

Optimización del rendimiento de plantas solares en azotea mediante monitoreo IoT de bajo costo: Un estudio de caso en Montería, Colombia¹

Optimizing Rooftop Solar Plant Performance through Low-Cost IoT Monitoring: A Case Study in Montería, Colombia

Recibido: marzo 26 de 2024 – Aceptado: junio 30 de 2025.

¹**Resumen**—Respondiendo a la necesidad de soluciones sostenibles, este estudio introduce un sistema de monitoreo IoT de bajo costo para plantas solares en montadas en techo. Usando la Raspberry Pi Pico W y sensores económicos, se logra una monitorización adecuada en tiempo real. La validación, en Montería, Colombia, mostró alta precisión: correlaciones (Temperatura del Panel: 0.99, Radiación Solar: 0.98, Temperatura del Inversor: 0.83, Temperatura Ambiente: 0.96) y bajos REMC (Temperatura del Panel: 1.59°C, Radiación Solar: 86.38 W/m², Inversor: 3.56°C, Ambiente: 1.29°C), comparada con equipos comerciales de medida. Estos resultados subrayan la capacidad del sistema para optimizar el rendimiento de instalaciones solares, favoreciendo una transición energética más sostenible.

Palabras clave—Planta solar fotovoltaica, Monitorización IoT, Raspberry Pi Pico W, Sostenibilidad energética, Temperatura del inversor.

Abstract—Responding to the need for sustainable solutions, this study introduces a low-cost IoT monitoring system for roof-mounted solar power plants. Using the Raspberry Pi Pico W and inexpensive sensors, adequate real-time monitoring is achieved. The validation, in Montería, Colombia, showed high accuracy: correlations (Panel Temperature: 0.99, Solar Radiation: 0.98, Inverter Temperature: 0.83, Ambient Temperature: 0.96) and low REMC (Panel Temperature: 1.59°C, Solar Radiation: 86.38 W/m², Inverter: 3.56°C, Ambient: 1.29°C), compared to commercial measurement equipment. These results underline the system's ability to optimize the performance of solar installations, favoring a more sustainable energy transition.

Keywords—Photovoltaic solar plant, IoT monitoring, Raspberry Pi Pico W, Energy sustainability, Inverter temperature.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Optimización de la gestión energética de una planta solar PV híbrida con sistema de almacenamiento en baterías de iones de litio mediante algoritmos genéticos”, apoyado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería y Universitat Politècnica de València. a través de la Maestría en Investigación Operativa y Estadística.

F.A. Lara, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, email: fabian.lara@upb.edu.co.

J. de la Ossa, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia, email: jimena.de@upb.edu.co.

S. Jaramillo, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia, email: santiago.jaramillomi@upb.edu.co.

C.A. Vargas, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, email: carvarsa@upv.edu.es.

Como citar este artículo: Lara, F. A., de la Ossa, J., Jaramillo, S. y Vargas, C.A. Optimización del rendimiento de plantas solares en azotea mediante monitoreo IoT de bajo costo: Un estudio de caso en Montería, Colombia, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 19, no. 37, pp. 71-78, enero-junio 2025. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.3106>.



Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

I. INTRODUCCIÓN

La expansión de las energías renovables ha sido sustancial, y la energía solar ha desempeñado un papel crucial en este crecimiento a nivel mundial. La Tierra recibe del sol, una enorme cantidad de energía que supera con creces el consumo anual actual. Por lo tanto, la energía solar es considerada una solución práctica para satisfacer la demanda energética mundial [1]. Prueba de ello, es el paso de las subvenciones públicas a la rentabilidad en la industria fotovoltaica durante la década de 2010, lo que pone de manifiesto el crecimiento y el potencial de la energía solar como fuente de energía sostenible y respetuosa con el medio ambiente [1].

A pesar de las prometedoras perspectivas, existen retos y disparidades en la adopción de la energía solar en distintas regiones del mundo. Por ejemplo, en Vietnam, las energías renovables, incluida la solar, solo representan aproximadamente el 7% del portafolio energético, lo que indica un importante potencial sin explotar [2].

Aunque las previsiones indican que las fuentes de energía renovables podrían satisfacer potencialmente la mitad de la demanda energética mundial en 2040 con una importante contribución de la energía fotovoltaica, la proporción actual de energías renovables en la satisfacción de las necesidades energéticas mundiales se sitúa en el 14% [3]. Es esencial resaltar la importancia del progreso continuo y del respaldo financiero para que las tecnologías solares fotovoltaicas desarrollen plenamente sus capacidades.

A. Optimización del rendimiento en plantas fotovoltaicas solares: estrategias y tecnologías emergentes.

Una de las tecnologías que más rápido avanzan en la actualidad son los sistemas de monitoreo del medio ambiente, así como de la producción de energía. Supervisar de cerca las plantas solares fotovoltaicas es de suma importancia para garantizar su rendimiento y eficiencia óptimos [4], al tiempo que se reduce su impacto negativo en el medio ambiente. Esto es especialmente crucial para maximizar el potencial de estas plantas y minimizar su huella ecológica.

