

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Vicerrectoría de Investigación y Extensión**  
**Dirección de Proyectos**  
**Informe final de proyectos de investigación y extensión**

Informe final sobre el proyecto: “Identificación de fallas en instalaciones solares fotovoltaicas” código 1360051.

Departamento Académico responsable: Escuela de Ingeniería en Electrónica

Grupo investigador:

Leonardo Cardinale Villalobos

Abel Méndez Pórras

Luis Diego Murillo Soto

Luis Alonso Araya Solano

Jorge Alfaro Velasco

Efrén Jiménez Delgado

Carlos Meza Benavides

San Carlos, diciembre, 2023



This work is marked with [CC0 1.0 Universal](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## 1. Código y Título del proyecto

Código del Proyecto: 1360051

Nombre del proyecto o actividad: Identificación de Fallas en Instalaciones Solares Fotovoltaicas

Departamento Académico responsable: Escuela de Ingeniería en Electrónica

Investigador(a) responsable: Leonardo Cardinale Villalobos

## 2. Autores y direcciones

**Tabla 1. Investigadores involucrados en el proyecto.**

Investigador	Correo electrónico	Grado académico
Leonardo Cardinale Villalobos ( <b>coordinador</b> )	lcardinale@itcr.ac.cr	Maestría
Abel Méndez Porras	amendez@itcr.ac.cr	Doctor
Luis Alonso Araya Solano	luaraya@itcr.ac.cr	Maestría
Luis Diego Murillo Soto	lmurillo@itcr.ac.cr	Doctor
Jorge Alfaro Velasco	joalfaro@itcr.ac.cr	Maestría
Efrén Jiménez Delgado	efjimenez@itcr.ac.cr	Maestría
Carlos Meza Benavidez	cmeza@itcr.ac.cr	Doctorado

### 3. Resumen

La creciente adopción de sistemas fotovoltaicos alrededor del mundo a obligado buscar alternativas que permitan detectar fallas en los módulos fotovoltaicos; para un máximo aprovechamiento energético. En este proyecto se desarrolló un método de identificación de fallas que integró la termografía infrarroja, la inspección visual y el análisis de variables eléctricas, por medio de un sistema basado en Internet de las cosas e inteligencia artificial. El sistema desarrollado mostró un mejor desempeño con relación a las soluciones tradicionales que utilizan un solo método. Los resultados demuestran las capacidades tecnológicas actuales para mejorar la gestión de las instalaciones fotovoltaicas y orientan a los administrados de estas instalaciones para hacer una mejor elección de soluciones de mantenimiento. Este informe se presenta como un compendio de artículos publicados y sometidos a publicación, los cuales se concretaron gracias al desarrollo y a los resultados del proyecto.

Palabras clave: Detección de fallas en instalaciones solares fotovoltaicas, IoT, termografía infrarroja, inspección visual, análisis de variables eléctricas.

Abstract.

The growing adoption of photovoltaic systems around the world has forced the search for alternatives to detect faults in photovoltaic modules; for maximum energy utilization. In this project, a fault identification method was developed that integrated infrared thermography, visual inspection and analysis of electrical variables, through a system based on the Internet of Things and artificial intelligence. The developed system showed an improved performance over traditional solutions using a single method. The results demonstrate the current technological capabilities to enhance the management of photovoltaic installations and guide the managers of these installations to make a better choice of maintenance solutions. This report is presented as a compendium of articles published and submitted for publication, which were made possible thanks to the development and results of the project.

Keywords: Fault detection in solar photovoltaic installations, IoT, infrared thermography, visual inspection, analysis of electrical variables.

#### 4. Contenido

Según la Guía para la Gestión interna de la Investigación y extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica:

*"Para que el informe sea aceptado por la Dirección de Proyectos, deberán entregarse los documentos 1 y 2 y los acuerdos de consejo de escuela, área académica o unidad desconcentrada participantes junto con la nota asignada al proyecto. En aquellos casos que la Dirección de Proyectos considere calificados (en los que se demuestre el cumplimiento de todos los objetivos del proyecto), se podrán aceptar como alternativos al documento 1 del informe final, otros productos tales como:*

- Documentación que evidencie la consecución de patentes de invención u otros productos protegibles.*
- Artículos científicos en proceso de aprobación por una revista indexada o ya publicados (alternativa tomada).*
- La creación de un dispositivo, software, equipo u otra evidencia física que sintetice el producto pretendido en el proyecto."*

A continuación, se presenta una tabla (**Tabla 2**) con los objetivos del proyecto y los artículos correspondientes según su temática.

