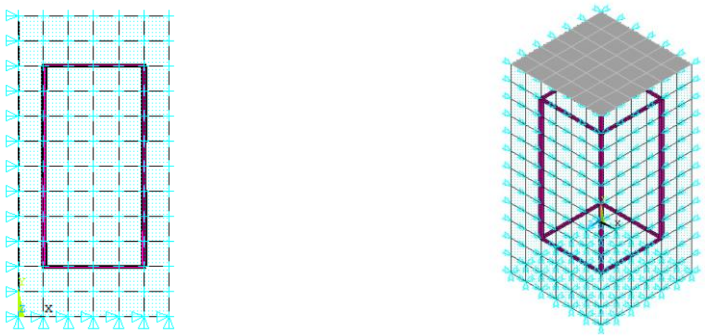
Figura 3. Modelo constitutivo del concreto (ANSYS, 2016): a) SOLID65; b) superficie de falla para el concreto.

Modelado del acero

El acero de refuerzo longitudinal y transversal fue modelado discretamente usando el elemento barra LINK8-3D introduciendo un modelo de endurecimiento isotrópico multilineal. El criterio de fluencia de Von Mises fue usado para describir el comportamiento plástico.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se muestran en la Figura 4a y 4b. También se muestra la malla de elementos finitos de un prisma con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 30 cm sujeto a una prueba uniaxial como una alternativa sencilla de simular el comportamiento a compresión de estos elementos.



a) b)

Figura 4. Condiciones de frontera y aplicación de la carga: a) vista lateral; b) vista isométrica.

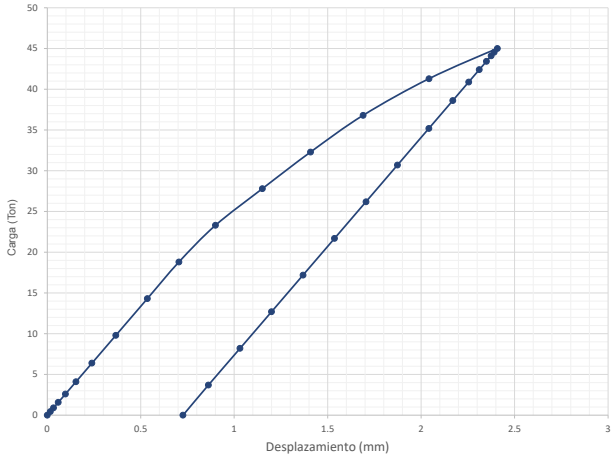


Figura 5. Curva Carga-desplazamiento del prisma.

La respuesta del modelo en la obtención de la curva carga-desplazamiento en los puntos de control brinda una buena aproximación considerando la etapa elástica e inelástica como se ilustra en la Figura 5. La modelación mostró resultados del comportamiento completo de aplicar carga en el prisma. Dicha modelación permitirá modelar otros elementos de concreto reforzado.

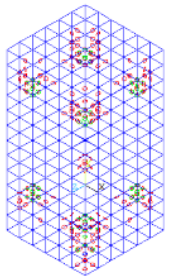


Figura 6. Daño en el prisma

El desarrollo e implantación de un modelo constitutivo que represente el comportamiento del concreto es una tarea difícil, como es bien sabido el concreto es un material cuasi-frágil con un comportamiento a compresión que difiere de su comportamiento a tensión. El método funciona mejor cuando es aplicado en concreto reforzado como se observa en la Figura 6.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Basado en las hipótesis de modelación aplicadas en el prisma se optó por calibrar con una prueba experimental que corresponde a un extremo recortado de viga (Moreno-Martínez & Meli, 2014) el cual mostró un comportamiento similar al modelo numérico como se muestra en la Figura 7.

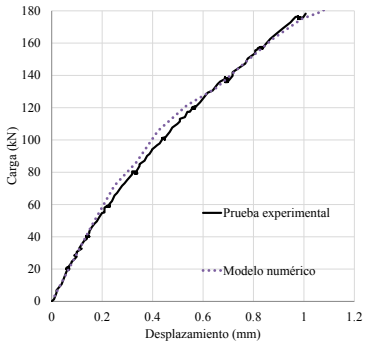


Figura 7. Curvas Carga-desplazamiento.

RESULTADOS

La modelación mostró resultados del comportamiento completo de aplicar carga y descarga en el prisma. También permitió modelar otros elementos de concreto reforzado como se mostró en la Figura 7 utilizando las hipótesis establecidas para la modelación, la similitud del modelo fue muy similar a la prueba experimenta ya que prácticamente mostró la misma rigidez.

CONCLUSIONES

Se logró reproducir el comportamiento de un elemento de concreto reforzado aplicando las hipótesis de modelación para el prisma. El Método de Elemento Finito proporciona información sobre el comportamiento del material y puede ser aplicado a numerosos problemas de mecánica utilizando elementos isoparamétricos en tres dimensiones, así como reproducir el agrietamiento y el aplastamiento en el concreto.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. G. Evans, “Perspectiva on the development of high-toughness ceramics”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, 2, 1990, pp. 187-206.
2. T. Kreis, “Speckle Metrology,” in *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996), Chapter 4, pp. 125-149.
3. A. Barbosa, G. Riberio, “Analysis Of Reinforced Concrete Structures Using Ansys Nonlinear Concrete Model”, Computational Mechanics, New Trends and Applications, 2018.
4. A. Mordini, “Three-Dimensional Numerical Modeling of Reinforce Concrete Behavior”, Doctorate in Civil Engineering, University of Parma, 2006.
5. ABAQUS/Standard User’s Manual, Ver 6.1 Hibbit, Karlsson and Sorensen, 2000.
6. Ansys, “Documentation for ANSYS”. ANSYS Workbench Release v. 16.2, 2016, ANSYS Inc. USA.
7. D. I. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat, T. Potisuk, “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates”, Reporte SPR 316, 2001, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA and Oregon State University, Corvallis, OR for Oregon Department of Transportation, mayo.
8. J. Hallquist, “LS-DYNA Theory Manual”, Livermore Software Technology Corporation, 2006, pp 259-474.
9. J. Y. Moreno-Martínez, R. Meli, “Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beam”, Engineering Structures, Vol. 75, 2014, pp. 152-163. doi: https://doi-org/10.1016/j.engstruct.2014.05.051
10. K. William, E. Warnke, "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete", Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 19. ISMES. Bergamo, Italy, 1975, pp. 174.

11. L. Dahmani, A. Khennane, S. Kaci, “Crack Identification in Reinforced Concrete Beams Using ANSYS Software”, ISSN 0556-171X, 2010, pp. 141-153.
12. N. Joshuva, S. Saibabu, P. Sakaria, K. Lakshmikandhan, P. Sivakumar, “Finite element analysis of reinforced and pre-tensioned concrete beams”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014, pp 449-457.
13. O. Avci. & A. Bhargava, “Finite-Element Analysis of Cantilever Slab Deflections with ANSYS SOLID65 3D Reinforced-Concrete Element with Cracking and Crushing Capabilities”, Pract. Period. Struct. Des. Constr., vol. 24 (1), 2019.
14. P. Fanning, “Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams”, Electronic Journal of Structural Engineering, 2001, pp 111-119.
15. S. Oller, “Fractura mecánica”, 2001, Un enfoque global. CIMNE, España.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LA CAPILLA DEL SEÑOR DE LA COLUMNA EN LA CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN

Andrea Rodríguez Fuentes [1], Guillermo Martínez Ruiz [2], José Manuel Jara Guerrero[2]

[1] Egresada de la Especialidad en Restauración de Sitios y Monumentos Históricos, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. [2] Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
0452872J@umich.mx, guillermo.martinez@umich.mx, jose.jara@umich.mx

RESUMEN

Se presenta una evaluación del comportamiento sísmico del Templo del Señor de la Columna en la ciudad de Morelia, Michoacán, el cual es un inmueble histórico cuya conclusión está datada en el año de 1780, por lo que forma parte del catálogo de momentos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), edificio que fue modelado numéricamente y sometido a una demanda sísmica probabilista con una recurrencia de 475 años. Para este trabajo se construyó un modelo compuesto por 26,423 elementos finitos elásticos tridimensionales para conformar los muros y torre campanario, 207 elementos finitos tipo placa para modelar el cupulín de la torre campanario, y 63 elementos tipo barra para incluir las vigas de madera que forman la cubierta de la nave.

La demanda sísmica fue introducida al modelo numérico mediante espectros elásticos de revisión, y se realizaron análisis sísmicos modales espectrales considerando la combinación de cargas muertas, vivas instantáneas y la acción sísmica incluyendo los efectos bidireccionales establecidos por la normativa vigente. Como resultados se presentan los niveles de desplazamiento lateral máximos siendo de 7.41 centímetros en el punto más alto de la torre, el cual, excede los 2.73 centímetros recomendados como estado límite de servicio por la normativa actual. Por otro lado, el desplazamiento máximo para los muros formeros de la nave resultante de 2.20 centímetros también excede el valor permisible por norma de 1.038 centímetros. Los desplazamientos anteriores denotan la posibilidad de daños en los macroelementos mencionados, situación que se corrobora con los esfuerzos principales a tracción obtenidos en la base de la torre, los cuales alcanzaron valores de hasta 17 kilogramos por centímetro cuadrado los cuales producen daño en la mampostería, partiendo de la hipótesis de que la misma tiene una resistencia nula ante esfuerzos de tracción.

Se puede concluir que, de presentarse un sismo probabilista con las características del considerado, podría producir daños de consideración en la base de la torre campanario, así como en la interacción de ésta con la fachada principal, por lo que el presente trabajo permitirá emprender acciones futuras que nos lleven a una correcta conservación hacia el futuro de éste bello edificio de la ciudad de Morelia.

INTRODUCCIÓN

La Capilla del Señor de la Columna (Figura 1) forma parte de los monumentos históricos de Morelia, Michoacán. Inicio su construcción en 1769 y finalizo en 1780. Su fundación fue promovida por los vecinos de esta zona en ese entonces (el barrio de negros) quienes fueron esclavos evangelizados y formaban parte de la mano de obra para la edificación de la Nueva Valladolid. La capilla está compuesta de una sola nave y una torre y su estilo es barroco sobrio.

En 1940 tras la llegada del padre Saturnino García Lara la Capilla fungió como escuela Apostólica de San Juan Bosco, donde se preparaban a los jóvenes para el sacerdocio. En 1984 el techo de la capilla colapso y fue con ayuda de los vecinos que se logró cambiar la viguería y techumbre; tras estos sucesos la Capilla presenta problemas de humedad en la techumbre, lo que genera daños en los muros y en las puntas de las vigas de madera. Además, se han identificado grietas estructurales, lo que hace necesario realizar una evaluación sísmica para determinar el nivel de riesgo que representa el inmueble.



Figura 1. Capilla del Señor de la Columna vista desde el atrio a) y vista interior b).

DEMANDA SÍSMICA

Se realizó un análisis sísmico modal espectral de la estructura considerando un espectro elástico de revisión obtenido a partir del peligro sísmico del sitio, incorporando los efectos del sitio a partir de funciones de amplificación obtenidas mediante la Red Sísmica Nicolaita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Jara *et al.*, 2025). El espectro elástico empleado (Figura 2) presenta un valor máximo de aceleración en su meseta igual a 3.70m/s^2, fue construido para un periodo de retorno de 475 años y de manera conservadora, con un porcentaje de amortiguamiento crítico del 5%.

