ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Gemelo digital experimental con control MPPT y analítica energética en microrredes DC aisladas

Experimental digital twin for MPPT-based load regulation and energy analytics in an isolated DC microgrid

Darwin Orlando Cardozo Sarmiento[1]
Francisco Ernesto Moreno García[1]
Gloria Esmeralda Sandoval Martínez[2]
Fabio Alexander Niño Pérez[1]

[1] **Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de Electricidad y Electrónica, Cúcuta, Colombia.**

[2] **Universidad Autónoma de Bucaramanga – UNAB, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Recursos, Energía, Sostenibilidad - GIRES, Bucaramanga, Colombia.**

Recibido: 04 agosto 2025. Revisado: 04 octubre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: Darwin Orlando Cardozo Sarmiento

Cómo citar: D. O. Cardozo Sarmiento, F. E. Moreno García, G. E. Sandoval Martínez, and F. A. Niño Pérez, "Gemelo digital experimental con control MPPT y analítica energética en microrredes DC aisladas", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4291, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4291

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

El desarrollo de estrategias de control y supervisión basadas en datos constituye un factor clave en la optimización energética de microrredes fotovoltaicas de corriente continua (DC). Este trabajo presenta la implementación de un gemelo digital experimental para la regulación de carga mediante tecnología Maximum Power Point Tracking (MPPT), complementado con un módulo de analítica energética orientado a evaluar la eficiencia y la estabilidad del sistema. La metodología combina la simulación en Matlab-Simulink con la implementación física en un microcontrolador ESP32, ejecutando un algoritmo P&O acoplado a un convertidor DC/DC tipo Boost. Los datos eléctricos y ambientales se procesan mediante herramientas de ciencia de datos (Python, Pandas, NumPy y Seaborn) para determinar correlaciones entre irradiancia, temperatura, voltaje y potencia. Los resultados muestran una eficiencia global del 91.6 % bajo condiciones reales de irradiancia y una correspondencia del 99.7% entre simulación y medición física, confirmando la fiabilidad del gemelo digital. El enfoque híbrido propuesto integra control electrónico, modelado digital y análisis estadístico, configurando una plataforma inteligente de monitoreo energético de bajo costo aplicable en microrredes rurales y entornos educativos.

Palabras clave: gemelo digital, MPPT, ciencia de datos, microrred DC, energía fotovoltaica, ESP32.

Abstract:

The development of data-driven control and monitoring strategies is a key factor in optimizing the energy performance of photovoltaic direct-current (DC) microgrids. This paper presents the implementation of an experimental digital twin for load regulation using Maximum Power Point Tracking (MPPT) technology, complemented by an energy analytics module to evaluate system efficiency and stability. The proposed methodology integrates a Matlab-Simulink simulation with a physical implementation on an ESP32 microcontroller, executing a Perturb and Observe (P&O) algorithm coupled to a Boost DC/DC converter. Electrical and environmental data are processed using data science tools (Python, Pandas, NumPy, Seaborn) to determine correlations among irradiance, temperature, voltage, and power. Experimental results demonstrate an overall efficiency of 91.6 % under real irradiance conditions and a 99.7 % correlation between simulation and physical measurement, validating the reliability of the digital twin. The hybrid approach combines electronic control, digital modeling, and statistical analysis, establishing a low-cost intelligent energy monitoring platform suitable for rural microgrids and educational environments.

Keywords: digital twin, MPPT, data science, DC microgrid, photovoltaic energy, ESP32.

INTRODUCCIÓN

La generación fotovoltaica es una de las principales tecnologías de conversión energética sostenible, impulsada por los avances en materiales semiconductores, la reducción de costos de producción y la creciente necesidad de sustituir fuentes fósiles por alternativas limpias. Sin embargo, la energía entregada por un panel solar presenta variabilidad debido a las condiciones de irradiancia y temperatura, factores que afectan el punto de máxima potencia (Maximum Power Point, MPP) y la eficiencia del sistema[1]-[3].

El aprovechamiento eficiente de la energía generada requiere estrategias de conversión y control capaces de mantener el sistema operando en el MPP, compensando las variaciones del entorno. Para esto, la tecnología Maximum Power Point Tracking (MPPT) representa una solución para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Esta tecnología consiste en ajustar dinámicamente los parámetros de operación del convertidor DC/DC de forma que el producto de la corriente y el voltaje del panel sea máximo en todo instante[1]-[3].

Varios algoritmos han sido propuestos para el MPPT, entre ellos Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (IC), y otros basados en técnicas de inteligencia computacional como redes neuronales artificiales o lógica difusa. Sin embargo, aunque los algoritmos avanzados ofrecen una respuesta rápida ante fluctuaciones de irradiancia, su implementación suele requerir hardware especializado y una mayor carga computacional. Por ello, el algoritmo P&O continúa siendo una opción preferente en aplicaciones didácticas y de bajo costo, gracias a su robustez y simplicidad operativa[1]-[3].

