

MPPT de Panel Solar Fotovoltaico con convertidor Elevador en Matlab/Simulink

MPPT of PV Panel with Boost converter in Matlab/Simulink

Recibido: 22 Septiembre de 2024

Aprobado: 17 Diciembre de 2024

Cómo citar: J. E. Lizarazo Parada, A. Pardo García, L. K. López Galeano, and P. A. Gómez Monsalve, “MPPT de Panel Solar Fotovoltaico con convertidor Elevador en Matlab/Simulink”, Mundo Fesc, vol. 15, no. 32, pp. 113–131, May 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1962.

Jhon Edward Lizarazo Parada^{1*}



Magister. Ingeniería de Mantenimiento,
jlizarazop@sena.edu.co ,
Orcid: 0000-0001-6079-8518,
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Cúcuta, Colombia.

Aldo Pardo García²



PhD. en Control Drives of Motors,
apardo13@unipamplona.edu.co ,
Orcid: 0000-0003-2040-9420,
Universidad de pamplona, Pamplona, Colombia.

Luz Karime López Galeano³



Magister en Neuropsicología y Educación,
luzkalopez43@hotmail.com,
Orcid: 0009-0008-7884-4752,
Universidad de pamplona, Pamplona, Colombia.

Pablo Andrés Gómez Monsalve⁴



Magíster En Controles Industriales,
pablo.gomez@unipamplona.edu.co,
Orcid: 0000-0002-9507-1690,
Universidad de pamplona, Pamplona, Colombia.

*Autor para correspondencia:

jlizarazop@sena.edu.co



MPPT de Panel Solar Fotovoltaico con convertidor Elevador en Matlab/Simulink

Resumen

Las energías renovables se clasifican según los recursos aprovechables en hidroeléctrica, eólica, solar, hidrógeno, biomasa, geotérmica y oceánica, es fundamental la aplicación de electrónica de potencia en los procesos de conversión para aumentar la eficiencia en la transformación de energía, por lo tanto, la máxima transferencia de potencia se ve claramente 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 implementa 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 aplicada con carga programable a resistencia constante como planta o proceso de conversión de energía para hacer el seguimiento al máximo punto de potencia aplicando algoritmos con un dispositivo de control raspberry pi 5. La metodología vincula tres etapas, 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. En la tercera etapa se implementó un sistema que permite la aplicación de algoritmos de seguimiento al máximo punto de potencia MPPT con un sistema de adquisición de datos de irradiancia, temperatura, corriente y voltaje para la retroalimentación necesaria. La conversión de energía requiere frecuencias de conmutación elevadas y actualización en el algoritmo más lentas de acuerdo a los cambios de irradiancia en Norte de Santander, para ello, es viable el uso de sistemas embebidos junto a los transistores MOSFET's de alta velocidad que permite el aumento de eficiencia en la conversión y el seguimiento al máximo punto de potencia MPPT por sus siglas en inglés.

Palabras clave: Aplicaciones de electrónica de potencia, Control de energía de recurso renovable, Diseño de sistemas de control, Modelado y simulación de sistemas de potencia, Seguimiento al Máximo Punto de Potencia MPPT, Sistemas de potencia y energía.

MPPT of PV Panel with Boost converter in Matlab/Simulink

Abstract

Renewable energies are classified according to exploitable resources into hydroelectric, wind, solar, hydrogen, biomass, geothermal, and oceanic. The application of power electronics in conversion processes is essential to increase energy transformation efficiency. Therefore, maximum power transfer is clearly 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. In this research, a step-up converter is implemented as a power interface between the 340W Amerisolar polycrystalline photovoltaic panel generation system and a 100Ω resistive load applied with a programmable constant resistance load as an energy conversion plant or process to track the maximum power point by applying algorithms with a Raspberry Pi 5 control device. The methodology links three stages. The first was the characterisation of the photovoltaic solar panel system, the second was 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. In the third stage, a system was implemented that allows the application of maximum power point tracking (MPPT) algorithms with a data acquisition system for irradiance, temperature, current, and voltage for the necessary feedback. Energy conversion requires high switching frequencies and slower algorithm updates according to changes in irradiance in Norte de Santander, to this end, it is feasible to use embedded systems together with high-speed MOSFETs, which allow for increased conversion efficiency and maximum power point tracking (MPPT).

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

Introducción

Los sistemas de generación de energías limpias presentan un diagrama de bloques similar al mostrado en la (Figura 1) como caso de estudio mencionado en [1]. Esta investigación busca la mejora del rendimiento de un sistema solar fotovoltaico, a partir del MPPT para obtener una conversión eficiente de la energía dentro del sistema; aplicando técnicas de control electrónico, relacionando la irradiancia y la temperatura como variable que afecta el sistema desde su modelo matemático. En la (Figura 6) se observa una representación general del sistema, adicionando el MPPT al diagrama de bloque de una fuente de energía convencional.

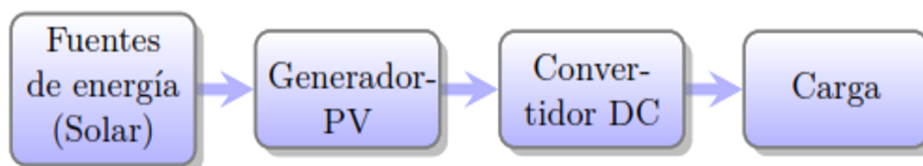


Fig. 1. Diagrama de bloque fuente de energía. Fuente: [2].

En [3] se muestra la clasificación de métodos de corrección de la curva I-V en dispositivos solares para diferentes condiciones de irradiancia y temperatura que cumplen con la norma IEC 60891. También, en [4] se mencionan tres modelos para una celda solar con sus ventajas y desventajas. Para efectos prácticos la ecuación 1 muestra el análisis de cada celda solar del panel, se toma el modelo de dos diodos exponenciales según [5], [6] y [7] que usan toolbox Simscape de Matlab/Simulink.

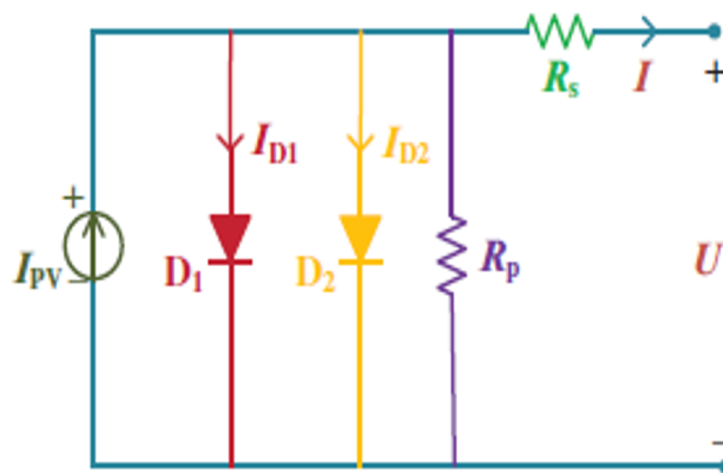


Fig 2: Double-diodo model. Fuente: [4].

