



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Red neuronal convolucional para el diagnóstico de módulos fotovoltaicos

**Jorge Luis Pincay
Lozada**

**Universidad Coopera-
tiva de Colombia
Cali, Colombia**

**Luis Fernando Mulcue
Nieto**

**Universidad Autónoma
de Manizales
Manizales, Colombia**

**Jesus Alfonso López
Sotelo**

**Universidad Autónoma
de Occidente
Cali, Colombia**

Resumen

A través de este documento se presenta el marco de trabajo y los avances parciales de la investigación que pretende acondicionar el uso de técnicas de aprendizaje profundo, para diagnosticar fallas de los módulos fotovoltaicos en operación, con base en las termografías como principal insumo de entrada para una red neuronal convolucional, y así obtener una guía en el diagnóstico y detección de fallos por cada módulo fotovoltaico – PV en funcionamiento. Bajo un método de investigación deductivo con enfoque mixto que aborda aspectos tanto cuantitativos como cualitativos, donde posteriormente se evalúa la eficiencia lograda del algoritmo de inteligencia artificial – IA, mediante rangos porcentuales de aciertos de falsos positivos y falsos negativos, siendo así de tipo exploratoria en el uso de redes neuronales convolucionales, este proyecto concluye en la viabilidad de hacer uso de herramientas de IA para diagnosticar sistemas de generación fotovoltaica en sitio, y con sugerencia diagnostica del posible fallo que cada módulo de captación pueda estar sobrellevando en el momento de ser captado por medio de una imagen de espectro infrarrojo. Con lo anterior se puede mejorar la interconexión de los módulos para corregir su proceso de conversión energética, creando así una mejora en eficiencia general del sistema, así como los tiempos de retorno de inversión, lo que se espera redunde un impacto en el uso de masivo de este tipo de sistemas para la obtención de energía eléctrica haciendo uso de fuentes alternativas.

Palabras clave: sistemas energéticos; inteligencia artificial; energía fotovoltaica; redes neuronales

Abstract

This paper presents the framework and partial progress of the research that aims to condition the use of deep learning techniques to diagnose failures of photovoltaic modules in operation, based on thermographies as the main input for a convolutional neural network, and thus obtain a guide in the diagnosis and detection of failures for each photovoltaic module - PV in operation. Under a deductive research method with a mixed approach that addresses both quantitative and qualitative aspects, where the efficiency achieved by the artificial intelligence - AI algorithm is subsequently evaluated, through percentage ranges of false positive and false negative hits, thus being exploratory in the use of convolutional neural networks, This project concludes in the feasibility of making use of AI tools to diagnose photovoltaic generation systems on site, and with diagnostic suggestion of the possible failure that each collection module may be carrying at the time of being captured by means of an image of infrared spectrum. With the above, the interconnection of the modules can be improved to correct their energy conversion process, thus creating an improvement in overall system efficiency, as well as the return on investment times, which is expected to have an impact on the massive use of such systems for obtaining electricity using alternative sources.

Keywords: energy systems; artificial intelligence; photovoltaic energy; neural networks

1. Introducción

En el año 2020 se generó un incremento del 23% equivalente a 156TWh, en la generación de electricidad a partir del recurso solar, en comparación con el año 2019; representando así un 3,1% de toda la generación de electricidad en el mundo, siendo la tercera forma de generación de electricidad de recursos renovables. (Bojek et al., 2021)

La generación de electricidad con fuente solar está siendo impulsada por medidas de fomento gubernamental en muchos países del mundo. Incluyendo a Colombia, de igual manera se vuelve transcendental el mantenimiento y diagnóstico de las instalaciones existente para lo cual se promueve la mejora en las tecnologías para detección de fallas en las instalaciones actuales y futuras.

Como cualquier sistema de generación de electricidad, las instalaciones de sistemas fotovoltaicos - SFV, requieren técnicas que permitan realizar el seguimiento, monitoreo y detección temprana de fallas y anomalías, permitiendo así mantener las condiciones óptimas de operación y aumentar la rentabilidad de estos proyectos (Triki-Lahiani et al., 2018). Existen diferentes métodos de detección de fallas fuera de línea (Mekki et al., 2016), con base en parámetros eléctricos principalmente: tensión, e intensidad de corriente, con los cuales se construyen las curvas $V \cdot I$ correspondientes para cada módulo PV, Lo cual implica interrupciones en el proceso de transformación energética.