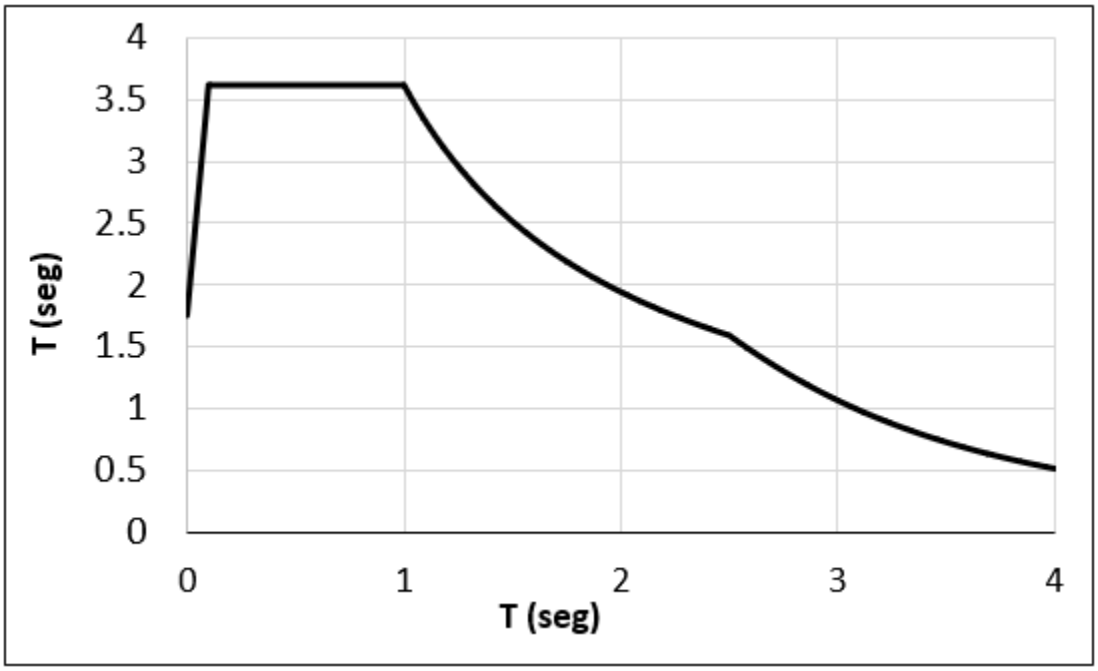


Figura 2. Espectro elástico de revisión para la demanda sísmica con una recurrencia de 475 años.

MODELADO NUMÉRICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se modeló la capilla mediante elementos finitos tridimensionales con comportamiento elástico lineal en los muros y torre campanario, elementos finitos tipo placa para modelar el cupulín de la torre campanario, y elementos tipo barra para incluir las vigas de madera que forman la cubierta de la nave (Figura 3).

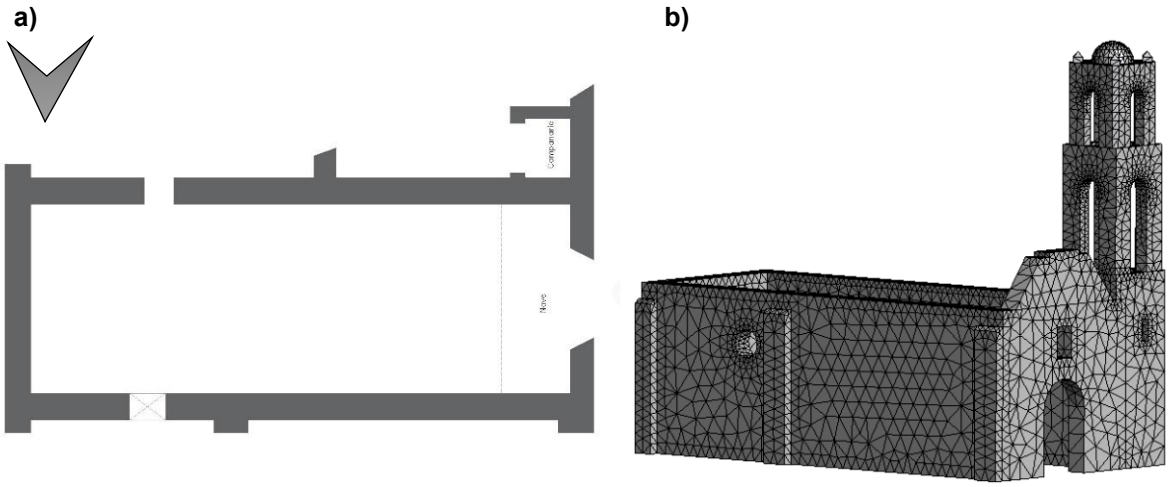


Figura 3. Planta arquitectónica de la nave y torre a) y malla de elementos finitos b).

Formas modales

Se estimaron 30 modos de vibración, de los cuales el primero corresponde a flexión de la torre campanario paralelamente a la dirección larga de la nave con un valor de 0.67 segundos, el segundo corresponde a flexión de la torre campanario paralela a la dirección corta de la nave con un periodo de vibración 0.66 segundos, el tercero está asociado a la flexión transversal de la nave con un valor de 0.35 segundos, el cuarto se corresponde a torsión de la torre campanario con un valor de 0.28 segundos y el quinto modo de vibración está asociado a la torsión en la nave con un valor de 0.22 segundos. El resto son modos superiores que no contribuyen significativamente en la participación dinámica del inmueble. Es importante hacer notar que a los primeros cinco modos mencionados les corresponde la aceleración máxima de la zona horizontal del espectro mostrado en la Figura 2, por lo que es de esperarse una respuesta elástica importante ante tal demanda sísmica.

Análisis sísmico modal espectral

Se llevó a cabo un análisis sísmico modal espectral considerando la combinación de cargas muertas, vivas instantáneas y la acción sísmica involucrando efectos bidireccionales; lo anterior implicó combinar el 100% de la acción sísmica en una dirección horizontal con el 30% de la acción en sentido perpendicular, realizando un total de nueve combinaciones de carga. Las vigas ubicadas en la dirección corta de la nave fueron modeladas mediante elementos finitos tipo barra y fueron cargadas con la carga muerta, carga viva máxima y carga viva instantánea.

Desplazamientos laterales máximos para la torre

De las nueve combinaciones el desplazamiento máximo en el punto más alto de la torre campanario fue de 7.41 centímetros (Figura 4), el cual, comparado con el desplazamiento máximo permisible por la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo (NTCS-23) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, el cual es igual a 0.0015 de la altura, y que para la altura de

torre que es de 18.2 metros arroja un valor de 2.73 centímetros; se observa claramente que éste este último valor es mucho menor que el obtenido para el sismo de diseño, lo cual, normativamente no cumple con el Estado Límite de Servicio denotando que la torre presentará daños. En la Figura 4 para fines de facilidad en la visualización se incrementó gráficamente el desplazamiento obtenido.

Desplazamientos laterales máximos para la nave

De las nueve combinaciones el desplazamiento máximo ocurre en la parte más alta de los muros laterales con un valor de 2.20 centímetros (Figura 4), el cual, comparado nuevamente con el desplazamiento máximo permisible por la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo (NTCS-23) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, y considerando la altura de los muros laterales que es igual a 6.92 metros, se obtiene un desplazamiento permisible reglamentario de 1.038 centímetros, el cual, nuevamente es excedido por el obtenido con el sismo de revisión con período de recurrencia de 475 años, el cual podría llegar a producir daños a la mitad de la longitud de la nave, que es la zona de muros con el mayor desplazamiento observado.

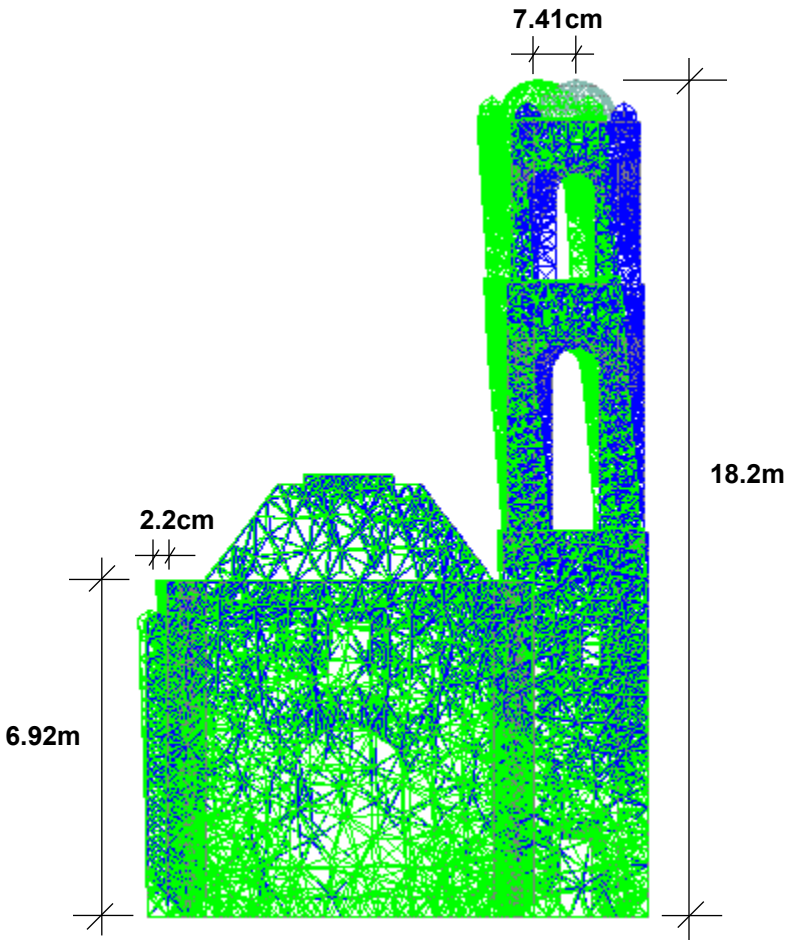


Figura 4. Desplazamiento máximo en la torre campanario y muros laterales para el sismo de 475 años de periodo de retorno.

Estado de esfuerzos en la estructura

Del análisis estructural con elementos finitos ante el sismo de revisión se obtuvieron los estados de esfuerzos principales en las tres direcciones ortogonales de la estructura. Los esfuerzos S1

corresponden a la dirección corta del edificio (Figura 5), los S2 a la dirección larga (Figura 6) y los S3 a la dirección vertical del mismo (Figura 7).

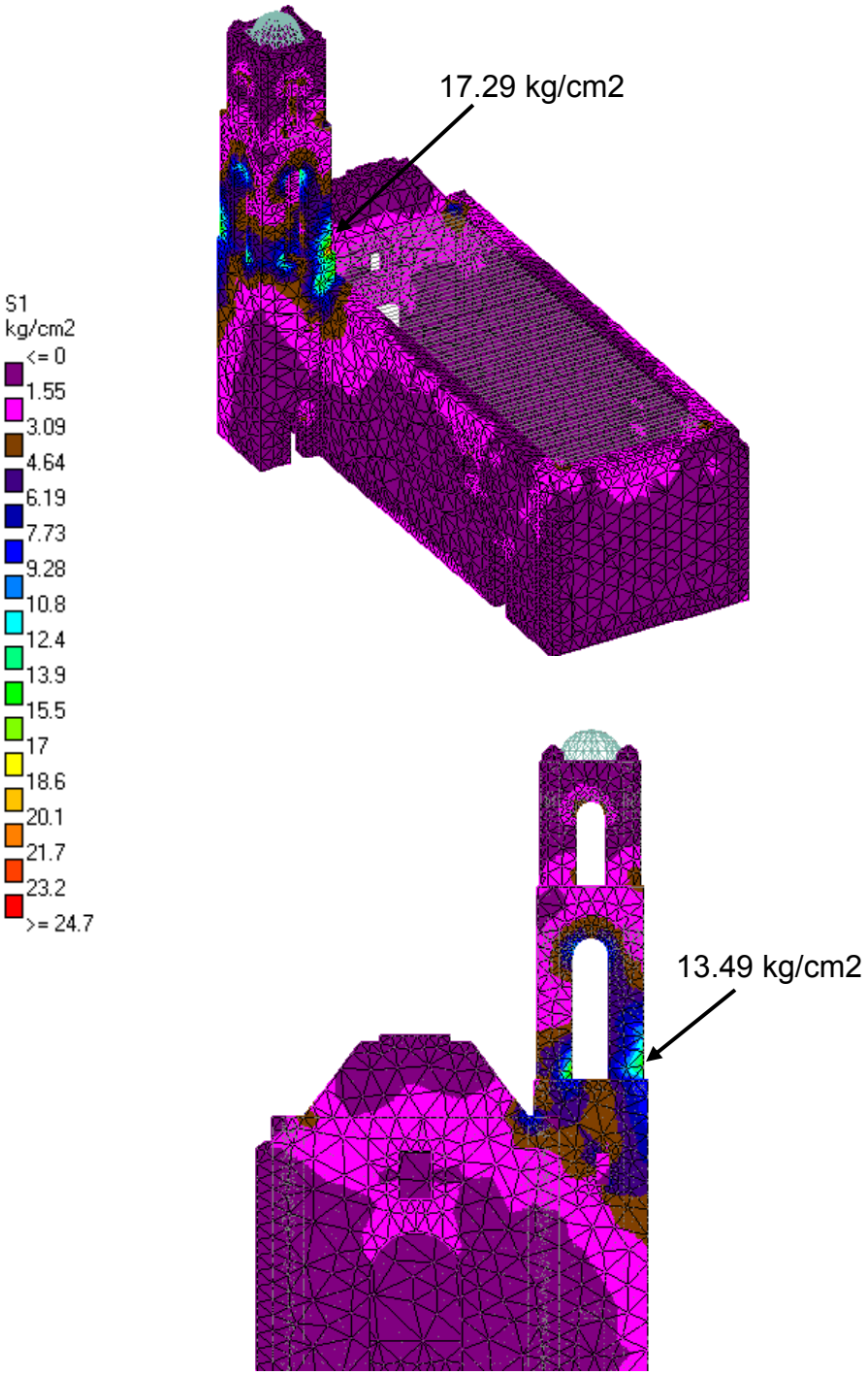


Figura 5. Esfuerzos principales S1 para el sismo de 475 años de periodo de retorno.

