

Comparación entre el algoritmo P&O y una RNA para la alcanzar el punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico ante la presencia de sombras parciales.

Comparison between P&O algorithm and an ANN to reach the maximum power point in partially shaded PV.

DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: , Fecha de Aceptación:.

Nombres Apellido1-Apellido2  <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>
Universidad, Organización ó Empresa a la que se encuentra afiliado. Ciudad, (País)
ejemplo@email.com

Nombres Apellido1-Apellido2  <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>
Universidad, Organización ó Empresa a la que se encuentra afiliado. Ciudad, (País)
ejemplo@email.com

Resumen

Introducción: Varios estudios relacionados con la búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas solares fotovoltaicos han mostrado que las sombras sobre los módulos, debidas a nubosidades principalmente, afectan en gran medida la producción de energía. Esto debido a la aparición de puntos máximos locales y un punto máximo global de potencia.

Objetivo: En este artículo se desarrolla un estudio del algoritmo P&O (tradicional y modificado), al igual que la implementación de redes neuronales artificiales (RNA) para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en un arreglo fotovoltaico ante la presencia de sombras parciales. Se propone determinar que método, P&O (tradicional y modificado) y RNA, tiene un mejor desempeño a la hora de alcanzar el punto de máxima potencia con una convergencia más rápida.

Metodología: La investigación es de tipo cuantitativo, partiendo del diseño, pruebas y revisión de datos. Se hizo uso de un convertidor elevador Boost, el cual permite elevar el voltaje de entrada a un voltaje de salida deseado manteniendo la potencia de entrada igual a la de carga. Modificando el ciclo de trabajo del convertidor es posible realizar la búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT).

Se realizan modificaciones a los parámetros del algoritmo P&O para poder evaluar el tiempo de estabilización o convergencia hacia el máximo punto de potencia y poder reducir las oscilaciones.

Además, la red neuronal se implementa esperando que la convergencia y la estabilidad de la señal sea mejor frente a algoritmos clásicos propuestos hasta el día de hoy.

Resultados: Los resultados muestran como el ciclo de trabajo influye en el tiempo de convergencia, permitiendo reducir las oscilaciones y el tiempo de convergencia, con estos criterios se encontró que la red neuronal logra la reducción del rizado de voltaje a la salida del arreglo fotovoltaico y alcanza un tiempo de estabilización de aproximadamente 40 ms.

Conclusiones: Se realizó la implementación en simulación de un arreglo fotovoltaico con presencia de sombras parciales sobre el cual se probaron los algoritmos P&O (tradicional y modificado) y RNA. Los resultados permiten concluir que el método propuesto con RNA mejora la respuesta del voltaje de salida del arreglo fotovoltaico permitiendo una reducción del rizado y mejorando el tiempo de respuesta, esto se traduce en un mejor aprovechamiento de la energía generada por los módulos.

Palabras clave

P&O, convertidor, red neuronal, ciclo de trabajo, convergencia, algoritmo, MPPT.

Abstract

Introduction: Several researches involve in Maximum Power Point Tracking (MPPT) in Photovoltaic (PV) systems has been shown that partially shaded PV, dues to cloudiness mainly, highly affect the generated energy. This owing to the presence of multiple peaks in output power.

Objective: This paper develops a study about the traditional and modified perturb and observe algorithm (P&O) and artificial neuronal network (ANN) implementation to MPPT applications in a partially shaded PV array. The aim is to compare the performance between P&O (traditional and

modified) and ANN based on time response and the successful MPPT.

Method: This is a quantitative research that realize design, tests and data review. Using a Boost converter that has a higher output voltage versus input voltage and provides constant input-output power. By mean duty cycle converter modifying is available to achieve the MPPT.

Variations of the P&O algorithm parameters are made to evaluate the establishment time and voltage ripple reduction. Besides, it's expected that the ANN implementation enhances the stability and convergence versus classic algorithms like P&O.

Results: Results shows that the duty cycle affect the establishment time and allow to reduce the voltage ripple. Moreover, the ANN enhances the voltage ripple in comparison with P&O (traditional and modified) and reach the MPPT in 40 ms approximately.