Para no generar interrupciones durante el proceso de diagnóstico, se han utilizado las termografías, o imágenes infrarrojas como una de las herramientas llamadas a liderar estos procesos, la termografía detecta temperaturas a distancia, sin contacto físico, funciona gracias a las radiaciones infrarrojas donde se emplea cámaras o sensores termográficos para conseguir la información de

la temperatura, estas cámaras captan la radiación infrarroja del espectro electromagnético.(Høiaas et al., 2022)

Esta propuesta de investigación doctoral pretende alcanzar un algoritmo estable de IA de manera experimental que permita apoyar los procesos de diagnóstico de las fallas más tipificadas pero imperceptibles a la vista humana.

2. Estado del arte

La eficiencia de generación de electricidad a partir del recurso solar proviene principalmente de los módulos de captación fotovoltaicos, por ello son considerados como el componente más importante del sistema, y es precisamente el objeto que debe ser más estudiado en los procesos diagnósticos para la oportuna detección de fallas, y así lograr un sistema operacionalmente fiable, eficiente y seguro. (Mekki et al., 2016)(Gallardo-Saavedra et al., 2019)

A partir de las imágenes infrarrojas IR se puede comprobar si la calidad de las células modulares cumple con los requerimientos operacionales. Si los módulos se tornan más calientes debido a la sombra, las células dañadas o subcadenas consumen electricidad, en vez de producirla, la eficiencia se reduce en un 0,5 % por Kelvin. Un calentamiento promedio del 10 °C con respecto a la temperatura media normal significa ya un rendimiento de energía un 5 % inferior.(Luis et al., 2017)

La inteligencia artificial, pretende emular la inteligencia biológica, a partir del conocimiento que se tiene de los cerebros humanos, se busca crear conexiones de sinopsis en un algoritmo que puedan procesar información de manera semejante. (Kubat, 1999). Si bien Para el año 2015 se afirmaba la ausencia de investigación en proyectos que vincularan las redes neuronales para aplicarlas en los procesos de detección de fallas y monitoreo de los SFV(Mekki et al., n.d.)

Las redes neuronales han sido empleadas de manera satisfactoria en diferentes procesos de la conversión energética fotovoltaica(Mellit & Kalogirou, 2008). En los sistemas fotovoltaicos SFV, se han desarrollado algoritmos de IA para la predicción de la energía generada con las plantas PV (Ding et al., 2011; Mellit et al., 2013), estos procesos ya llevan más de una década de desarrollo y hoy por hoy son predicciones de gran porcentaje de certeza. En cuanto al rendimiento, la IA ha aportado en el proceso de evaluaciones para determinar la configuración optima de las conexiones entre series y paralelos que pueden transformar la mayor cantidad de energía según la estimación de los parámetros (Bastidas-Rodriguez et al., 2013), por otro lado, la IA se usó para realizar procesos de investigación en el análisis el rendimiento de dos tecnologías solares fotovoltaicas bajo exposición atmosférica mediante modelos de redes neuronales artificiales – RNA (Velilla et al., 2014) para los sistemas de seguimiento del punto máximo de potencia – MPPT, la IA a aportado en la creación de métodos que permiten su reconfiguración a partir de la conductancia incremental para contrarrestar rápidamente los efectos de poseer parcialmente áreas sombreadas sobre los módulos generadores. (Boukenoui et al., 2016; Punitha et al., 2013), las redes neuronales convolucionales – CNN han sido de utilidad para detectar sombras parciales sobre los módulos fotovoltaicos. (Mekki et al., 2016)



Las imágenes de infrarrojas se han usado para identificar módulos defectuosos, así como para el control y optimización de estos, así como su impacto en el rendimiento del SFV (Buerhop et al., 2018), después de realizar una gran cantidad de imágenes termográficas se han tipificado las fallas que este tipo de tecnología puede identificar con mayor eficacia que otros métodos. Dejando definidas la capacidad de detectar, identificar y cuantificar la gravedad de los defectos que aparecen en los módulos fotovoltaicos es esencial para constituir un sistema fiable, eficiente y seguro, evitando pérdidas de energía, desajustes y problemas de seguridad, los defectos detectados se han clasificado en cinco modos de fallo termográficos: sobrecalentamiento en celdas, en circuito bypass, en la caja de conexiones, en la conexión entre la barra colectora (busbar) y la caja de conexiones y en el módulo completo. (Buerhop et al., 2018; Gallardo-Saavedra et al., 2019)