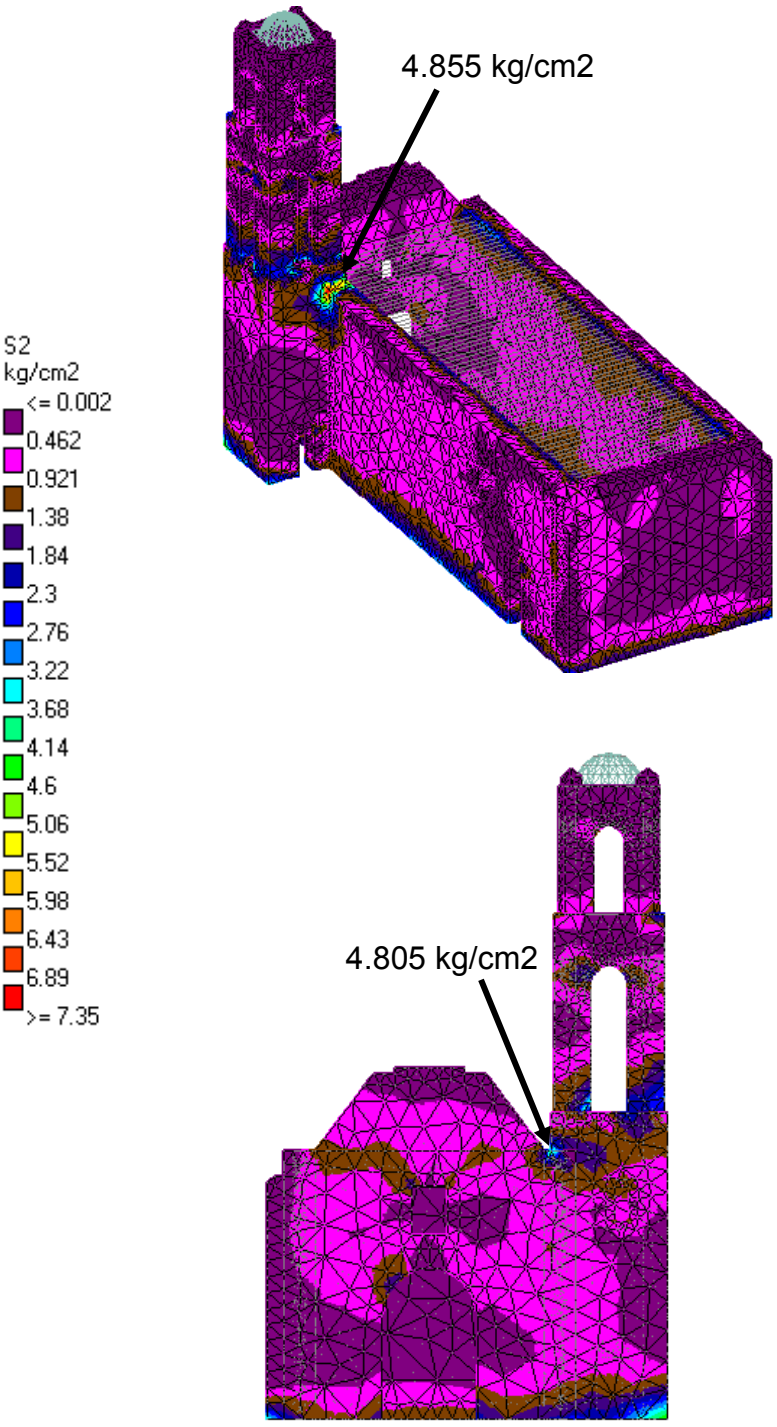


Figura 6. Esfuerzos principales S2 para el sismo de 475 años de periodo de retorno.

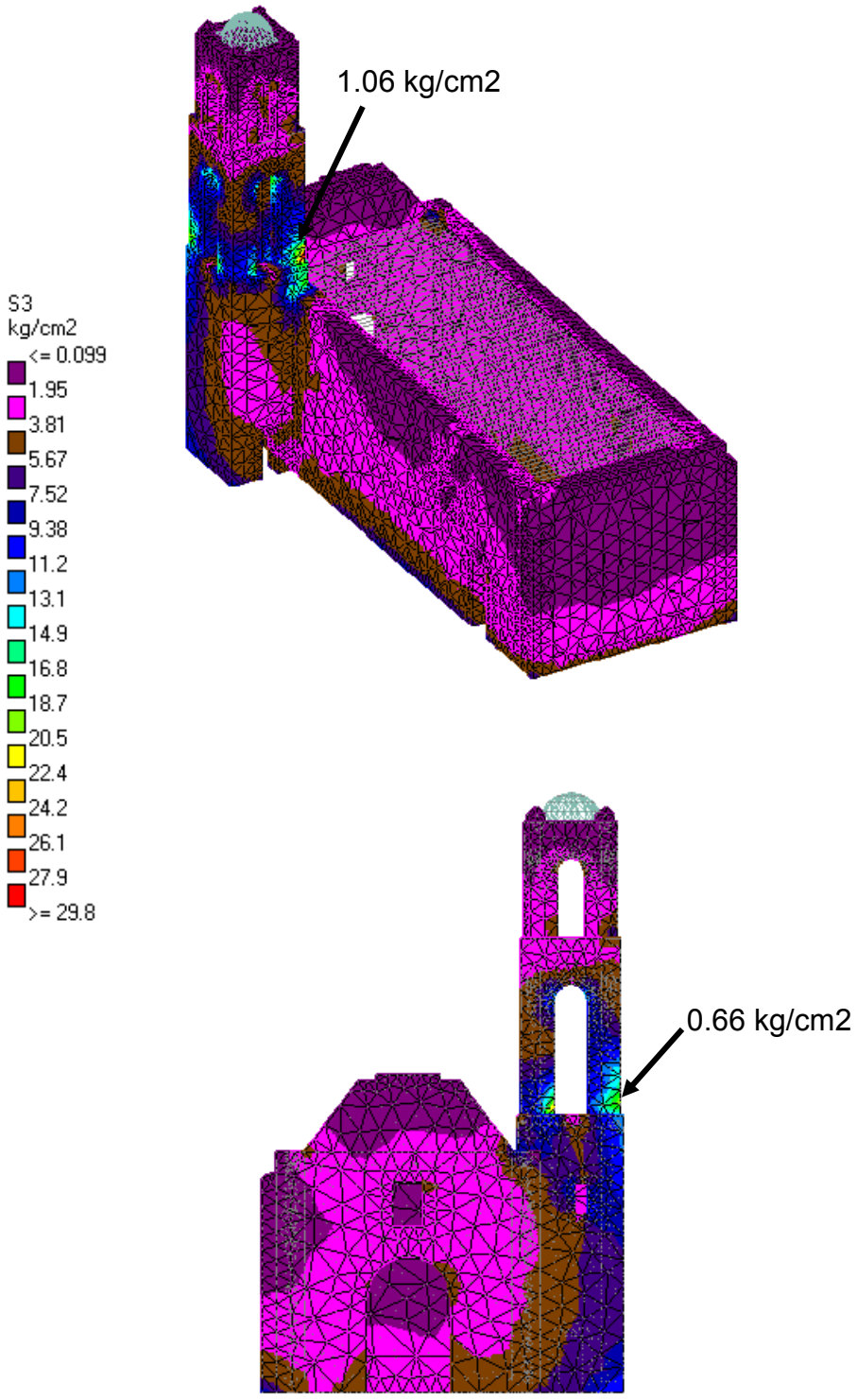


Figura 7. Esfuerzos principales S3 para el sismo de 475 años de periodo de retorno.

PROPIEDADES MECÁNICAS Y RESISTENTES

La capilla esté edificada a base de mampostería de cantera unida con mortero de cal, la cual posee una alta capacidad de resistencia a la compresión, sin embargo, su resistencia a tensión es muy baja por lo que para fines prácticos se podría considera nula. Sin embargo, en la Tabla 1 (Meli, 1998) se presentan las propiedades mecánicas, así como los parámetros de resistencia considerados para el presente trabajo.

Tabla 1 Tabla de propiedades mecánicas de mampostería en edificios históricos

Material	Peso Volumétrico (Ton/m^3)	Resistencia a la compresión (kg/cm^2)	Resistencia a la cortante (kg/cm^2)	Módulo de elasticidad (Kg/cm^2)
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10-15	0.5	5000
Mampostería de piedra de buena calidad con mortero de cal	2.0	30	2.0	20 000

Es posible entonces comparar los esfuerzos a tensión y compresión obtenidos del análisis estructural, con la finalidad de verificar el nivel de seguridad de la estructura, así como poder determinar los elementos más vulnerables.

RESULTADOS

Resulta relevante señalar que el espectro del sismo utilizado para la revisión de la capilla del Señor de la Columna, fue obtenido a partir de un riguroso estudio probabilista de peligro sísmico en el sitio y calibrado con los registros sísmicos de eventos reales obtenidos con la Red Sísmica Nicolaita, lo cual proporciona la confiabilidad razonable para el escenario de daño obtenido. En las tres direcciones de esfuerzos principales, y mayormente para los esfuerzos horizontales, se obtuvieron tensiones con un valor máximo de 17.29 y 4.855 kg/cm^2, los cuales exceden el valor permisible de 2 kg/cm^2 reportado en la Tabla 1, lo cual, evidencia que ante un sismo con las características consideradas, la torre campanario sufriría los mayores daños en su interacción con la nave, y en menor grado en la zona del campanario, condición que se corresponde con los desplazamientos laterales obtenidos, que se verificó exceden los máximos admisibles por la norma vigente para mampostería de piedra.

CONCLUSIONES

Se presentan niveles de desplazamientos lateral máximos que exceden los permisibles por la normativa vigente, lo cual se corresponde con los valores de esfuerzos en la base de la torre campanario, lo que evidencia una marcada interacción entre ambos elementos estructurales. Los muros laterales, aunque presentan desplazamientos laterales que exceden los permisibles, no presentan zonas de tensiones excesivas, por lo que se esperarían daños ligeros para el escenario sísmico analizado. Con lo anterior, se concluye que, de presentarse el sismo probabilista con una recurrencia de 475 años en suelo firme, que es sobre el que se encuentra desplantada la capilla, podrían producirse daños en la torre por interacción entre la misma y la nave, lo cual, obliga a llevar a cabo estudios más profundos que permitan estimar estrategias de intervención de cara a preservar éste bello edificio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jara JM, Estrada A, Gaytan R, Olmos BA, Martínez G. "Effect of the Seismic Source on the Probabilistic Hazzard Assessment a Heritage City in Mexico: A case study of Morelia". Nat. Hazards Rev., ASCE, 2025, 26(2): 05025002. DOI: 10.1061/NHREFO.NHENG-2281.
2. NTCS-23. Norma Técnica Complementaria para el Diseño Por Sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 6 de noviembre de 2023.
3. Meli, R. Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos. Fundación ICA. México D.F., 1998.

INSTRUMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL EMPLEADA PARA LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS NO INVASIVOS DE IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS ROTODINÁMICOS

Arturo Aguilar Pérez[1], María de la Luz Delgadillo Torres[2], Jacinto Cortés Pérez[1], Alberto Reyes Solís[1], Sergio Guillermo Torres Cedillo[1], Juan Carlos García Hernández[3]

[1]Facultad de Estudios Superiores Aragón - UNAM, [2]TecNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, [3]Instituto Politécnico Nacional - SEPI ESIME Zacatenco.
arturoaguilar8s5@aragon.unam.mx.