Conclusions: The simulation of PV array under partial shadows was made and the P&O (traditional and modified) algorithm and ANN was applied in the PV array. In conclusion the ANN proposed method improve the output voltage response and allow to reduce the ripple and enhances the establishment time, this means a better energy exploitation from the PV modules.

P&O, convertidor DC-DC, red neuronal, ciclo de trabajo, convergencia, algoritmo, MPPT.

Key Words

P&O, DC-DC converter, neuronal network, duty cycle, convergence, algorithm, MPPT.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el planeta entero está en un proceso de recambio de generación y consumo de energía de las fuentes tradicionales hacia las fuentes no convencionales, buscando reducir el impacto ambiental causado por la producción a partir de combustibles fósiles. El objetivo de la mayoría de la población mundial, así como de diversas entidades públicas y privadas es claro, la reducción de la huella de carbono y para lograrlos se está trabajando en diversos campos como el de la energía solar fotovoltaica [1], [2]. Los sistemas de generación de energía basados en paneles solares fotovoltaicos son quizás la fuente de generación no convencional más extendida y atractiva para el público en general, esto debido a sus repetidas menciones en medios de comunicación masiva y la noción de ser un tipo de energía de muy bajo costo que en algunos casos se asume como gratuito [3]. No obstante, este tipo de energía presenta problemas en cuanto a eficiencia debido a diferentes factores (clima, sombras, efectos atmosféricos, etc.), además de ser consideradas como intermitentes puesto que no se cuenta con el recurso solar las 24 horas del día en las mismas condiciones. En este orden de ideas en esta investigación se hará énfasis en el estudio de la energía solar fotovoltaica cuando la eficiencia en la producción se afecta por la presencia de sombras parciales.

El estudio del efecto que tienen las sombras parciales sobre los sistemas fotovoltaicos y el desarrollo de métodos para mitigar este fenómeno tiene algunos años de desarrollo logrando avances como en [4] donde se modela un arreglo fotovoltaico como un tablero de Sudoku (juego matemático) donde se pretende cambiar la interconexión de los paneles para reducir las pérdidas de energía debidas a la aparición de sombras. Así mismo en [5] se presenta el uso de la técnica SD-PAR para solventar las pérdidas de energía debidas a las sombras, el método propuesto se basa en la reubicación física de los módulos fotovoltaicos para incrementar la eficiencia en la generación de energía de forma que se logre extraer la máxima energía del arreglo fotovoltaico. De forma similar en [6] se implementa el algoritmo de optimización de saltamontes o GOA por sus siglas en inglés, al igual que los casos anteriores el método propone la reconfiguración del arreglo para lograr el punto de máxima potencia ante la presencia de sombras parciales. En todos estos desarrollos no solo es necesario contemplar los beneficios teóricos sino también las consideraciones para su posible implementación las cuales podrían llegar a hacer inviable su implementación.

Por otra parte, otro método que se puede aplicar e incluso se encuentra disponible comercialmente es el uso de optimizadores de energía DC o DCPO por sus siglas en ingles. Los DCPO son convertidores DC-DC que se instalan de forma individual en cada módulo fotovoltaico de un arreglo solar. En [7] se realiza un estudio comparativo de los DCPO frente al uso de diodos de bypass, con los resultados de la investigación los autores concluyen que los DCPO logran un incremento entre el 2.8 y 6.4% de la energía, sin embargo, no recomiendan la inversión para arreglos con 3 submódulos puesto que la eficiencia solo mejora en un 1%. Aunque el método presenta resultados favorables se importante tener en cuenta los costos de inversión necesarios para cubrir un arreglo de varios módulos fotovoltaicos.

De igual forma existen métodos que no se basan en la reconfiguración o modificación física del arreglo sino más bien en la búsqueda del punto de máxima potencia por medio de software a través de la implementación de algoritmos de búsqueda o métodos de control avanzados como en [8] donde se propone la combinación de los métodos tradicionales de búsqueda como perturbar y observar (P&O) y conductancia incremental con redes neuronales artificiales (RNA) para predecir la región del punto de máxima potencia global estimando los límites de voltaje donde se encuentra este punto. De forma muy similar en [9] se usa una RNA para definir un rango de ciclo útil en el cual un algoritmo tradicional realizará la búsqueda final del punto de máxima potencia (MPP), para esto la RNA es alimentada con información de intensidad solar, irradiancia solar y temperatura del módulo. Al igual que en [9] en [10] se usa una RNA para estimar un rango de búsqueda del MPP, en este caso los autores combinan la red con el algoritmo de búsqueda Hill-Climb mostrando que con la combinación de las

redes neuronales y algoritmos de búsqueda se alcanza un alto desempeño sin necesidad de realizar modificaciones físicas sobre el arreglo fotovoltaico.