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

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

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

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

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

Se realizó una simulación usando toolbox simscape de MATLAB/Simulink 2024 (Figura 3), en la función rampa se agrega una carga variable para obtener las mediciones de I , V y P en un script que ejecuta un bucle con intervalo de 100 W/m^2 desde 100 a 1000 W/m^2 . En las figuras 4 y 5 se observa la respuesta P vs V y V vs I respectivamente, de un arreglo de dos paneles solares Amerisolar de 340 W conectados en paralelo.

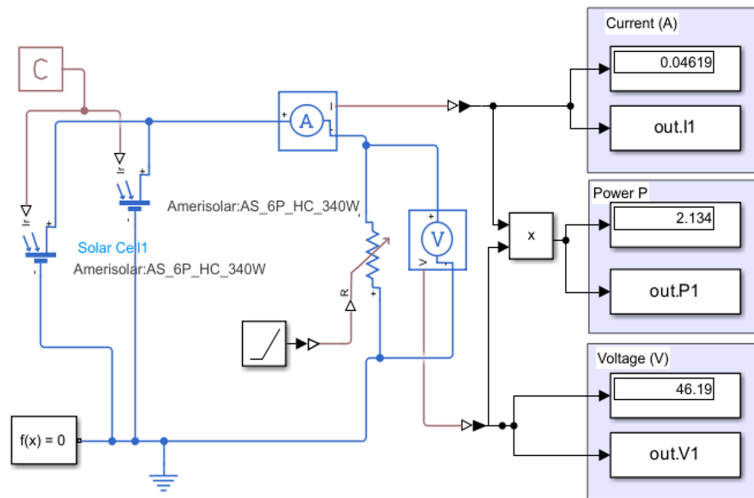


Fig 3: Diagrama de bloques simulink, arreglo de dos paneles solares Amerisolar de 340W.

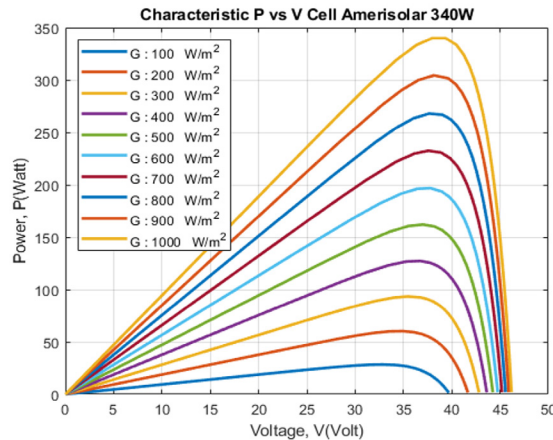


Fig 4: Curva P vs V MATLAB/Simulink

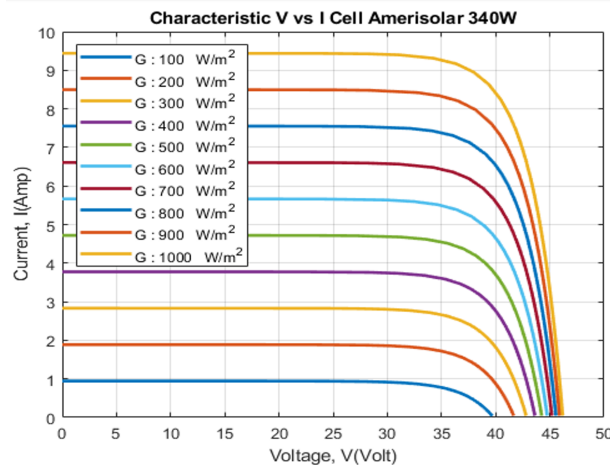


Figura 5: Curva V vs I MATLAB/Simulink.

La fuente de energía solar junto al generador fotovoltaico se modela de acuerdo a principios físicos que dependen de la irradiancia, temperatura y la carga eléctrica como lo muestra la ecuación 4, esto demuestra la equivalencia del análisis de los dos primeros bloques mencionados en la (Figura 1).

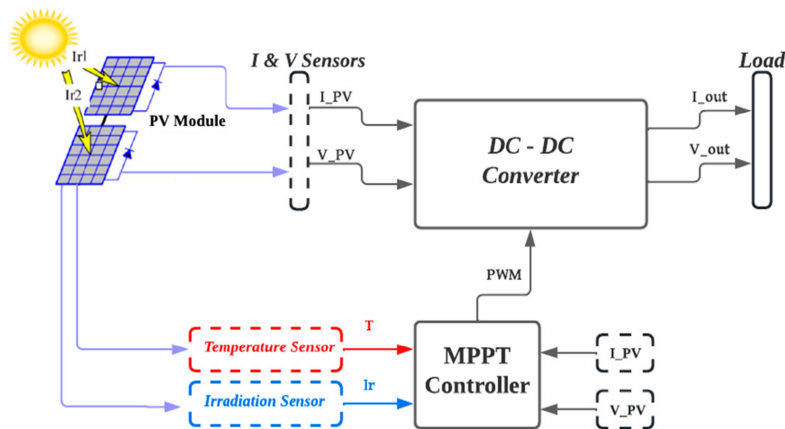


Fig 6: Diagrama de bloque general de sistema PV. Fuente: [9].

Materiales y Métodos

(Convertidor Elevador DC-DC).

Los convertidores de potencia usados en sistemas solares fotovoltaicos según [10] son Buck, Boost, Forward, Flyback, Push-pull, Half-Bridge, FullBridge, LLC Resonante entre otros. En este estudio se usa un convertidor tipo Boost debido a que el panel solar fotovoltaico entrega 46.1Vmp a la salida y la carga agregada será resistiva a un voltaje superior. En la (Figura 7) se muestra el circuito esquemático del convertidor a estudiar, cabe resaltar que se puede utilizar un IGBT o un MOSFET para la conmutación [11]. En

esta topología se presentan dos modos de conducción: continua y discontinua; en este caso se estima la conducción continua debido a que no llega a cero durante un ciclo completo. El diodo D1 asegura que la corriente fluya en la misma dirección todo el tiempo como se muestra en las ecuaciones 7 y 8. Para efecto de diseño se tomó en cuenta las indicaciones de [12].