La integración de herramientas de ciencia de datos en los sistemas de control energético ha permitido ampliar el análisis desde una perspectiva eléctrica hacia un enfoque estadístico y descriptivo. Mediante la recopilación y tratamiento de datos provenientes de sensores de irradiancia, temperatura, voltaje y corriente, es posible caracterizar el comportamiento dinámico del sistema fotovoltaico, evaluar patrones de eficiencia y determinar las variables con mayor influencia sobre la potencia generada. Esta sinergia entre control electrónico y análisis de datos fortalece la toma de decisiones para optimizar la operación de microrredes DC[1]-[3].

Este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de regulación de carga con tecnología MPPT, complementado con un análisis de datos ambientales y eléctricos para la optimización energética de una microrred DC aislada. El sistema integra un convertidor DC/DC tipo Boost, un algoritmo MPPT P&O, y un controlador programado en una plataforma ESP32, lo que permite una arquitectura eficiente, de bajo costo y con capacidad de monitoreo digital. A través de la simulación en Matlab-Simulink y de la validación experimental, se analizan los efectos de las condiciones ambientales sobre la eficiencia del sistema, demostrando la correspondencia entre los resultados analíticos y empíricos. Adicionalmente, el sistema se concibe bajo el enfoque de Gemelo Digital Experimental (Digital Twin), donde el modelo virtual desarrollado en Matlab-Simulink replica el comportamiento dinámico del sistema físico implementado. Esta interacción entre simulación y realidad permite validar la coherencia entre ambos entornos y fundamenta el diseño de estrategias futuras de control predictivo basadas en datos[4]-[8].

El aporte innovador de esta investigación está en la combinación del control MPPT con técnicas de análisis de datos para la caracterización energética del sistema, contribuyendo al fortalecimiento de la transición hacia redes eléctricas inteligentes y sostenibles. Esta propuesta es especialmente relevante para entornos académicos y microrredes rurales, donde la simplicidad del hardware y la precisión del control determinan la viabilidad tecnológica y económica de las soluciones implementada.

METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación se estructura en cuatro fases metodológicas orientadas al diseño, implementación y validación de un sistema de regulación de carga con tecnología MPPT, complementado con un análisis de datos ambientales y eléctricos.

Fase 1. Selección y caracterización del sistema fotovoltaico

Esta fase comprende la recopilación de información técnica y la selección de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico. Se analizan diferentes módulos comerciales considerando potencia nominal, tensión en el punto de máxima potencia (VMPP), corriente (IMPP), eficiencia bajo condiciones estándar (STC) y disponibilidad en el mercado.

Para determinar el módulo fotovoltaico apropiado, se establecen seis criterios medibles que influyen directamente en el rendimiento del sistema de regulación de carga[1]-[3]:

- Corriente de máxima potencia (IMPP, A): determina la capacidad de entrega de corriente del panel bajo condiciones estándar (STC).
- Tensión de máxima potencia (VMPP, V): debe ser compatible con la topología del convertidor Boost para evitar excesivas ganancias de voltaje.
- Potencia estimada a 700 W/m² (P700, W): representa el comportamiento del panel en condiciones de irradiancia típicas del entorno de implementación (Cúcuta, Colombia).
- Eficiencia máxima (%): refleja la capacidad de conversión fotovoltaica del material semiconductor.

• Disponibilidad comercial: factor cualitativo asociado al acceso local a repuestos y soporte técnico.
• Número de paneles requeridos: se prefiere un diseño con un solo módulo para minimizar conexiones y pérdidas por cableado.
Cada criterio es ponderado con un peso uniforme de 16,67 %, otorgando el mismo grado de importancia a las variables eléctricas y de disponibilidad.

Con el fin de comparar valores medidos en diferentes unidades (amperios, voltios, vatios y porcentajes), se aplica un proceso de normalización min–max, expresado en (1)[9].

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \times 100 \quad (1)$$

Xnorm (valor normalizado)

Xi (representa el valor del criterio para cada panel)

Xmin (valor mínimo)

Xmax (valor máximo)

Luego se calcula el índice de compatibilidad global (ICG), como la media ponderada de los seis criterios, mostrada en (2)[9].

$$ICG = \sum_{i=1}^{6} w_i \cdot X_{norm,i} \quad (2)$$

wi = 0.1667 (peso asignado a cada criterio)

Tras realizar el análisis multicriterio aplicado a seis paneles (ver Fig. 1), se selecciona el módulo Yingli Solar YL245P-29b (245 W), con un 94,86 % de compatibilidad frente a los requerimientos eléctricos del diseño.

Panel Solar	IMPP (A)	VMPP (V)	P700 (W)	Eficiencia	Compatibilidad
Yingli Solar	8.11	30.2	173.3	15.0	**94.9%**
Trina Solar	7.98	30.7	168.1	15.0	**77.8%**
Jinko Solar	7.89	29.8	166.0	14.0	**77.7%**
JA Solar 340	9.79	34.7	250.5	20.2	**83.3%**
JA Solar 245	9.16	38.8	245.3	19.3	**66.3%**
Restar Solar	10.47	20.1	145.2	19.2	**43.0%**

Óptimo Moderado Crítico

Fig. 1. *Compatibilidad de Paneles.*
Fuente: Propia.