Finalmente en [11] y [12] se encuentra una revisión y análisis de hasta 20 métodos para mejorar la eficiencia en la generación e incrementar la potencia extraída de un arreglo fotovoltaico. En ambas referencias no solo se estudian los métodos propuestos en diferentes artículos, sino que también se ponen a prueba logrando comparativas y conclusiones muy importantes para los investigadores que están interesados en el tema de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT) con la presencia de sombras parciales.

En este orden de ideas, documento presenta el desarrollo de un sistema solar fotovoltaico sobre el cual se implementan los métodos de búsqueda P&O, P&O modificado y RNA. En la sección II se presenta la metodología que se siguió para llevar a cabo las simulaciones del sistema, partiendo del modelo de los módulos fotovoltaicos, el convertidor DC-DC tipo Boost, los algoritmos P&O y P&O modificado y la red neuronal. Posteriormente en la sección III se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en Simulink y la discusión sobre estos. En último lugar la sección IV presenta las conclusiones del trabajo.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación parte del convertidor elevador mostrado en la Figura 1 que está basado en el convertidor del libro de Hart [13] y un arreglo solar de 2 paneles en paralelo y 3 en serie, al cual se aplican cambios de temperatura e irradiancia simulando las sombras parciales.

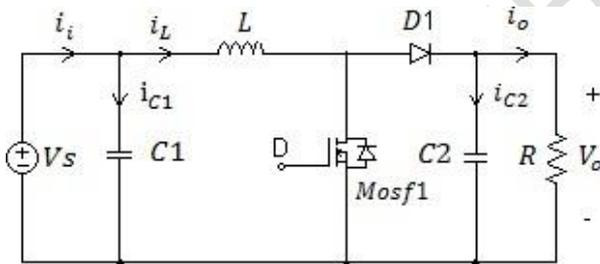


Figura 1. Convertidor DC/DC Boost. Fuente: Autores

Se procesan los datos arrojados por el arreglo solar, con la finalidad de determinar los valores de los elementos que constituyen al convertidor para alcanzar los valores estipulados o deseados.

Se procede a conectar el algoritmo P&O (tradicional, modificado), evaluar su rendimiento y determinar si cumple su función, esto con la finalidad de escoger solamente un algoritmo P&O y posterior mente compararlo con la Red Neuronal.

Para la red neuronal se hacen entrenamientos los cuales permiten que la respuesta a la salida de la Red Neuronal sea la deseada, luego de ello se procede a conectarla al arreglo solar y así recrear en su salida la

temperatura y la irradiancia para después determinar el máximo punto de potencia y con ello determinar su ciclo de trabajo ideal para dicho punto.

A. Circuito Equivalente de una celda solar

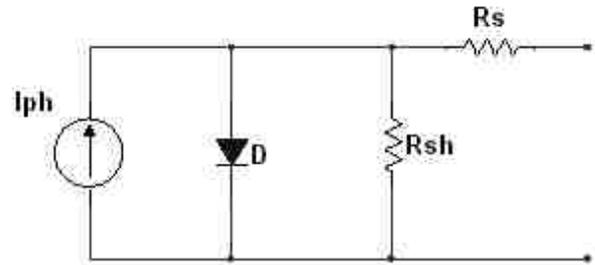


Figura 2. Circuito equivalente de un panel solar. Fuente: [14].

Las ecuaciones (1) a (5) representan el comportamiento cuantitativo de una celda fotovoltaica según el modelo presentado en la Figura 2. Estas ecuaciones son ampliamente usadas en las investigaciones relacionadas con energía solar fotovoltaica y se derivan de la ecuación de Shockley, estas permiten conocer la tensión y corriente de la celda fotovoltaica ante variaciones de temperatura e irradiancia instantánea [14].