En el año 2019, de manera experimental se realizó el proceso de inspección de 17412 módulos monocristalinos, para lo cual fue necesario 34 días de trabajo de dos especialistas, donde Cada uno de los fallos detectados durante la inspección, independientemente de su temperatura, fue registrado, identificado y comunicado, el proceso de análisis tomó 26 días, analizado utilizando el software de la cámara termográfica, IRTSoft, obteniendo la temperatura relativa del defecto, la temperatura media de la zona sana y la diferencia entre ellas, lo que indicaba el sobrecalentamiento del defecto.(Gallardo-Saavedra et al., 2019) Es precisamente este proceso de análisis el que se busca mejorar mediante las herramientas computacionales.

Se han realizado algunos avances en el campo en los últimos 2 años, usar las herramientas de visión computacional para realizar la clasificación de fallas desde e insumo de videos aéreos, los cuales contenían 4.6 millones de termografías de 107842 módulos PV, información la cual se usó para entrenar una RNA de arquitectura ResNet (Bommes et al., 2021)

3. Metodología

A la fecha, no ha sido posible conseguir un paquete de imágenes etiquetadas para realizar el entrenamiento, por lo cual en el proceso operacional de la investigación es necesario la adición de la campaña de datos.

Se inicia el proceso de apropiar el conocimiento alrededor de las técnicas de inteligencia artificial - IA y su aplicación en detección de fallas de sistemas, al ser un área de intenso desarrollo tecnológico científico actual, se debe realizar revisiones continuas de nuevos aportes al proceso de investigación, por lo cual se requiere analizar los nuevos trabajos de la comunidad científica, garantizando así un potencial de innovación al concluir el proyecto.

Con reportes oficiales, y publicaciones recientes que enriquecen y potencializan el trabajo de investigación en curso, con las cuales se procede a construir bases sólidas para el informe y publicaciones que están en desarrollo, así como seguir recomendaciones técnicas de procesos previos para la adquisición de los datos e imágenes infrarrojas – IR. Según experimentos realizados por investigadores.



Para fase de recolección de señales y parámetros influyentes para el diagnóstico de los módulos fotovoltaico, se ha logrado contar con un importante avance, pues la UJA (Universidad de Jaén), cuenta con diferentes Sistemas Fotovoltaicos (SFV) con sistemas de adquisición de datos (DAQSAD), y estaciones meteorológicas para la medición y recolección de los diferentes parámetros eléctricos y meteorológicos que pueden ser considerados potencialmente relevantes para el proyecto, de igual manera se cuenta con trazadores de curvas corriente versus tensión (I-V).

Durante la estancia de investigación en la UJA, se puso en marcha el sistema de adquisición de datos, por medio de cual se cuenta con acceso a información referentes a diferentes instalaciones de SFV, hasta el momento se han realizado pruebas preliminares con 3 instalaciones:

- Sistema paralelo PWM compuesto por 2 paneles
- Sistema serie PWM compuesto por 2 paneles
- Sistema MPPT compuesto por 2 paneles

Mediante un sistema de instrumentación se alcanza la adquisición de datos que almacena los parámetros medidos de tensión y corrientes tanto del generador fotovoltaico, batería como las entradas y salidas del controlador, así como temperatura del módulo. Así mismo está la estación meteorológica para la captura de radiación solar en el mismo plano de inclinación de los módulos, plano horizontal, temperatura ambiente, velocidad de viento, humedad, punto de rocío y presión. Creando información redundante que podría ser utilizada para mejorar la eficacia y eficiencia del producto de IA.