Fase 2. Comparación y selección del algoritmo MPPT

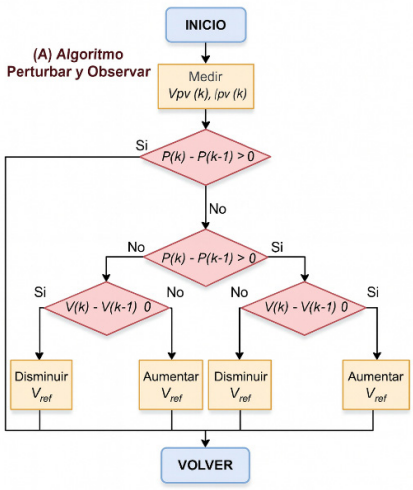


Fig. 2. *Algoritmo de P&O básico.*
Fuente: Adaptado de [6].

Una vez definido el módulo fotovoltaico, se comparan dos algoritmos clásicos de seguimiento del punto de máxima potencia:

Perturb and Observe (P&O): ajusta iterativamente el voltaje del panel observando la respuesta de la potencia. Si esta aumenta, la perturbación continúa en la misma dirección; si disminuye, se invierte el sentido. Es robusto, fácil de programar y requiere bajo procesamiento (ver Fig. 2)[10]-[17].

Conductancia Incremental (IC): evalúa la igualdad entre la conductancia incremental (ΔI/ΔV) y la conductancia instantánea (I/V) (ver Fig. 3). Su precisión es superior bajo condiciones variables de irradiancia, pero su costo computacional aumenta[10]-[17].

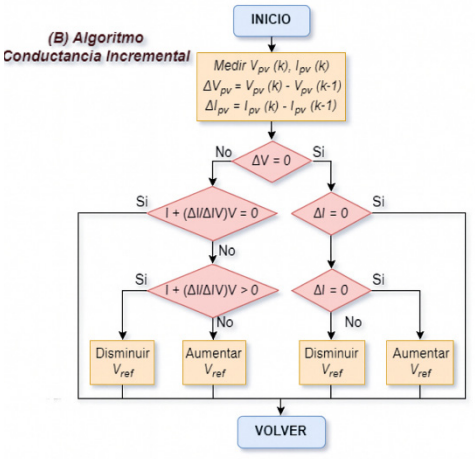


Fig. 3. *Algoritmo de conductancia incremental.*
Fuente: Adaptado de [6].

Fase 3. Implementación del sistema de control en microrred DC

Esta fase abarca la integración física del sistema propuesto. El convertidor Boost DC/DC se diseña para operar con una tensión de entrada de 30 V y una salida de 70 V.

El control se implementa mediante un PID digital, ajustado para minimizar el error estacionario y mejorar la respuesta transitoria ante variaciones rápidas de irradiancia.

Se utiliza un microcontrolador ESP32 para ejecutar el algoritmo MPPT y adquiere datos de sensores de voltaje y corriente mediante módulos INA219, procesando las mediciones cada 100 ms. Los valores se visualizan en una pantalla LCD integrada al módulo didáctico, y se almacenan localmente en formato CSV para análisis posterior.

El sistema se conecta a una microrred DC aislada compuesta por una carga resistiva RL y una etapa inversora posterior. Las pruebas se realizan bajo irradiancia promedio de 700 W/m², representativa de la zona de estudio.

Con el fin de validar cuantitativamente la correspondencia entre el modelo virtual y el sistema físico, se incorporan métricas de evaluación que permiten determinar la fidelidad del Gemelo Digital Experimental. Se comparan los datos de potencia obtenidos en Matlab-Simulink con las mediciones reales registradas en el microcontrolador ESP32 bajo condiciones equivalentes de irradiancia y temperatura. Se aplican indicadores de error y correlación ampliamente utilizados en la literatura de validación de gemelos digitales, definidas desde (3) hasta (6)[4]-[8].

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_{sim,i} - P_{exp,i}| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{P_{sim,i} - P_{exp,i}}{P_{exp,i}}\right| \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{sim,i} - P_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_{exp,i} - \bar{P}_{exp})^2} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{sim,i} - P_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_{exp,i} - \bar{P}_{exp})^2} \quad (6)$$

Psim (potencia simulada)

Pexp (potencia experimental)

Fase 4. Análisis de datos y correlación energética

Para validar experimentalmente el desempeño del sistema MPPT, se emplean técnicas de ciencia de datos para analizar la eficiencia energética mediante la plataforma Google Colab con lenguaje de programación Python[17]-[23].

Adquisición y depuración: Los registros de potencia se recolectaron mediante dos configuraciones experimentales (con MPPT y sin MPPT), totalizando 40 muestras comparables para cada caso. Los datos se estructuraron en formatos CSV para su procesamiento sistemático.