RESUMEN

México tiene sus principales industrias en el sector automotriz, petroquímico, cemento y construcción, textil, bebidas, alimentos, minería y turismo en los cuales, por cierto, la instrumentación es largamente utilizada. Sin embargo, en los últimos años, el mundo de la instrumentación y del control de procesos ha entrado en una era de cambio total, en la cual los aparatos de medición, trasmisión y automatización se hacen cada vez más necesarios en la mejora de los procesos. Con base en lo anterior y centrados en el desarrollo de pruebas no invasivas para identificar fallas en sistemas rotodinámicos, se implementó un sistema de adquisición de datos en una plataforma experimental. Este paso permitió continuar avanzando en el desarrollo de técnicas efectivas para la identificación de desbalance y balanceo, aplicables tanto a turbinas aéreas como a sistemas automotrices, con el objetivo de proponer nuevas metodologías que ofrezcan servicios de mantenimiento más eficientes en estas industrias. Es importante mencionar que la enseñanza y el desarrollo de elementos que conforman maquinaria rotativa y sus vibraciones han sido poco consideradas en la formación de ingenieros. Como resultado, las empresas mexicanas recurren a compañías extranjeras para resolver este tipo de problemas. El desarrollo de esta plataforma responde a la necesidad de contar con avances tecnológicos y recursos humanos altamente especializados en estos campos de la ingeniería, lo que permitirá reducir la dependencia científico-técnica del extranjero. La instrumentación de esta plataforma fue dividida en tres etapas. La primera comprende la identificación de los elementos que componen al del banco de pruebas, la segunda etapa fue la selección del equipo para instrumentar la plataforma y el cual está conformado por acelerómetros, cables, canales de entradas analógicas, un chasis, un variador de frecuencia y una PC y en la tercera etapa se implementó el equipo y se desarrolló el sistema de adquisición de datos que permita validar tanto los modelos dinámicos, como los métodos propuestos. Una vez concluidas las etapas anteriores se procedió a verificar el comportamiento del sistema al comparar modelos teóricos con las bases de datos generadas a partir de la información recibida de los sensores en pruebas programadas en el variador de frecuencia. En conclusión, la puesta en marcha de la plataforma experimental proporcionará un medio para validar experimentalmente técnicas no invasivas de identificación de desbalance en sistemas rotodinámicos, con el fin de obtener soluciones innovadoras en áreas como la automotriz o aeronáutica en beneficio de la sociedad mexicana.

INTRODUCCIÓN

La instrumentación industrial es una de las áreas más importantes en cualquier planta o proceso, ya que permite medir, controlar y registrar variables en los equipos, tanto de forma manual como automática, según se requiera. Esto facilita la automatización de los procesos sin comprometer la vida o la integridad de los operadores. Además, permite identificar oportunamente condiciones peligrosas, como altas presiones, temperaturas, flujos o niveles, cuando las líneas de proceso superan los límites de operación. Asimismo, posibilita el monitoreo continuo de variables en procesos potencialmente peligrosos para las personas y los equipos presentes en una instalación [1].

La instrumentación constituye la columna vertebral de cualquier operación en plantas, estaciones o sistemas industriales. Por esta razón, es fundamental conocer los diversos dispositivos y técnicas utilizados en la industria de procesos para monitorear y controlar las condiciones operativas de un

sistema específico. Esto permite no solo supervisar el funcionamiento del proceso, sino también optimizar su desempeño. En otras palabras, los elementos de la instrumentación industrial permiten validar lo que realmente ocurre dentro del proceso, determinar si este se está desarrollando conforme a los objetivos establecidos, y, en caso necesario, intervenir sobre ciertos parámetros del sistema para aplicar acciones preventivas o correctivas [2].

En particular, industrias como la aeronáutica, que priorizan la reducción de vibraciones transmitidas al fuselaje del avión para garantizar el confort del pasajero, y la automotriz, que busca minimizar las vibraciones transmitidas al chasis del vehículo con el fin de mejorar la experiencia del usuario y reducir los costos de mantenimiento, han impulsado el desarrollo de sistemas capaces de identificar fallas mediante métodos no invasivos en sistemas rotodinámicos. En este contexto, el presente trabajo aborda la instrumentación de un banco de pruebas diseñado específicamente para este tipo de análisis.

TEORÍA

Antecedentes.

Los adelantos en el diseño de turbinas áreas ha tomado en cuenta consideraciones económicas y ambientales para la optimización de las estructuras de estos sistemas rotodinámicos. Actualmente, las turbinas constan con rotores más ligeros, y soportados en estructuras flexibles con poco amortiguamiento inherente. Donde, los rodamientos de película comprimida mejor conocidos en inglés como Squeeze-film Damper (SFD), proporcionan un medio muy rentable para introducir el amortiguamiento en tales estructuras. No obstante, los armazones de avión son flexibles y altamente sensibles a la vibración de excitación derivada por los rotores de alta y baja presión.

Investigaciones previas [3–5] han presentado y modelado un típico ensamble de turbinas de avión, que tiene dos rotores coaxiales montados dentro de un armazón flexible a través de SFDs. Estos trabajos reportan que dentro de los daños más comunes e identificados en las turbinas de avión se encuentra el desbalance en sus rotores. Este daño puede ser provocado por: imperfecciones en el material del rotor, errores de manufactura (o ensamble), perdida de un alabe (en casos extremos), desgaste de los alabes, deformación térmica, etc. También el desbalance es considerado la principal fuente de vibración que se transmite de la turbina hacia fuselaje a través de los de los “Engine mounts”. De acuerdo con lo anterior, la investigación de técnicas efectivas de identificación de desbalance para turbinas aéreas podrá satisfacer las demandas de la industria aeronáutica y paralelamente reducir los efectos nocivos en la turbina de avión.

En la Figura 1, se presenta un par de turbinas de avión montadas directamente al ala del avión. Esta figura se presenta para explicar los elementos ineludibles que requiere una plataforma experimental para simplificar la estructura de una turbina de avión. Además, un número considerable de trabajos publicados que estudian la respuesta vibratoria de turbinas de avión comercial, modelan la estructura de las turbinas tomando en cuenta solo los siguientes elementos: Montaje, Rotor, Carcasa y Soportes rotor-carcasa (SFDs) [6-8].



Figura 1. Aviones comerciales con 2 turbinas en cada ala [9].

En la Figura 2, se ilustra la estructura del sistema de suspensión de un vehículo, donde se observan los elementos principales, los cuales sufren problemas en su funcionamiento cuando la vibración ocasiona la desalineación del giro, siendo el eje de velocidad constante y el pivote de dirección. Las señales que proporcionaran información acerca del desequilibrio de las ruedas son principalmente las vibraciones en el volante que mantiene una correlación a mayor velocidad, vibraciones en toda la carrocería del vehículo, impresión de derrape en la parte de trasera, específicamente al desplazarse en caminos curvos y desgaste inusual de la banda de rodadura [10].



Figura 2. Suspensiones de un automóvil [11].

Por lo anterior descrito, la plataforma experimental que se presenta en la Figura 3 es capaz de simplificar los elementos principales de la estructura de sistemas rotodinámicos. Se puede observar que el desbalance será generado a través de los anillos de desbalance o discos de desbalance. Su selección dependerá de la inclusión de efectos giroscópicos, los cuales aumentan la complejidad de la dinámica del sistema. Por otra parte, el ensamble rotor-carcasa es soportado por columnas, las cuales simulan el soporte entre la carcasa y el ala de avión o la suspensión de un automóvil como se muestra en las Figuras 1 y 2. Es importante mencionar que mediante el uso de diferentes diámetros de estas columnas será posible modificar su rigidez, esto servirá para la generación de diferentes casos de estudio y validación. Así mismo, la flexibilidad del el rotor y la carcasa se toma en cuenta para emular condiciones aproximadas a la realidad.

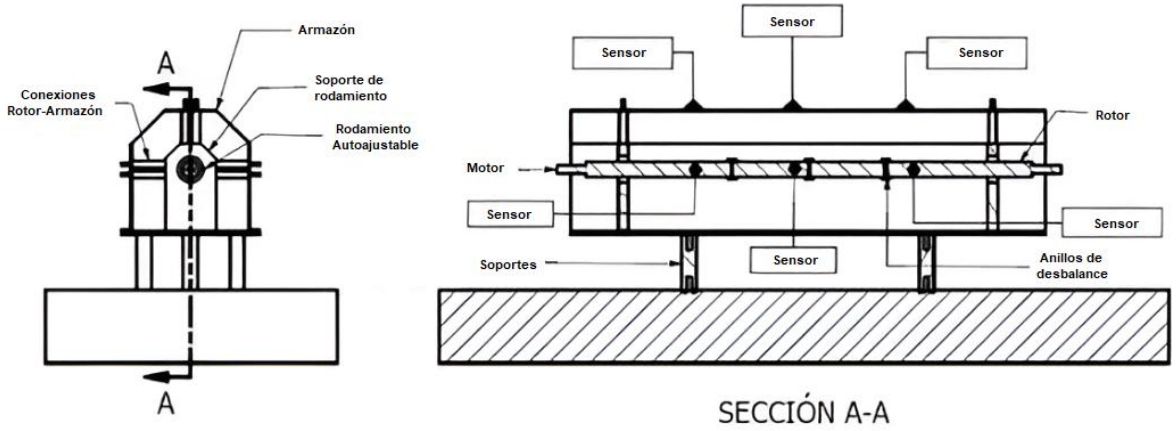


Figura 3. Diseño conceptual de la plataforma experimental.

Metodología.

El desarrollo del banco de pruebas que se muestra en la Figura 4, está orientado a industrias como la aeronáutica y la automotriz, donde la reducción de la vibración transmitida a través de la estructura es una prioridad clave para mejorar la experiencia del pasajero. Por ello, es fundamental enviar toda la información generada por el sistema a una computadora, con el fin de construir bases de datos que faciliten el análisis detallado de los datos obtenidos.



Figura 4. Vista general de la plataforma experimental.

Para instrumentar la plataforma experimental y enviar la información a la computadora central para generar bases de datos se definieron 3 etapas:

- Identificación del banco de pruebas.
- Selección de sensores, sistema de adquisición de datos e interfaz de usuario.
- Implementación y desarrollo del sistema de adquisición de datos.

Plataforma experimental.

Los principales componentes que conforman el banco de pruebas son: la placa de bancada, los pedestales, los rodamientos, el eje principal o eje del rotor, la carcasa, un motor trifásico, un variador de frecuencia marca Yaskawa V1000®, la estructura de la plataforma y los tornillos de sujeción, como se muestra en la Figura 5.

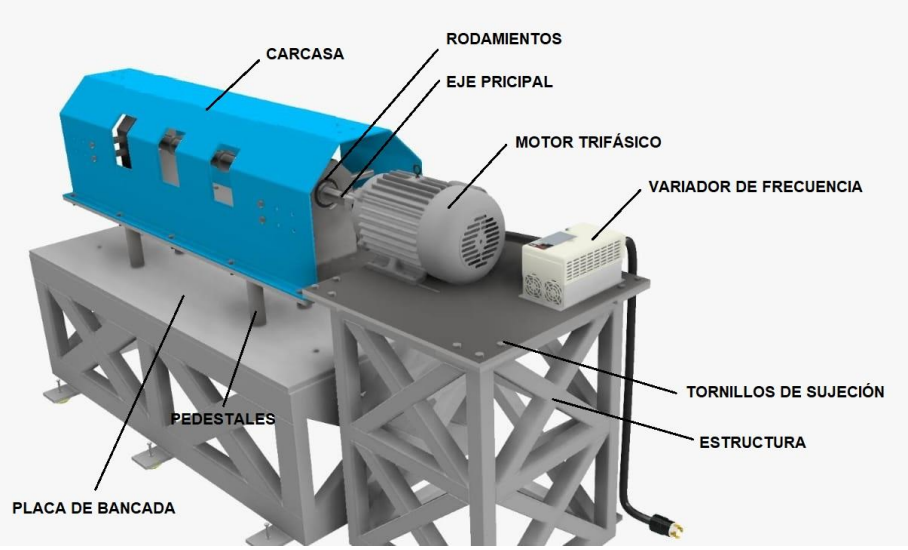


Figura 5. Componentes del banco de pruebas.