La supervisión de las plantas solares fotovoltaicas juega un papel fundamental para mantener su rendimiento óptimo. La acumulación de polvo natural en los módulos solares puede reducir considerablemente la transmitancia y degradar la eficiencia de conversión, por lo que es necesario limpiarlos periódicamente y predecir su rendimiento mediante algoritmos de aprendizaje automático [5].

Los sistemas solares fotovoltaicos se utilizan cada vez más como fuente de energía renovable. Sin embargo, diversos factores ambientales, como la temperatura ambiente, la nubosidad y la altitud, pueden afectar significativamente a la eficiencia operativa de estos sistemas [6]. Por consiguiente, es crucial tener en cuenta estos factores a la hora de evaluar su rendimiento. Estudios recientes han demostrado la importancia de incorporar factores medioambientales en las evaluaciones de rendimiento para garantizar valoraciones precisas y fiables de la eficiencia de las plantas solares fotovoltaicas [7].

Monitorizar las plantas fotovoltaicas solares es esencial para maximizar su rendimiento y minimizar las consecuencias medioambientales. Se pueden utilizar técnicas como el aprendizaje automático para predecir el rendimiento y optimizar las operaciones [5], análisis de los factores medioambientales [7], seguimiento solar [8], supervisión inteligente [9], estudios de impacto del polvo [7], y rentabilidad del monitoreo remoto [9] contribuyen a la gestión eficaz de las plantas solares fotovoltaicas. Estas estrategias garantizan que las plantas solares fotovoltaicas funcionen a su máximo potencial, apoyando así la adopción generalizada de fuentes de energía renovables.

B. Optimización y desafíos en el monitoreo de instalaciones fotovoltaicas a través de IoT.

Varios estudios han explorado el uso de sensores y técnicas de análisis de datos para la monitorización de plantas solares fotovoltaicas, pero aún se necesitan métodos más precisos y fiables. La literatura revela un consenso sobre la importancia de emplear sensores y técnicas de análisis de datos para la monitorización de plantas solares fotovoltaicas [10]. Estos métodos son cruciales para optimizar el rendimiento y garantizar la fiabilidad de los sistemas de

energía solar [11]. Por ejemplo, se ha propuesto la integración de sensores avanzados con protocolos de comunicación inalámbricos para mejorar la resolución de los sistemas de vigilancia y permitir la adquisición de datos casi en tiempo real [10].

Además, se ha destacado el uso de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) con diversos sensores por su papel en la mejora de la automatización, el control y la supervisión de los sistemas fotovoltaicos [12].

Sin embargo, existen retos como la viabilidad económica, la gestión de datos y problemas de seguridad que deben abordarse [13]. Aunque algunos estudios se han centrado en el desarrollo de métodos de seguimiento rentables [11] para sistemas fotovoltaicos autónomos con células de referencia [14], otros han destacado el potencial de emplear tecnologías avanzadas de reconocimiento (TR), inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (AM) para dotar a los drones de la capacidad de supervisar de forma eficiente las plantas solares a gran escala [15].

C. Condiciones ambientales en la performance de los sistemas fotovoltaicos.

La temperatura del módulo solar es un factor crítico que influye en la eficiencia de las células fotovoltaicas, y las estrategias para la gestión térmica pueden conducir a mejoras significativas en la eficiencia de generación de energía [5].

Es un hecho ampliamente reconocido que las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad, y la irradiancia, introducen incertidumbres que afectan a la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos [7]. Además, se ha observado que el ángulo de instalación de los sistemas fotovoltaicos tiene un efecto insignificante en la generación de energía cuando es inferior a 20° [8].

Por último, la calidad de la potencia de salida de los sistemas fotovoltaicos puede verse afectada por factores como el aumento de la temperatura interna del inversor, que cuando gestiona potencias elevadas sin la temperatura ambiente adecuada, provoca un derrateo de potencia relacionado con la temperatura. No obstante, es necesario desarrollar modos de funcionamiento óptimos para mitigar estos problemas [10]. La integración de sistemas de almacenamiento de energía, como supercondensadores y baterías, aumenta la necesidad de un sistema de supervisión integrado que mejore la fiabilidad del suministro de energía fotovoltaica conectada a la red [13].

D. Validación de prototipos electrónicos.

De hecho, varios estudios se han centrado en el desarrollo y la validación de modelos y sistemas de seguimiento y predicción del rendimiento de las plantas solares fotovoltaicas. Por ejemplo, [16] analiza el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la detección de fallos en paneles fotovoltaicos, lo que indica que se está investigando en sistemas de monitorización inteligente. Del mismo modo, [10] propone un novedoso sistema de monitorización casi en tiempo real con mayor resolución y seguimiento solar integrado, lo que sugiere avances en las tecnologías de monitorización.

Sin embargo, es importante señalar que, aunque estos estudios contribuyen al campo, es posible que no cubran todos los aspectos de la validación de prototipos electrónicos.

Estudios como [17] y [18] presentan metodologías de validación de modelos de plantas solares fotovoltaicas mediante simulación dinámica de datos híbridos, lo que implica que las técnicas de validación son efectivamente objeto de investigación, aunque estos trabajos se centran más en la precisión del modelo en relación con la integración en la red eléctrica que en los propios prototipos electrónicos.

