



Comparative analysis of dynamic efficiency in P&O algorithms for tracking the maximum power point in photovoltaic systems

Análisis comparativo de la eficiencia dinámica en algoritmos P&O para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos

Jhon Edward Lizarazo-Parada^{1*}, Aldo Pardo-García², Lisset Jaimes-Mogollón³

^{1*} MSc. en Ingeniería de Mantenimiento, jlizarazop@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-6079-8518>, Servicio Nacional de Aprendizaje, Cúcuta, Colombia.

² PhD. en Control Drives of Motors, apardo13@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-2040-9420>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

³ MSc. Chemical Engineering, lisset.jaimes@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-9936-2738>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Cómo citar: J. E. Lizarazo-Parada, A. Pardo-García, y L. Jaimes-Mogollón, “Análisis comparativo de la eficiencia dinámica en algoritmos P&O para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos”, *Respuestas*, vol. 31, n.º 1, pp. 34-46, ene. 2026. <https://doi.org/10.22463/0122820X.5646>.

Received on August 26, 2025 - Approved on December 16, 2025 – Published on January 1, 2026.

ABSTRACT

Keywords:

Application of power electronics, Control of renewable energy resources, Intelligent control of power systems, Maximum Power Point Tracking, Modeling and simulation of power systems, Power and Energy Systems.

Usable energy resources are classified as hydroelectric, wind, solar, hydrogen, biomass, geothermal, and oceanic. The application of power electronics is important in conversion processes to increase energy transformation efficiency; therefore, maximum power transfer is affected by the type of converter used. In solar photovoltaic systems, there are different architectures studied for the analysis of maximum power transfer in converters according to the literature reviewed. This research analyses a step-up converter as a power interface between the 340W Amerisolar polycrystalline photovoltaic panel generation system and a 100Ω resistive load to track the maximum power point. The methodology links two phases: the first is the characterisation of the photovoltaic solar panel system, and the second is the tracking of the maximum power point using the perturbation and observation (P&O) algorithm simulated with MATLAB/Simulink to obtain the PV and VI performance curves.

RESUMEN

Palabras clave:

Aplicaciones de electrónica de potencia, Control de energía de recurso renovable, Control de energía de recurso renovable, Modelado y simulación de sistemas de potencia, Seguimiento al Máximo Punto de Potencia, Sistemas de potencia y energía.

Los recursos energéticos aprovechables se clasifican en hidroeléctricos, eólicos, solares, hidrógeno, biomasa, geotérmicos y oceánicos, la aplicación de electrónica de potencia es importante en los procesos de conversión para aumentar la eficiencia en la transformación de energía, por lo tanto, la máxima transferencia de potencia se ve afectada según la tipología de convertidor a utilizar. En sistemas solares fotovoltaicos existen diferentes arquitecturas estudiadas para el análisis de máxima transferencia de potencia en convertidores según la literatura abordada. En esta investigación se analiza un convertidor elevador como interfaz de potencia entre el sistema de generación panel fotovoltaico policristalino de 340W marca Amerisolar y una carga resistiva de 100Ω para hacer el seguimiento al máximo punto de potencia. La metodología vincula dos fases, la primera es la caracterización del sistema de panel solar fotovoltaico, la segunda el seguimiento al máximo punto de potencia por medio del algoritmo de perturbación y observación (P&O) simulado con MATLAB/Simulink para la obtención de las curvas de rendimiento PV y VI.

*Corresponding author.

E-mail Address: jlizarazop@sena.edu.co (Jhon Edward Lizarazo-Parada)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

Las configuraciones de generación basadas en fuentes renovables suelen seguir esquemas estructurales estandarizados, similares a los descritos en la literatura técnica como casos de referencia (Figura 1) [1]. El propósito central de este trabajo es incrementar la efectividad de los arreglos fotovoltaicos mediante el uso de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), los cuales permiten una gestión energética superior al procesar variables climáticas —específicamente la radiación solar y el nivel térmico— dentro de su marco analítico. Al integrar estas unidades de control en el flujo de potencia convencional, el sistema evoluciona hacia una arquitectura más robusta orientada a la eficiencia, como se visualiza en los diagramas generales presentados (Figura 6).

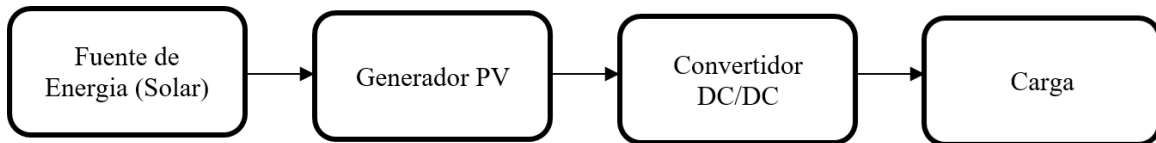


Figura 1. Diagrama de bloque fuente de energía. Fuente: [2].

Con el fin de normalizar el desempeño de los dispositivos solares bajo diferentes niveles de temperatura y radiación, la literatura técnica categoriza los métodos de corrección de curvas I-V siguiendo el estándar IEC 60891 [3]. Aunque se han identificado tres modelos principales para describir el comportamiento de las celdas [4], cada uno con fortalezas y debilidades específicas, la metodología de esta investigación se fundamenta en la ecuación de dos diodos exponenciales por su capacidad de respuesta en entornos de simulación [5]. La implementación técnica de este modelo se apoya en el uso de Simscape y Matlab [6] y [7], permitiendo obtener resultados detallados sobre el rendimiento del sistema fotovoltaico.