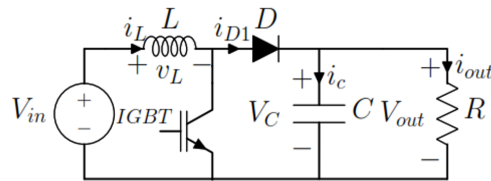


Figura 7: Esquemático convertid

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

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

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

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

En la (Figura 9) se muestra la implementación de la simulación en Matlab para el convertidor DC-DC como tercer paso en el desarrollo del control del sistema solar fotovoltaico, teniendo en cuenta el diagrama de bloques mostrado en (Figura 1). Para completar el diseño propuesto se investigó los diferentes algoritmos de seguimiento al máximo punto de potencia MPPT con técnicas off-line y online; las cuales a su vez se complementan con técnicas de inteligencia artificial según [13].

El seguimiento al máximo punto de potencia tanto en sistemas PV como eólicos [14] es un tema de relevancia, puesto que el recurso renovable presenta variaciones que limitan la generación constante según el diagrama observado en la Figura 6. En [9] y [13] se clasifican las técnicas de MPPT de acuerdo a diferencias en implementación. Para [9] existen cuatro grupos principales que son: métodos clásicos, métodos de optimización, métodos avanzados y métodos híbridos; sin embargo, para [13] la clasificación es por métodos offline y online, cada uno con su arquitectura diferente. Se tomaron las técnicas online de P&O y P&O modificado, según el postulado hecho por [15] para un convertidor Buck, con la variación en este estudio para la simulación con un convertidor boost (Figura 9).

El algoritmo MPPT de perturbación y observación (P&O) clásico se presenta en la (Figura 8). Este es uno de los más usados en diferentes equipos comerciales por su facilidad de implementación y buen rendimiento bajo condiciones de radiación uniforme, con algunas desventajas en oscilaciones alrededor del estado estable debido a variaciones rápidas por condiciones ambientales [16]. El primer paso del algoritmo es medir el voltaje y corriente del panel solar para calcular la potencia. En este instante de tiempo se evalúa la condición, si la diferencia de potencia ΔP es igual a cero, no se ejecuta ninguna acción

y salta a retornar hasta la próxima muestra, pero, si es diferente de cero, se indaga si es mayor que cero para evaluar los cambios de voltaje en la salida del panel. Luego, si el cambio de voltaje es positivo, se debe incrementar el ciclo útil de la señal PWM que controla el IGBT o MOSFET utilizado en el conmutador del convertidor boost, pero, si el cambio de voltaje es negativo se debe decrementar el ciclo útil de dicha señal.

Si por el contrario, el cambio de potencia es menor que cero, se debe indagar el cambio de voltaje con las mismas condiciones de variación para el ciclo útil de la señal PWM, esto lo hace conveniente en la implementación en sistemas embebidos por su facilidad de configuración. La continuidad del algoritmo depende del intervalo de muestreo; luego de pasar por el término return del diagrama de flujo de la (Figura 8), donde se inicia con el proceso Init(k) que representa el inicio de la k-ésima muestra de la potencia del sistema solar fotovoltaico. El algoritmo se implementa en el circuito de la Figura 9 con el bloque llamado "PyO" que está conectado con las entradas del voltaje Vpv y corriente Ipv para calcular la potencia y hallar el ciclo útil de la señal PWM que debe controlar el convertidor de potencia boost.

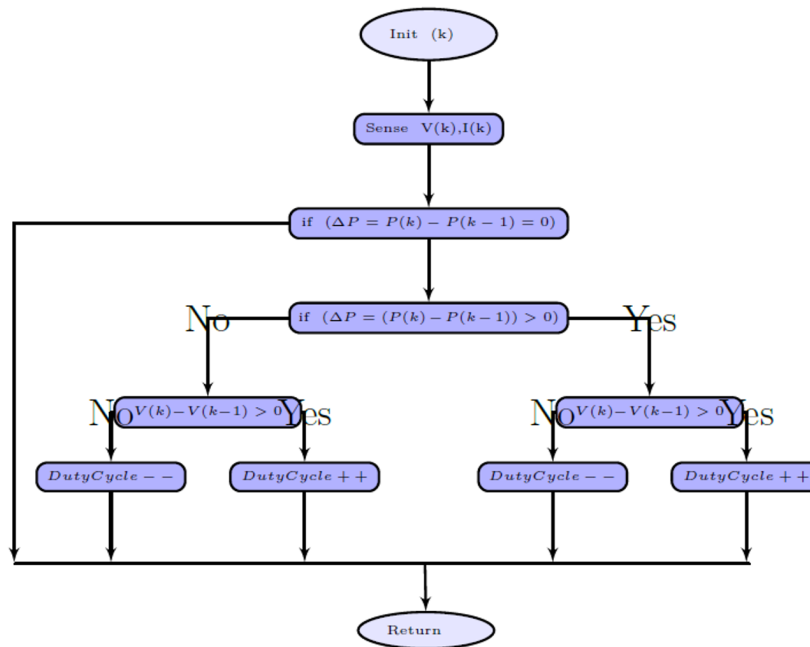


Fig 8: Algoritmo P&O Clásico.

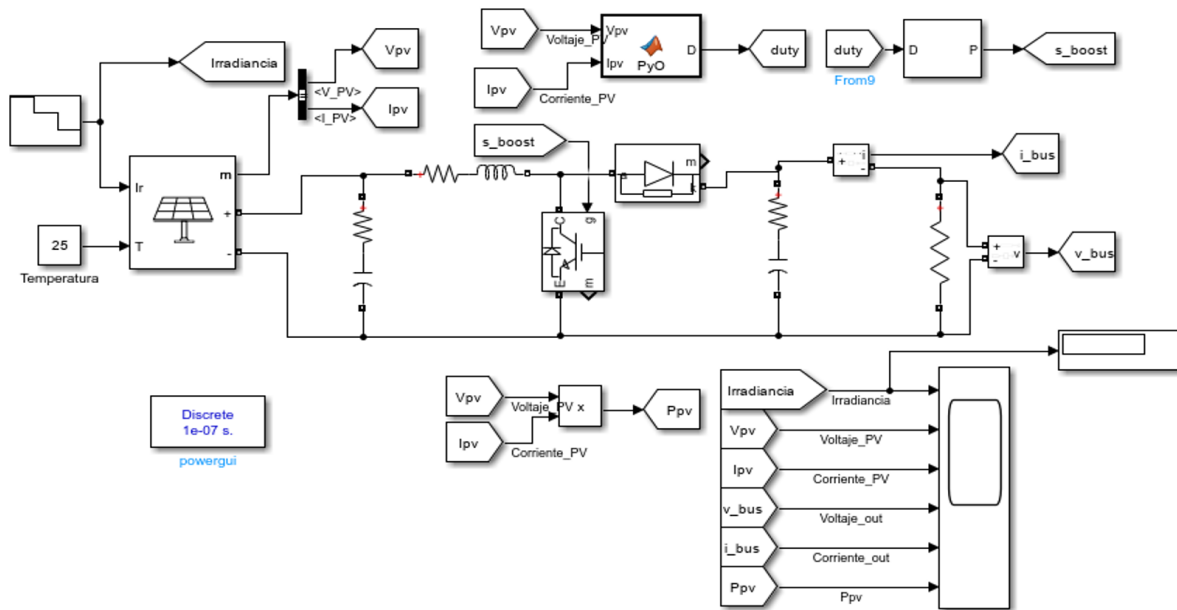


Figura 9: Diagrama de Bloques Sistema PV en Simscape Matlab/Simulink.

