

**Director de tesis:** Dr. Manuel I. Peña Cruz

**Sinodales:** Dr. Manuel I. Peña Cruz  
(Director de Tesis, Presidente del Jurado)

Dra. Naghelli Ortega Ávila  
(Sinodal Externo - CIMAV, Secretaria)

DR. Luis Valentín Coronado  
(Sinodal Interno, Vocal)

**Tesis:** "DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED OPTICAL SYSTEM FOR SOLAR IRRADIANCE FORECASTING USING SKY-DYNAMICS ANALYSIS"

**Resumen:**

En la actualidad, la utilización eficiente de la energía solar es un desafío constante en el mercado energético. En respuesta, han surgido tecnologías como la energía solar por concentración y la fotovoltaica, entre otras, como alternativas energéticas sostenibles y viables frente a los combustibles fósiles. La clave para aprovechar esta energía renovable es contar con información precisa sobre las características y disponibilidad del recurso solar en las regiones de interés, lo que permite dimensionar y diseñar sistemas adecuados, así como implementar mecanismos de protección para garantizar la estabilidad de la generación de energía durante las variaciones en la irradiancia. Por ello, existe un gran interés en desarrollar sistemas con capacidad para medir y predecir el recurso solar con gran precisión. En esta tesis doctoral se ha desarrollado un sistema de visión que tiene como objetivo evaluar la irradiancia solar y predecir su evolución a lo largo del día en periodos cortos de tiempo. Para lograrlo, se realizaron estudios específicos en intervalos de 1, 5 y 10 minutos. Con ese motivo, un sistema catadióptrico fue diseñado para capturar imágenes de todo el cielo. Dicho sistema dispone de un algoritmo que estima el valor de las componentes solares a partir de estas imágenes y de las mediciones de un piranómetro. Esto es posible porque la contribución de irradiancia de las partículas en el cielo se obtiene mediante una estrategia de conversión de valor de intensidad del píxel a irradiancia. Además, se desarrolló una metodología para mapear el cielo con respecto al Sol en un espacio ortogonal, donde cada píxel representa un ángulo sólido constante. Esto facilita el cálculo de la velocidad de las nubes a lo largo de una trayectoria de bloqueo solar. La combinación de estas dos metodologías y la estrategia propuesta para estimar la transmitancia de las nubes, utilizando el color de las mismas y un modelo empírico de cielo claro, posibilita el cálculo de las variaciones de irradiancia en intervalos de tiempo breves. Se realizaron pruebas tanto individuales como conjuntas de estas

metodologías en distintos escenarios climáticos para evaluar su efectividad. La metodología para el cálculo de las componentes solares fue validada mediante el análisis de cuatro días con escenarios climatológicos distintos, obteniendo un error cuadrático medio para la componente global, la componente difusa y la componente directa de 19.62 %, -6.55 % y 4.53 % para días soleados; 7.00 %, -6.13 % y 0.79 % para días parcialmente soleados; -0.73 %, -6.58 % y 1.96 % para días parcialmente nublados; y -0.65 %, -10.48 % y 100 % para días nublados. En cuanto a la metodología de predicción de irradiancia, se establecieron 1, 5 y 10 minutos como tiempos de predicción, obteniendo un error cuadrático medio de 80.58 W/m<sup>2</sup>, 166.45 W/m<sup>2</sup> y 177.34 W/m<sup>2</sup> para la componente directa, mientras que para la componente global los resultados fueron de 67.97 W/m<sup>2</sup>, 114.86 W/m<sup>2</sup> y 104.96 W/m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos en estos experimentos son consistentes con los reportados en la literatura, lo cual demuestra que el trabajo presentado en esta tesis doctoral proporciona una alternativa viable y de bajo coste para la medición y previsión del recurso solar.