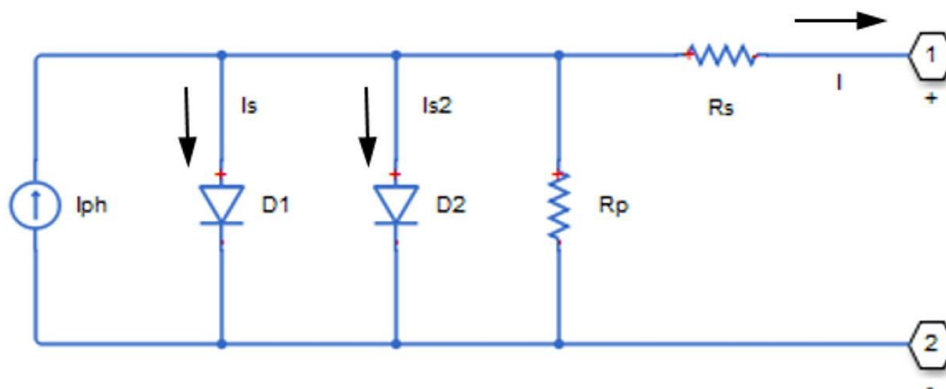


Figura 2. Modelo de doble Diodo.

$$I = I_{pv} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V_{D1}}{R_p} \quad (1)$$

$$I_{D1} = I_{D2} (e^{V_{D2}/\sigma_2 V_T} - 1) \quad (2)$$

$$V = V_D - IR_s \quad (3)$$

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \quad (4)$$

V_T es el voltaje térmico, N_s es el número de celdas conectadas en serie, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura en (K) y q es la carga eléctrica. [8].

El análisis de las variables eléctricas del arreglo fotovoltaico se fundamentó en pruebas virtuales que integran una carga programable dentro del entorno Simscape. A través de un bucle de programación, se evaluó el comportamiento del sistema ante cambios de irradiancia, lo que facilitó la visualización de las respuestas dinámicas de potencia y tensión frente a la corriente. Las fuentes indican que estas mediciones corresponden a una configuración en paralelo de dos módulos Amerisolar de 340W, logrando identificar puntos de operación clave como se detalla en las representaciones gráficas V vs. I (Figura 4) y P vs. V (Figura 5).

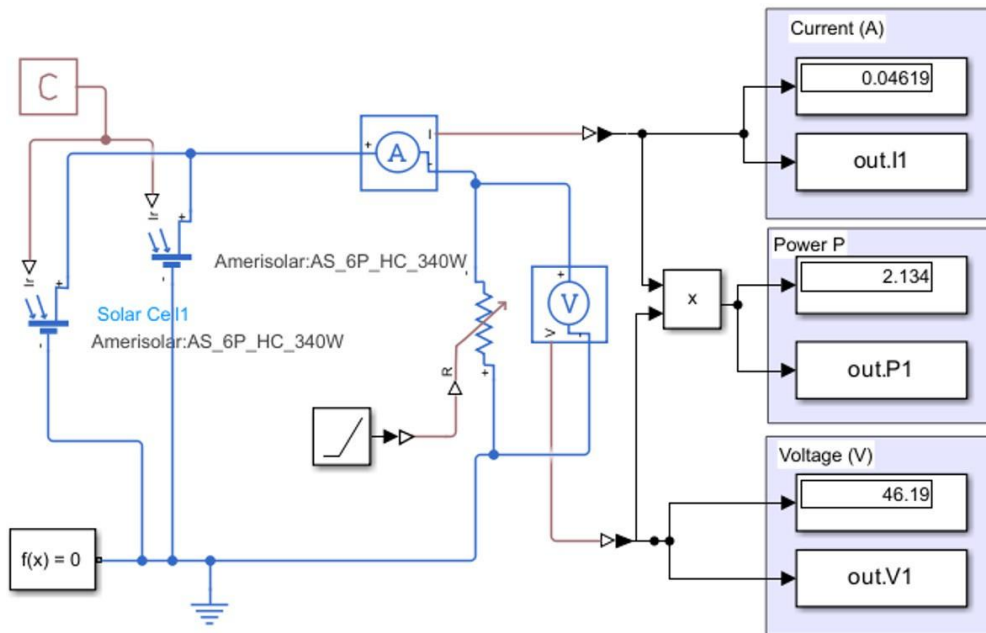


Figura 3. Diagrama de bloques simulink. Fuente: autor

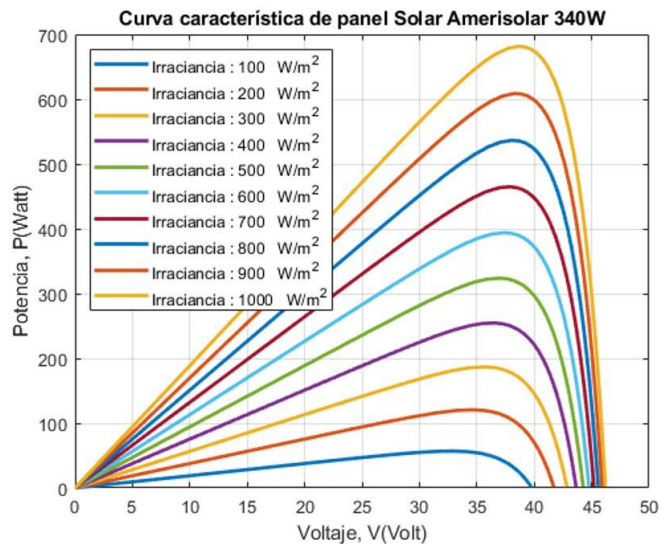


Figura 4. Curva P vs V MATLAB/Simulink. Fuente: autor.

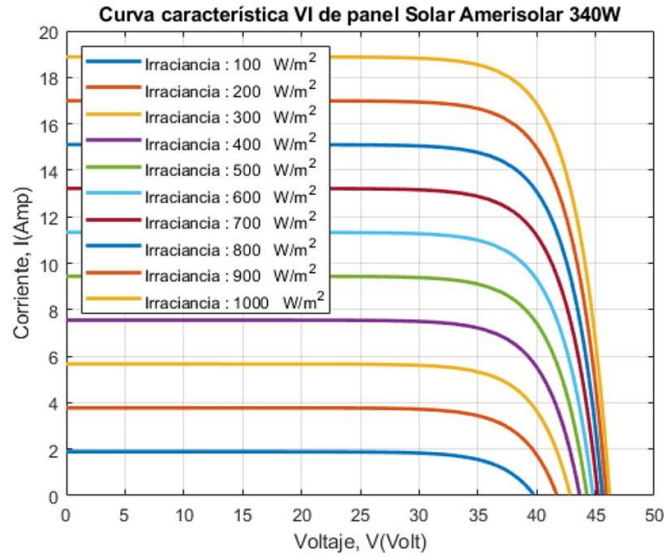


Figura 5. Curva V vs I MATLAB/Simulink. Fuente: autor.