En resumen, aunque existen pruebas de la investigación sobre sistemas de monitorización y validación de modelos para plantas solares fotovoltaicas, el enfoque específico sobre la validación de prototipos electrónicos en términos de precisión y fiabilidad puede no estar tan ampliamente cubierto. Esto sugiere que, si bien el campo es activo, todavía puede haber espacio para una mayor investigación sobre los procesos de validación de los sistemas electrónicos de monitorización en aplicaciones solares fotovoltaicas.

E. Caso de estudio.

El sistema de estudio está instalado en la azotea de un edificio en la ciudad de Montería, Colombia, en la ubicación 8.803750, -75.850125, y está conectado a la red eléctrica de la instalación a través de una subestación tipo indoor en la azotea del edificio. La planta consta de 240 paneles con una capacidad de 400W, alcanzando una potencia pico de 96kWn. El sistema de conversión de CC a CA incluye dos inversores de 36 kWn cada uno, con una capacidad total de 72 kWn.

F. Evaluation and Verification of Photovoltaic Monitoring Prototypes.

El objetivo de este estudio es abordar esta laguna de conocimiento mediante la validación de un prototipo electrónico diseñado para monitorizar una planta solar fotovoltaica montada en azotea, y evaluar su precisión y fiabilidad. Sin embargo, es necesario preguntarse ¿cuál es el grado de precisión y confiabilidad de un prototipo electrónico para monitorizar una planta solar fotovoltaica montada sobre azotea con inversores instalados en la cubierta en comparación con las mediciones proporcionadas por una estación meteorológica comercial, un datalogger de temperatura y los sistemas de medición internos del inversor?

El objetivo de este estudio es validar un prototipo electrónico de monitorización de una planta solar fotovoltaica y evaluar su precisión y fiabilidad. El sistema se compone de una red integrada de sensores que transmiten sus variables medidas cada hora y se dividen en secciones de medida internas y de medida exterior. Las variables de medición exteriores son la temperatura del panel solar en °C, y la radiación solar en W/m² se mide en el mismo ángulo de inclinación del módulo solar. Las variables de medición interiores son la temperatura ambiente en °C y la humedad en porcentaje, así como la temperatura del inversor en °C.

Este estudio presenta un enfoque innovador y asequible para la monitorización de plantas solares fotovoltaicas mediante la integración de hardware de bajo coste, como la Raspberry Pi Pico W, y una variedad de sensores en una red IoT, abordando significativamente las lagunas en la asequibilidad, la monitorización en tiempo real, y la gestión térmica de componentes críticos como los inversores. El uso de la tecnología IoT para el análisis avanzado de datos y la aplicación de sensores específicos para la supervisión

detallada y proactiva del rendimiento y la eficiencia térmica promueve una notable mejora de la eficiencia energética y la reducción de los costes operativos.

Este enfoque no sólo tiene el potencial de democratizar la supervisión avanzada de las plantas fotovoltaicas, haciéndola accesible a un mayor número de usuarios, sino que también establece un nuevo estándar para la optimización de la gestión de las energías renovables, inspirando futuras investigaciones y desarrollos en el sector.

El estudio propone un notable impacto en la optimización del rendimiento y la reducción de los costes operativos de las plantas fotovoltaicas, gracias al desarrollo de un sistema de monitorización de bajo coste integrado en una red IoT. Este enfoque promueve una transición energética más ecológica.

Los métodos utilizados para validar el prototipo consisten en una validación concentrada de unos dos meses en la que se comparan los datos del prototipo y los datos emitidos por una estación meteorológica comercial, un datalogger de temperatura y los sistemas de medición internos del inversor solar instalado en la azotea. El método estadístico por utilizar es la correlación de variables y la raíz del error cuadrático medio (RECM). Los formatos de captura de datos son horarios. El sistema almacena los datos en la nube y se pueden visualizar a través de una página web.

La metodología para desarrollar el sistema (IoT) se estructura en ocho secciones. En la Sección 1, el estudio identifica las variables que deben medirse para el prototipo. La Sección 2 se centra en el diseño del sistema IoT integrado. La Sección 3 aborda la construcción del prototipo, mientras que la Sección 4 define los métodos de validación de este y el periodo de pruebas. La Sección 5 selecciona los equipos comerciales para el proceso de evaluación comparativa, y la Sección 6 se centra en el proceso de captura y procesamiento de los datos. La Sección 7 analiza los resultados obtenidos, y la Sección 8 desarrolla las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

Esta sección describe la metodología empleada para desarrollar y validar un prototipo electrónico destinado al monitoreo de una planta solar fotovoltaica. Este sistema, basado en Internet de las Cosas (IoT), fue diseñado para recopilar datos de variables ambientales y de operación, contribuyendo a investigaciones futuras y avances en el campo de la energía solar. La metodología se estructura en ocho secciones, detallando desde la identificación de variables hasta el desarrollo de conclusiones. La Fig. 1 describe el flujo de trabajo de la metodología propuesta.