Para iniciar este proceso de adquisición y medición de parámetros se han realizado algunas imágenes (Fig1) de los SFV en operación:

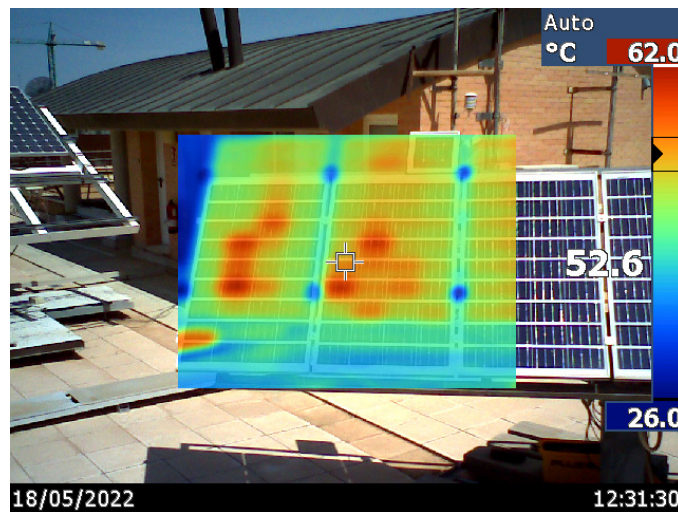


Figura 1. Imagen de termografía del SFV Serie. Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de imágenes IR se procesan mediante los softwares del fabricante de las cámaras FLUKE para obtener una imagen en formato legible por el software donde se desarrollará la IA. Se espera tener para el final de la estancia un dataset (paquete de información para la configuración de la

IA) para poder proceder al entrenamiento del primer algoritmo de IA tipo CNN para analizar la respuesta al problema de investigación propuesto.

Los sistemas fotovoltaicos que se están realizando las primeras medidas, cuentan con acceso de las curvas I^*V del momento histórico que los SFV fueron puestos en marcha, creando así el potencial de comparación y desgaste a través del tiempo de estos sistemas.

Actualmente está en curso la construcción de un dataset para lograr el entrenamiento del modelo de la técnica de aprendizaje profundo, para lograr el entrenamiento de una red neuronal convolucional – CNN, de su sigla en inglés, y así culminar los entrenamientos y pruebas conducentes a la consecución del proceso del cuarto objetivo específico: Validar del modelo IA en sitio para módulos PV en operación, con esto se tendría la consecución del proyecto completado, al alcanzar el objetivo general que trata de un algoritmo de IA para el diagnóstico de fallas de los módulos de captación fotovoltaica en sitio, es decir bajo las condiciones de operación.

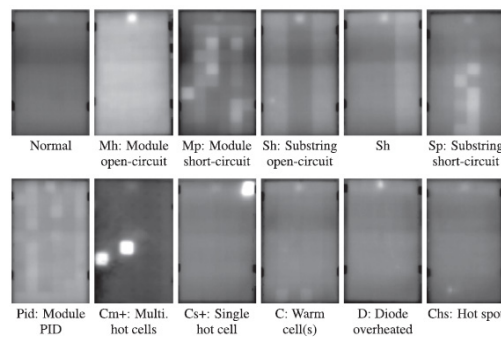


Fig 2. Exemplary IR images of a normal and ten different types of anomalous PV modules in our dataset. Temperature ranges from 30°C (black) to 60°C (white). (Bommes et al., 2022)

En la figura 2 se observa la clasificación realizada recientemente por investigadores que entrenaron una IA de tipo convolucional CNN y con arquitectura ResNet-34, con una pérdida contrastiva supervisada, sobre la que se empleó un clasificador k-próximo para detectar anomalías, con 73,3% de efectividad. (Bommes et al., 2022)

En la actualidad se ha iniciado el proceso de diseño y codificación de la IA, actualmente, ya se cuenta con algoritmos entrenados y funcionando para la clasificación de imágenes, el primero para imágenes de blanco y negro, el segundo para imágenes a color, estos algoritmos han sido entrenados con dataset disponibles y abiertos, es necesario terminar la construcción de dataset de IR-PV para la culminación del objetivo de la investigación propuesto. Estos avances en el algoritmo de IA se han realizado con dataset disponibles como se ha comentado anteriormente, para el cual se han probado algoritmos de clasificación con redes neuronales convolucionales profundas, iniciando con clasificación en blanco y negro mediante herramientas de Google, TensorFlow y keras