Procesamiento estadístico: Los datos se procesan con Python (utilizando Pandas, NumPy y SciPy) para calcular medidas de tendencia central (media, mediana), dispersión (desviación estándar, rango) y métricas de eficiencia relativa. Se aplica normalización de nombres de columnas y filtrado temporal para garantizar comparabilidad[17]-[23].

Visualización descriptiva: Mediante Matplotlib y Seaborn se generaron:

- Gráficos temporales comparativos de potencia
- Histogramas y diagramas de caja para distribución
- Análisis de tendencia con suavizado gaussiano
- Visualizaciones de métricas agregadas

Validación cuantitativa: Los resultados se exportaron en formatos CSV para documentación técnica, incluyendo estadísticos descriptivos y resúmenes analíticos que permitieron cuantificar la ventaja del sistema MPPT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación del sistema se realiza en dos etapas: simulación en Matlab-Simulink y verificación experimental sobre la microrred DC implementada. Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del regulador de carga, la precisión del algoritmo MPPT, y la coherencia entre el modelo teórico y el montaje físico.

Los algoritmos MPPT se simulan en Matlab-Simulink, considerando perfiles de irradiancia fluctuante entre 400 y 1000W/m² y temperatura de 25–45°C.

Desempeño de los algoritmos MPPT

En Fig. 4 se presenta la comparación simulada de la potencia entregada en función de la irradiancia para los algoritmos P&O e IC, junto con la potencia. Se observa que ambos métodos mantienen un seguimiento cercano al punto de máxima potencia en todo el rango de 200–1000W/m². Ambas curvas convergen hacia el punto de máxima potencia sin oscilaciones apreciables, confirmando la estabilidad del sistema bajo irradiancia variable. Se tienen eficiencias medias de 98.34% (P&O) y 99.15% (IC). La diferencia acumulada de energía a favor de IC es 0.82%, margen que da el menor costo computacional y simplicidad de implementación del P&O.

Finalmente, se selecciona el P&O como algoritmo final por su simplicidad y menor consumo de memoria, para implementarse en el microcontrolador.

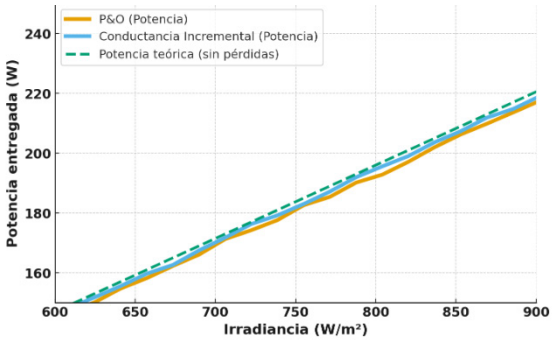


Fig. 4. *Potencia vs Irradiancia.*
Fuente: Propia.

Validación del sistema en simulación

El modelo del sistema fotovoltaico se construye en Matlab-Simulink (ver Fig. 5), incluyendo el panel solar, el convertidor

Boost y el controlador MPPT. Este modelo se emplea para la validación previa del control PID y del convertidor Boost.

En Fig. 6 se muestra la potencia obtenida en simulación con y sin el algoritmo MPPT del tipo P&O. Se observa que la potencia del panel se estabiliza en torno a 173.3W, mientras que sin MPPT la potencia útil se mantiene alrededor de 100–120W en el mismo intervalo de tiempo.

Esto representa un incremento aproximado del 44% en la potencia disponible gracias a la acción del algoritmo MPPT. Además, el sistema alcanza la estabilización en menos de 0.6 segundos, lo que demuestra rápida convergencia hacia el punto de máxima potencia. La pequeña diferencia entre la potencia real (173.33W) y la potencia estimada por el algoritmo (172.94W) evidencia la precisión del control implementado, con un error relativo inferior al 0.23%.

Asimismo, se observa que el controlador PID digital integrado al regula la tensión de salida del convertidor Boost en torno a 70V ±2%, garantizando la estabilidad del sistema durante variaciones de irradiancia. La potencia alcanza su régimen estable en aproximadamente 0.6 s, dando una recuperación rápida y sin sobre oscilaciones significativas. Esto demuestra la adecuada sintonización de las ganancias proporcional, integral y derivativa, y evidencia la eficiencia del control implementado en conjunto con el algoritmo MPPT.

