

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Tesis de postgrado con impacto

Detección Inteligente de Fallas en Paneles Solares mediante Redes Neuronales Físicamente Informadas

Karla Ivette

Email: karla.schroder@pucv.cl

Número: 987870825

1. Nombre del Proyecto

Detección Inteligente de Fallas en Paneles Solares mediante Redes Neuronales Físicamente Informadas

2. Resumen del Proyecto

Este proyecto de tesis tiene como objetivo el desarrollo de un sistema inteligente para la detección automática de fallas en paneles solares fotovoltaicos, utilizando un modelo híbrido que integra redes neuronales convolucionales (CNN) con redes informadas por física (PINNs). La propuesta se enmarca en la necesidad crítica de mejorar la operación y mantenimiento de plantas solares mediante herramientas de diagnóstico automatizadas, precisas y escalables. El sistema se entrenará utilizando datos experimentales recolectados en laboratorio, incluyendo imágenes de electroluminiscencia y parámetros eléctricos de módulos con distintos tipos de fallas. Las CNN permitirán extraer patrones visuales, mientras que las PINNs incorporarán conocimiento físico del comportamiento eléctrico de los módulos, mejorando la robustez, explicabilidad y generalización del modelo. Se espera obtener un modelo funcional validado bajo condiciones controladas (TRL 4), capaz de identificar fallas con alta precisión. Esta tecnología tiene un potencial de transferencia significativo, dado que en Chile existen más de 11.000 MW de capacidad solar instalada (Informe marzo 2025, Coordinador Eléctrico Nacional), con un creciente desafío de mantenimiento predictivo, particularmente en zonas de alta radiación como el Desierto de Atacama. La solución podrá escalar hacia una plataforma digital tipo SaaS (Software as a Service), permitiendo su aplicación en el monitoreo remoto de plantas solares. El proyecto contribuye al fortalecimiento de la infraestructura tecnológica para energías renovables y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS N°7: Energía asequible y no contaminante.

3. Objetivo General

Desarrollar un modelo híbrido basado en inteligencia artificial, que combine redes neuronales convolucionales (CNN) y redes informadas por física (PINNs), para detectar fallas en paneles solares fotovoltaicos a partir de imágenes e información eléctrica experimental, con el fin de mejorar la precisión y explicabilidad del diagnóstico automatizado y aportar al mantenimiento predictivo en instalaciones solares.

4. Objetivos Específicos

1. Diseñar un protocolo experimental para la captura de imágenes (EL, IR, Visible) y adquisición de datos eléctricos de módulos fotovoltaicos bajo distintas condiciones de falla. 2. Entrenar y validar un modelo CNN para la detección automática de fallas en paneles solares a partir de patrones visuales extraídos de imágenes experimentales. 3. Desarrollar una red neuronal informada por física (PINN) que incorpore relaciones eléctricas propias del funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, a partir de los datos medidos en laboratorio. 4. Integrar y evaluar el desempeño del modelo híbrido CNN + PINN, considerando métricas de precisión, interpretabilidad y robustez frente a datos no vistos. 5. Analizar el potencial de transferencia tecnológica de la solución, identificando actores relevantes del ecosistema solar chileno y líneas de financiamiento para su continuidad y escalamiento.

5. Tesis de Postgrado

- **Nombre del proyecto de postgrado:**Detección Inteligente de Fallas en Paneles Solares mediante Redes Neuronales Físicamente Informadas
- **Nombre del programa:**Doctorado en Ingeniería Eléctrica
- **Fecha de inicio:**2025-03-10
- **Fecha de termino (estimada):**2026-11-27
- **Resumen:**La presente tesis tiene por objetivo desarrollar un sistema de detección automática de fallas en paneles solares fotovoltaicos mediante un enfoque híbrido de inteligencia artificial. La propuesta consiste en combinar redes neuronales convolucionales (CNN) para el análisis de imágenes de electroluminiscencia con redes neuronales informadas por física (PINNs), que incorporan el conocimiento eléctrico del comportamiento de los módulos. El modelo será entrenado con datos experimentales recolectados en laboratorio, bajo condiciones controladas que simulan distintos tipos de fallas en paneles solares. Las imágenes y datos eléctricos serán obtenidos utilizando equipos propios, lo que permitirá contar con un dataset especializado. La arquitectura PINN añadirá robustez al modelo y facilitará su interpretabilidad técnica, favoreciendo su adopción en entornos industriales. El trabajo se desarrollará hasta alcanzar un nivel de madurez tecnológica (TRL 4), con pruebas de validación en laboratorio. Se espera que este sistema sea una base para futuras plataformas de monitoreo predictivo en plantas solares, y pueda escalarse como solución digital para empresas del rubro energético.