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (1)$$

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\frac{qE_{go}(1/(T_n - 1/T))}{nK}} \quad (2)$$

$$I_{rs} = I_{sc} \left(e^{\frac{qV_{oc}}{nN_sKT}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nKTN_s}} - 1 \right) - I_{sh} \quad (5)$$

Donde:

I_{ph} es la corriente fotoeléctrica, I_0 es la corriente de saturación del diodo, I_{rs} es la corriente de saturación inversa, I_{sh} es la corriente a través de la resistencia de derivación, I es la corriente de salida, K es la constante de Boltzman ($1.3806503 e - 23 J / ^\circ K$), q es la carga del electrón ($1.60217646 e - 19 C$), I_{ph} es la corriente fotogenerada [15].

La Tabla 1, muestra los valores de las variables que se utilizan para la implementación del panel fotovoltaico en Simulink.

Tabla 1 Parámetros del módulo fotovoltaico

Variable	Valor
G	1000 W/m^2
T	25 C

V_{oc}	30 V
I_{sc}	4 A
V_{mp}	17.8 V
I_{mp}	5.63 A
T_{ci}	0.06
T_{cv}	-0.37
R_s	0.01 Ω
R_p	358.0048 Ω
N_s	36



Tabla 2 Parámetros convertidor

Variable	Valor
V_{mpp}	25 V
V_o	100 V
I_{mpp}	4 A
F_s	20 kHz

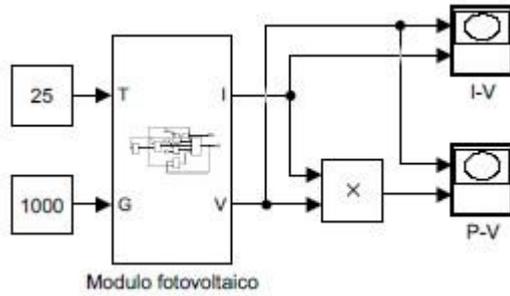


Figura 3. Diagrama de bloques de un panel fotovoltaico usando Simulink de Matlab. Fuente: Autores

En la Figura 4 se muestra las curvas de Potencia vs Voltaje (P vs V) y Corriente vs Voltaje (I vs V) variando los niveles de temperatura y teniendo la radiación constante, en la Figura 5 se presenta las curvas de Potencia vs Voltaje (P vs V) y Corriente vs Voltaje (I vs V) ante la variación de radiación, teniendo la temperatura constante.

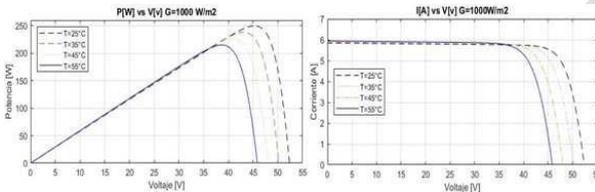


Figura 4. Curvas P Vs V e I Vs V con variación de temperatura. Fuente: Autores

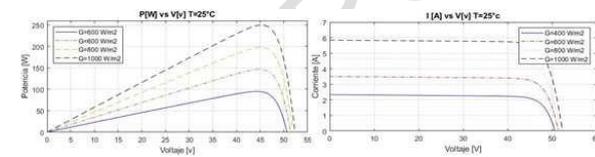


Figura 5. Curvas P Vs V e I Vs V con variación de irradiancia. Fuente: Autores

B. Diseño del convertidor DC/DC Boost

Es un convertidor que permite elevar el nivel de voltaje de entrada, donde se conecta el panel fotovoltaico y entregar un voltaje más alto a la salida, manteniendo la potencia igual a la entrada y la salida. Los valores iniciales de entrada y salida se presentan en la Tabla 2.

Debido a los requerimientos de voltaje de entrada y salida, y teniendo en cuenta que se desea una estabilización del sistema en el menor tiempo de convergencia, se determinó el uso de un convertidor tipo boost para esta investigación, se muestra la realización de los cálculos y el análisis para determinar el valor de los parámetros del convertidor.