El comportamiento conjunto del recurso solar y el panel fotovoltaico se fundamenta en leyes físicas influenciadas por la irradiancia, la temperatura y la carga eléctrica, parámetros que se sintetizan matemáticamente en el cálculo del voltaje térmico (VT) mediante la ecuación 4. Esta relación analítica valida teóricamente la integración de las dos primeras etapas del sistema, la fuente energética y el generador ilustradas en el diagrama de bloques estructural de la Figura 1. De este modo, se establece una equivalencia directa entre las ecuaciones del modelo y la arquitectura física propuesta para la captación de energía.

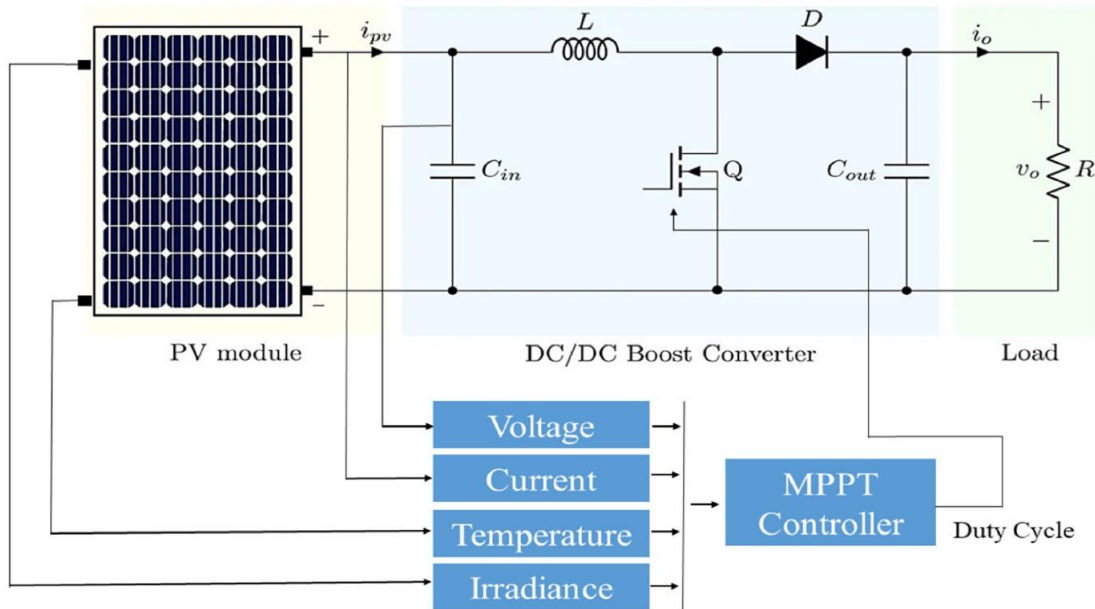


Figura 6. Diagrama de bloque general de sistema PV. Fuente: [9].

Materiales y Métodos

(Convertidor Elevador DC-DC).

Aunque la literatura técnica identifica diversas arquitecturas de conversión de potencia para aplicaciones fotovoltaicas, como los modelos Buck, Forward, Flyback y resonantes [10], este estudio se decanta por el uso de un convertidor Boost. La elección del convertidor elevador se fundamenta en que la salida del panel solar es de 46.1Vmp, mientras que la carga resistiva asociada exige un nivel de tensión superior. Como se detalla en el esquema de la Figura 7, el proceso de conmutación puede gestionarse indistintamente mediante transistores MOSFET o IGBT [11]. El régimen de operación previsto es de conducción continua, asegurando que el flujo eléctrico no se anule durante el ciclo completo. Finalmente, la unidireccionalidad de la corriente queda garantizada por la integración del diodo D1 [12], siguiendo los lineamientos de diseño y las bases matemáticas de las ecuaciones 7 y 8.

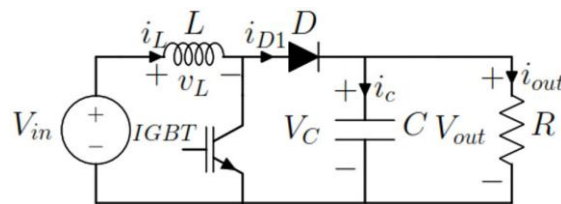


Figura 7. Schematic DC-DC boost converter.

$$V_{out} = V_{in} + v_L \quad \text{OFF Period} \quad (5)$$

$$V_{out} = V_c \quad \text{ON Period} \quad (6)$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1 - D)} \quad (7)$$

$$I_{RIPPLERMS} = (I_{D1})^2 - (i_{out})^2 \quad (8)$$

La fase final del diseño del controlador fotovoltaico consistió en el modelado del convertidor DC-DC dentro del entorno de Matlab, siguiendo la lógica estructural del diagrama de bloques inicial (Figura 1). Para perfeccionar este sistema, se analizaron diversas estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), diferenciando entre enfoques en línea (online) y fuera de línea (offline), los cuales pueden fortalecerse significativamente mediante el uso de inteligencia artificial. Esta implementación técnica se detalla en la Figura 9, representando el tercer nivel de avance en la gestión energética del sistema [13].

Dada la naturaleza intermitente de recursos como el sol y el viento, que impide una producción energética constante (como se ilustra en la Figura 6), el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) se ha consolidado como un área de estudio esencial [14]. La literatura especializada organiza estas estrategias bajo distintos criterios: algunos autores proponen grupos basados en métodos clásicos, avanzados, híbridos o de optimización [9], mientras que otros las categorizan según su ejecución en modalidades online u offline [13]. Para esta investigación, se seleccionaron las técnicas online P&O y P&O modificado, las cuales, aunque han sido propuestas originalmente para convertidores Buck [15], se han adaptado en este estudio para ser evaluadas mediante la simulación de un convertidor elevador o Boost.

La lógica del seguidor de máxima potencia mediante perturbación y observación (P&O), detallada en los diagramas de flujo de las fuentes (Figura 8), es ampliamente preferida en soluciones comerciales por su sencillez técnica y eficiencia con radiación uniforme. No obstante, este método puede generar oscilaciones indeseadas en el estado estable si se presentan fluctuaciones ambientales bruscas [16].