**Tabla 2. Objetivos específicos del proyecto con los artículos publicados que muestran el cumplimiento de estos objetivos.**

<b>Objetivo específico</b>	<b>Artículo (publicado o en proceso de publicación) correspondiente (ver enlace web)</b>
<b>A:</b> Diseñar un protocolo y una figura de mérito para la evaluación del desempeño de técnicas de identificación basadas en variables eléctricas, imágenes y termografías para la detección de ensuciamiento, sombreados parciales y puntos calientes.	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Solar panel failure detection by infrared UAS digital photogrammetry: a case study. <a href="#">Artículo 1</a></li><li>2. Generative Adversarial Network for Synthetic Imaging Data of Sub-optimal Conditions in Photovoltaic Panels <a href="#">Artículo 2</a></li><li>3. Outdoor efficiency model for photovoltaic modules and its experimental validation <a href="#">Artículo 3 (ponencia)</a></li><li>4. Detection Criterion for Progressive Faults in Photovoltaic Modules Based</li></ol>

	<p>on Differential Voltage Measurements <a href="#">Artículo 4</a></p> <p>5. Validation of an outdoor efficiency model for photovoltaic modules <a href="#">Artículo 5</a></p>
<p><b>B:</b> Desarrollar un experimento para la evaluación de cada una de las técnicas de identificación en una cadena de 20 módulos para casos de ensuciamiento, sombreado y puntos calientes.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Detection of Suboptimal Conditions in Photovoltaic Installations for Household-Prosumers <a href="#">Artículo 6</a></li> <li>2. Experimental Comparison of Visual Inspection and Infrared Thermography for the Detection of Soiling and Partial Shading in Photovoltaic Arrays. <a href="#">Artículo 7</a></li> <li>3. Quantitative Comparison of Infrared Thermography, Visual Inspection, and Electrical Analysis Techniques on Photovoltaic Modules: A Case Study <a href="#">Artículo 8</a></li> <li>4. Evaluación de la producción energética para el sistema fotovoltaico con microinversores instalado en el edificio de rectoría del Tecnológico de Costa Rica. <a href="#">Artículo 9</a></li> <li>5. Defect inspection and detection in solar panels using image sensing technology: A Systematic Mapping Study <a href="#">Artículo 10</a></li> </ol>
<p><b>C:</b> Desarrollar un método que, maximizando la figura de mérito propuesta, integre los métodos de identificación de fallas utilizando variables eléctricas, imágenes</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. IoT system for thermographic data acquisition of photovoltaic installations <a href="#">Artículo 11</a></li> <li>2. IoT System Based on Artificial Intelligence for Hot Spot Detection in Photovoltaic Modules for a Wide Range of Irradiances <a href="#">Artículo 12</a></li> <li>3. Detection of suboptimal conditions in photovoltaic systems integrating data from several domains <a href="#">Artículo 13</a> (<i>artículo aceptado, por publicar, se adjunta con este informe</i>)</li> </ol>

## 5. Recomendaciones.

El proyecto se enfoca desde un punto de vista experimental en la evaluación de condiciones subóptimas (fallas) debido a sombras parciales, ensuciamiento y fallas eléctricas, sin embargo, existen otros tipos de condiciones subóptimas que deberán ser evaluadas en futuras investigaciones.

El desarrollo de la plataforma tecnológica (combinación de herramientas de hardware-software) que integra las técnicas de detección visual, termografía infrarroja y análisis de variables eléctricas, ha sido evaluada desde un sistema fijo en sitio y en la planta fotovoltaica del campus San Carlos. En la práctica se podrían tener datos tomados desde drones, que generaría condiciones distintas a las evaluadas y de arreglos fotovoltaicos con distribuciones de los módulos distintas. Por lo tanto, queda pendiente para futuros trabajos, la evaluación del sistema a partir de datos tomados desde drone y en otros sistemas fotovoltaicos.

El proyecto se enfocó en la evaluación técnica de una plataforma tecnológica para detección de fallas. Su implementación real deberá considerar aspectos económicos, por lo tanto, queda pendiente un análisis financiero de la solución y la valoración de reducción de costos.