A. Identificación de variables.

Inicialmente, se identificaron las variables críticas para el monitoreo de la planta fotovoltaica, luego de un análisis bibliográfico, que permitió establecer que en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos influyen diversos factores, como la radiación solar, la temperatura de los módulos, la temperatura del inversor, y las condiciones ambientales que rodean al inversor, como la temperatura y la humedad. En la siguiente sección se desarrolla el análisis bibliográfico.

La radiación solar influye directamente en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos, ya que una mayor irradiancia suele traducirse en una mayor generación de electricidad [19]. Sin embargo, la temperatura del módulo fotovoltaico es un parámetro crítico, ya que una mayor temperatura del módulo puede reducir significativamente la eficiencia y la potencia de salida del sistema [19].



Fig. 1. Flujo de trabajo de la metodología.

Además, aunque la radiación solar y la temperatura del módulo se suelen discutir conjuntamente debido a su impacto directo en el rendimiento fotovoltaico, la temperatura en el inversor y las condiciones ambientales a su alrededor también son cruciales. Las altas temperaturas ambientales pueden afectar negativamente al rendimiento de los paneles solares al aumentar su temperatura de funcionamiento [6]. Además, los inversores, que son esenciales para convertir la corriente continua (CC) producida por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna (CA) adecuada para la red, también pueden sufrir una reducción de la eficiencia y la fiabilidad en condiciones de alta temperatura y humedad [6].

En resumen, la interacción entre la radiación solar, la temperatura del módulo fotovoltaico, la temperatura del inversor y las condiciones ambientales alrededor del inversor es compleja y puede afectar significativamente al rendimiento general de los sistemas fotovoltaicos. La gestión eficaz de estos factores es esencial para optimizar la eficiencia y la longevidad de los sistemas de energía solar [20]. Es por lo anterior que este estudio seleccionó dichas variables para ser monitoreadas en el caso de estudio, el cual se caracterizó por ser una planta fotovoltaica montada en techo con inversores instalados al interior de la azotea y que cuenta con un sistema de control de temperatura al interior. La Fig. 2 muestra la instalación de la azotea donde se encuentran los inversores (1) y la planta fotovoltaica instalada en techo (2).

B. Diseño del sistema IoT integrado

El diseño del sistema IoT integrado se enfocó en establecer una arquitectura capaz de soportar la recopilación y transmisión de datos en tiempo real. Se contempló la selección de sensores apropiados, la integración con el microcontrolador Raspberry Pi Pico W, y el desarrollo de una interfaz de usuario para la visualización de datos. La Fig. 3 muestra la arquitectura y localización del sistema IoT.



Fig. 2. Planta fotovoltaica de estudio.

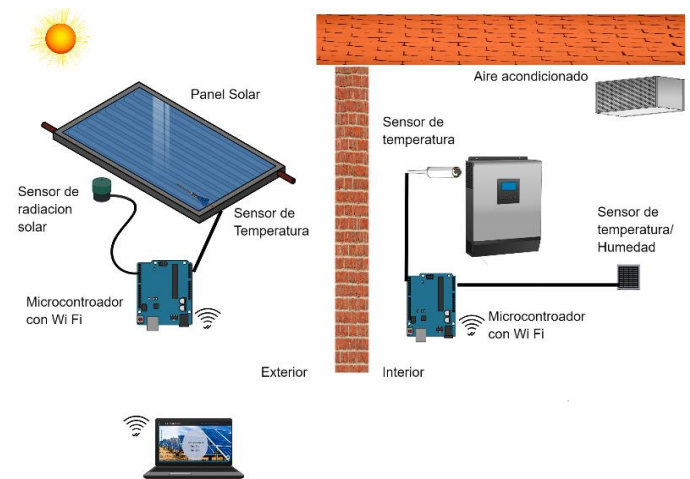


Fig. 3. Diagrama de diseño del sistema IoT de monitoreo.

Los sensores seleccionados fueron los siguientes, debido a su bajo costo y facilidad de conexión al sistema Raspberry Pi, además de contar con una precisión adecuada para su precio:

- Piranómetro Davis 6450: Este sensor mide la radiación solar incidente, proporcionando lecturas precisas de la cantidad de energía solar que llega al panel fotovoltaico, este instrumento, cuenta un rango espectral de medición es de 400 a 1100 nm y una resolución en unidades de $1W/m^2$ y su rango corresponde a 0 a $1800 W/m^2$ [21].
- Termocupla tipo J con módulo MAX6675: La termocupla tipo J en el presente prototipo cumple la función de obtener el dato de la temperatura de panel, la resolución de la temperatura es de $0.25^{\circ}C$, el rango de la temperatura de la termocupla corresponde a $-200^{\circ}C$ hasta $1300^{\circ}C$ [22] y

Resolución Transmisor MAX6675: 12 bits (0°C - 1023°C) [23].