El ciclo operativo comienza con el cálculo de la potencia a partir de la corriente y el voltaje medidos en los paneles. El algoritmo determina la diferencia de potencia (ΔP); si esta es inexistente, el proceso se detiene hasta el siguiente muestreo. En caso de detectar cambios, se evalúa si el diferencial es mayor a cero para proceder con el ajuste del voltaje de salida del panel.

Técnicamente, si se identifica un incremento positivo en el voltaje, el sistema aumenta el ciclo útil de la señal PWM que regula el MOSFET o IGBT del convertidor elevador. Por el contrario, ante una reducción del voltaje, el ciclo útil disminuye para ajustar la respuesta del convertidor boost y buscar el punto de máxima transferencia energética. Este proceso se repite continuamente según el intervalo de muestreo configurado, permitiendo que el sistema sea apto para su implementación en dispositivos embebidos.

En situaciones donde se detecta una disminución en la potencia, el algoritmo procede a analizar las fluctuaciones de tensión bajo los mismos parámetros para ajustar el ciclo de trabajo de la señal PWM. Esta característica simplifica considerablemente su configuración, convirtiéndolo en una opción predilecta para su ejecución en sistemas embebidos debido a su baja demanda computacional. La operatividad recurrente del sistema está supeditada a la frecuencia de muestreo; tras finalizar un ciclo en el nodo "return" del diagrama de flujo (Figura 8/9), el proceso se reinicia en el estado $Init(k)$, marcando el comienzo de una nueva captura de datos del arreglo solar. En el modelo de simulación, la función denominada "PyO" actúa como el núcleo de control, procesando las señales de voltaje (V_{pv}) y corriente (I_{pv}) para calcular el ciclo útil requerido por el convertidor elevador.

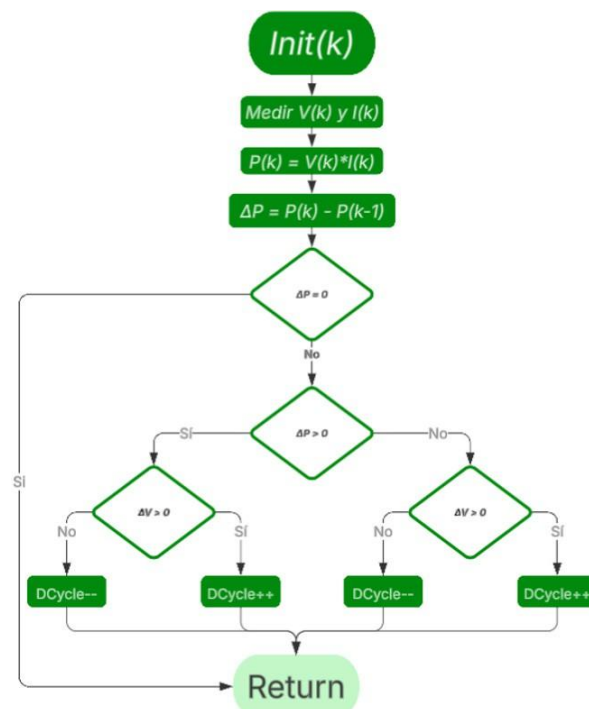


Figura 8. Algoritmo P&O Clásico.

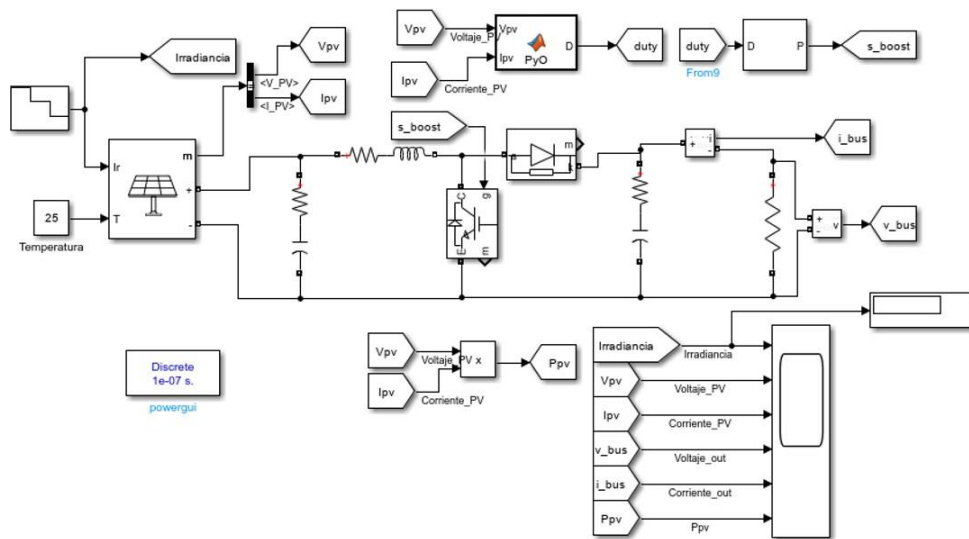


Figura 9. Diagrama de Bloques Sistema PV en Simscape Matlab/Simulink.

Resultados y Discusión

El comportamiento del sistema bajo una irradiación estable de 900W/m^2 se detalla en la Figura 10, donde la sección superior muestra una corriente de panel de 17A y la monitorización de la salida del convertidor. En la parte inferior de dicha gráfica, se confirma que el voltaje del generador se mantiene cerca de los 38V , cumpliendo con su ficha técnica, mientras que la tensión de salida se eleva hasta alcanzar los 80V aproximadamente. Estos valores dan como resultado una potencia global de 610W , lo que significa que el arreglo de dos paneles Amerisolar de 340W opera a un 90% de su capacidad nominal bajo condiciones constantes de temperatura y radiación [17].