Con el fin de identificar las áreas donde se realizará la instrumentación, se elaboró una representación básica del sistema a analizar, la cual se muestra en la Figura 6.
En este esquema se ilustra la relación entre los distintos componentes del sistema rotodinámico, destacando en color verde los sistemas de soporte, los cuales establecen una relación explícita entre sí. Esta representación permite localizar las zonas donde es posible medir las fuerzas generadas por el movimiento del sistema. Además, facilita su interpretación y posterior implementación en el software de análisis por elementos finitos.

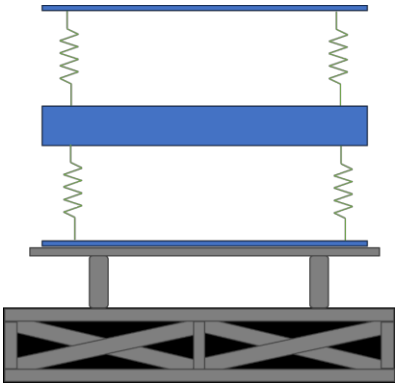


Figura 6. Esquema simplificado del sistema rotodinámico utilizado.

PARTE EXPERIMENTAL

Instrumentación de la plataforma experimental.

La instrumentación de la plataforma experimental se realizó considerando que el equipo involucrado debe detectar la respuesta vibratoria efectuada y esta se compone de sensores piezoeléctricos del tipo acelerómetro, un módulo de adquisición de datos y un equipo de cómputo con el software encargado a la captura de datos. Además de una interfaz hombre máquina que permitirá tener una interacción amigable entre la plataforma y el usuario.



a) Modelo 352C03. b) Modelo 352C33. c) Cable 003C10.

Figura 7. Acelerómetros uniaxiales [12].

Dentro de la amplia variedad de acelerómetros con disponibilidad a su empleo y compatibles con el módulo de adquisición de datos, destacan un par de modelos de acelerómetros uniaxiales del fabricante PCB Piezotronics, los cuales proporcionan soluciones precisas y versátiles para una variedad de aplicaciones de medición de vibración. El modelo 352C03, presentado en la Figura 7a; es un acelerómetro cerámico genérico, con una sensibilidad de 10 mV/g y un rango de medición de ±500 g pico, proporcionando una respuesta en frecuencia (±5 %) de 0.5 a 10000 Hz; la conexión se realiza fácilmente a través de un conector BNC y un cable 003C10. Por otro lado, el modelo 352C33, como se muestra en la Figura 7b; destaca por su alta sensibilidad de 100 mV/g y un rango de medición de ± 50 g pico, ofreciendo una respuesta en frecuencia (±5 %) de 0.5 a 10000 Hz; junto con la misma conexión BNC y cable 003C10, ilustrado en la Figura 7c; lo que garantiza una integración sin problemas en sistemas de medición existentes [12].



a) Martillo de impacto modelo 086C03. b) Cable BNC-012A10.

Figura 8. Martillo de impacto [13].

Entre los accesorios esenciales empleados en el análisis de vibración libre se encuentra el martillo de impacto, el cual debe ser compatible con el módulo de adquisición de datos. En este caso, se utilizó el martillo PCB Piezotronics modelo 086C03, mostrado en la Figura 8a, que ofrece una solución confiable y precisa para la realización de mediciones de impacto, gracias a su sensor de fuerza integrado y puntas intercambiables.
Este dispositivo cuenta con una masa de 0.16 kg y una frecuencia de resonancia mínima de 22 kHz, lo que le permite un rendimiento óptimo. Su sensibilidad es de 2.25 mV/N, con un rango de medición de ±2224 N pico, lo que garantiza una captura precisa de los datos generados por los impactos. La conexión al sistema de adquisición se realiza mediante un cable BNC-012A10, como se muestra en la Figura 8b [13].



Figura 9. Módulo de adquisición modelo KRYPTON-4xACC de Dewesoft® [14].

De igual manera, otro de los componentes que más destaca de este sistema instrumental; es el módulo de adquisición de datos modelo KRYPTON-4xACC del fabricante Dewesoft®, en la Figura 9; el cual ofrece un diseño robusto con una versatilidad excepcional para diversas aplicaciones y entornos de trabajo, dotado con cuatro canales; cada uno con la capacidad de operar a una velocidad de muestreo simultánea de 20 kS/s garantizando la captura de datos precisa en tiempo real, admite entradas de voltaje e IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric), con un conversor ADC (Convertidor Analógico a Digital) delta-sigma de 24 bits y un filtro anti-aliasing integrado [14].
El software utilizado para la adquisición de datos es DewesoftX®, desarrollado por la empresa Dewesoft. Este fue seleccionado con el objetivo principal de simplificar el proceso de medición

científica, permitiendo la captura y el análisis de datos provenientes tanto de fuentes analógicas como digitales. La interfaz del software se presenta en la Figura 10.

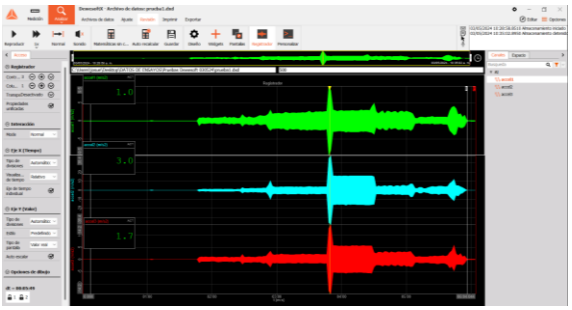


Figura 10. Interfaz gráfica del software DewesoftX®.

Es importante señalar que el acceso a DewesoftX® está vinculado al uso de un módulo de adquisición de datos de la misma marca, ya que la licencia correspondiente se encuentra integrada en el dispositivo adquirido a través de un proveedor autorizado.



Figura 11. Motor principal y variador de frecuencia.

Por otra parte, la plataforma experimental es operada mediante un variador de frecuencia, mostrado en la Figura 11, el cual dispone de un panel con display y teclado alfanumérico para su puesta en marcha. Sin embargo, esta configuración representa una limitación, ya que su manipulación requiere conocimientos técnicos especializados, al ser necesario ingresar parámetros específicos para su correcta operación. Esto evidencia la necesidad de implementar un sistema de control más accesible, que permita regular de forma sencilla tanto el sentido de giro como la velocidad, facilitando así su uso en entornos de investigación y docencia.



Figura 12. HMI Marca Samkoon® [15].

Para resolver ese inconveniente se procedió a implementar una interfaz hombre máquina de la marca Samkoon® que se muestra en la Figura 12, la cual cuenta con un puerto RS485, el cual puede vincularse de manera correcta con el variador de frecuencias, modelo Yaskawa V1000®, a través del protocolo de comunicación Modbus RTU [15].

Implementación

La colocación de los acelerómetros sobre la carcasa del sistema se realizó en las posiciones indicadas en la Figura 13, señaladas mediante recuadros de color rojo. De igual forma, la ubicación del martillo de impacto se encuentra destacada dentro del recuadro de color amarillo.

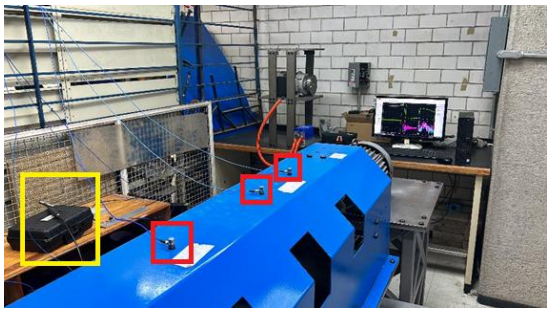


Figura 13. Ubicación de acelerómetros y martillo de impacto.

En la Figura 14 se muestra la conexión de los acelerómetros al sistema KRYPTON, el cual forma parte del equipo de adquisición de datos de la marca Dewesoft. Este sistema permite la integración eficiente de múltiples sensores mediante entradas específicas, garantizando una transmisión precisa y sincronizada de la información. La conexión de los acelerómetros se realiza utilizando cables blindados con conectores compatibles, lo que asegura la integridad de la señal y minimiza posibles interferencias electromagnéticas durante el proceso de adquisición. Esta configuración resulta fundamental para obtener mediciones confiables en los análisis de vibración del sistema.

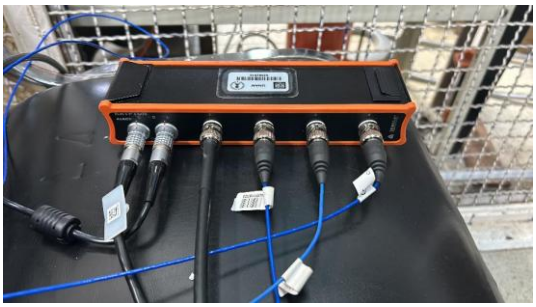


Figura 14. Conexión de los sensores al sistema KRYPTON.

Posteriormente, se realizó la conexión de la interfaz hombre-máquina (HMI) mediante un cable diseñado específicamente para enlazarla con el variador de frecuencia utilizando el protocolo de comunicación Modbus RTU. Para ello, se fabricó un cable al que se le soldó, en uno de sus extremos, un conector DB9 hembra, utilizando los pines 8 y 9, conforme a las especificaciones indicadas en los manuales de uso tanto del variador como de la HMI. Esta conexión se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Conexión de la HMI al variador de frecuencia.

Finalmente, se llevó a cabo la programación de la interfaz hombre-máquina (HMI), así como la configuración de los parámetros operativos del variador de frecuencia y del sistema de adquisición de datos. Este proceso fue esencial para garantizar la correcta comunicación entre los distintos componentes del sistema y permitir un control eficiente de la plataforma experimental.



Figura 16. Programación de equipos.

La interfaz programada, mostrada en la Figura 16, permite al usuario interactuar de manera intuitiva con el sistema, facilitando la selección de variables como la velocidad de rotación y el sentido de giro del motor. Una vez completada esta etapa de configuración, se procedió con la puesta en marcha de la plataforma experimental, asegurando su operatividad bajo las condiciones deseadas para la realización de pruebas de vibración y análisis dinámico.

Puesta en marcha.
Una vez completado el proceso de instrumentación del sistema, se procedió a la puesta en marcha de la plataforma experimental.

Para iniciar su operación, fue necesario ingresar ciertos parámetros fundamentales, tales como la frecuencia de operación y el sentido de giro del motor, los cuales condicionan el comportamiento dinámico del sistema durante las pruebas.



Figura 17. Puesta en marcha del banco de pruebas.

Esta configuración se realizó a través de la interfaz previamente programada, permitiendo una interacción directa con el variador de frecuencia y facilitando el control preciso del sistema. La Figura 17 muestra la pantalla correspondiente en la que se introducen estos valores. destacando la facilidad de uso que ofrece la interfaz para su aplicación tanto en entornos de investigación como en actividades docentes.

RESULTADOS

La visualización de los datos capturados se lleva a cabo mediante el software especializado DewesoftX, el cual no solo permite monitorear en tiempo real las señales adquiridas, sino que también facilita la configuración y calibración de los sensores conectados al sistema de adquisición y a la computadora.

Este entorno de software ofrece una interfaz gráfica intuitiva que permite personalizar la disposición de los canales de medición, aplicar filtros, establecer umbrales de activación y seleccionar parámetros específicos para cada tipo de sensor, ya sea analógico o digital.

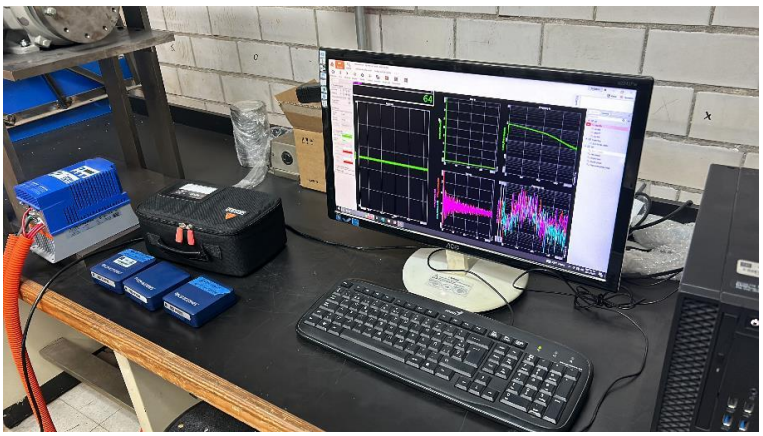


Figura 18. Captura del software DewesoftX.