6. Problema

6.1 ¿Cuál es el problema, oportunidad o necesidad que da origen a su proyecto?

Las fallas en módulos fotovoltaicos, como microfisuras, delaminación o puntos calientes, reducen significativamente la eficiencia energética de las plantas solares. Estas fallas muchas veces no son visibles externamente, por lo que su detección oportuna es clave para evitar pérdidas económicas y prolongar la vida útil de los módulos. En Chile, el problema adquiere gran relevancia: el país cuenta con más de 11.000 MW de capacidad solar fotovoltaica instalada (Coordinador Eléctrico Nacional, 2025) https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2025/03/CEN_Informe_Mensual_SEN_mar25.pdf, en su mayoría en zonas como el Desierto de Atacama, donde la alta radiación y condiciones ambientales extremas aceleran el deterioro de los equipos. La inspección manual de miles de módulos no es viable en este contexto, y las herramientas tradicionales presentan limitaciones en cuanto a precisión, escalabilidad y trazabilidad. Diversos estudios indican que factores como la degradación de los módulos, la acumulación de suciedad y las condiciones climáticas adversas pueden reducir de forma significativa la producción de energía en sistemas fotovoltaicos a lo largo del tiempo (<https://doi.org/10.1038/s41598-023-40168-8>, <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100094>, NREL 2012: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>). Esto genera una necesidad urgente de desarrollar herramientas automatizadas, explicables y basadas en modelos físicos para el diagnóstico temprano de fallas, contribuyendo así al mantenimiento predictivo, la reducción de pérdidas y la consolidación de la matriz energética renovable nacional.

6.2 ¿A quienes afecta este problema, oportunidad o necesidad?

El problema de fallas no detectadas en paneles solares afecta a múltiples actores del ecosistema energético. En primer lugar, impacta directamente a empresas generadoras y operadoras de plantas solares fotovoltaicas, que ven reducida su capacidad de generación y enfrentan mayores costos por mantenimiento reactivo o sustitución prematura de módulos. También afecta a las empresas de operación y mantenimiento (O&M), que requieren soluciones eficientes para inspeccionar grandes volúmenes de módulos en terrenos extensos y muchas veces de difícil acceso. Además, se ven impactadas instituciones públicas como el Coordinador Eléctrico Nacional, el Ministerio de Energía y la CNE, responsables de velar por la confiabilidad del sistema eléctrico y el cumplimiento de metas de generación renovable. A nivel territorial, comunidades cercanas a las plantas solares también pueden verse afectadas si estas instalaciones operan por debajo de su potencial o requieren intervenciones constantes. Finalmente, el problema compromete a los usuarios del sistema eléctrico nacional, ya que limita la eficiencia y disponibilidad de una fuente de energía limpia clave en la transición energética del país.

6.3 ¿Cuál es el tamaño del problema, oportunidad o necesidad?

El tamaño del problema es considerable, tanto a nivel nacional como global. En Chile, según el Coordinador Eléctrico Nacional, la capacidad solar fotovoltaica instalada supera los 11.000 MW, con miles de módulos operando en regiones de alta radiación como el Desierto de Atacama. Esto implica la existencia de decenas de millones de celdas solares que deben ser monitoreadas para asegurar su funcionamiento eficiente y seguro. El impacto económico es significativo. Una planta solar de gran escala puede contener entre 100.000 y 300.000 módulos, dependiendo de su capacidad instalada y del