Resultados y Discusión

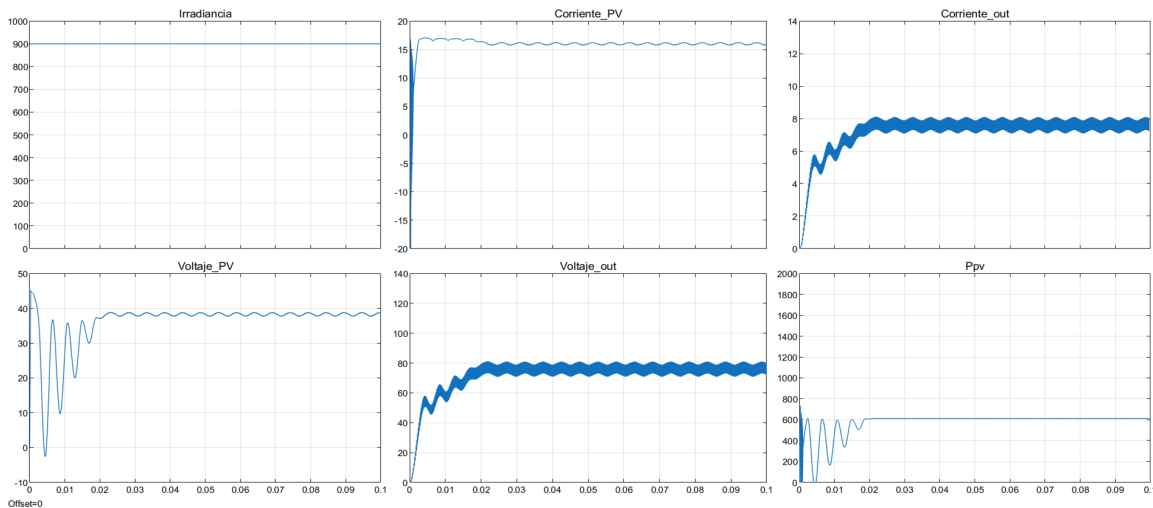


Figura 10: Voltajes de entrada y salida del Convertidor

En la Figura 10 en la parte superior se identifican los datos de Irradiancia 900W/m^2 , la corriente del panel solar con un valor de 17A y la corriente de la salida del convertidor DC-DC, en la parte inferior se muestra el voltaje del panel solar alrededor de 38V como lo indica la ficha técnica del mismo, el voltaje de salida alrededor de 80V y, por último, la potencia total del sistema PV alrededor de 610W , debido a que es un arreglo en paralelo de dos paneles solares de 340W , el cual estaría trabajando al 90% como se muestra en la Figura 5 y la tabla I. Los resultados son satisfactorios para el punto de operación planteado en el primer escenario con irradiación constante y temperatura constante [17].

Tabla I. Componentes de simulación e implementación.

Componente	Descripción	Valor
PV	2X Amerisolar	340W
C1	Capacitor de entrada	470uF
L1	Inductor de entrada	5mH
D1	Diodo	schockly
C2	Capacitor de salida	100uF
MOSFET	MOSFET/diode	Rs, 1mΩ
Funtion	MATLAB Funtion	P&O

Se comprobó el seguimiento ante variaciones de irradiancia cada 200W/m² para comparar los valores de la potencia en la simulación y la eficiencia del seguimiento en el algoritmo implementado [18] y [19]. Uno de los inconvenientes presentes en el diseño de controladores para el seguimiento de MPP es la presencia de varios puntos globales, por ello, en los últimos años se ha profundizado en estrategias inteligentes para tener este seguimiento [20]. Se debe tener en cuenta el intervalo de incremento-decremento de la señal PWM para no saltar a inestabilidad del sistema por periodo de muestreo, luego de hacer un barrido inicial, se tomó un incremento de 1% para obtener la respuesta observada en el comportamiento de ascenso Figura 15 y descenso Figura 16, cambiando la irradiancia según la gráfica superior, con una respuesta del seguimiento del voltaje del panel en la gráfica inferior.

Para la implementación se selecciona el sensor de corriente de efecto Hall TMC1107 de marca Texas Instruments, el cual se caracterizó con una fuente DC de 24V a 6A y una carga programable ATORCH de 600W a 200V confrontada con la usada en [26] obteniendo una respuesta lineal ante variaciones en la corriente del circuito eléctrico. En la figura 11 se puede visualizar la respuesta del sensor ante variaciones controladas en una carga de corriente constante.

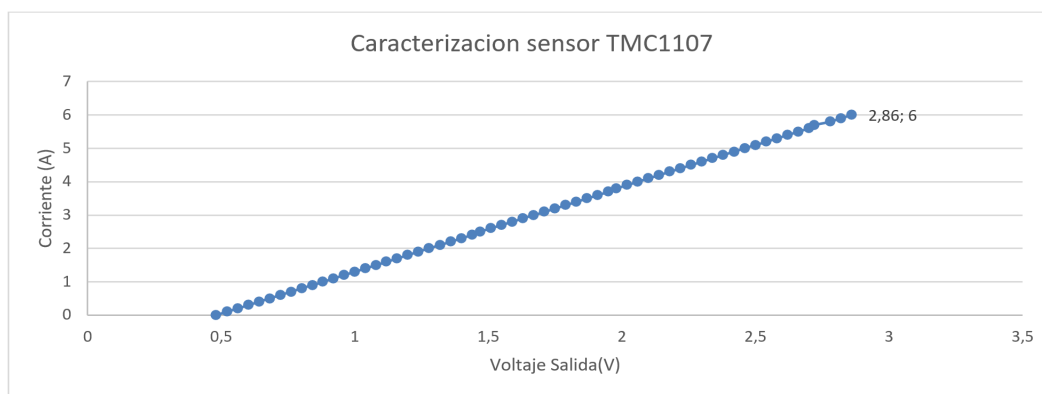


Figura 11. Caracterización Sensor de Corriente.