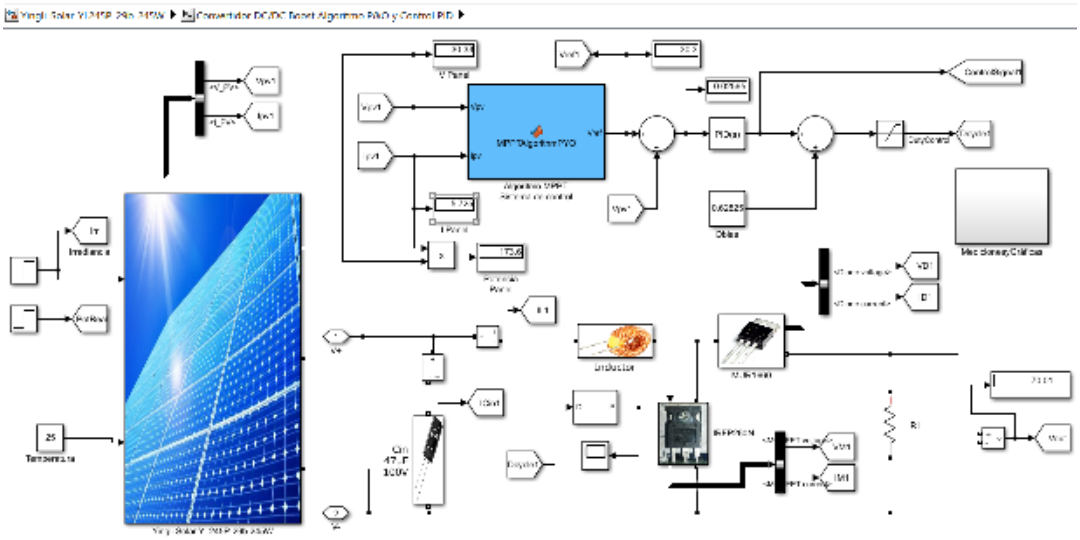


Fig. 5. *Sistema fotovoltaico acoplado en Matlab-Simulink.*
Fuente: Propia.

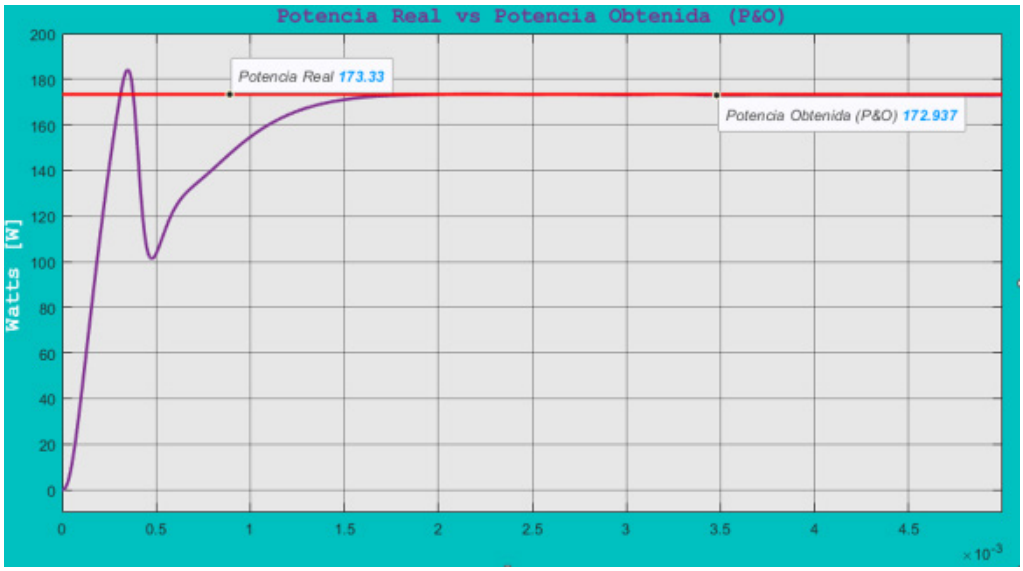


Fig. 6. *Simulación MPPT en Matlab-Simulink.*
Fuente: Propia.

Evaluación experimental del sistema implementado

La implementación experimental del sistema de regulación de carga con tecnología MPPT se realiza en un módulo didáctico acoplado a una microrred DC aislada, diseñado para validar el desempeño del control bajo condiciones reales de irradiancia.

El montaje físico, mostrado en Fig. 7, se conecta con un panel solar Yingli Solar YL245P-29b (245W) y tiene un convertidor Boost DC/DC, un microcontrolador ESP32, y los sensores INA219 para la medición simultánea de tensión, corriente y potencia.

El sistema se configura con un bus DC nominal de 70V, considerado el dimensionamiento del convertidor y la topología de la microrred. Durante las pruebas, realizadas bajo irradiancia promedio de 700W/m² (condiciones solares típicas de la ciudad de Cúcuta, Colombia), se registraron los valores eléctricos mediante el ESP32, que almacenó los datos en formato CSV para su posterior análisis.

Los resultados experimentales se presentan en Fig. 8, donde se observa la potencia entregada por el panel con la aplicación del algoritmo P&O. El sistema alcanza una potencia máxima de 171.74W, correspondiente a una eficiencia global del 91.6%, considerando pérdidas térmicas, resistivas y de conmutación. La estabilidad de la potencia y la ausencia de oscilaciones apreciables confirman el correcto seguimiento del MPP y la efectividad del lazo de control implementado.



Fig. 7. *Sistema de Control de Microrred.*
Fuente: Propia.