tipo de tecnología empleada. Por ejemplo, Quilapilún (110 MW) en la Región Metropolitana opera con más de 350.000 módulos. <https://www.revistaei.cl/parque-solar-quilapilun-el-mayor-proyecto-ernc-de-la-region-metropolitana/> Esto implica que la detección oportuna de fallas es un desafío de alta escala logística y técnica. La detección tardía de fallas puede traducirse en pérdidas acumuladas de producción, costos por reemplazo de equipos y sobrecarga en los sistemas de mantenimiento. A ello se suma el riesgo de daño progresivo a módulos cercanos y el deterioro de la confiabilidad del sistema eléctrico. Desde una perspectiva ambiental, estas fallas reducen el rendimiento de una fuente limpia de energía, lo que podría generar una dependencia mayor de fuentes fósiles o limitar la penetración renovable. Actualmente, las soluciones comerciales para el monitoreo de fallas son costosas, no escalables o carecen de fundamentos físicos, lo que limita su adopción en plantas medianas o en expansión. Por tanto, existe una necesidad tecnológica y económica real de contar con herramientas más accesibles, robustas y explicables para el diagnóstico de fallas. Esta brecha representa una oportunidad estratégica para desarrollar soluciones nacionales con potencial de transferencia al sector productivo y escalabilidad internacional.

7. Solución

7.1 ¿En qué consiste su propuesta de solución?

La solución consiste en el desarrollo de un sistema de diagnóstico automático de fallas en módulos solares fotovoltaicos, utilizando un modelo híbrido de inteligencia artificial que combina redes neuronales convolucionales (CNN) con redes neuronales informadas por física (PINNs). Este enfoque permitirá identificar fallas de forma precisa y explicable, integrando tanto patrones visuales como el comportamiento eléctrico esperado del sistema fotovoltaico. El funcionamiento del sistema se basa en tres componentes principales:

- **Captura de datos experimentales:** Se generará un conjunto de datos propios a partir de la adquisición de imágenes de electroluminiscencia y variables eléctricas (corriente, voltaje, temperatura, potencia) de módulos en condiciones controladas. Las pruebas de laboratorio considerarán fallas frecuentes como sombreado parcial, acumulación de suciedad, desconexiones eléctricas y puntos calientes.
- **Modelo CNN:** Se entrenará una red neuronal convolucional en Python utilizando bibliotecas como PyTorch, para detectar patrones visuales característicos de cada tipo de falla. Este componente permite una detección automática basada en la información contenida en las imágenes.
- **Modelo PINN:** Se desarrollará un modelo físicamente informado que incorporará ecuaciones eléctricas relevantes al comportamiento de los paneles solares, tales como la relación voltaje-corriente (curvas I-V). Este componente refuerza la interpretabilidad de los resultados, permitiendo validar la presencia de una falla desde el punto de vista físico, más allá del análisis visual. La metodología contempla el diseño, entrenamiento e integración de ambos modelos, y su validación bajo condiciones de laboratorio. Esta integración busca mejorar la capacidad de generalización y confiabilidad del sistema, facilitando su futura aplicación en ambientes reales mediante una plataforma escalable de monitoreo.

7.2 ¿Cuál es el estado del arte?

El uso de modelos de aprendizaje profundo para la detección de fallas en módulos fotovoltaicos ha crecido en los últimos años, especialmente mediante el análisis de imágenes de electroluminiscencia. Modelos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado un alto desempeño en tareas de clasificación automática de fallas, utilizando datasets como PVEL-AD, que contiene imágenes anotadas con distintos tipos de defectos visibles (disponible en: <https://github.com/>

binyisu/PVEL-AD). Sin embargo, estos enfoques suelen operar como “cajas negras”, careciendo de interpretabilidad y sin incorporar relaciones físicas del sistema. Frente a estas limitaciones, han surgido las redes neuronales informadas por física (PINNs) como una técnica capaz de integrar conocimiento teórico en el entrenamiento de redes. Un referente fundamental es el trabajo de Raissi et al. (2019), quienes propusieron un marco para resolver problemas directos e inversos mediante redes neuronales guiadas por ecuaciones diferenciales, publicado en Journal of Computational Physics (<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>). Más recientemente, Wörnhör et al. (2025) desarrollaron una CNN informada por física para estimar el grosor de la capa TCO en células solares de heterounión, logrando predicciones precisas y físicamente coherentes a partir de datos experimentales reales (<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113541>). Estos avances demuestran que la combinación de visión por computador con modelos físicamente fundamentados es una línea de investigación vigente y prometedora. Sin embargo, aún existen pocas aplicaciones que integren estas técnicas en el diagnóstico automatizado de fallas en módulos fotovoltaicos completos, especialmente bajo condiciones experimentales realistas. En este contexto, la presente propuesta representa una contribución original y contextualizada al desarrollo tecnológico en energías renovables.