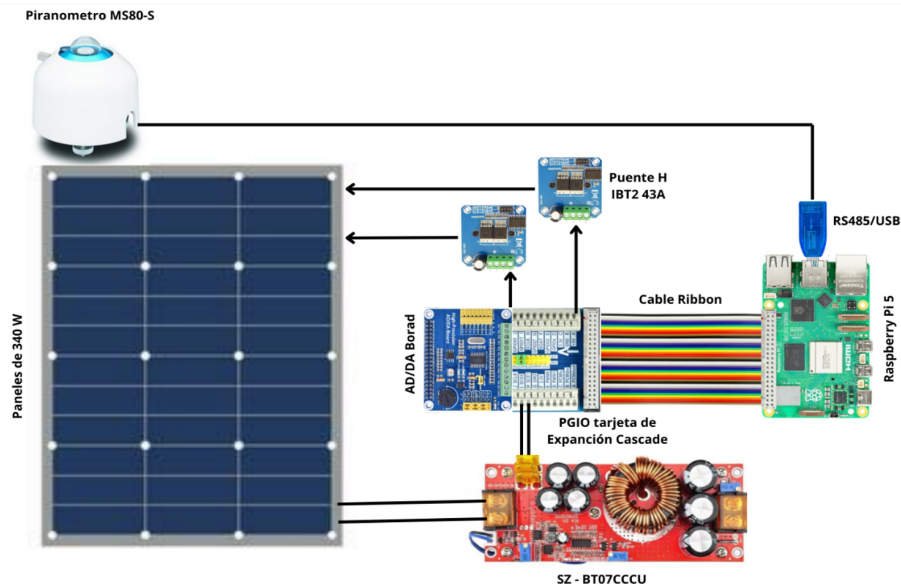


Figura 12. Arquitectura del sistema implementado.

La etapa de control se implementa con una Raspberry Pi 5 programada en lenguaje Python v3.12, un sensor de irradiancia y temperatura MS-80S marca EKO conexión serie vía USB, un sistema de adquisición de datos analógicos con tarjeta de expansión de alta precisión ADS1256 para las variables de corriente y voltaje del panel en la retroalimentación al algoritmo P&O diferente al observado en [15] debido a los sensores usados para la medición. En la figura 12 se muestra la arquitectura del sistema solar fotovoltaico, junto al hardware del experimento a realizar. Cabe resaltar, que esta implementación precisó un diseño de software de adquisición que permite relacionar el sistema embebido para la aplicación, los niveles de tensión del convertidor análogo digital, singled ended +5V con una restricción del sensor de voltaje aislado con divisor de tensión máximo 2.15V, según la referencia AMC0311. Los datos se tomaron con una frecuencia de 10Hz, lo cual, es razonable para la implementación de algoritmos P&O partiendo de la premisa, que la frecuencia de conmutación del MOSFET es mucho mayor que la frecuencia de medición de corriente y voltaje en la toma de decisiones en el algoritmo. Comparando con [27] caso de estudio de simulación para las P&O y tamaño adaptativo variable, se establece la frecuencia de muestreo por condiciones limitantes del hardware Raspberry Pi 5 al poseer sistema operativo.

En la figura 13 se visualiza el circuito implementado para el convertidor boost diseñado según las especificaciones de la tabla I. El MOSFET utilizado tiene referencia Vishay IRFP264 con una corriente máxima de 38A, un diodo FFSH2065BDN que permite la conmutación rápida del convertidor DC-DC, a una frecuencia de 100Khz como se observa en a figura 14 según los cálculos realizados con los componentes del convertidor.

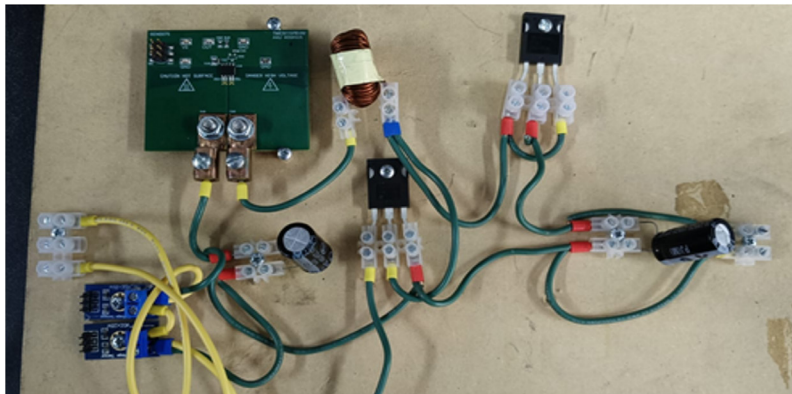


Figura 13. Implementación del convertidor BOOST.

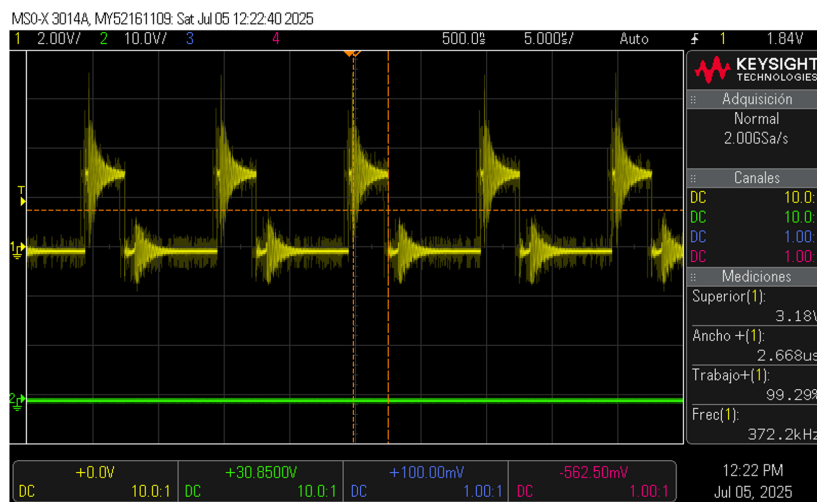


Figura 14: Señal de salida de conmutación MOSFET 100 khz.

