

Tecnología para el diagnóstico de instalaciones Fotovoltaicas: Aporte del Campus San Carlos en la investigación

MSc. Leonardo
Cardinale Villalobos
Escuela de Ingeniería en
Electrónica
✉ lcardinale@itcr.ac.cr

Introducción

La energía solar fotovoltaica representa una de las fuentes más prometedoras para lograr una matriz energética sostenible, especialmente en países como Costa Rica que lideran la producción eléctrica a partir de fuentes renovables. Sin embargo, para aprovechar al máximo el potencial de esta tecnología, es fundamental contar con sistemas de diagnóstico y monitoreo que permitan evaluar su desempeño, detectar fallas y proponer mejoras continuas (Mellit et al., 2018). En este contexto, la investigación científica y el desarrollo de tecnología en torno al diagnóstico de instalaciones fotovoltaicas se vuelve clave para garantizar la eficiencia, sostenibilidad y expansión de esta fuente energética.

El TEC y los sistemas de diagnóstico de instalaciones fotovoltaicos

Desde 2019, en el Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se ha venido desarrollando un esfuerzo sostenido en el monitoreo de instalaciones solares fotovoltaicas. Este trabajo ha permitido la generación de

conocimiento científico y el desarrollo de tecnologías innovadoras en el área, consolidando una línea de investigación con impacto a nivel nacional e internacional.

La instalación fotovoltaica utilizada en San Carlos forma parte de un esfuerzo planificado para la creación de iniciativas sostenibles en ciudades universitarias en los campus de Cartago y San Carlos (Meza et al., 2019) . La misma entró en funcionamiento en 2017 y ha servido como plataforma experimental para el desarrollo de múltiples proyectos de investigación.

En este contexto, se han desarrollado nueve trabajos finales de graduación de licenciatura, una tesis de maestría y se han publicado nueve artículos científicos en revistas y conferencias especializadas. Estos proyectos han estado orientados principalmente al diseño y validación de prototipos de sistemas electrónicos para el diagnóstico de instalaciones solares fotovoltaicas, así como al análisis científico de variables clave para la evaluación del desempeño de estas instalaciones.

Uno de los aspectos más relevantes de este esfuerzo ha sido la participación de los estudiantes en la investigación científica, lo que ha favorecido su formación en metodologías de investigación, desarrollo de tecnología y análisis de datos. Esto no solo enriquece su formación académica, sino que también fortalece sus competencias para enfrentar los retos del sector energético.

Además, estos trabajos han sido desarrollados en colaboración con otros departamentos del mismo campus y con otras unidades académicas del campus central, generando sinergias que han enriquecido las investigaciones y han permitido abordar los proyectos desde una perspectiva interdisciplinaria.

Tecnología desarrollada en el TEC

Los principales desarrollos tecnológicos han sido:

- **Sistemas de detección de fallas a partir de la comparación entre la potencia teórica y la real:** Se desarrollaron dos prototipos de sistemas que generan alarmas cuando se detecta una disminución en la generación de energía real con respecto a la teórica. La figura 1 muestra imágenes de este trabajo, que además generó dos publicaciones científicas: (Corrales et al., 2022) y Cardinale-Villalobos et al. (2025)].
- **Sistemas de detección de fallas a partir de análisis estadístico:** Considerando que arreglos fotovoltaicos equivalentes deben generar la misma energía, es posible detectar condiciones de funcionamiento subóptimo cuando existe algún arreglo que genere una cantidad de energía distinta, lo cual es posible mediante la estadística inferencial. Utilizando este principio, se

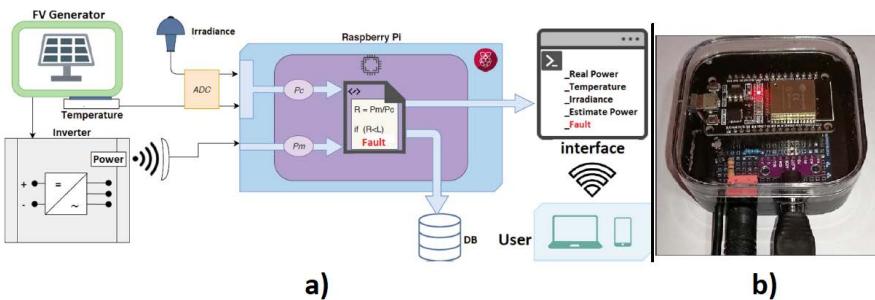


Figura 1. Representaciones de los desarrollos de sistemas de detección de fallas mediante análisis de comparación de potencia: a) esquemático de sistema desarrollado por (Corrales et al., 2022) y b) implementación física de sistema desarrollado por Cardinale-Villalobos et al. (2025).

desarrolló el trabajo de Bryan Rodriguez (2021). En la figura 2 se muestra la tarjeta electrónica de adquisición de datos desarrollada para este trabajo.