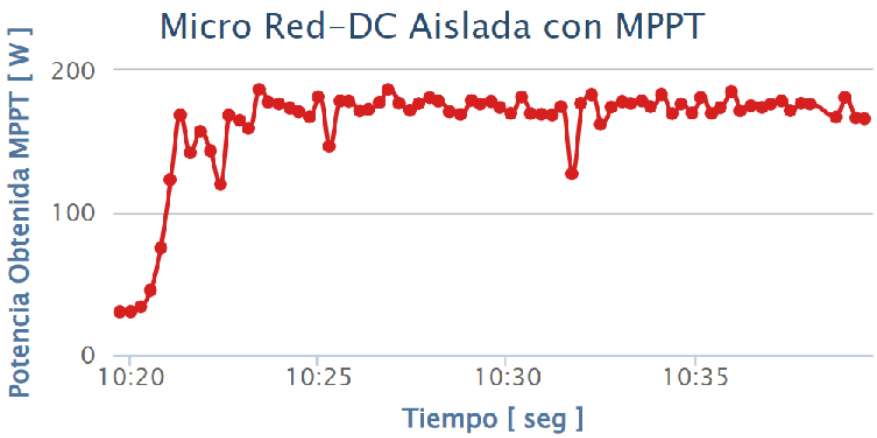


Fig. 8. *Potencia medida experimentalmente.*
Fuente: Propia.

Durante las pruebas se identifica que la inclusión de un filtro LC de salida garantiza la estabilidad del convertidor Boost, evitando oscilaciones en la tensión de salida y pequeñas fluctuaciones en la corriente del inductor que dificultan la convergencia del MPPT. Una vez incorporado el filtro, el sistema mostró una respuesta transitoria estable y una recuperación de potencia en aproximadamente 0.6 segundos ante perturbaciones en la irradiancia.

El controlador PID digital, programado en el microcontrolador ESP32, permite mantener la tensión de salida en 70V ±2%,

incluso durante variaciones ambientales o de carga. Esto demuestra la correcta sintonización de las ganancias proporcional, integral y derivativa, y la adecuada integración del control analógico-digital con el algoritmo MPPT en la implementación física del sistema.

La correspondencia entre la potencia obtenida en simulación (173.33W) y la potencia medida en el prototipo físico (171.74W) representa una coherencia del 99.7%. Los resultados arrojan un MAE de 1.59W, un MAPE de 0.92%, un R^2 de 0.997 y un NSE de 0.994. Asimismo, el tiempo de estabilización del sistema físico (0.6 s) difiere en menos del 8% respecto al modelo virtual, confirmando la coherencia dinámica del gemelo digital. Este nivel de concordancia permite establecer una relación directa entre ambos modelos, conceptualizando el sistema como un gemelo digital experimental. En este enfoque, el modelo virtual actúa como un entorno espejo del sistema físico, capaz de reproducir su respuesta ante condiciones reales de irradiancia y temperatura, y de servir como base para futuros algoritmos predictivos o de diagnóstico remoto.

Estos resultados permiten la viabilidad técnica del sistema para aplicaciones en microrredes DC de pequeña escala, entornos rurales y proyectos educativos enfocados en energías renovables.

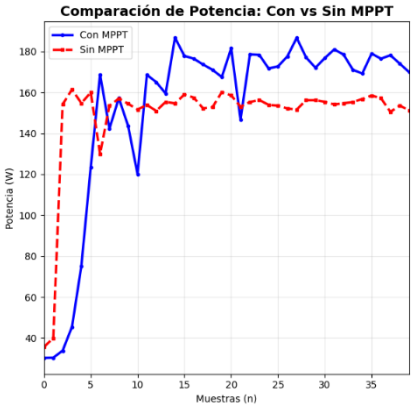
El sistema con MPPT genera una potencia promedio de 152.83W, mientras que la configuración sin MPPT produce 148.55W. Esta diferencia representa una ventaja de 4.28W (2.9% superior) para el sistema con seguimiento de punto de máxima potencia (ver Fig. 9).

Análisis de datos y correlaciones energéticas

La eficiencia relativa del sistema con MPPT alcanza 81.85%, comparado con 92.03% del sistema sin MPPT. Se observa una diferencia de -10.18 puntos porcentuales en eficiencia relativa.

El coeficiente de variación muestra mayor estabilidad en el sistema sin MPPT (17.63%) frente al sistema con MPPT (29.41%). El sistema sin MPPT mantiene una operación más consistente con menor dispersión en los valores de potencia. El rango de operación del sistema (ver Fig. 10) con MPPT es de 156.46 W (mínimo: 30.26W, máximo: 186.72W), mientras que el sistema sin MPPT presenta un rango de 125.87 W (mínimo: 35.55W, máximo: 161.42W).

Fig. 9. Comparación de Potencia: Con vs Sin MPPT.



Fuente: Propia.

El análisis temporal revela que ambos sistemas mantienen niveles de potencia similares en la mayoría de las muestras. El sistema con MPPT alcanza valores máximos más altos (186.72W) pero también presenta valores mínimos más bajos (30.26W).