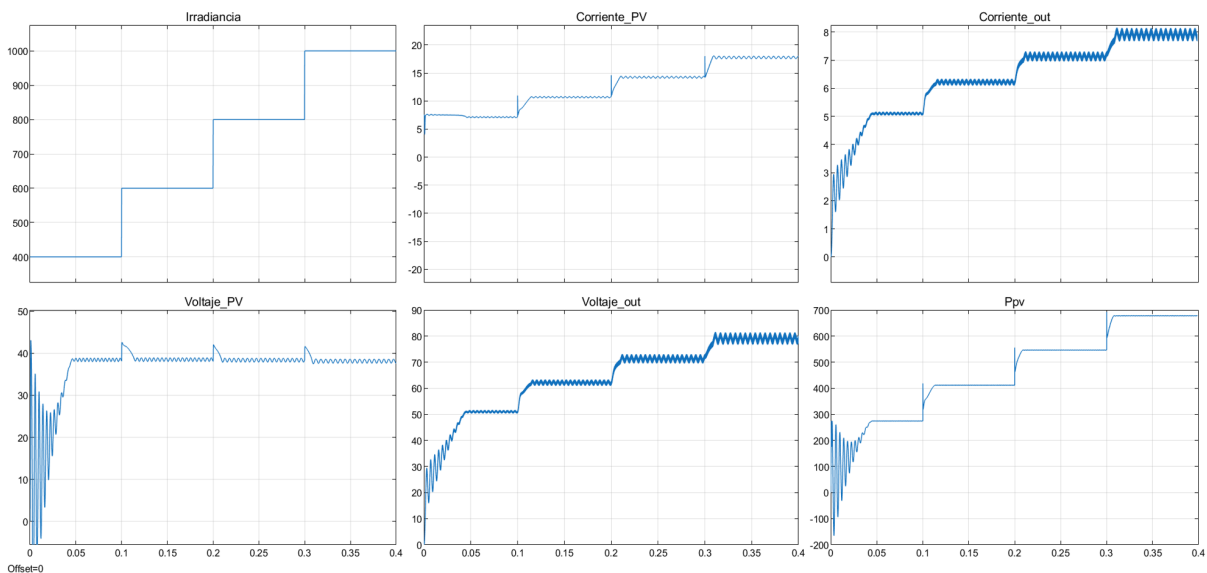


Figura 15: Salida ante ascenso de G P&O clásico.

La eficiencia en estado estable η , se define como la relación entre la potencia captada con la potencia máxima de la hoja de datos a irradiancia y temperatura estable, en la figura 15 se denota la potencia captada (P_{pv}) del arreglo, de igual forma, la eficiencia dinámica μ es la relación entre la potencia captada por el seguidor y la potencia máxima en condiciones no uniformes de irradiancia y temperatura como se observa en [21]. Según [26] la eficiencia total es la multiplicación de la eficiencia del módulo solar y la eficiencia del seguidor del MPPT en conjunto al convertidor DC-DC.

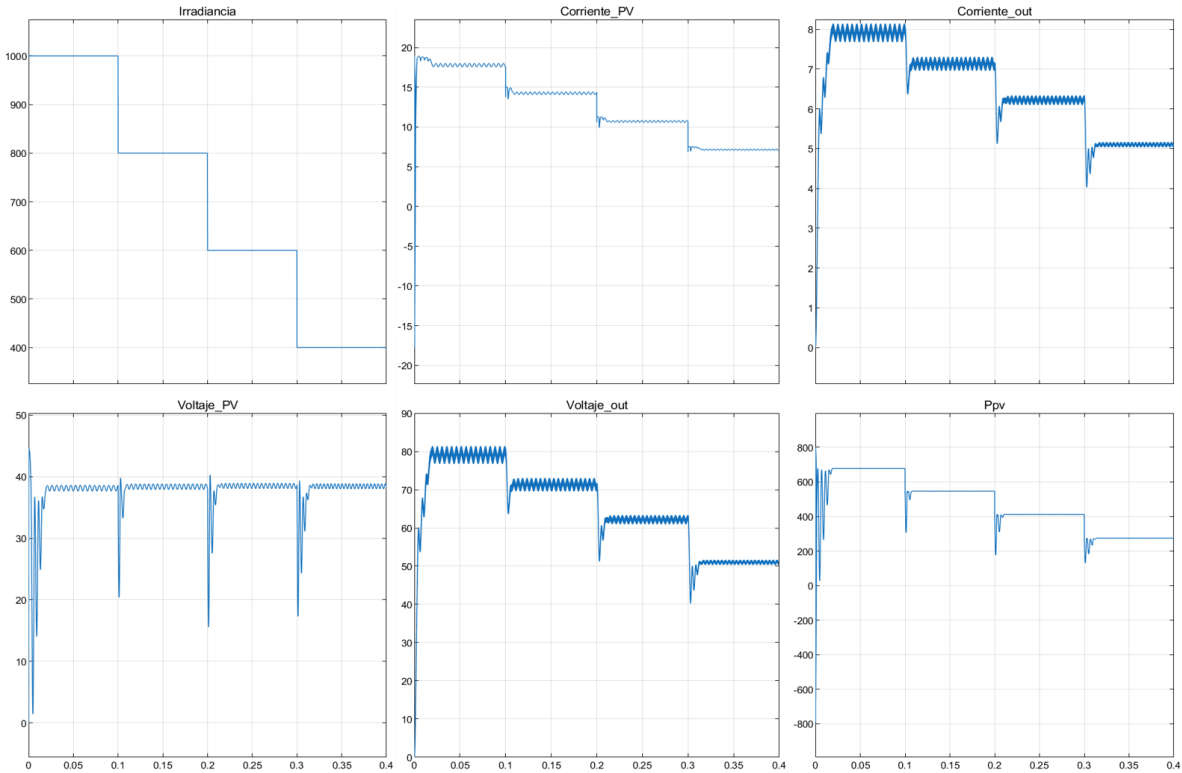


Figura 16: Salida ante descenso de G P&O clásico.

Cabe resaltar, que esta medición se realiza para evaluar el comportamiento del sistema ante variaciones en la irradiancia, por lo tanto, la estabilidad del sistema depende en gran medida de la selección del intervalo en la señal PWM del 0 a 80% con el diseño de los parámetros del convertidor. El método P&O de paso variable agrega un parámetro adicional de conteo, para establecer si los cambios son de voltaje de operación, o de irradiancia seleccionando el modo de operación contrastando con [15], el cual hace variaciones de irradiancia con el algoritmo clásico de P&O.

Las técnicas específicas se pueden encontrar en [21] junto a otros algoritmos que implementan técnicas heurísticas como el algoritmo de optimización de partículas adaptativo observado en [22], de igual forma, en [23] se hace una clasificación de las técnicas empleadas en los últimos años como clásicas, inteligentes e híbridas, para

optimización; las cuales vinculan diferencias en rendimiento y años de publicación. Por otro lado, en [24] se hace un análisis comparativo entre técnicas de P&O y redes neuronales artificiales simuladas en MATLAB y por último, en [25] se analizan 14 técnicas para el seguimiento al máximo punto de potencia MPPT como revisión de implementación con tarjetas embebidas de bajo costo. En [28] 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, en comparación al caso de la presente investigación.

En la figura 17 y 18 se observa la respuesta del seguimiento con paso modificado ante incrementos y decrementos de irradiancia, el cual agrega más tiempo de procesamiento porque acumula las lecturas de dos intervalos de muestreo para hacer una detección de los cambios de potencia, si es por cambio en el voltaje de operación o de irradiancia con la selección del contador; en esta configuración se hace el mismo análisis con los resultados mostrados en la figura 15. Se observa que la velocidad de seguimiento se ve afectada por el procesamiento de los intervalos y decae significativamente en comparación a la figura 15 con el sacrificio de convergencia hacia el punto global de máxima potencia.