Fig 3. DataSet libre fashion_mnist. Google TensorFlow / Keras

Posteriormente se ha logrado entrenar modelos para reconocimiento, con dataset disponibles y CIFAR-10 y CIFAR-100, de la Universidad de Toronto, que cuenta con 60.000 imágenes de color para 10 clases disponibles, dejando 6.000 imágenes por cada clase. Obteniendo rendimientos satisfactorios en imágenes de 3 canales:

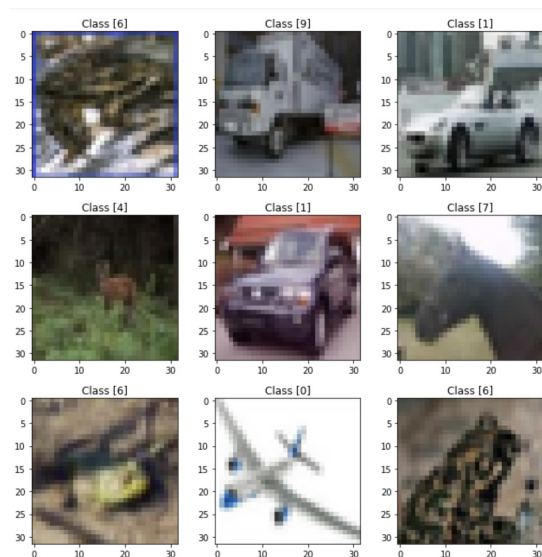


Fig 4. DataSet libre Cifar-10. Universidad de Toronto

Con estos desarrollos en el lenguaje de programación Python 3.0 se logrado obtener importantes avances, ratificando así la viabilidad de crear un algoritmo que permita el diagnóstico fallas de los módulos PV en operación, mediante una Graficación de imágenes de prueba con clasificación correcta e incorrecta

4. Conclusiones parciales

Una vez se cuente con el dataset completo, se harán las pruebas para la validación del modelo de las arquitecturas de IA, para satisfacer el diagnóstico de los módulos PV bajo condiciones de operación. La investigación se considera con gran potencial de innovación e impacto, al mejorar los procesos operacionales de los SFV pueden masificarse este tipo de generación de electricidad en países que aún son muy incipientes en este campo, pues se puede lograr mayor efectividad en el proceso de conversión energética lo cual reduce los tiempos de retorno de las inversiones, convirtiendo en estos proyectos atractivos desde el punto de vista financiero.

La privilegiada ubicación geográfica de Colombia, pues está situado sobre el eje ecuatorial, genera un excelente ángulo azimutal para el uso del sol como fuente para procesos energéticos, y es también una gran oportunidad para poner marcha proyectos que permitan contribuir con estas tecnologías, desde el punto de vista de emprendimientos de base tecnológica con gran impacto esperado para diferentes electrificadoras alrededor del mundo, pues se han masificado el uso de estos Sistemas fotovoltaicos tanto en tamaño como complejidad, por lo cual cada día es relevante evitar la aparición de problemas relacionados a la estabilidad y la calidad de operación de las celdas y módulos fotovoltaicos, esto garantiza la potencia de la generación de energía en el tiempo, de ahí la necesidad de contar con un sistema eficiente para su diagnóstico. Lo cual se pretende mediante tratamiento de imágenes térmicas para sistemas fotovoltaicos.

El proyecto está vinculado a un área de investigación en desarrollo, donde actualmente se cuentan con una creciente pero aún primitiva contribución a la ciencia en esta área.

5. Agradecimientos

Agradecimientos especiales A la Universidad de Jaén, por brindar acceso a SFV, equipos de laboratorio para las etapas experimentales del proyecto. La Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado - AUIP, quien ha otorgado el beneficio de la beca para el traslado entre Colombia – España – Colombia, del investigador principal. La Universidad Cooperativa de Colombia, por financiar otros rubros de la presente investigación.