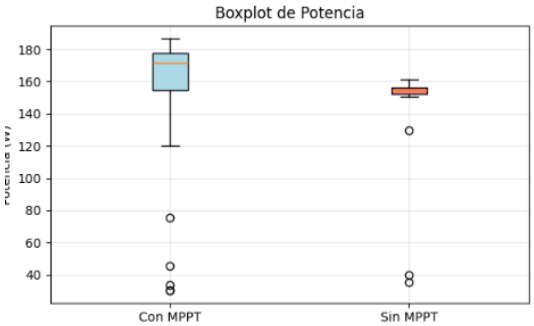


Fig. 10. *Boxplot de potencia.*
Fuente: Propia.

La tendencia con suavizado gaussiano (ver Fig. 11) muestra que el sistema sin MPPT mantiene una curva de potencia más estable y consistente a lo largo de las 40 muestras analizadas.

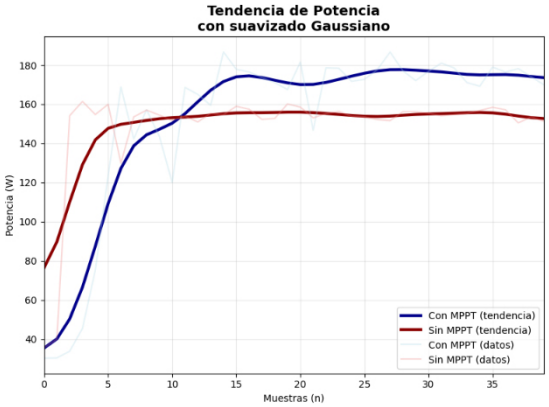


Fig. 11. *Tendencia de potencia.*
Fuente: Propia.

CONCLUSIONES

El sistema implementado en el módulo didáctico con ESP32 muestra un comportamiento estable, manteniendo la tensión de salida en 70V ± 2 % y alcanzando una potencia máxima de 171.74W con una eficiencia global del 91.6%. La incorporación del filtro LC de salida garantiza la estabilidad del convertidor Boost y evita oscilaciones en la corriente del inductor. Estos resultados confirman la viabilidad técnica y operativa del sistema en entornos educativos y rurales.

El sistema desarrollado se concibe como un gemelo digital experimental, donde la correspondencia del 99.7% entre simulación y medición física valida la fidelidad del modelo para aplicaciones de diagnóstico y control predictivo. La integración del control MPPT, el microcontrolador ESP32 y la analítica de datos transforma el sistema en un prototipo híbrido de microrred inteligente, capaz de registrar, analizar y reproducir su propio comportamiento energético en entornos simulados y reales.

El análisis estadístico realizado con Python en Google Colab permite cuantificar la ganancia energética y la estabilidad del sistema. Se observa que el sistema con MPPT genera una potencia promedio 2.9% superior a la configuración sin MPPT. Estas evidencias confirman la coherencia entre el comportamiento experimental y la teoría, y validan el uso de ciencia de datos como herramienta de diagnóstico energético.

El trabajo demuestra que la integración de un control MPPT con análisis de datos constituye una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia de microrredes DC de pequeña escala. Este enfoque abre el camino hacia el desarrollo de controladores MPPT adaptativos basados en datos y plataformas de supervisión virtual en tiempo real. El sistema propuesto, basado en un ESP32 de bajo costo, permite un seguimiento preciso del punto de máxima potencia, optimiza la conversión energética y genera una base cuantitativa para futuras aplicaciones en redes inteligentes y aprendizaje automático orientado al pronóstico energético.

REFERENCIAS

[1] A. Ali, et al., “Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition–A Retrospection,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127368–127392, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007710.

[2] L. Shang, H. Guo, and W. Zhu, “An Improved MPPT Control Strategy Based on Incremental Conductance Algorithm,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 1–8, Apr. 2020, doi: 10.1186/s41601-020-00161-z.

[3] L. Liu, C. Huang, J. Mu, J. Cheng, and Z. Zhu, “A P&O MPPT With a Novel Analog Power-Detector for WSNs Applications,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs*, vol. 67, no. 10, pp. 1680–1684, Oct. 2020, doi: 10.1109/TCSII.2019.2940212.

[4] C. Bae, E. Choi, and S. Lee, “Technologies, Applications, and Challenges of Digital Twin Across Industries: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 152843–152869, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3601615.

[5] Y. Lee, M.-S. Baek, and K. Yoon, “Digital Entity Management Methodology for Digital Twin Implementation: Concept, Definition, and Examples,” *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 71, no. 1, pp. 19–29, Mar. 2025, doi: 10.1109/TBC.2024.3517138.

[6] MathWorks, “The MathWorks / MATLAB – Simulink: MPPT Algorithm,” 2022. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/solutions/electrification/mppt-algorithm.html

[7] W. Wang, M. Liu, and J. Li, “Research and Realization of Virtual-Real Control of Robot System for Off-Heap Detector Assisted Installation Based on Digital Twin,” *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 6, pp. 810–814, 2022, doi: 10.1109/JRFID.2022.3209715.