- Raspberry Pi Pico W: Para el procesamiento de los datos, se empleó el microcontrolador Raspberry Pi Pico W debido a sus capacidades para proyectos de Internet de las Cosas (IoT), lo que facilita el desarrollo de sistemas de monitoreo como el descrito en este estudio [24].
- Sensor infrarrojo MLX90614: Este sensor es utilizado para medir la temperatura dentro del invernadero. Este sensor cuenta con un rango de temperatura de objeto: -70°C hasta +380°C y su precisión $\pm 0.5^\circ\text{C}$ [25].
- Sensor de temperatura y humedad DHT11: Este sensor es capaz de medir tanto la temperatura como la humedad del aire exterior. el rango de temperatura del sensor es de 0°C hasta 50°C y el de humedad de 20% hasta 90%, la resolución de la variable de temperatura corresponde a **0.1°C**, respecto a la humedad **1% RH**, otra de sus características técnicas es su periodo de muestreo que esta dado por **> 2 segundos** [26].

C. Construcción del prototipo.

La construcción del prototipo implicó la implementación física del diseño del sistema. Se realizaron conexiones entre los sensores seleccionados y el microcontrolador, se programó la lógica de captura y transmisión de datos utilizando Micro Python, y se estableció la conexión Wi Fi para la transmisión de datos a la nube. Por otro lado, fue necesario el desarrollo de los algoritmos de los controladores, los cuales son expuestos en el diagrama de flujo de la Fig. 4.

D. Métodos de Validación y Periodo de Pruebas.

Los métodos de validación incluyeron el uso de técnicas estadísticas como la correlación y la raíz del error cuadrático medio (RECM) para contrastar los datos recopilados por el prototipo con los obtenidos por equipos comerciales. El periodo de pruebas se extendió por dos meses (noviembre y diciembre de 2023), debido a la disponibilidad de los datos para ese momento.

REMC (Raíz del Error cuadrático medio): Esta métrica mide la magnitud de los errores entre los valores predichos por el modelo $V_{predicted}$ y los valores reales V_{target} . desarrollando una suma al cuadrado de la diferencia de estos valores, para dividirlos por el número de muestra N y radicar el resultado de esta operación. Un menor REMC indica una mayor precisión del modelo. La ecuación 1 muestra el método de cálculo [27].

El método de correlación de variables es una herramienta estadística fundamental con amplias aplicaciones en todas las disciplinas. Su uso es crucial para comprender las relaciones entre variables, a pesar de los posibles escollos en su aplicación e interpretación [28].

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (V_{predicted} - V_{target})^2}{N}} \quad (1)$$

La bibliografía subraya la importancia de la aplicación e información precisas de este método para garantizar la validez

de los resultados de la investigación [29].

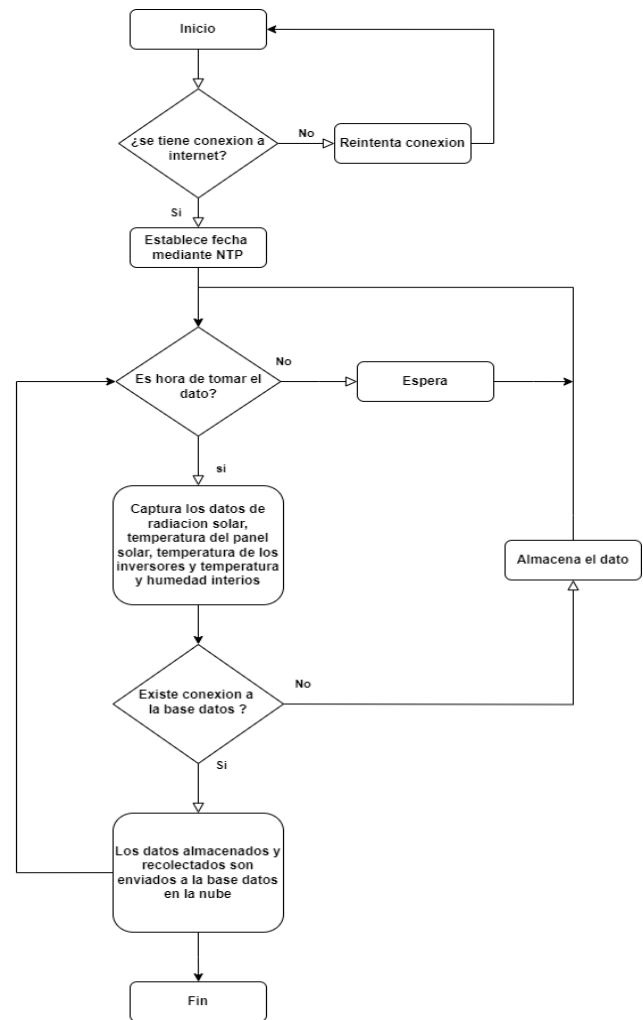


Fig. 4. Diagrama de flujo de la programación de los microcontroladores.