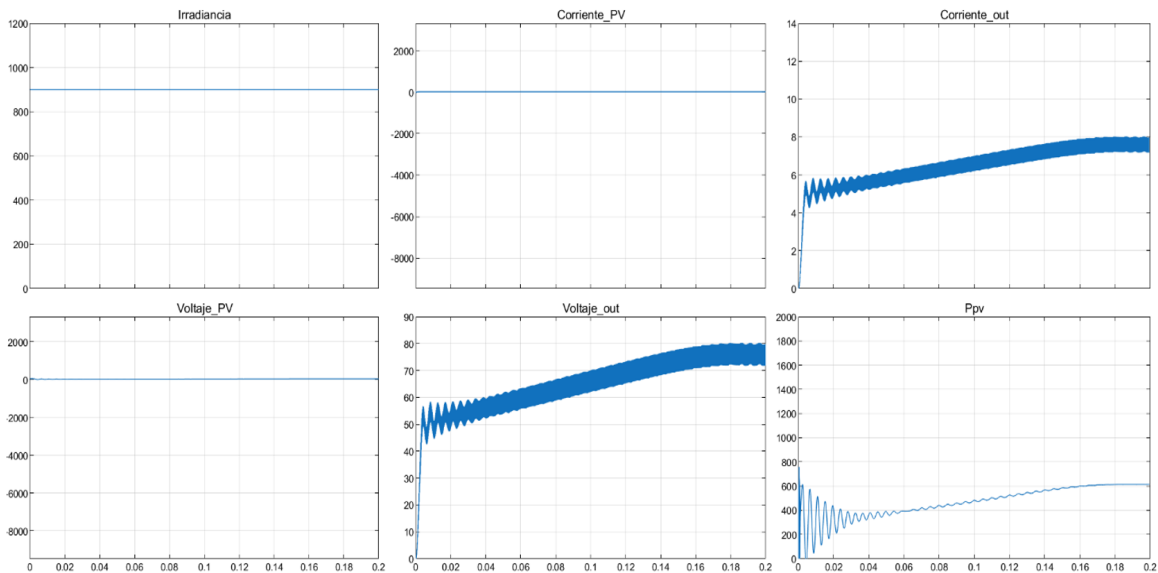


Figura 17: Salida P&O paso variable.

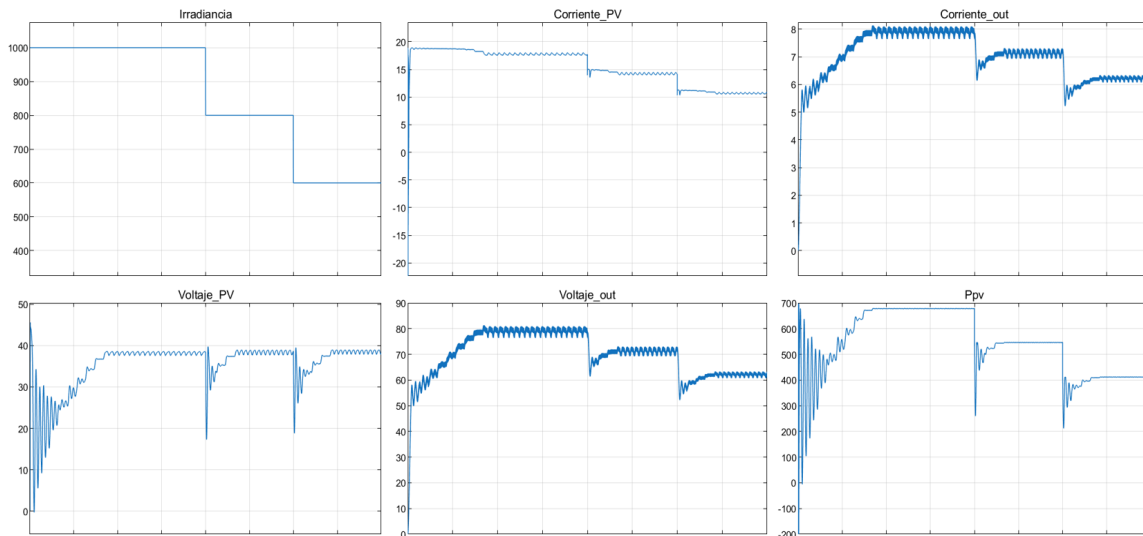


Figura 18: Salida P&O paso variable.

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 MPPT presenta diversas alternativas de solución para la implementación física de los algoritmos que cumplen con el propósito de diseño. En el presente artículo se describen algunas referencias actuales que clasifican las técnicas clásicas en línea o fuera de línea, quedando relegadas las últimas por la flexibilidad de los algoritmos en línea. Se exploró de manera significativa las técnicas metaheurísticas que abren un conjunto de posibilidades adicionales con el desarrollo e implementación de inteligencia artificial sobre sistemas embebidos o microcomputadoras, por mencionar algunas técnicas simples e híbridas, lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos, ANFIS, P&O-AG.

La investigación implementó los algoritmos planteados de P&O observados en la revisión del estado del arte, sin dejar atrás las técnicas inteligentes híbridas, que permiten evitar errores de aproximación o de pérdida del punto global de máxima potencia GMPP. Los diferentes autores abordan el problema de una forma práctica y se logra la profundización al momento de proponer la simulación detallada del sistema en un software comercial que permite solucionarlo, evitando desviaciones en los resultados, producto del procesamiento de ecuaciones y soluciones complejas. Este artículo deja abierta la posibilidad para comparar la solución con otras técnicas de control avanzado en trabajos futuros.

La toolbox simscape de Matlab permite simulación para caracterizar eficientemente los

arreglos de sistemas solares fotovoltaicos, con marcas comerciales para el análisis de los algoritmos a implementar, realizando una mejora significativa en productividad dentro del diseño de controladores. De la misma manera, presenta una alternativa para implementar los controladores con sistemas embebidos o con metodología HIL aprovechando los módulos add-ons de las diferentes marcas fabricantes de microcontroladores, FPGA y PLC comerciales.

El tamaño de paso en la eficiencia dinámica del sistema simulado aplicando el algoritmo P&O y P&O modificado, permite mejorar la convergencia hacia el punto global de máxima potencia, sacrificando la velocidad de seguimiento, debido a que en algunas circunstancias está comprobado que el algoritmo de paso fijo no permite la detección de cambios en sombreados parciales para su rápida respuesta, afectando la eficiencia general del sistema fotovoltaico.