En la Figura 18 se muestra una vista general de la interfaz del software durante una sesión de adquisición, donde es posible observar la organización de los datos en forma gráfica y numérica, lo que resulta fundamental para un análisis detallado del comportamiento dinámico del sistema.

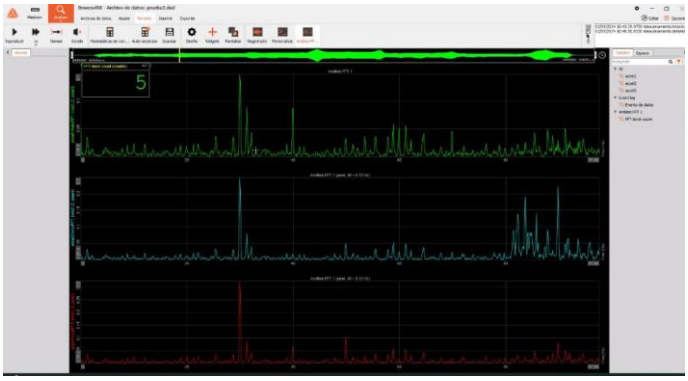


Figura 19. Respuesta de los acelerómetros.

Este software permite realizar análisis de los datos capturados, ya sea en tiempo real, o en una etapa de procesamiento posterior a la captura y la Figura 19 muestra el análisis de frecuencia de la señal capturada de cada acelerómetro.

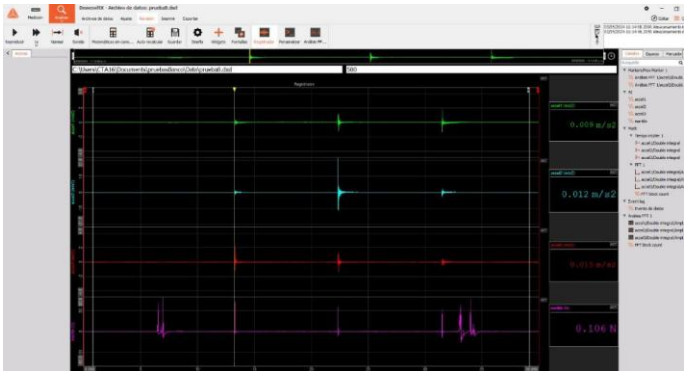


Figura 20. Captura de datos y respuesta al impacto.

Para las pruebas realizadas con el martillo de impacto, la Figura 20 muestra los datos capturados correspondientes a la aceleración y la fuerza de impacto ejercida sobre el sistema. A diferencia de las pruebas con el motor en funcionamiento continuo, esta metodología permite observar con mayor

claridad la respuesta transitoria del sistema ante un estímulo puntual, revelando los efectos de la vibración inducida en el momento exacto del impacto sobre la carcasa.

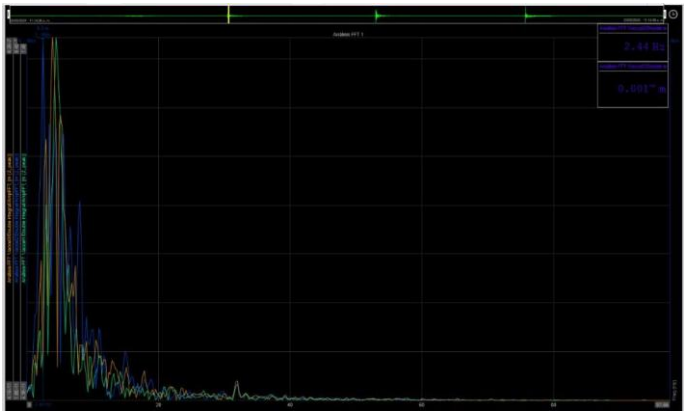


Figura 21. Respuesta al martillo de impacto.

Este tipo de prueba es especialmente útil para el análisis modal experimental, ya que permite identificar las frecuencias naturales y los modos de vibración del sistema. Al igual que en las pruebas con motor, los datos adquiridos pueden ser procesados en el dominio de la frecuencia, lo que facilita la caracterización dinámica del sistema. Este análisis espectral puede apreciarse en la Figura 21, donde se visualiza la distribución de las componentes de frecuencia derivadas del impacto.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se detalló el proceso de implementación de un sistema de adquisición de datos en una plataforma experimental diseñada con el propósito de representar, de forma simplificada, la estructura de un sistema rotodinámico como el de una aeronave o un automóvil, con el fin de facilitar su estudio y análisis dinámico. Esta plataforma experimental, concebida como un banco de pruebas, permitirá validar modelos asociados a técnicas no invasivas de identificación de desbalances.

Es importante mencionar que actualmente no existen en el mercado plataformas experimentales con las características específicas descritas en este trabajo. Las soluciones comerciales disponibles están orientadas, en su mayoría, a la validación de métodos invasivos para el monitoreo o detección de daños estructurales, dejando un vacío importante en el desarrollo de alternativas que no comprometan la integridad del sistema a analizar.

En este contexto, la plataforma propuesta en el presente proyecto representa una contribución relevante, ya que su diseño y construcción han sido completados satisfactoriamente, y se ha logrado integrar un sistema de adquisición de datos funcional que permite realizar validaciones experimentales de este tipo de técnicas.

En conclusión, el desarrollo de la plataforma experimental respondió a la necesidad de contar con un entorno adecuado para la validación de metodologías no invasivas, particularmente orientadas a la identificación de desbalances en sistemas rotodinámicos. Gracias a su diseño y capacidades, esta plataforma no solo constituye un recurso valioso para la investigación aplicada, sino que también ofrece un medio práctico y accesible para la formación académica.

Su implementación permite abordar tópicos avanzados de ingeniería con estudiantes de distintos niveles educativos, promoviendo así el desarrollo de capital humano especializado en áreas estratégicas como el monitoreo de condiciones, la dinámica estructural y el análisis de vibraciones. En este sentido, la plataforma representa una herramienta versátil con potencial tanto para el ámbito educativo como para aplicaciones prácticas en la industria.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Zhang, H. Ren, H. Ren, Y. Chai, Z. Liu, and X. Liang, "Comprehensive Review of Safety Studies in Process Industrial Systems: Concepts, Progress, and Main Research Topics" Processes Vol. 11, no. 8:2454, 2023, pp. 1-34.
2. A. Creus, “Instrumentación industrial”, 8va ed., Alfaomega Grupo Editor-Marcombo, España 2010.
3. P. Bonello, P. Minh Hai, “A receptance harmonic balance technique for the computation of the vibration of a whole aero-engine model with nonlinear bearings”, Journal of Sound and Vibration Vol. 324,2009, pp. 221–242.
4. P. Bonello, P.M. Hai, “Computational Studies of the Unbalance Response of a Whole Aero-Engine Model with Squeeze-Film Bearings”, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 132, no.3:32504, 2009, pp. 1-7.
5. P.M. Hai, P. Bonello, “An impulsive receptance technique for the time domain computation of the vibration of a whole aero-engine model with nonlinear bearings”, Journal of Sound and Vibration Vol. 318, 2008, pp. 592–605.
6. K. H. Groves, “Identification of squeeze-fim damper bearings for aerogine vibration analysis”, Tesis de doctorado, Universidad de Manchester, 2011.
7. S.G. Torres Cedillo, P. Bonello, “An equivalent unbalance identification method for the balancing of nonlinear squeeze-film damped rotordynamic systems”, Journal of Sound and Vibration Vol. 360, 2016, pp. 53–73.
8. R.E.D. Bishop, G.M.L. Gladwell, “The Vibration and Balancing of an Unbalanced Flexible Rotor”, Journal of Mechanical Engineering Science Vol.1,1959, pp. 66–77.
9. Recuperado de: https://www.gacetaeronautica.com/gaceta/wp-101/boeing-747-freighter-la-reina-regresa/
10. T.L.d.V. Lima, A.C.L. Filho, F. A. Belo, F. V. Souto, T.CB. Silva, K.V. Mishina, K.V., M.C. Rodrigues, “Noninvasive Methods for Fault Detection and Isolation in Internal Combustion Engines Based on Chaos Analysis”, Sensors Vol. 21:6925, pp. 1-27.
11. Recuperado de: https://www.ro-des.com/mecanica/cuando-cambiar-amortiguadores/
12. Recuperado de: https://www.pcb.com/products?m=352c33#tabs-1
13. Recuperado de: https://www.pcb.com/products?m=086c03#tabs-1
14. Recuperado de: https://downloads.dewesoft.com/manuals/dewesoft-krypton-manual-en.pdf
15. Recuperado de: https://www.samkoon.store/samkoon-hmi/

DISEÑO Y ANÁLISIS MODAL DE UN PUENTE PEATONAL EN ARCO DE 45M DE LONGITUD POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO UTILIZANDO SOLIDWORKS

Humberto Rodríguez Bravo[1], Ángeles Liliana Apolinar Herrera[2], Carlos Arturo Anguiano Luna[3].

Tecnológico Nacional de México/ ITS de Irapuato.
humberto.rb@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

En el siguiente trabajo se diseñará y analizará un puente peatonal elaborado en el software SolidWorks por medio del elemento finito (MEF), con la finalidad de conocer la frecuencia dinámica mediante del diseño y estructura conforme a la frecuencia natural y la carga estática ejercida, su función principal es dar seguridad al peatón por medio del análisis en el diseño arquitectónico para obtener mayor estabilidad dando a conocer un tiempo de vida viable aproximado, los puentes peatonales es uno de los principales motivos que alarman a la población por los accidentes que ocurridos y las vibraciones que llegan a sentirse causadas por el uso de diversa multitud de personas día a día generando vibraciones dinámicas afectando la estructura, esto produce inestabilidad, inseguridad e incluso pánico para sus peatones y personas a sus alrededores que puedan verse afectadas, tomando en cuenta que la mayoría de los puentes peatonales en la República Mexicana no cumple criterios de seguridad de normas NOM-012-SCT-2-1995, N•PRY• sustentadas en el Manual for Assessing Safety Hardware [8]. En el diseño mecánico creado se desarrolló un modelo inicial de alambre CAD 3D, el cual permitió ver de una forma más simple la geometría de la estructura.

Este modelo alambre facilita la representación de disposición y conexiones entre los componentes (unión rígida) sin agregar detalles complejos. Posteriormente, se usó el módulo de piezas soldadas, lo que implicó incorporación de materiales, uniones entre piezas, restricciones, resistencia e interacción dentro del sistema estructural, para el diseño arquitectónico y las medidas, se tomaron en cuenta las normativas técnicas aplicables para miembros estructurales, se tomaron como referencia algunos tipos de estructuras de puentes ya diseñados y construidos, así como un catálogo de perfiles para la selección de los mismos (puente peatonal Puerta del Milenio y puente peatonal Cruz de Cantera, de la Ciudad de Irapuato, Gto.). El desarrollo de un estudio de frecuencias permite identificar los modos de vibración y frecuencias naturales causadas por las cargas dinámicas inducidas por factores (movimiento de personas, viento y vehículos). Aplicar fuerzas simulando al peatón dependiendo de la cantidad de personas que le dan uso en un tiempo determinado incluyendo el tipo de paso da a conocer la vibración generada en la estructura y comparando dicha información con la vibración generada naturalmente da a conocer sus puntos críticos de diseño y así rediseñar hasta obtener una buena estructura dependiendo de las necesidades de implementación, las actuales normas presentan interés en la revisión de estructuras para la reducción máxima de vibraciones; la recolección de datos en la investigación para la simulación da a conocer una buena estructura al emplear el modelo en un puente peatonal en forma de arco tubular implementada previa a la construcción dando puntos críticos respecto a las vibraciones mecánicas para conocer donde se pueden generar fallas en los miembros estructurales previniendo así los daños conforme al tiempo/uso, puntos críticos con respecto a las vibraciones mecánicas previniendo accidentes y prolongando la vida útil de la estructura.

INTRODUCCIÓN

El incremento de puentes peatonales en la actualidad cada día se hace más alta, con la demanda de la sociedad en el incremento capital social obliga a tener más estructuras por ejemplo casas, hoteles, carreteras, puentes, entre otras. El uso de los puentes peatonales y su diversa multitud de personas que le dan uso día a día genera vibraciones en la estructura, esto produce inestabilidad, inseguridad e incluso puede producir pánico para sus peatones y personas a sus alrededores que puedan verse afectadas; en la actualidad la mayoría de las construcciones de puentes peatonales

en la República Mexicana no cumple criterios primordiales para la seguridad de la población, tomando en cuenta que eso le corresponde a la entidad gubernamental para establecer la reglamentación sobre cada uno de ellos, el tener estos diseños con un previo análisis puede dar a conocer puntos críticos de la estructura y así conocer si su diseño es totalmente estable para las vibraciones emitidas por los peatones.