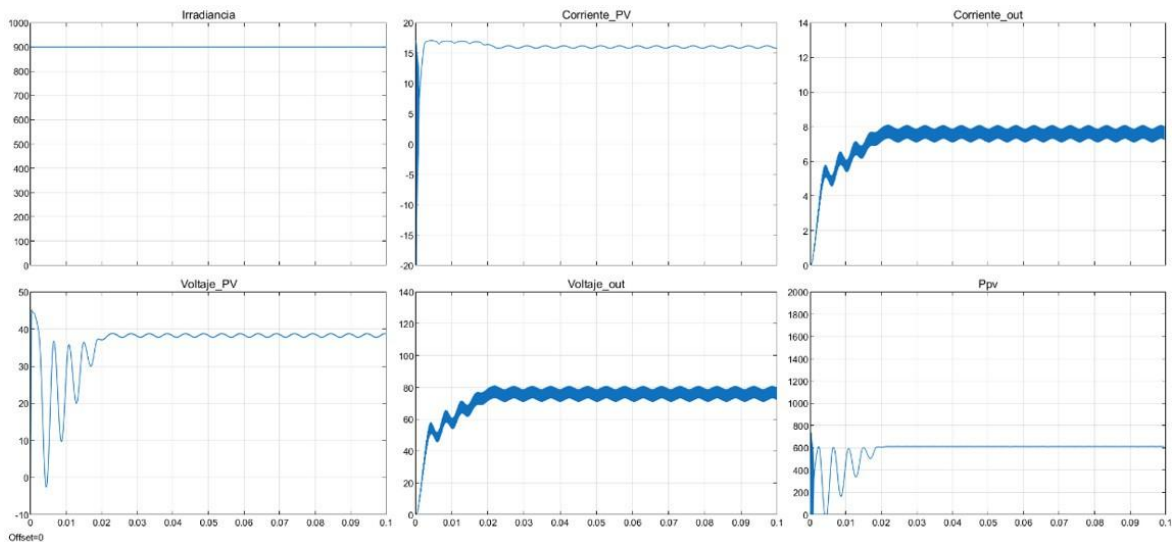


Figura 10. Voltajes de entrada y salida del Convertidor.

La efectividad del algoritmo se verificó sometiendo al sistema a transitorios de irradiancia en pasos de $200\text{W}/\text{m}^2$, permitiendo un análisis comparativo entre la potencia obtenida en la simulación y la precisión del seguimiento real [18] y [19]. Un obstáculo recurrente en el desarrollo de estos controladores es la coexistencia de diversos máximos globales, lo que ha impulsado el estudio de estrategias inteligentes para optimizar la convergencia [20]. Asimismo, para prevenir la inestabilidad operativa durante el muestreo, se estableció un ajuste del 1% en el ciclo útil de la señal PWM tras una fase de barrido preliminar. Este comportamiento se evidencia en las Figuras 11 y 12 donde se observa la respuesta del voltaje y la potencia ante variaciones ascendentes y descendentes del recurso solar.

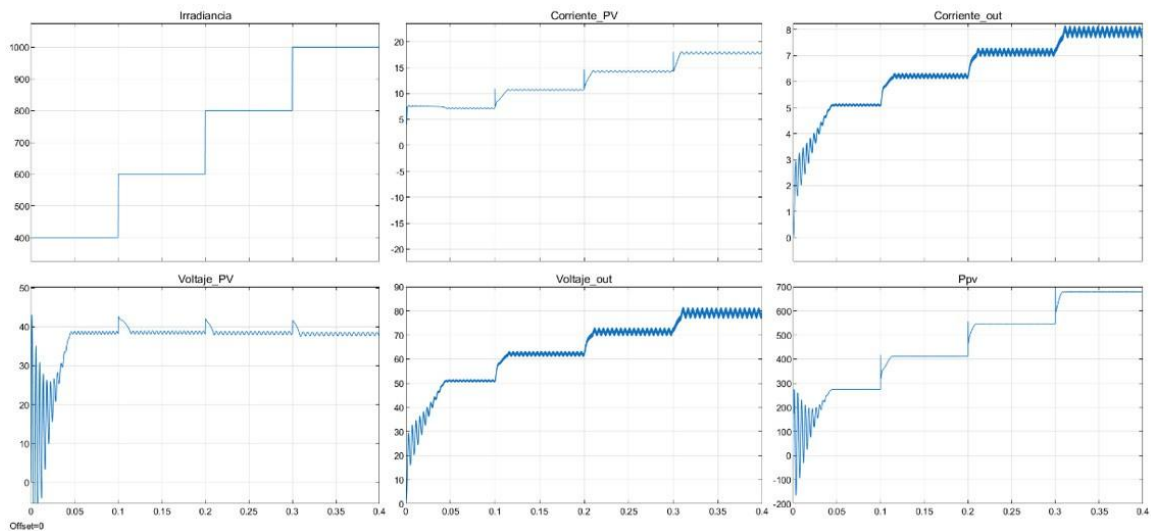
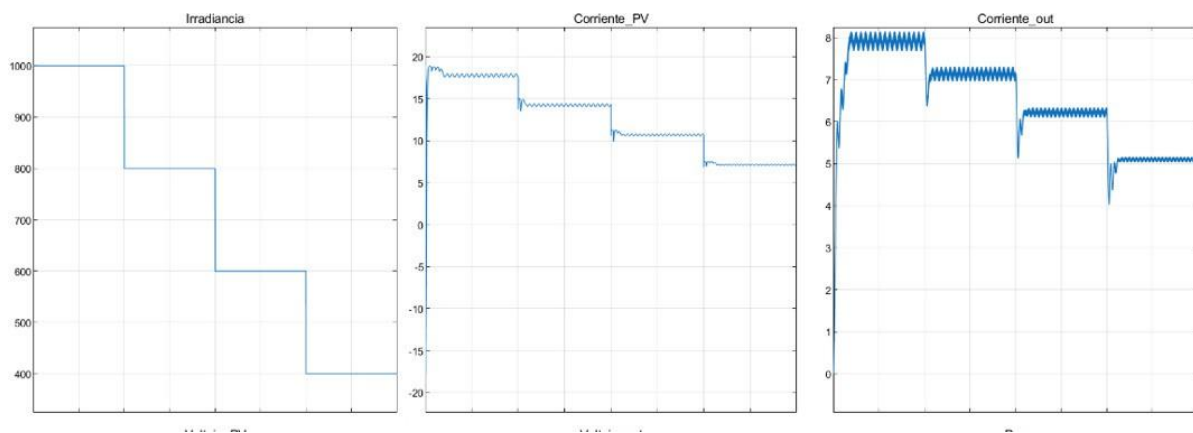


Figura 11. Salida ante ascenso de G P&O clásico.