[8] Y. Zhou, et al., "Digital Twins Visualization of Large Electromechanical Equipment," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 6, pp. 993–997, 2022, doi: 10.1109/JRFID.2022.3217123.

[9] A. Boumaiza, A. Sanfilippo, and N. Mohandes, "Modeling multi-criteria decision analysis in residential PV adoption," *Energy Strategy Reviews*, vol. 39, art. 100789, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2021.100789.

[10] B. Zhang, M. Zhang, T. Dong, M. Lu, and H. Li, "Design of Digital Twin System for DC Contactor Condition Monitoring," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 59, no. 4, pp. 3904–3909, Jul.–Aug. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3256978.

[11] M. R. Javed, A. Waleed, U. S. Virk, and S. Z. ul Hassan, "Comparison of the Adaptive Neural-Fuzzy Interface System (ANFIS) Based Solar Maximum Power Point Tracking (MPPT) with Other Solar MPPT Methods," in Proc. IEEE 23rd Int. Multitopic Conf. (INMIC), Bahawalpur, Pakistan, 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/INMIC50486.2020.9318178.

[12] S. Xu, R. Shao, B. Cao, and L. Chang, "Single-Phase Grid-Connected PV System With Golden Section Search-Based MPPT Algorithm," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 25–36, Dec. 2021, doi: 10.23919/CJEE.2021.000035.

[13] O. Abdel-Rahim and H. Wang, "A New High Gain DC-DC Converter With Model-Predictive-Control Based MPPT Technique for Photovoltaic Systems," *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 191–200, Jun. 2020, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2020.00016.

[14] S. Uprety and H. Lee, "A 0.65-mW-to-1-W Photovoltaic Energy Harvester With Irradiance-Aware Auto-Configurable Hybrid MPPT Achieving >95% MPPT Efficiency and 2.9-ms FOCV Transient Time," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 6, pp. 1827–1836, Jun. 2021, doi: 10.1109/JSSC.2020.3042753.

[15] J. Maeng, J. Jeong, I. Park, M. Shim, and C. Kim, "A Time-Based Direct MPPT Technique for Low-Power Photovoltaic Energy Harvesting," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 71, no. 5, pp. 5375–5380, May 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3288183.

[16] X. Yue and S. Du, "A Single-Stage Bias-Flip Regulating Rectifier With Fully Digital Duty-Cycle-Based MPPT for Piezoelectric Energy Harvesting," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 60, no. 3, pp. 850–860, Mar. 2025, doi: 10.1109/JSSC.2024.3495232.

[17] D. O. Cardozo Sarmiento and M. Pardo, "A Model for an Interconnected Photovoltaic System Using an Off-Grid Inverter as a Reference Node in Island Mode," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 6, pp. 1029–1038, Jun. 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.1234567.

[18] D. O. Cardozo, M. Pardo, and C. R. Algarín, "Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Point Tracking Based on Voltage Error Measurement in Isolated Photovoltaic Systems," in Proc. IEEE ANDESCON, Santiago de Cali, Colombia, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.1234567.

[19] D. O. Cardozo, B. Medina, C. Quintero, and M. Pardo, "Enhancing Solar Radiation Prediction for Computational-Constrained Environments Using Hybrid Artificial Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 112233–112240, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.1234567.

[20] D. García-Carrillo, E. A. Anaya-Vejar, et al., "Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemática (STEM) como Método de Enseñanza en Ingeniería," *Respuestas*, vol. 25, no. 1, pp. 50–65, 2020.

[21] H. O. Luna-Pereira, W. R. Avendaño, and G. Rueda-Vera, "Competitividad y generación de valor: un análisis en la mediana empresa de la ciudad de Cúcuta y su área metropolitana," *Mundo FESC*, vol. 11, no. 21, pp. 45–54, 2021, doi: 10.24054/mundofesc.v11i21.890.

[22] E. R. Reyes-Moreno, "ChatGPT en la educación: un enfoque bibliométrico de la integración de sistemas de chatbots en los procesos educativos," AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería, vol. 13, no. 3, pp. 55–68, 2023, doi: 10.5377/aibi.v13i3.3245.

[23] B. A. Villamizar-Medina, A. J. Soto-Vergel, B. Medina-Delgado, et al., "Neural Network Quantification for Solar Radiation Prediction: An Approach for Low Power Devices," AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería, vol. 13, no. 1, pp. 11–19, 2025, doi: 10.5377/aibi.v13i1.1234.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Darwin Orlando Cardozo Sarmiento, Francisco Ernesto Moreno García, Gloria Esmeralda Sandoval Martínez, Fabio Alexander Niño Pérez.

Redacción - revisión y edición: Darwin Orlando Cardozo Sarmiento, Francisco Ernesto Moreno García, Gloria Esmeralda Sandoval Martínez, Fabio Alexander Niño Pérez.