Figura 2. Tarjeta electrónica de adquisición de datos para la detección de fallas en arreglos FV mediante análisis estadístico desarrollado por Bryan Rodriguez (2021)

Sistema de detección de fallas a partir del análisis de imágenes visuales y térmicas: Para el diagnóstico de arreglos FV, también es posible evaluar imágenes visuales e infrarrojas. La presencia de suciedad, sombras o quebraduras que se pueden identificar visualmente son evidencia de problemas en el arreglo FV que deberán ser atendidos. Algunos problemas pueden no ser apreciados visualmente, pero sí mediante termografía infrarroja, generando regiones más calientes en un módulo FV. Sobre esto, se desarrollaron proyectos que utilizan las técnicas anteriores (ver Figura 3) y se generaron las siguientes publicaciones: Cardinale-Villalobos, Rimolo-Donadio, y Meza, (2020), y (Cardinale-Villalobos Leonardo et al., 2021).

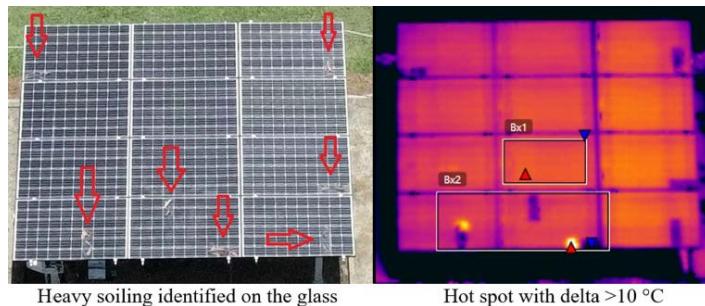


Figura 3. Fotografías tomadas de (Cardinale-Villalobos Leonardo et al., 2021) que identifican suciedad de forma visual y puntos calientes en módulos FV.

Con el desarrollo de la inteligencia artificial es posible automatizar la detección de fallas utilizando las técnicas mencionadas. En este sentido, se implementó un sistema que utiliza la IA para detectar puntos calientes (fallas) en imágenes térmicas de módulos FV (ver Figura 4), lo anterior generó las publicaciones: Cardinale-Villalobos, Solís-García, et al. (2023) y Cardinale-Villalobos, Jimenez-Delgado, et al. (2023)

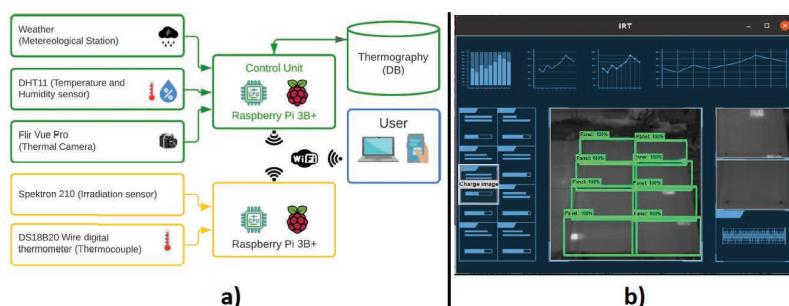


Figura 4. Imágenes representativas de los sistemas de detección de puntos calientes a través de IA. a) esquemático de la arquitectura del sistema desarrollado en Cardinale-Villalobos, Solís-García, et al. (2023) y b) interfaz de usuario del sistema desarrollado en Cardinale-Villalobos, Jimenez-Delgado, et al. (2023).

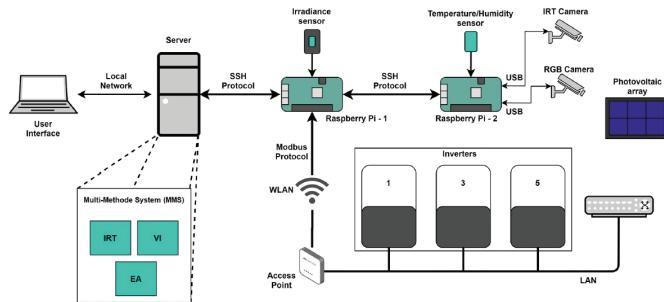


Figura 5. Esquemático de la arquitectura del sistema desarrollado por Cardinale-Villalobos et al. (2024) que combina inspección visual, termografía infrarroja y análisis de variables eléctricas, para la detección de condiciones subóptimas en arreglos fotovoltaicos.