7.3 Grado de diferenciación de su propuesta.

La principal diferenciación de esta propuesta respecto a soluciones existentes radica en su enfoque híbrido, que integra aprendizaje automático con conocimiento físico del sistema fotovoltaico. Mientras que la mayoría de los modelos actuales basados en redes neuronales convolucionales (CNN) se limitan al análisis visual, este proyecto incorpora un segundo componente basado en redes informadas por física (PINNs), lo que permite aumentar la robustez y la trazabilidad de los resultados. A nivel metodológico, esta integración permite validar los resultados del modelo no solo por correlación estadística, sino también por coherencia con ecuaciones físicas del comportamiento eléctrico de los módulos. Esto mejora la interpretabilidad y confiabilidad del sistema, lo cual es fundamental para su adopción en contextos industriales, donde los operadores requieren evidencia técnica clara para actuar. Otro aspecto diferenciador es que el modelo será entrenado con datos experimentales propios generados en laboratorio, en lugar de depender exclusivamente de bases de datos públicas. Esto permitirá un mejor ajuste al contexto local y a los tipos de falla más frecuentes en ambientes como el norte de Chile. Desde el punto de vista de aplicabilidad, se proyecta una solución adaptable a distintos tipos de módulos y condiciones operativas. Esto representa una ventaja en términos de accesibilidad y despliegue en terreno frente a soluciones que requieren hardware específico o intervención manual constante. En conjunto, esta propuesta ofrece una alternativa más explicable, contextualizada y transferible que las herramientas actuales basadas únicamente en visión por computador.

7.4 ¿Cuál es la hipótesis que se pondrá a prueba?

La hipótesis central de esta tesis es que: “La combinación de una red neuronal convolucional (CNN) entrenada con imágenes (EL, IR, Visible), junto con una red neuronal informada por física (PINN) que incorpore relaciones eléctricas propias del funcionamiento fotovoltaico, permite detectar fallas en módulos solares con mayor precisión, robustez y explicabilidad que modelos basados únicamente en datos visuales.” Esta hipótesis se validará mediante la comparación del desempeño del modelo híbrido CNN + PINN frente a modelos tradicionales (por ejemplo, CNN sin información física), utilizando métricas como precisión, sensibilidad y robustez ante datos no vistos. Asimismo, se evaluará su capacidad de interpretación a partir de su coherencia con los parámetros eléctricos esperados. El objetivo es comprobar que la

incorporación de conocimiento físico en el proceso de aprendizaje permite no solo mejorar los resultados, sino también ofrecer trazabilidad técnica, lo que es clave para su adopción en aplicaciones reales de monitoreo fotovoltaico.

7.5 Grado de Madurez Tecnológica de la Solución

Actualmente, el proyecto se encuentra en un nivel de madurez tecnológica TRL 3, correspondiente a la etapa de formulación de concepto y validación analítica de componentes clave. Se han identificado y estudiado modelos de referencia basados en CNN y PINNs, y se ha definido una estrategia metodológica para su integración, la cual está siendo trabajada con datasets públicos. Durante el desarrollo de la tesis y de este proyecto se espera alcanzar el TRL 4, correspondiente a la validación de componentes tecnológicos en un entorno controlado de laboratorio. Para ello, se contempla la adquisición de cámaras de electroluminiscencia y equipos de medición que permitirán capturar datos reales de módulos fotovoltaicos con distintos tipos de fallas. Con esta información, se entrenará y validará un modelo híbrido CNN + PINN que pueda generar diagnósticos automáticos basados en datos visuales y eléctricos. El avance hacia TRL 4 implicará no solo la implementación del modelo, sino también su prueba sistemática mediante métricas cuantitativas de desempeño, explicabilidad y robustez, lo que sentará las bases para su futura validación en terreno (TRL 5) mediante alianzas con actores del ecosistema solar chileno.