El desempeño del sistema se mide a través de dos indicadores fundamentales: la eficiencia en estado estable (η_{estable}) y la eficiencia dinámica. La primera establece una comparación entre la potencia efectivamente recolectada por el arreglo (visible en la respuesta de Ppv de la Figura 11) y el valor máximo teórico definido en la ficha técnica bajo condiciones climáticas constantes. En contraste, la eficiencia dinámica (η) evalúa la capacidad del seguidor para capturar energía en escenarios de irradiancia y temperatura fluctuantes [21]. El rendimiento global o eficiencia total del conjunto se obtiene al multiplicar la eficiencia intrínseca del módulo fotovoltaico por la eficiencia combinada del algoritmo MPPT y el convertidor DC-DC [22].



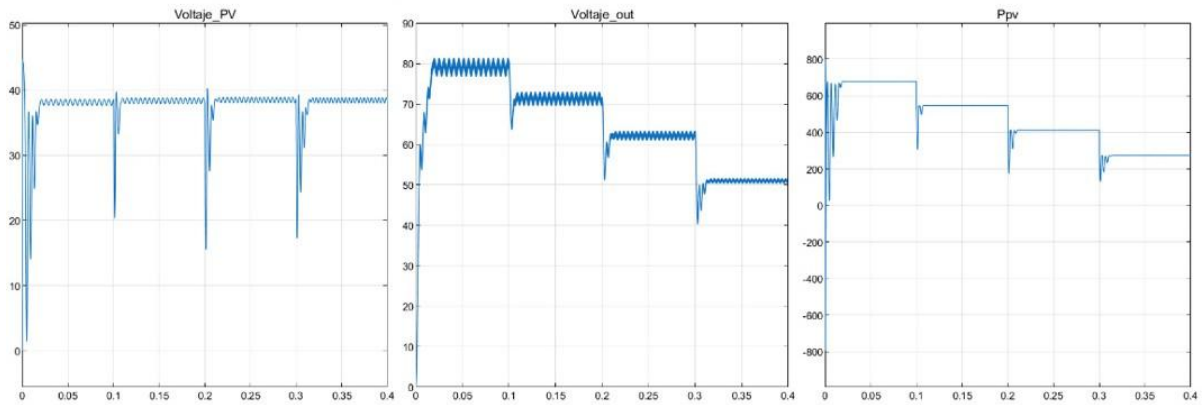


Figura 12. Salida ante descenso de G P&O clásico.

Es fundamental señalar que el propósito de estas mediciones es analizar el desempeño del sistema frente a las fluctuaciones del recurso solar. La firmeza operativa del diseño está vinculada a la configuración del ciclo útil de la señal PWM en un rango del 0% al 80%, armonizado con las especificaciones físicas del convertidor. A diferencia de los métodos tradicionales que solo reaccionan a cambios de luz, esta investigación emplea un algoritmo P&O de paso variable que integra un parámetro de conteo adicional; este permite distinguir si las variaciones en la potencia son resultado de ajustes en el voltaje de operación o de alteraciones reales en la irradiancia. Este enfoque contrasta con los estudios convencionales que utilizan el esquema clásico de P&O sin esta capacidad de discriminación [15].

Diversas metodologías de control se detallan en las fuentes, incluyendo algoritmos heurísticos de vanguardia como la optimización de partículas adaptativa [21]. La bibliografía técnica clasifica las estrategias desarrolladas en los últimos años en grupos clásicos, inteligentes, híbridos y de optimización [23], evaluando su evolución y eficiencia operativa [24]. Asimismo, se han realizado análisis comparativos entre el método de perturbación y observación y las redes neuronales artificiales mediante simulaciones en MATLAB [25]. Otros trabajos examinan múltiples procedimientos de seguimiento para su ejecución en tarjetas embebidas de bajo costo, lo cual resulta relevante para esta investigación basada en sistemas embebidos.

El interés científico actual también se centra en aplicaciones para controladores de carga, utilizando simuladores en tiempo real para validaciones experimentales complejas [26]. En [27] se observa un resultado experimental con diferentes técnicas haciendo uso de un simulador en tiempo real OP5707XG para hacer el desarrollo del MPPT a un controlador de carga que es una de las aplicaciones de mayor interés actual de este tipo de seguidores [28]. En los resultados de este estudio, representados en las Figuras 13 y 14, se observa que el algoritmo P&O de paso modificado gestiona las fluctuaciones de irradiancia mediante un procesamiento que acumula lecturas de dos intervalos de muestreo. Este mecanismo emplea un parámetro de conteo para discernir si las variaciones de potencia son consecuencia del voltaje operativo o de cambios en la radiación solar. Finalmente, aunque esta configuración asegura una mejor convergencia hacia el punto global de máxima potencia (GMPP), el aumento en la carga de procesamiento reduce la velocidad de seguimiento en comparación con el modelo estándar mostrado en la Figura 12.

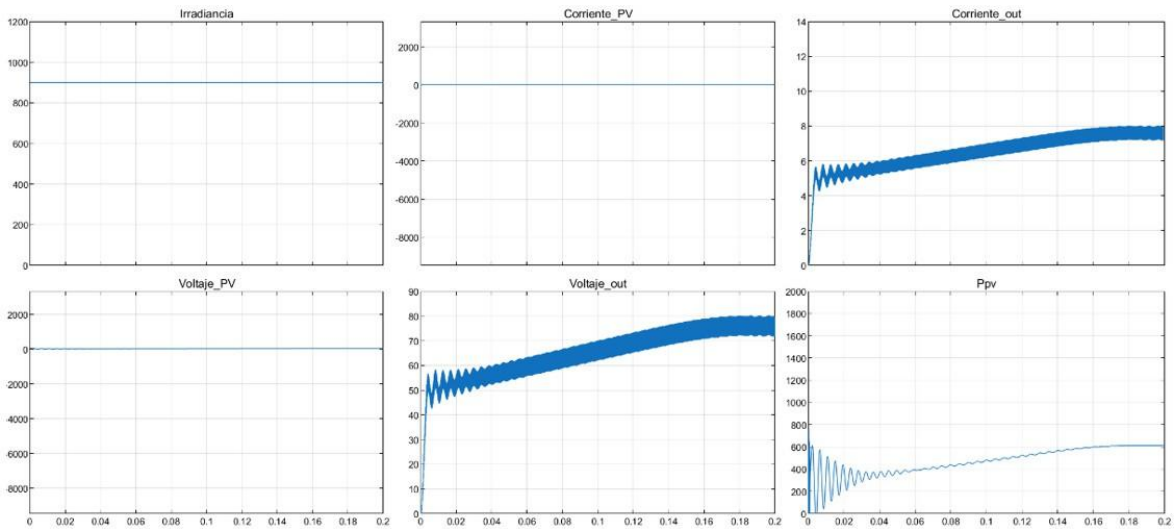


Figura 13. Salida P&O paso variable.