Referencias

- [1] F. A. Lara V., M. Padilla Ortiz y C. Vargas 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," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, n° 43, págs. 43-2024, 2024. doi: <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2807> . url: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/2807/6478> .
- [2] M. H. Rashid, "Electronica de Potencia", 4 Ed. USA, 2015, vol. 1, isbn: 978-607-32-3328-6.
- [3] C. Pavithra, S. Vidhyareni, M. Vijayadharshini, S. K. Akshaya y N. Varsha, "Comparison of Solar P&O and FLC-based MPPT Controllers & Analysis under Dynamic Conditions," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 11, págs. 1-6, 2024, issn: 2032944X. <https://doi.org/10.4108/ew.4988> , url: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/4988>
- [4] B. Yang, R. Xie y Z. Guo, "Maximum Power Point Tracking Technology for PV Systems: Current Status and Perspectives," *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, vol. 121, n.o 8, págs. 2009-2022, 2024, issn: 15460118. doi: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.049423>. url: <https://www.techscience.com/energy/v121n8/57341>
- [5] E. J. Barbosa, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, R. C. Neto, E. A. O. Barbosa y F. Bradaschia, "Hybrid GMPPT Technique for Photovoltaic Series Based on Fractional Characteristic Curve," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 14, n.o 1, págs. 170-177, 2024. doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3323774, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10288588>.
- [6] S. Senthilkumar, V. Mohan, S. Mangaiyarkarasi y M. Karthikeyan, "Analysis of

Single-Diode PV Model and Optimized MPPT Model for Different Environmental Conditions", *International Transactions on Electrical Energy Systems-2015-Tripathi*, 2022. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4980843>, url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/4980843>.

- [7] Y. García, F. García y J. A. Martín, "Mathematical model for the determination of volt-ampere characteristics in solar photocells," *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, 2022 doi: 10.24054/rcta.v2i40.2358 .
- [8] N. Priyadarshi, P. Sanjeevikumar, M. S. Bhaskar, F. Azam y S. M. Muyeen, "An improved standalone photovoltaic system with hybrid dual integral sliding mode and model predictive control for MPPT," *IET Renewable Power Generation*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12665>. url: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/rpg2.12665> .
- [9] H. Abidi y L. Sidhom, "Photovoltaic MPPT Techniques," 2023, <https://doi.org/10.3390/en16083509> .
- [10] M. Abouelela, "Power electronics for practical implementation of PV MPPT," 2020, págs. 65-105, isbn: 9783030055783. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_3 . url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3>.
- [11] N. Hernandez Diaz, A. Pardo Garcia, E. N. Sanchez Camperos y C. J. Vega, "Implementación De Un Módulo Para El Control Y Gestión Del Almacenamiento De Energía En Una Microrred Eléctrica," *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, vol. 1, n°37, págs. 91-98, 2023, issn: 1692-7257. doi: <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i37.1258> .
- [12] R. Manual, "Switch Mode Power Supply Reference Manual," *On Semiconductor*, vol. Rev4, pág. 73, 2014. URL: <https://www.onsemi.com/pub/collateral/smprsm-d.pdf>
- [13] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes y M. Goda, "History of maximum power point tracking," *Green Energy and Technology*, págs. 1-29, 2020, issn:18653537. doi:10.1007/978-3-030-05578-3_1. url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3> .
- [14] E. Muñoz-Palomeque, J. E. Sierra-García y M. Santos, "Técnicas de control inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia en turbinas eólicas," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 21, n°3, págs. 193-204, 2024, issn: 1697-7912. doi: <https://doi.org/10.4995/riai.2024.21097> , url: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/21097> .
- [15] A. A. Alzubaidi, L. A. Khaliq, H. S. Hamad, W. K. Al-Azzawi, M. S. Jabbar y T. A.

- Shihab, "MPPT implementation and simulation using developed P&O algorithm for photovoltaic system concerning efficiency," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, n°5, págs. 2460-2470, 2022, issn: 23029285. doi: <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.3949>, url: <https://beei.org/index.php/EEI/article/view/3949> .
- [16] A. M. Eltamaly y H. M. "Farh, PV characteristics, performance and modelling." 2020, págs. 31-63, isbn:9783030055783. doi:10.1007/978-3-030-05578-3_2. url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3>.
- [17] S. Ngo, C. S. Chiu, T. D. Ngo y C. T. Nguyen, "A novel hybrid method based MPP tracking design using boost converter for solar power systems," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 15, n°1, págs. 506-517, 2024, issn:20888694. doi: <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp506-517>, url: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/22842> .
- [18] O. Abdalla, H. Rezk y E. M. Ahmed, "Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance," *Solar Energy*, vol. 180, August 2018, págs. 429-444, 2019, issn: 0038092X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.056> , url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19300684?via%3Dihub>
- [19] H. M. Farh y A. M. Eltamaly, "Maximum power extraction from the photovoltaic system under partial shading conditions," *Green Energy and Technology*, págs. 107-129, 2020, issn: 18653537. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05578-3_4 url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3>.
- [20] D. M. Atia, "Global maximum power point tracking based computational intelligence techniques." 2020, págs. 131-163, isbn: 9783030055783. doi: 10.1007/978-3-030-55783_5. url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3>.
- [21] M. Abdel-Salam, M. T. EL-Mohandes y M. Goda, "On the improvements of perturb-and-observe-based MPPT in PV systems." 2020, págs. 165-198, isbn:9783030055783. doi:10.1007/978-3-030-05578-3_6. url: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05578-3>.
- [22] S. Roy Chowdhury y H. Saha, "Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, n° 9, págs. 1441-1447, 2010, issn: 09270248. doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.011. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.011> .
- [23] W. H. Tan y 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, n° 2, 2023, issn: 19961073. doi: <https://doi.org/10.3390/en16020850>. url: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/850>

- [24] P. Mittal, T. Goel y P. Gupta, "Evolution of MPPT algorithms in solar arrays," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, n° 2, págs. 3154-3158, 2020, issn:22147853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.045> url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532036733X?via%3Dihub> .
- [25] S. Motahhir, A. El Hammoumi y A. El Ghzizal, "The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm," *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, pág. 118 983, 2020,issn:09596526.doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118983> url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619338533?via%3Dihub> .
- [26] C. Restrepo, C. Gonzalez-Castaño, J. Muñoz, A. Chub, E. Vidal-Idiarte y R. Giral, "An MPPT Algorithm for PV Systems Based on a Simplified Photo-Diode Model" *IEEE Xplore Access*, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061340 ,vol. 9,2021, issn: 2169-3536, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061340 url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9360748> .
- [27] A. Zouhri, "Advanced perturb and observe algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic systems with adaptive step size", *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol 18 N° 3, 2024 doi: 10.14313/JAMRIS/3-2024/22 url: <https://www.jamris.org/index.php/JAMRIS/article/view/935>.
- [28]. Nguyen. H. P, Nguyen, T. T, Le. M. P, Tran T. N, "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", *Solar Energy*, vol 298, Septiembre 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113666 url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25004293?via%3Dihub> .