Referencias

- Bastidas-Rodriguez, J. D., Ramos-Paja, C. A., & Saavedra-Montes, A. J. (2013). Reconfiguration analysis of photovoltaic arrays based on parameters estimation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 35, 50–68. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2013.03.001>
- Bojek, P., Bahar, H., & International Energy Agency. (2021, November). *Solar PV - Tracking report November 2021*. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>.
- Bommes, L., Hoffmann, M., Buerhop-Lutz, C., Pickel, T., Hauch, J., Brabec, C., Maier, A., & Marius Peters, I. (2022). Anomaly detection in IR images of PV modules using supervised contrastive learning. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(6), 597–614. <https://doi.org/10.1002/pip.3518>



- Bommès, L., Pickel, T., Buerhop-Lutz, C., Hauch, J., Brabec, C., & Peters, I. M. (2021). Computer vision tool for detection, mapping, and fault classification of photovoltaics modules in aerial IR videos. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(12), 1236–1251. <https://doi.org/10.1002/pip.3448>
- Boukenoui, R., Salhi, H., Bradai, R., & Mellit, A. (2016). A new intelligent MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under fast transient variations of shading patterns. *Solar Energy*, 124, 124–142. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.11.023>
- Buerhop, C., Fecher, F. W., Pickel, T., Häring, A., Adamski, T., Camus, C., Hauch, J., & Brabec, C. J. (2018). Verifying defective PV-modules by IR-imaging and controlling with module optimizers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(8), 622–630. <https://doi.org/10.1002/pip.2985>
- Ding, M., Wang, L., & Bi, R. (2011). An ANN-based Approach for Forecasting the Power Output of Photovoltaic System. *Procedia Environmental Sciences*, 11(PART C), 1308–1315. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2011.12.196>
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Pérez, Ó. (2019). *Analysis and characterization of PV module defects by thermographic inspection* *Análisis y caracterización de defectos en módulos fotovoltaicos por medio de termografía infrarroja*. <https://doi.org/10.17533/udea.redin>
- Høiaas, I., Grujic, K., Imenes, A. G., Burud, I., Olsen, E., & Belbachir, N. (2022). Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112353>
- Kubat, M. (1999). Neural networks: a comprehensive foundation by Simon Haykin, Macmillan, 1994, ISBN 0-02-352781-7. *The Knowledge Engineering Review*, 13(4), 409–412. <https://doi.org/10.1017/S0269888998214044>
- Luis, J., Lozada, P., Autónoma, U., Occidente, D. E., De, F., Departamento, I., Operaciones, D. E., & Sistemas, Y. (2017). *ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN DE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO Y SU VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO*.
- Mekki, H., Mellit, A., & Salhi, H. (2016). Artificial neural network-based modelling and fault detection of partial shaded photovoltaic modules. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 67, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.05.005>
- Mekki, H., Mellit, A., Salhi, H., & Guessoum, A. (n.d.). *Mediterranean Journal of Modeling and Simulation Artificial neural Network-Based modeling and monitoring of photovoltaic generator*.
- Mellit, A., & Kalogirou, S. A. (2008). Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 574–632. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2008.01.001>
- Mellit, A., Sağlam, S., & Kalogirou, S. A. (2013). Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module. *Renewable Energy*, 60, 71–78. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2013.04.011>
- Punitha, K., Devaraj, D., & Sakthivel, S. (2013). Artificial neural network based modified incremental conductance algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic system under partial shading conditions. *Energy*, 62, 330–340. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.08.022>
- Triki-Lahiani, A., Bennani-Ben Abdelghani, A., & Slama-Belkhodja, I. (2018). Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 2680–2692). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.101>
- Velilla, E., Valencia, J., & Jaramillo, F. (2014). Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models. *Solar Energy*, 107, 260–271. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.04.033>



Sobre los autores

- **Jorge Pincay Lozada:** Ingeniero Mecatrónico, Máster en Ingenierías, Candidato a Doctor en Ingenierías Profesor Asistente – Facultad de Ingenierías, Grupo de Investigación ES-LINGA. Profesor titular. jorge.pincay@ucc.edu.co
- **Luis Fernando Mulcuen Nieto:** Ingeniero Físico. Magíster en Ciencias-Física. Máster en Energía Fotovoltaica. Doctor en Ciencias-Física, Doctor en Ingeniería Mecánica y eficiencia energética. Profesor departamento de física y matemáticas, Universidad Autónoma de Manizales. luisf.mulcuen@autonoma.edu.co
- **Jesús Alfonso López Sotelo:** Ingeniero Electricista. Magíster en Automática, Doctor en Ingeniería. Profesor Titular - Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Occidente jalopez@uao.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