Sistema multi-método que integra análisis de imágenes visibles, imágenes infrarrojas y análisis de variables eléctricas: Considerando que existen distintos métodos para detección de condiciones subóptimas en arreglos FV, se hizo una comparación de las técnicas implementadas, lo cual dio como resultado el artículo Cardinale-Villalobos et al. (2022). Conociendo lo anterior, en la publicación Cardinale-Villalobos et al. (2024) se presenta el desarrollo de un sistema multimétodo (ver Figura 5) que integra tres tipos de técnicas e IA para la detección automática de condiciones subóptimas.

Cabe destacar que estos proyectos no se han limitado a ejercicios teóricos o de simulación, sino que han sido implementados y validados en una instalación fotovoltaica real de 22.65 kW ubicada en el campus. Esto brinda un valor adicional a los desarrollos realizados, ya que permite evaluar su funcionamiento en condiciones reales de operación y optimizar sus diseños a partir de datos experimentales.

Conclusión

El desarrollo de proyectos en el campus San Carlos para el diagnóstico de instalaciones fotovoltaicas ha permitido la generación de nuevos conocimientos y la apertura de nuevas oportunidades de investigación. En un país como Costa Rica, líder en generación de energías renovables,

es fundamental contar con expertos en esta temática para afrontar los retos futuros e impulsar la innovación en el sector.

El trabajo desarrollado ha sido un ejemplo de cómo la investigación universitaria puede contribuir de forma práctica al desarrollo tecnológico del país. La formación de estudiantes, la colaboración interdisciplinaria y la validación en condiciones reales han sido pilares fundamentales de este esfuerzo, consolidando una línea de investigación con un gran potencial de crecimiento y aplicación.

Bibliografía

- Bryan Rodriguez, Leonardo Cardinale-Villalobos, Carlos Meza, Luis Diego Murillo-Soto, & Hugo Sanchez. (2021). Effectiveness of PV string current measurements to detect fault in PV systems. In P. J. Escamilla-Ambrosio, L. Hernández-Callejo, S. Nesmachnow, P. Moreno, & D. Rossit (Eds.). (2021). *Proceedings of the IV Ibero-American Conference on Smart Cities. CITIES* (pp. 418–426). <https://icsc-cities.com/proceedings/2021.pdf> <https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3> https://doi.org/10.1007/978-3-030-69136-3_21
- Cardinale-Villalobos, L., Jimenez-Delgado, E., García-Ramírez, Y., Araya-Solano, L., Solís-García, L. A., Méndez-Porras, A., & Alfaro-Velasco, J. (2023). IoT System Based on Artificial Intelligence for Hot Spot Detection in Photovoltaic Modules for a Wide Range of Irradiances. *Sensors*, 23(15), 6749. <https://doi.org/10.3390/s23156749>
- Cardinale-Villalobos, L., Murillo-Soto, L. D., & Brenes, R. (2025). Low-Cost IoT System Prototype to Detect Suboptimal Conditions in PV Arrays. In S. Nesmachnow & L. Hernández Callejo (Eds.), *Smart Cities. ICSC-CITIES 2024* (pp. 3–17). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85324-1_1
- Corrales, D., Cardinale-Villalobos, L., Meza, C., & Murillo-Soto, L. D. (2022). Detection of Suboptimal Conditions in Photovoltaic Installations for Household-Prosumers. In J. M. Corchado & S. Trabelsi (Eds.), *Sustainable Smart Cities and Territories. SSCTIC 2021* (pp. 26–36). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78901-5_3
- Mellit, A., Tina, G. M., & Kalogirou, S. A. (2018). Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 91, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062>
- Meza, C., Sanchez, H., Monge, F., Morera, J., & Mendez, A. (2019). Estrategia para la implementación de iniciativas sostenibles en ciudades universitarias exemplificada con el Complejo Solar del TEC de Costa Rica. *II Ibero-American Congress of Smart Cities (ICSC-CITIES2019)*.