En el presente trabajo se busca resolver esta problemática basado en el puente del Milenio que se encuentra en León, Guanajuato (Figura 1). De tal manera que se plasma un trabajo sobre un análisis modal de una estructura peatonal en forma de arco tubular y analizar puntos críticos respecto a condiciones que generan fallas a la estructura.



Figura 1. Puente “Puerta del Milenio”.[7]

TEORÍA

El método del elemento finito es una técnica matemática usada para analizar y resolver problemas de manera más eficiente, se utiliza en la ingeniería para poder hacer cálculos ya no de manera manual, sino que un software en este caso SolidWorks dando los datos necesarios pueda hacer un cálculo en cuestión de minutos, dicho método es mayormente utilizado para estructuras modeladas, análisis de resistencia, entre otros. Para su proceso de análisis el cuerpo se divide en pequeños cuerpos iguales, los elementos finitos, analizando cada una de sus partes los cuales están interconectados a lo largo de toda la estructura. En la (Figura 2), se observa ese pequeño análisis de pequeños segmentos en la estructura.

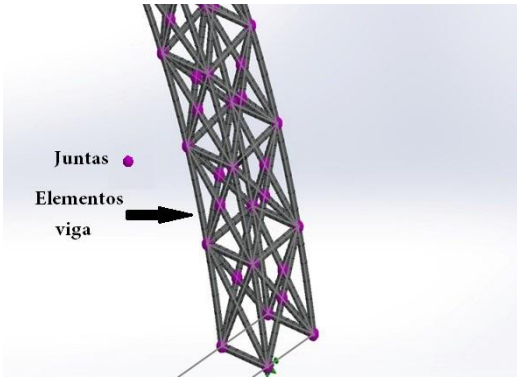


Figura 2. Estructura de puente peatonal segmentada para análisis modal (juntas y elementos de viga).

Este proceso de simulación permite analizar detalladamente las vibraciones causadas por las cargas dinámicas simulando el análisis de frecuencia. En la Tabla 1, se observa información sobre las velocidades y frecuencias que se producen al aplicar fuerzas simulando al peatón, dependiendo del tipo de paso que se ejecute. Incluso se da a conocer la vibración generada para mostrar una comparativa y dar a conocer puntos críticos del diseño, con el fin de obtener una estructura en condiciones adecuadas dependiendo de las necesidades de implementación y coincidir con las

actuales normas que presentan interés en la revisión de estructuras para la reducción máxima de vibraciones.

Tabla 1. Velocidades y frecuencias ejercidas por un peatón.[5]

Frecuencia peatonal				
Actividad peatonal	Velocidad (m/s)	Vertical (Hz)	Horizontal (Hz)	Longitudinal (Hz)
Caminata lenta	1.1	1.7	0.85	1.7
Caminata normal	1.5	2	1	2
Caminata rápida	2.2	2.3	1.15	2.3
Carrera lenta	2.5	2.1	1.05	2.1
Carrera normal	3.3	2.5	1.25	2.5
Carrera rápida	5.5	3.2	1.6	3.2

Estudio de cuerpos estructurales [4]

El estudio de movimientos de cuerpos estructurales depende de la fuerza y vibración dinámica que se ejerce, esta vibración que entra se considera una transferencia de energía cinética y energía potencial en la cual se almacenan las energías, para poder analizar lo de manera más comprensible ponemos como ejemplo masa- resorte, donde el resorte actúa como energía potencial y la masa siendo la energía cinética. (He & Fu, 2011). Su enfoque energético en un ejemplo siempre se puede ver aplicado en un resorte cuando una masa actúa sobre él, al aplicar una fuerza en el resorte este se estira dividiéndolo en varias partes los cuales serán elementos finitos del mismo resorte, la división de elementos da como tal una división de propiedades como lo son rigidez, deformación y esfuerzo. Este ejemplo se ve aplicado en la (Figura 3).

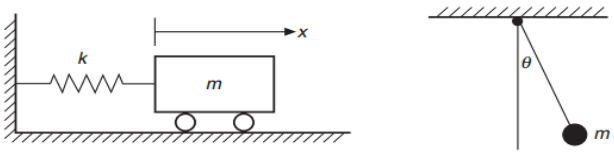


Figura 3. Ejemplo masa- resorte, He & Fu, 2011.[4]

Para el análisis de vibraciones realizable a un sistema SDoF (de un grado de libertad) en vibración libre con masa-resorte simple, como el que es mostrado en la (Figura 4), puede ser analizado comenzando por su ecuación de movimiento.

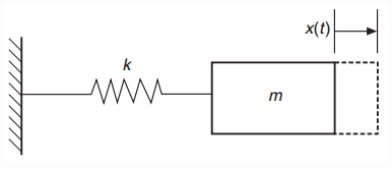


Figura 4. Sistema de masa y resorte simple, He & Fu, 2011.[4]

Una masa acoplada a un resorte se parte de la 2ª Ley de Newton se compone por la ecuación 1:

$$\boldsymbol{m\ddot{x} + kx = 0} \qquad (1)[4]$$

||

Para entenderla se debe tomar en cuenta que $\dot{x}$ y $\ddot{x}$ representan la velocidad y aceleración del sistema y se obtiene una expresión de la proporción que tiene la rigidez y la masa en el sistema, aquí se ve el enfoque energético tal y como se muestra en la ecuación 2.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}\ rad/sec \qquad (2)\ [4]$$

Material estructural

Se utiliza el acero A36 como principal material estructural debido al bajo contenido de carbono, facilidad para soldar y mecanizar. El acero A36 es utilizado en estructuras metálicas como puentes, maquinaria o componentes industriales en general. En la Tabla 2, se muestran las propiedades principales de acero A36.

Tabla 2. Propiedades de material Acero A36.

ASTM A36 acero					
Tipo de modelo	Unidades	categoría	Propiedad	Valor	Unidades
Isotrópico elásticolineal	SI - N/mm² (MPa)	Acero	Módulo elástico	200000	N/mm²
			Coeficiente de poisson	0.26	N/D
			Módulo cortante	79300	N/mm²
			Densidad de masa	7850	kg/m³
			Límite de tracción	400	N/mm²
			Límite de compresión		N/mm131
			Límite elástico	250	N/mm132
			Coeficiente de expansión térmica		/k
			Conductividad térmica		W/(m-k)

Vibraciones mecánicas estructurales

Al aplicar fuerza, viento, movimiento o algún fenómeno natural la estructura tiende a experimentar vibraciones, para medir dichos fenómenos es necesario hacer un estudio de frecuencias naturales dando como resultado las condiciones de firmeza en la estructura.

Análisis modal

El análisis modal se utiliza normalmente en la ingeniería estructural ya que garantiza tanto seguridad como durabilidad en la arquitectura, nos ayuda a determinar las frecuencias naturales y determinar puntos críticos donde las estructuras tienden a vibrar más alto que los límites establecidos dependiendo de la fuerza aplicada.

Resonancia

La resonancia es una condición que se presenta cuando se aplican fuerzas a una estructura y estas vibraciones actúan en una frecuencia cercana o igual a las frecuencias naturales de vibración, provocando una respuesta dinámica. Por ejemplo, si se encuentra un grupo de personas en un puente peatonal y existen vibraciones por motores de maquinaria industrial trabajando para el mismo puente o cerca de él provocan unas inestabilidad estructural y fatiga de materiales poniendo en riesgo la vida del peatón.

Elemento finito

El método del elemento finito es un análisis estructural permite determinar puntos críticos del modelo donde divide en partes pequeñas el objeto o estructura, esto con el fin de que su estudio tenga mayor factibilidad y no dependa tanto de pruebas físicas para su estudio optimizando el diseño y arrojando resultados concretos ya que es altamente preciso. Cualquier estructura sometida a este proceso se separa en partes pequeñas basado en una división de dominio de elementos pequeños y discretos. De acuerdo con la (Figura 5), se puede observar una pieza totalmente sólida que se segmentó dándonos nodos y elementos.[6]

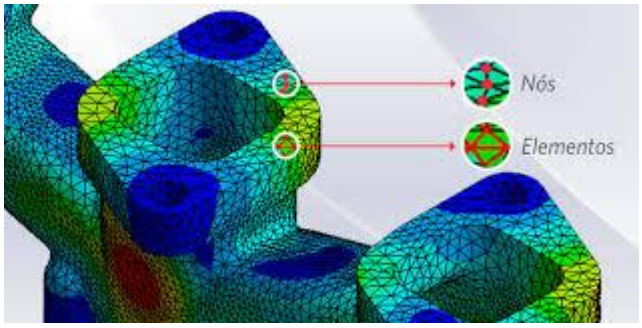


Figura 5. Ejemplo de elemento finito. [6]

En el proceso del modelado es necesario desarrollar una buena estructura para que no se presenten complicaciones y la tome como una sola pieza. Los elementos finitos permiten que el modelo se optimice y muestre resultados más precisos por medio de la división de elementos (Figura 6).

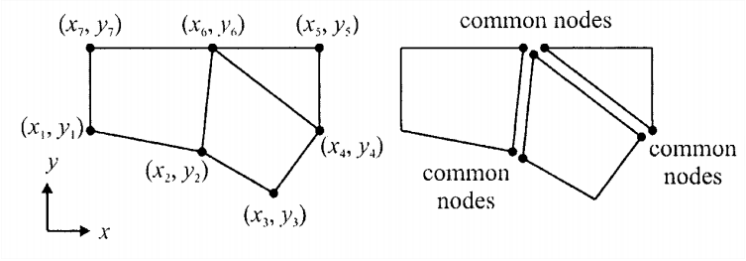


Figura 6. División de elementos.

Modelado y simulación en SolidWorks

Metodología

Para su elaboración es necesario seguir ciertos pasos, los cuales son:

Modelo alambre

El modelo alambre es una representación visual de un modelo 3D donde se muestran las aristas y líneas del modelo, pero sin alguna superficie no relleno del sólido. El análisis de estudio de frecuencias, también conocido como análisis modal, se realizó sobre una estructura con forma arqueada diseñada como un puente peatonal, pero considerando las mediciones y condiciones de los puentes peatonales a lo largo del malecón de León, Guanajuato.

Con base a los valores determinados, se evalúa el comportamiento del puente ante el uso peatonal frecuente. Para el análisis, la estructura se divide en elementos claramente diferenciados, permitiendo una interpretación detallada de su respuesta. Este estudio permite identificar las frecuencias naturales de vibración y anticipar los efectos que podrían acumularse con el paso del

tiempo, en caso de que el diseño estructural no está adecuadamente preparado para resistir estas condiciones. De esta manera, se busca asegurar que el puente tenga un desempeño seguro y eficiente frente a posibles problemas.

Para el diseño arquitectónico propuesto del presente trabajo fue considerado una de las estructuras más factibles según las estructuras implementadas en este mismo espacio. Una vez realizado el modelo 3D el modelo alambre es implementado y mostrando una estructura esqueleto de este, tal y como se muestra en la (Figura 7).

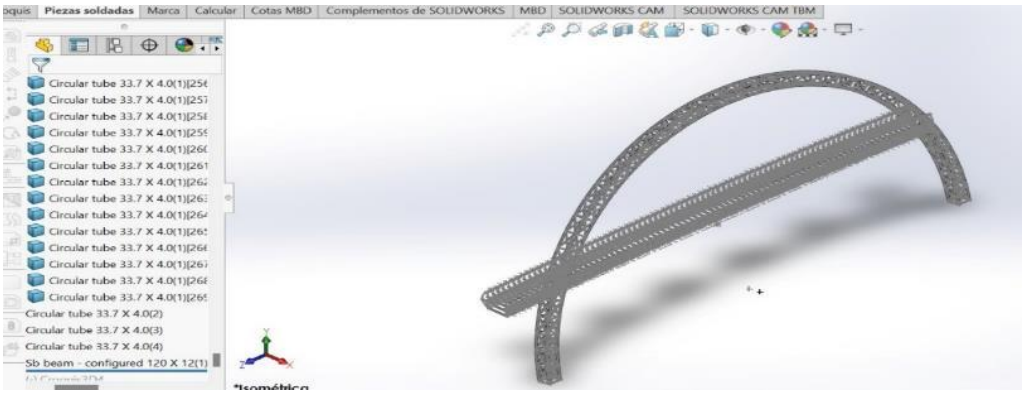


Figura 7. Puente peatonal en modo alambre.