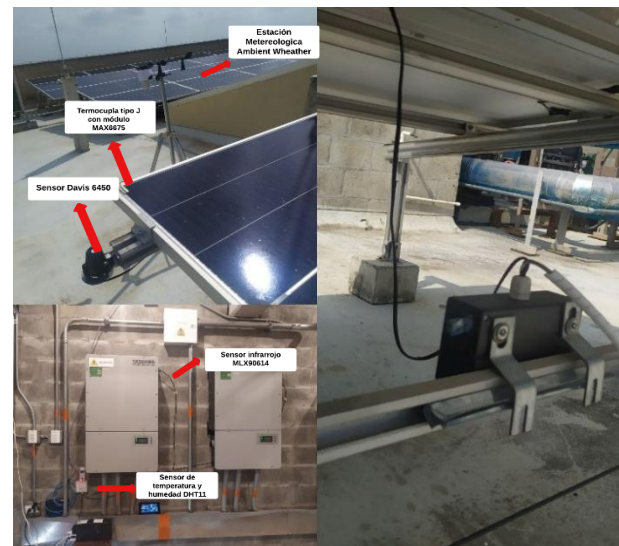


Fig. 5. Diagrama de sensores y patrones de comparación.

E. Selección de Equipos Comerciales para Evaluación Comparativa.

Para la evaluación comparativa, se seleccionaron una estación meteorológica Ambient Weather W2000 con una resolución de 0.001W/m² y 0.1 °F, 0.1%RH y el datalogger Elitech Gsp-6 con una resolución de 0.1°C/°F; 0.1%RH, además de los valores de temperatura que emite el inversor trifásico Yaskawa VLT 36. Estos equipos sirvieron como referencia para validar las mediciones del prototipo, dada su precisión y fiabilidad comprobadas y su costo asequible. La Fig. 5 muestra la ubicación de los distintos sensores y los patrones de comparación.

F. Proceso de captura y procesamiento de los datos.

El proceso de captura y procesamiento de los datos se automatizó mediante el prototipo, recopilando mediciones cada hora y enviándolas a una base de datos MySQL alojada en GoDaddy. Se desarrolló una interfaz web para la visualización y análisis de los datos en tiempo real, la cual se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6. Página web para el almacenamiento de los datos.

G. Análisis de resultados.

El análisis de resultados se centró en la comparación de los datos recopilados por el prototipo con aquellos obtenidos por los equipos comerciales. Se utilizaron las correlaciones de Spearman y el cálculo de la RECM para evaluar la precisión del prototipo en diversas condiciones ambientales y operativas.

H. Desarrollo de conclusiones.

Las conclusiones derivadas del proyecto subrayaron la eficacia del prototipo en proporcionar mediciones precisas y confiables de variables clave en la monitorización de plantas solares fotovoltaicas. Estos hallazgos validaron el potencial del prototipo como herramienta para futuras investigaciones en el campo de la energía solar, resaltando áreas de mejora y recomendaciones para su implementación en otros contextos o escalas de proyecto.

III. RESULTADOS

Al desarrollar el análisis de correlación y RECM sobre los meses de noviembre y diciembre de 2023 los resultados fueron los descritos en la tabla I.

TABLA I
RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES DEL ESTUDIO CON LAS VARIABLES PATRÓN.

Variable		Correlación	RECM
Temperatura Panel	°C	0,99	1,59
Radiación Solar	W/m ²	0,98	16,38
Temperatura Inversor	°C	0,83	3,56
Temperatura Interior	°C	0,96	1,29
Humedad Interior	%	0,88	7,75

Con lo anterior se puede afirmar que el prototipo presenta una buena confianza en la correlación con los datos del elemento patrón y un error medio cuadrático menor. Sin embargo, es de anotar que la medida del sensor de radiación del prototipo se hace en el mismo plano de inclinación del panel fotovoltaico es decir de 9° a diferencia del sensor de la estación meteorológica que mide de forma vertical.

Por otro lado, debido al volumen de los datos horario no es posible apreciar la diferencia de estos mediante una gráfica, por lo que se escoge el día de mayor radiación del periodo de análisis, debido a que la evaluación del prototipo en condiciones extremas es fundamental para verificar su rendimiento en escenarios difíciles, garantizando su aplicabilidad en situaciones reales y su capacidad para adaptarse a variaciones significativas, como en la radiación solar, la temperatura ambiente, la cantidad de potencia DC generada, la cual coincide con altos niveles de radiación solar y que aumenta la temperatura del inversor solar.

La Fig. 7 muestra los valores en el día de mayor radiación solar, que fue el día 13 de noviembre de 2023 según la estación meteorológica. Como puede apreciarse el sistema IoT presenta una buena precisión en referencia a los patrones usados, más aún cuando el sistema es capaz capturar y procesar señales procedentes de tres ambientes distintos como los son la temperatura del panel solar, los datos ambientales y los datos de temperatura del inversor en una sola plataforma, con unos costos menores a los tres elementos patrones usados.