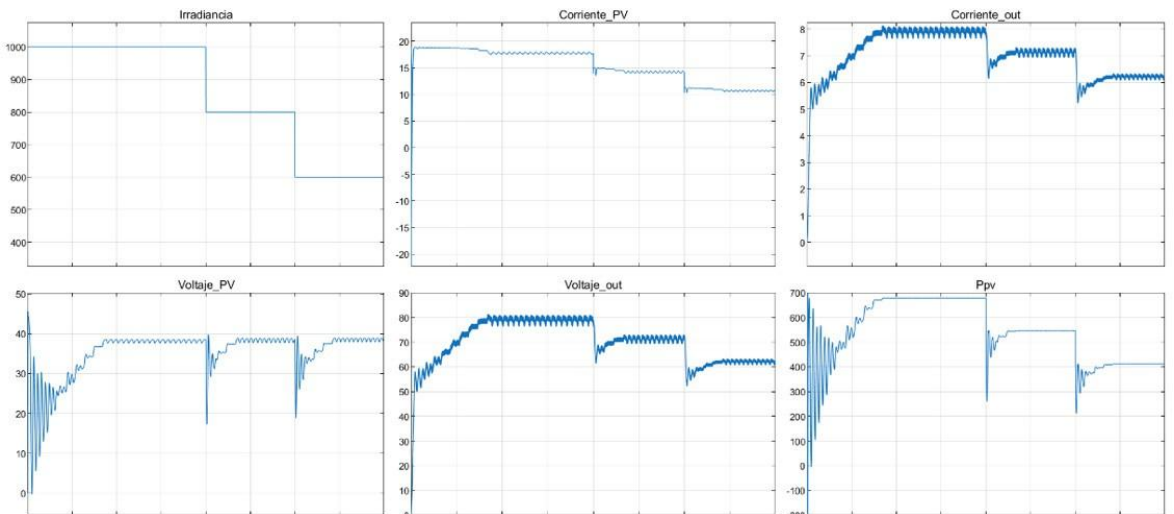


Figura 14. Salida P&O paso variable.

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de programa de becas de formación de talento humano especializado del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia Minciencias, la Universidad de Pamplona UP y el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, quienes han aportado el uso de su infraestructura y software de simulación para el desarrollo.

Conclusiones

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) dispone de múltiples alternativas para su implementación física, donde las técnicas clásicas en línea destacan por su flexibilidad frente a las de fuera de línea. El desarrollo actual apunta hacia el uso de técnicas metaheurísticas e inteligencia artificial (como lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos) ejecutadas en sistemas embebidos o microcomputadoras.

La implementación de algoritmos P&O, reforzados con estrategias inteligentes híbridas, permite minimizar los errores de aproximación y prevenir la pérdida del punto global de máxima potencia (GMPP). Además, el uso de simulaciones detalladas en entornos comerciales evita las desviaciones producidas por el procesamiento manual de ecuaciones complejas, facilitando futuras comparaciones con controles avanzados.

El uso de la toolbox Simscape de Matlab representa una mejora significativa en la productividad del diseño, ya que permite caracterizar de forma eficiente arreglos fotovoltaicos de marcas comerciales. Esta herramienta también abre el camino para implementar controladores mediante sistemas embebidos o la metodología HIL (Hardware-in-the-Loop), aprovechando los módulos específicos para microcontroladores y FPGA.

El tamaño de paso en los algoritmos P&O y P&O modificado es un factor determinante en la eficiencia dinámica; aunque un ajuste preciso favorece la convergencia hacia el punto de máxima potencia, esto conlleva un sacrificio en la velocidad de respuesta del sistema. Se observó que los algoritmos de paso fijo pueden fallar al detectar cambios rápidos en condiciones de sombreado parcial, lo que reduce la eficiencia total del sistema fotovoltaico.

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de programa de becas de formación de talento humano especializado del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia Minciencias, la Universidad de Pamplona UP y el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, quienes han aportado el uso de su infraestructura y software de simulación para el desarrollo.

Conclusiones

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) dispone de múltiples alternativas para su implementación física, donde las técnicas clásicas en línea destacan por su flexibilidad frente a las de fuera de línea. El desarrollo actual apunta hacia el uso de técnicas metaheurísticas e inteligencia artificial (como lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos) ejecutadas en sistemas embebidos o microcomputadoras.

La implementación de algoritmos P&O, reforzados con estrategias inteligentes híbridas, permite minimizar los errores de aproximación y prevenir la pérdida del punto global de máxima potencia (GMPP). Además, el uso de simulaciones detalladas en entornos comerciales evita las desviaciones producidas por el procesamiento manual de ecuaciones complejas, facilitando futuras comparaciones con controles avanzados.

El uso de la toolbox Simscape de Matlab representa una mejora significativa en la productividad del diseño, ya que permite caracterizar de forma eficiente arreglos fotovoltaicos de marcas comerciales. Esta herramienta también abre el camino para implementar controladores mediante sistemas embebidos o la metodología HIL (Hardware-in-the-Loop), aprovechando los módulos específicos para microcontroladores y FPGA.

El tamaño de paso en los algoritmos P&O y P&O modificado es un factor determinante en la eficiencia dinámica; aunque un ajuste preciso favorece la convergencia hacia el punto de máxima potencia, esto conlleva un sacrificio en la velocidad de respuesta del sistema. Se observó que los algoritmos de paso fijo pueden fallar al detectar cambios rápidos en condiciones de sombreado parcial, lo que reduce la eficiencia total del sistema fotovoltaico.