8. Oportunidad de mercado

8.1 ¿Cuál es el mercado objetivo de su propuesta?

El mercado objetivo de esta propuesta está compuesto por actores clave del sector solar fotovoltaico, principalmente: Empresas generadoras y operadoras de plantas solares, tanto a gran escala como en proyectos de menor tamaño, que buscan optimizar el mantenimiento predictivo, reducir pérdidas operacionales y extender la vida útil de sus instalaciones. Empresas proveedoras de servicios de operación y mantenimiento (O&M), que enfrentan el desafío de monitorear y mantener en óptimas condiciones miles de módulos distribuidos en extensas áreas, muchas veces bajo condiciones ambientales adversas. E integradores tecnológicos y empresas de monitoreo, interesados en incorporar soluciones innovadoras y explicables que complementen sus plataformas actuales con herramientas basadas en inteligencia artificial. Según datos del Coordinador Eléctrico Nacional, al cierre de 2023, el Sistema Eléctrico Nacional contaba con 944 centrales generadoras en operación, de las cuales 506 corresponden a plantas solares fotovoltaicas. Estas plantas son operadas por diversas empresas, lo que refleja un mercado amplio y diversificado para la implementación de soluciones de diagnóstico automatizado de fallas. <https://electromineria.cl/sistema-electrico-nacional-cierra-el-ano-con-casi-1-000-centrales-generadoras-en-operaciones/> A nivel internacional, el crecimiento del mercado solar es igualmente notable. De acuerdo con SolarPower Europe (2023), se proyecta que la capacidad instalada fotovoltaica global supere los 4 teravatios (TW) para 2027, lo que indica una creciente demanda por soluciones inteligentes de diagnóstico y mantenimiento. <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/> La solución propuesta, basada en modelos explicables de inteligencia artificial integrados con conocimientos físicos del sistema fotovoltaico, es altamente replicable y escalable. Su carácter automatizado y fundamentado científicamente la hace especialmente atractiva para plantas ubicadas en entornos exigentes, como desiertos, zonas remotas o regiones de alta radiación, tanto en Chile como en otros países con

condiciones similares (por ejemplo, India, Egipto, México, Emiratos Árabes Unidos).
<https://globalsolaratlas.info/map>

8.2 ¿Cuál es su propuesta de continuidad?

Una vez finalizado el desarrollo de la tesis y alcanzado el TRL 4 (validación en entorno de laboratorio), se proyecta avanzar hacia TRL 5, realizando pruebas en terreno con apoyo de empresas o instituciones del sector solar. Esta etapa permitirá validar la solución en condiciones reales de operación y generar evidencia para su transferencia o escalamiento. En términos de continuidad, se identifican dos rutas principales: Línea de financiamiento público: Se contempla la postulación a fondos de I+D aplicada como FONDEF IDeA (ANID), el instrumento VIU para valorización de tesis doctorales, o concursos de transferencia tecnológica de CORFO, como Startup Ciencia o Bienes Públicos para la Competitividad. Estos fondos permitirían financiar el desarrollo de un prototipo avanzado, pruebas piloto y acciones de vinculación con empresas. Ruta de emprendimiento tecnológico: Se proyecta la transformación de esta solución en una plataforma digital tipo SaaS (Software as a Service), que permita a empresas subir imágenes de módulos y variables eléctricas para obtener un diagnóstico automatizado y explicable sobre el estado de sus paneles. Esta plataforma podría escalar como servicio por suscripción o licenciamiento, abriendo posibilidades de comercialización nacional e internacional.