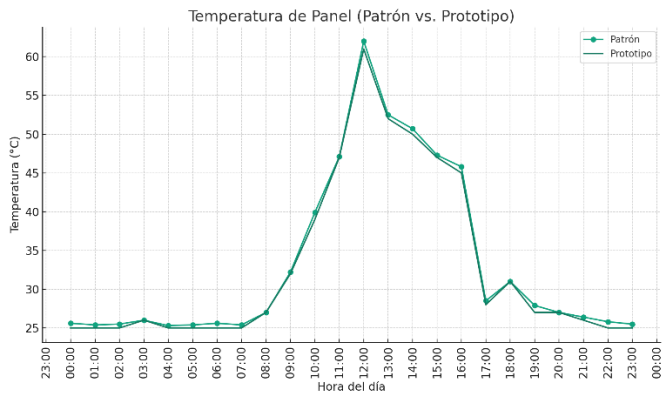




Fig. 7. Cuadro comparativo de variables patrones y prototipo.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un análisis del proceso de diseño, puesta en marcha y comprobación de un sistema prototipo económico destinado a la supervisión de instalaciones solares fotovoltaicas a través del Internet de las Cosas (IoT). A través de un enfoque innovador que integra hardware accesible,

como la Raspberry Pi Pico W, y una selección de sensores específicos. Este estudio aborda desafíos cruciales en la monitorización de plantas fotovoltaicas, tales como la asequibilidad, la precisión de la monitorización en tiempo real, y la gestión eficiente de la temperatura en componentes críticos.

Los resultados cuantitativos obtenidos durante la validación del prototipo destacan su precisión y fiabilidad en comparación con equipos de referencia comerciales. La correlación significativa de las mediciones, con valores como 0.99 para la temperatura del panel y 0.98 para la radiación solar, junto con bajos valores de RMSE, como 1.59°C para la temperatura del panel y 16.38 W/m² para la radiación solar, evidencian la capacidad del sistema para proporcionar mediciones consistentes.

Por otro lado, la comparativa de la temperatura del inversor y las condiciones internas, como la temperatura y humedad, mostraron una buena adaptación del sistema a diferentes condiciones ambientales, con correlaciones de 0.83 y 0.88 respectivamente. Estos resultados subrayan la eficacia del prototipo en capturar con precisión las variables críticas para la operación y el mantenimiento óptimo de las plantas fotovoltaicas.

La investigación se limitó a un período de validación de dos meses, lo que podría no capturar completamente la variabilidad estacional y su impacto en el sistema. La selección de variables se centró en parámetros específicos, dejando fuera otros factores potencialmente relevantes para el rendimiento de las instalaciones fotovoltaicas, como la velocidad del viento y la deposición de polvo sobre los paneles.

Esta investigación no solo establece un nuevo sistema de monitorización rentable, sino que también allana el camino para una adopción más amplia de dicha tecnología en la gestión de plantas de energía fotovoltaica. De cara al futuro, podrían desarrollarse protocolos de calibración y ajuste para mejorar la precisión y alinear mejor los valores con los patrones.

REFERENCIAS

- [1] A. M. Mitrašinović, "Photovoltaics advancements for transition from renewable to clean energy," *Energy*, vol. 237, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121510.
- [2] X. Fan, W. Liu, and G. Zhu, "Scientific linkage and technological innovation capabilities: international comparisons of patenting in the solar energy industry," *Scientometrics*, vol. 111, no. 1, 2017, doi: 10.1007/s11192-017-2274-5.
- [3] A. Ali, "Transforming Saudi Arabia's Energy Landscape towards a Sustainable Future: Progress of Solar Photovoltaic Energy Deployment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, 2023, doi: 10.3390/su15108420.
- [4] M. Fabian, A. L. Vargas, M. M. Ángel, O. Padilla, P. Carlos, and V. Salgado, "Comparative experimental analysis of the annual energy production of a 72kWn photovoltaic solar power plant installed on a roof for self-consumption in the city of Monteria using PVsyst, PVGIS and SAM," vol. 1, pp. 43–2024, 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2807.
- [5] N. Ra, S. Varman, K. Antony Joseph, and A. Bhattacharjee, "Prediction of Optical Performance of Solar PV under the Impact of Natural Dust Accumulation: Machine Learning Approach," in *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies*,