Módulo de piezas soldadas y perfil estructural

Su miembro estructural es tubular, con perfiles de ANSI 33.7 x 4.0 in de grosor en tubos pequeños y en sus tubos principales laterales en forma de arco son medidas de 88.9 x 3.2 in, esto es con base a las estructuras de puentes peatonales ya implementados. En la (Figura 8), se muestra la estructura del pasillo central y un lateral del arco ya con miembros tubulares, donde también se pueden ver más medidas de sus miembros con menos longitud.

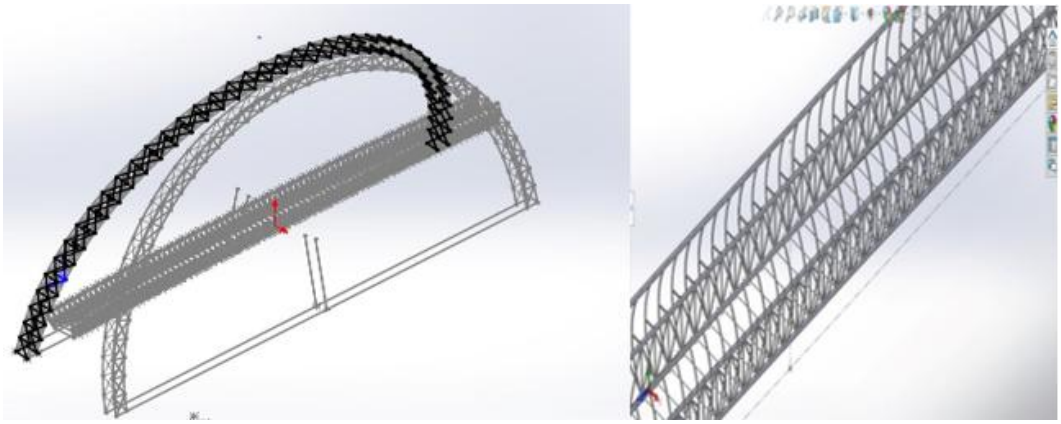


Figura 8. Miembros estructurales tubulares.

Mallado

SolidWorks ofrece procesos dentro de la simulación para un análisis de elementos finitos, se trata del mallado o creación de una red con subdivisiones de elementos conectados entre sí, existen distintos tipos de mallado, en este proyecto se utilizó el mallado mixto, el cual ofrece combinar distintos elementos y con ello se optimiza el análisis. En el proceso de mallado puede ser bastante tardado dependiendo del modelo y el tipo de malla que se utiliza, es decir, si nuestro modelo 3D

cuenta con una cantidad alta de juntas al momento de crear la malla tardara de calcular y finalizar el análisis. Por ejemplo, en el caso del puente presente, se muestran juntas color morado en las cueles e concentra la rigidez al momento de realizar el mallado.

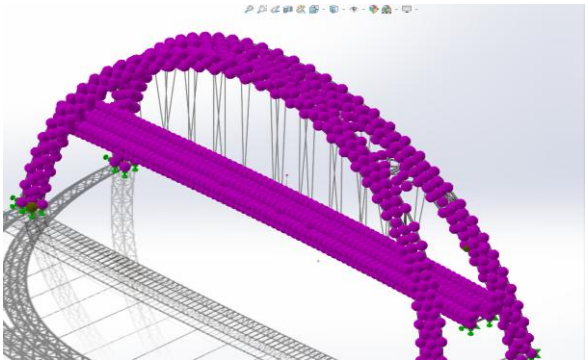


Figura 9. Mallado de estructura (Juntas).

Sujeciones

Las sujeciones se aplican en estructuras antes de un análisis, la sujeción es dependiendo del análisis a elaborar o también de los puntos fijos que deba tener tu estructura. Existen distintos tipos de sujeciones, los más aplicados son 7:

1. Sujeción fija.
2. Sujeción inamovible
3. Sujeción con geometría de referencia
4. Sujeción sobre caras cilíndricas
5. Sujeción sobre caras esféricas
6. Sujeción de simetría
7. Sujeción de rodamiento

Para este análisis utilizaremos las sujeciones físicas, ya que restringe completamente el movimiento de una cara, arista o vértice. De acuerdo con la (Figura 10), estas se colocarán en las aristas del final de nuestros arcos y de la parte superior de cada costado del pasillo peatonal (observar sus sujeciones de color verde).

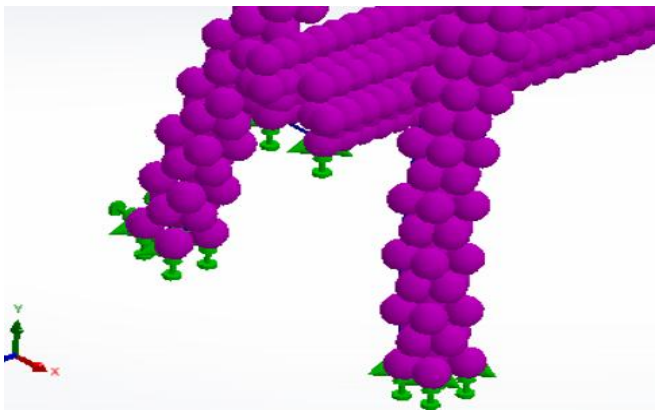


Figura 10. Sujeciones fijas.

RESULTADOS

Tomando de referencia los datos de la Tabla 1, la deformación que generan las frecuencias del peso humano es de 1.5-3 ciclos vibratorios (HZ) dependiendo a la velocidad y actividad peatonal será su frecuencia ejercida sobre la estructura, por lo tanto, una persona al hacer uso del puente peatonal este experimenta una deformación, si la frecuencia natural se acerca a la frecuencia de pisadas de la persona la estructura tiende a vibrar más, lo que afecta la comodidad y seguridad de los peatones.

En la (Figura 11), se puede observar la deformación que dependiendo del número de nodos sus frecuencias aumentan o disminuyen según su actividad, así como también se logra apreciar la tensión en los hilos tensores del puente peatonal conforme a su carga, dando valores dentro de los rangos establecidos, el comportamiento dinámico de la estructura incrementa la seguridad al peatón e indica que el diseño estructural es correcto.

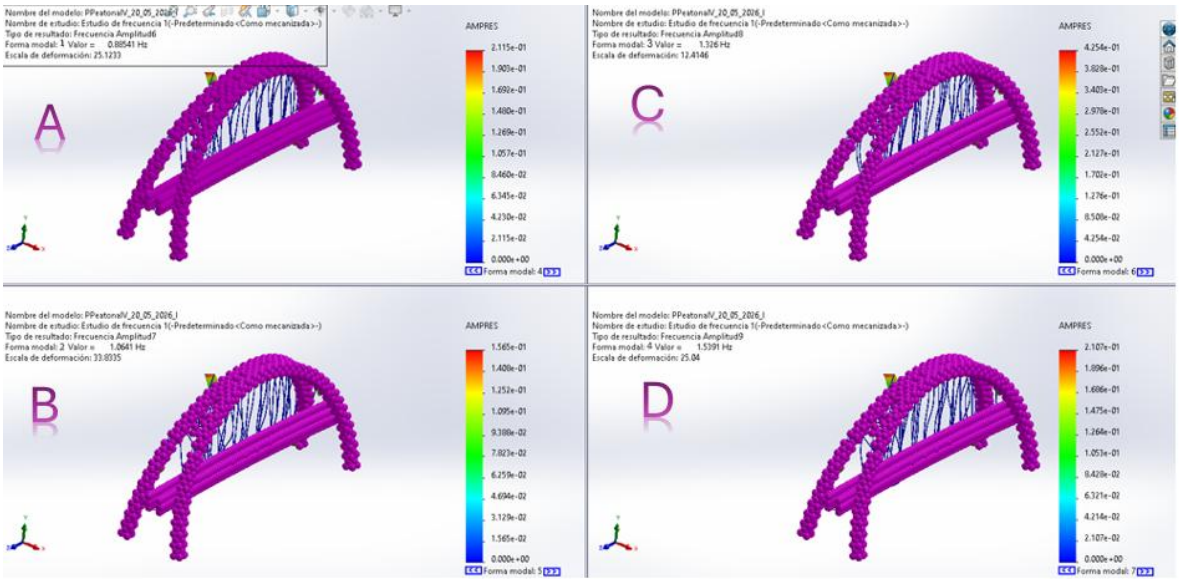


Figura 11. Modos de vibración vertical.

En la Tabla 3, se observa la frecuencia vertical (Hertz) en los primeros 4 modos según el número de modo correspondiente a la (Figura 11).

Tabla 3. Estudio de frecuencia (4 modos).

Estudio de frecuencia			
N. de modo	Frecuencia (Rad/seg)	Frecuencia (Hertz)	Período (Segundos)
1 A	5.5632	0.8841	1.129
2 B	6.6859	1.0641	0.93977
3 C	8.3316	1.326	0.75414
4 D	9.6705	1.5391	0.64973

|

De acuerdo con la Tabla 4, los mayores desplazamientos modales se concentran en los hilos tensores donde se ejerce la fuerza, entre mayor frecuencia (Rad/seg) aumenta su frecuencia (Hz), por eso la importancia de un buen uso a los puentes peatonales, ya que entre mayor Hz de frecuencia peatonal horizontal mayor su inseguridad. Es recomendable rediseñar secciones para evitar resonancia y conocer con anticipación su viabilidad de estructura.

Tabla 4. Resultados del estudio de frecuencia.

Estudio de frecuencia			
N. de modo	Frecuencia (Rad/seg)	Frecuencia (Hertz)	Período (Segundos)
1	5.5632	0.8841	1.129
2	6.6859	1.0641	0.93977
3	8.3316	1.326	0.75414
4	9.6705	1.5391	0.64973
5	10.534	1.6766	0.59645
6	11.416	1.825	0.55037
7	13.713	2.1825	0.4582
8	15.336	2.4407	0.40971
9	16.6	2.74949	0.3785
10	17.561	2.94	0.3578

CONCLUSIONES

Un buen análisis modal y sus frecuencias naturales permiten predecir puntos críticos con respecto a las vibraciones mecánicas, en el cual su modo de vibración debe de estar a 1.5 – 3.5 Hz [5] fuera del rango crítico de paso humano determinando si es seguro/inseguro (Véase Tabla 4).

También tomando en cuenta que su configuración es arqueada lo cual mejora la rigidez, de manera que minimiza accidentes y prolonga la vida útil de la estructura, aunque se sugiere reforzar zonas específicas si alguna frecuencia es crítica, un factor muy importante es que las uniones soldadas estén perfectamente colocadas ya que proporcionan buena continuidad estructural.

BIBLIOGRAFÍAS

1. Sebastián, M. J. (2013, septiembre). Las leyes de Newton de la mecánica: Una revisión histórica y sus implicaciones en los textos de enseñanza. https://core.ac.uk/download/pdf/71022947.pdf.
2. Kelly, S. G. (2011). Mechanical vibrations: Theory and applications. CENGAGE Learning.
3. Rao, S. S. (2011). *The finite element method in engineering*. Butterworth-Heinemann.
4. Rodríguez Súnico, M. (2005). *Análisis modal operacional: teoría y práctica* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla]. Repositorio de la Universidad de Sevilla. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/.
5. Huergo-Ríos, I. F., & Hernández-Barrios, H. (2020). Control pasivo de vibracines verticales inducidas por personas en puentes peatonales. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(2), 1–13. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.017.
6. ESSS. (2015, abril 30). Método de los elementos finitos: ¿qué es? Recuperado de https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/.
7. Bárcenas, G. (2020). *La torre del olvido*. Página Central. Recuperado de https://paginacentral.com.mx/la-torre-del-olvido/.
8. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017: Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. https://www.imt.mx/images/files/seg/regfederales/nom-012.pdf

EDITORAS

María Eugenia Sánchez Morales
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
Alexandra Monsetrrat García



ISBN TOMO VI
INGENIERÍAS



ISBN OBRA COMPLETA
AVANCES CIENTÍFICOS Y
TECNOLÓGICOS EN MÉXICO II

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.