8.3 ¿Potencial vinculación con el entorno socioproductivo

monitoreo y mantenimiento de plantas solares, como empresas de operación y mantenimiento (O&M) y centros de investigación aplicada en energías renovables. La propuesta contempla realizar actividades de validación temprana con estos actores, incluyendo entrevistas técnicas, pruebas de concepto y demostraciones del modelo en desarrollo. En conjunto, estas instancias permitirán validar el valor práctico de la solución, recoger retroalimentación desde el terreno y fortalecer su proyección como herramienta aplicable y transferible al sector productivo nacional e internacional.

9. Antecedentes del Director(a) y Profesor(a) Guía

Director (a) Responsable

- **Nombre:** Karla Ivette Schröder Silva
- **Rut:** 18618394-0
- **CV Responsable:** https://www.canva.com/design/DAGVnSByrV0/KJUtOPVJ7f5IhPzu2VeRSA/view?utm_content=DAGVnSByrV0&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=uniquelinks&utm_id=h8b23dcdbff

Profesor Guía

- **Profesor guía:** Gonzalo Alberto Farías Castro
- **Rut:** 13111865-1
- **Unidad Académica:** Escuela de Ingeniería Eléctrica
- **Profesor guía:**
- **Rut:**

- **Unidad Académica:**

- **Link carta de patrocinio:** <https://drive.google.com/file/d/13j56APG1lfg3c4pDNRUqQmYsFYym3X51/view?usp=sharing>

10. Plan de trabajo y presupuesto

Objetivo específico: Objetivo Específico 1: Diseñar protocolo experimental

Actividades:

- **Diseño del setup experimental**
Especificación de equipos requeridos, montaje preliminar y definición de variables a medir
Presupuesto: \$0
Duración: Mayo 2025 meses
- **Arriendo de cámaras e instrumentos**
Arriendo de cámara de electroluminiscencia, termográfica y equipos eléctricos
Presupuesto: \$1.000000
Duración: Mayo 2025 meses
- **Validación del entorno de medición**
Pruebas de funcionamiento de cámaras y sensores en laboratorio
Presupuesto: \$300.000
Duración: Mayo 2025 meses
- **Captura de imágenes y rotulado**
Toma de imágenes de módulos con distintas fallas y anotación manual del dataset
Presupuesto: \$300.000
Duración: Junio 2025 meses

Objetivo específico: Entrenar y validar modelo CNN

Actividades:

- **Preprocesamiento de imágenes**
Normalización, segmentación y augmentación del dataset para entrenamiento
Presupuesto: \$200.000
Duración: Julio 2025 meses
- **Entrenamiento del modelo CNN**
Implementación del modelo en Python y ajuste de hiperparámetros
Presupuesto: \$200.000
Duración: Julio 2025 meses
- **Validación del modelo CNN**
Evaluación de precisión, recall y sensibilidad con conjunto de prueba
Presupuesto: \$0
Duración: Julio 2025 meses

Objetivo específico: Desarrollar PINN

Actividades:

- **Modelado físico del sistema**
Formulación de ecuaciones que describen el comportamiento eléctrico del módulo

Presupuesto: \$0
Duración: Agosto 2025 meses

- **Codificación de la PINN**
Implementación de la red neuronal físicamente informada en Python
Presupuesto: \$150.000
Duración: Agosto 2025 meses
- **Entrenamiento y ajuste del modelo**
Uso de datos experimentales para ajustar parámetros físicos
Presupuesto: \$150.000
Duración: Agosto 2025 meses
-

Presupuesto: \$
Duración: meses

Objetivo específico: Integrar CNN + PINN

Actividades:

- **Integración funcional de modelos**
Diseño de arquitectura conjunta que combine los modelos CNN y PINN
Presupuesto: \$100.000
Duración: Septiembre 2025 meses
- **Validación funcional**
Pruebas de consistencia y desempeño del sistema integrado
Presupuesto: \$100.000
Duración: Septiembre 2025 meses

Objetivo específico: Transferencia y proyección

Actividades:

- **Actividades de vinculación**
Presentación de resultados a actores externos y generación de redes de colaboración
Presupuesto: \$500.000
Duración: Octubre 2025 meses
- **Formulación de propuesta de continuidad**
Elaboración de propuesta para fondos ANID, CORFO u otras convocatorias
Presupuesto: \$0
Duración: Octubre 2025 meses

Presupuesto total: 3.000.000