- GlobConHT* 2023, 2023. doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087364.
- [6] T. Atiyah and M. Qasim, "Evaluating the Impact of Weather Conditions on the Effectiveness and Performance of PV Solar Systems and Inverters," *NTU Journal of Renewable Energy*, vol. 5, no. 1, 2023, doi: 10.56286/ntujre.v5i1.551.
 - [7] Z. Wang, Y. Li, K. Wang, and Z. Huang, "Environment-adjusted operational performance evaluation of solar photovoltaic power plants: A three stage efficiency analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.119.
 - [8] H. Alici, B. Esenboga, I. Oktem, T. Demirdelen, and M. Tumay, "Designing and performance analysis of solar tracker system: A case study of Çukurova region," in *Design, Analysis and Applications of Renewable Energy Systems*, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-824555-2.00004-6.
 - [9] H. Yazdani, M. Radmehr, and A. Ghorbani, "Smart component monitoring system increases the efficiency of photovoltaic plants," *Clean Energy*, vol. 7, no. 2, 2023, doi: 10.1093/ce/zkac071.
 - [10] S. B. Sadineni, J. D. Realmuto, and R. F. Boehm, "An integrated performance monitoring and solar tracking system for utility scale PV plants," in *American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) POWER*, 2011. doi: 10.1115/POWER2011-55243.
 - [11] C. B. Yahya, "Performance monitoring of solar photovoltaic systems using reference cells," in *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM*, 2008. doi: 10.1109/ICM.2008.5393768.
 - [12] K. Rajeshwar Reddy, R. R. Arabelli, D. Rajababu, and K. Mahender, "Solar power generation system with IOT based monitoring and controlling using different sensors and protection devices to continuous power supply," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/981/3/032017.
 - [13] S. Ansari, A. Ayob, M. S. Hossain Lipu, M. H. Md Saad, and A. Hussain, "A review of monitoring technologies for solar pv systems using data processing modules and transmission protocols: Progress, challenges and prospects," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 15, 2021, doi: 10.3390/su13158120.
 - [14] C. Belhadj-Yahya, "Performance monitoring of solar stand alone power systems," in *2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, EnergyCon 2010*, 2010. doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771715.
 - [15] N. M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykano, and V. Jayaseelan, "On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants," in *Procedia Computer Science*, 2018. doi: 10.1016/j.procs.2018.07.087.
 - [16] L. Yun, Y. Bofeng, Q. Dan, and L. Fengshuo, "Research on Fault Diagnosis of Photovoltaic Array Based on Random Forest Algorithm," in *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications, ICPECA 2021*, 2021. doi: 10.1109/ICPECA51329.2021.9362559.
 - [17] D. Zhao, D. Hu, J. He, L. Zhang, and N. Chen, "Model validation of solar PV plant with hybrid data dynamic simulation based on fast-responding generator method," in *MATEC Web of Conferences*, 2016. doi: 10.1051/mateconf/20166502006.
 - [18] D. W. Zhao *et al.*, "Hybrid data simulation-based model validation method for solar PV plant," in *IET Conference Publications*, 2015. doi: 10.1049/cp.2015.0533.
 - [19] V. Gupta, M. Sharma, R. Pachauri, and K. N. D. Babu, "Impact of hailstorm on the performance of PV module: a review," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, 2022. doi: 10.1080/15567036.2019.1648597.
 - [20] V. V. Kulkarni and V. A. Kulkarni, "Performance Optimization of Photovoltaic Systems using Thermoelectric Cooling System," in *2022 International Conference on Futuristic Technologies, INCOFT 2022*, 2022. doi: 10.1109/INCOFT55651.2022.10094413.
 - [21] Vantage Pro2TM Accessories and DAVIS, "6450 Pyranometre MANUAL EN DAVIS," 2014. [Online]. Available: www.davisnet.com
 - [22] Maxim Integrated Products, "MAX6675 User Manual," 2021. [Online]. Available: www.maximintegrated.com
 - [23] Zonzen, "Thermocouple. Ficha Técnica," 2019.
 - [24] Raspberry Pi Ltd, "User Manual Raspberry Pi Pico W," 2023.
 - [25] P. By ALLDATASHEETCOM, "MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39 Features and Benefits."
 - [26] Asair, "Digital Temperature & Humidity Module DHT11 User Manual," 2019. [Online]. Available: www.aosong.com
 - [27] T. O. Hodson, "Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not," *Geoscientific Model Development*, vol. 15, no. 14, 2022. doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
 - [28] D. S. Cho, C. Chung, J. Kim, S. Ahn, S. Park, and H. S. Park, "Analysis on Reports of Statistical Testings for Correlation and Regression," *Korean Journal of Women Health Nursing*, vol. 14, no. 3, 2008, doi: 10.4069/kjwhn.2008.14.3.213.
 - [29] Y. Wang and J. Mi, "Applying statistical methods to library data analysis," *Serials Librarian*, vol. 76, no. 1-4, 2019, doi: 10.1080/0361526X.2019.1590774.



Fabian Alonso Lara Vargas. Profesor titular de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Colombia. Obtuvo el título de ingeniero electrónico en la Universidad Pontificia Bolivariana de Colombia en 2004, una especialización en control e instrumentación industrial en la misma Universidad en 2009, una maestría en gestión de proyectos informáticos en la Universidad de Pamplona en Colombia en 2016, y es estudiante de doctorado en diseño, fabricación y gestión de proyectos industriales, en la Universidad Politécnica de Valencia en España. Es profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana, Campus Montería, Colombia. Sus intereses de investigación incluyen algoritmos genéticos, regresión simbólica, energía solar fotovoltaica flotante y almacenamiento.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8246-1852>.



Jimena de la Ossa Rivera. Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería en 9 semestre, miembro estudiantil de IEEE y del semillero de investigación ITEM.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6874-6038>.



Santiago Jaramillo Mira. Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería en 9 semestre, miembro estudiantil de IEEE y del semillero de investigación ITEM.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8082-2833>.



Carlos Vargas Salgado. Doctor en Ingeniería y Producción Industrial, de la UPV en Valencia, España. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPV. Desde 2005 vinculado al Instituto de Ingeniería Energética de la UPV, donde se han llevado a cabo proyectos en energías renovables (microrredes aisladas y conectadas a red basadas en fotovoltaica, eólica y gasificación de biomasa con almacenamiento en baterías).

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9259-8374>.