Referencias

- [1] F. A. Lara V, M. Padilla Ortiz, and C. Vargas Salgado, “Comparative experimental analysis of the annual energy production of a 72 kWp photovoltaic solar power plant installed on a roof for self-consumption in the city of Monteria using PVsyst, PVGIS and SAM,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 43, pp. 43–51, 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2807.
- [2] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 5th ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2024.
- [3] C. Pavithra, S. Vidhyareni, M. Vijayadharshini, S. K. B. Akshaya, and N. Varsha, “Comparison of Solar P&O and FLC-based MPPT Controllers & Analysis under Dynamic Conditions,” *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, vol. 11, pp. 1–6, 2024, doi: 10.4108/ew.4988.
- [4] B. Yang, R. Xie, and Z. Guo, “Maximum Power Point Tracking Technology for PV Systems: Current Status and Perspectives,” *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 121, no. 8, pp. 2009–2022, 2024, doi: 10.32604/ee.2024.049423.
- [5] E. J. Barbosa et al., “Hybrid GMPPT Technique for Photovoltaic Series Based on Fractional Characteristic Curve,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 14, no. 1, pp. 170–177, Jan. 2024, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3323774.
- [6] A. Timarán Buchely and R. Timarán Pereira, “Educational data mining to discover patterns associated with academic performance in generic skills,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 38, pp. 87–95, Jul. 2021, doi: 10.24054/rcta.v2i38.1282.
- [7] Y. García, F. García, and J. A. Martín, “Mathematical model for the determination of volt-ampere characteristics in solar photocells,” presented at the 22nd World Multi-Conf. Syst., Cybern. Informat. (WMSCI 2018), Orlando, FL, USA, 2022, pp. 1–6.
- [8] N. Priyadarshi, S. M. Muyeen, M. S. Bhaskar, and F. Azam, “An improved standalone photovoltaic system with hybrid dual integral sliding mode and model predictive control for MPPT,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–15, 2025, doi: 10.1049/rpg2.12665.
- [9] H. Abidi and L. Sidhom, “Photovoltaic MPPT Techniques: A Review,” *Energies*, vol. 16, no. 8, Art. no. 3509, 2023, doi: 10.3390/en16083509.
- [10] K. S. Cardozo Rueda, “Aplicación de redes neuronales artificiales para el pronóstico de precios de café,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 39, pp. 113–117, Feb. 2022, doi: 10.24054/rcta.v1i39.1403.
- [11] N. Hernández Díaz, A. Pardo Garcia, E. N. Sánchez Camperos, and C. J. Vega, “Implementación de un módulo para el control y gestión del almacenamiento de energía en una microrred eléctrica,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 37, pp. 91–98, 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i37.1258.
- [12] ON Semiconductor, “Switch-Mode Power Supply Reference Manual,” ON Semiconductor, Phoenix, AZ, USA, Rep. HBD853/D, Rev. 4, 2014. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com>
- [13] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes, and M. Goda, “History of maximum power point tracking,” in *Green Energy and Technology: Photovoltaic Systems*, A. M. Eltamaly and A. Y. Abdelaziz, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 1–29. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_1.
- [14] E. Muñoz-Palomeque, J. E. Sierra-García, and M. Santos, “Técnicas de control inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia en turbinas eólicas,” *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 21, no. 3, pp. 193–204, 2024, doi: 10.4995/riai.2024.21097.
- [15] A. A. Alzubaidi, L. A. Khaliq, H. S. Hamad, W. K. Al-Azzawi, M. S. Jabbar, and T. A. Shihab, “MPPT implementation and simulation using developed P&O algorithm for photovoltaic system concerning efficiency,” *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 11, no. 5, pp. 2460–2470, Oct. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i5.3949.
- [16] A. M. Eltamaly and H. M. H. Farh, “PV characteristics, performance and modelling,” in *Green Energy and*

Technology: Photovoltaic Systems, A. M. Eltamaly and A. Y. Abdelaziz, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 31–49. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_2.

- [17] S. Ngo, C. S. Chiu, T. D. Ngo, and C. T. Nguyen, “A novel hybrid method based MPP tracking design using boost converter for solar power systems,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 506–517, Mar. 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i1.pp506-517.
- [18] O. Abdalla, H. Rezk, and E. M. Ahmed, “Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance,” *Sol. Energy*, vol. 180, pp. 429–444, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.056.
- [19] H. M. H. Farh and A. M. Eltamaly, “Maximum power extraction from the photovoltaic system under partial shading conditions,” in *Green Energy and Technology: Photovoltaic Systems*, A. M. Eltamaly and A. Y. Abdelaziz, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 107–129. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_4.
- [20] C. A. Ramos Paja, S. I. Serna Garcés, and A. J. Saavedra Montes, “Rectificador elevador/reductor con corrección de factor de potencia basado en un convertidor Cuk y control por modos deslizantes,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 46, pp. 110–122, Jul. 2025, doi: 10.24054/rcta.v2i46.3525.
- [21] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes, and M. Goda, “On the improvements of perturb-and-observe-based MPPT in PV systems,” in *Green Energy and Technology: Photovoltaic Systems*, A. M. Eltamaly and A. Y. Abdelaziz, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 115–143. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_6.
- [22] C. Restrepo, C. González-Castaño, J. Muñoz, A. Chub, and D. Vinnikov, “An MPPT Algorithm for PV Systems Based on a Simplified Photo-Diode Model,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 33189–33202, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061340.
- [23] S. R. Chowdhury and H. Saha, “Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1441–1447, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.011.
- [24] W. H. Tan and J. Mohamad-Saleh, “Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications,” *Energies*, vol. 16, no. 2, Art. no. 850, 2023, doi: 10.3390/en16020850.
- [25] P. Mittal, T. Goel, and P. Gupta, “Evolution of MPPT algorithms in solar arrays,” *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no. 2, pp. 3154–3158, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.045.
- [26] J. Ruiz Thorrens and O. Pinzón Ardila, “Modelización y simulación de un compensador estático síncrono para sistemas de distribución de energía eléctrica,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 43, pp. 57–63, Mar. 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2804.
- [27] H. P. Nguyen, T. T. Nguyen, M. P. Le, and T. N. Tran, “Experimental platforms consisting of software-in-the-loop, hardware-in-the-loop and power-hardware-in-the-loop for developing MPPT charge controller for photovoltaic system,” *Sol. Energy*, vol. 298, Art. no. 113666, May 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113666.
- [28] H. Hernández Palma, D. J. Novoa, and D. Mendoza Cásseres, “Energías renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 41, pp. 123–131, May 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i41.2557.