La ecuación (6) corresponde al voltaje de salida del convertidor, la ecuación (7) proporciona el valor mínimo de inductancia para el convertidor y la ecuación (8) permite calcular la variación en el rizado de la tensión de salida [13].

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (6)$$

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \quad (7)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{RCf} \quad (8)$$

Donde:

D es el ciclo de trabajo del convertidor, f es la frecuencia de conmutación en Hertz, R es la resistencia de carga, C es la capacitancia del conductor de salida, V_s es el voltaje de entrada al convertidor, V_o es el voltaje de salida del convertidor.

En la **Error! Reference source not found.** se encuentran las ecuaciones para el cálculo de parámetros de los elementos del convertidor tipo boost dependiendo del valor de la carga, se toma como estudio de muestra el uso de 4 lámparas de iluminación led, con la finalidad de llevar a cabo un comportamiento más acertado a lo real se hace uso de las lámparas de iluminación, está iluminación tiene un consumo de 5 W cada una y se alimentan con un voltaje de 12 VDC, la conexión está dado en serie para obtener un voltaje de salida total de 48 v y una potencia total de 20 w, esta potencia y voltaje de salida pertenecen a las lámparas de iluminación led que se encuentran en serie. Con esta información se dispone a hallar el valor de la carga resistiva mediante la ecuación (6).

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{48^2}{20} = 116 \Omega \quad (6)$$

Remplazando el valor de la carga resistiva en la **Error! Reference source not found.** se obtiene los valores de L_{min} y C.

Tabla 3. Valores de inductancia y capacitancia mínimos

Inductor mínimo de funcionamiento	136 μH
Condensador de salida	33 μF

Se plantea un margen de seguridad del 30 y se toma el valor nominal más cercano $L_{min} = 177\mu H$ y $C = 43\mu H$.

C. Algoritmo P&O (modificado, tradicional) y Red Neuronal

El algoritmo tradicional tal como se presenta en la Figura 6 se basa en el utilizado en [16], este toma como variables de entrada el voltaje y la corriente del arreglo PV, la variable dCs representa el paso para realizar la perturbación su valor es de $dCs = 0.01$, el algoritmo lee los datos suministrados por el panel solar, con estos valores calcula la potencia instantánea, con este cálculo se realiza la comparación con el nivel de potencia de la anterior muestra P1, de igual forma se hace la comparación con el voltaje y de acuerdo a esto se determina el nuevo valor del ciclo de trabajo (D) que varía entre 0 y 1, permitiendo encontrar el punto de estabilización del algoritmo. La simulación del algoritmo P&O tradicional se muestra en la Figura 6.

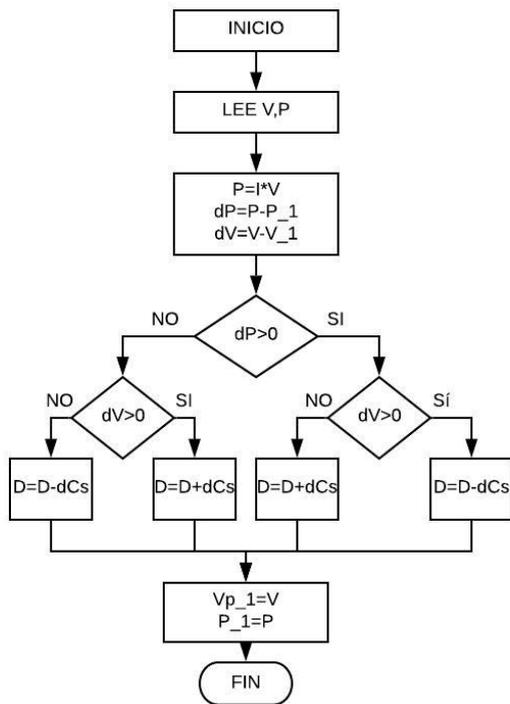


Figura 6. Algoritmo P&O tradicional. Fuente: Autores.

La modificación del algoritmo tradicional se presenta en la Figura 7, donde se define un valor ciclo del trabajo útil del 0.5, correspondiente a un valor teórico aproximado al MPP en condiciones ideales, permitiendo disminuir el tiempo de establecimiento con respecto a la oscilación.

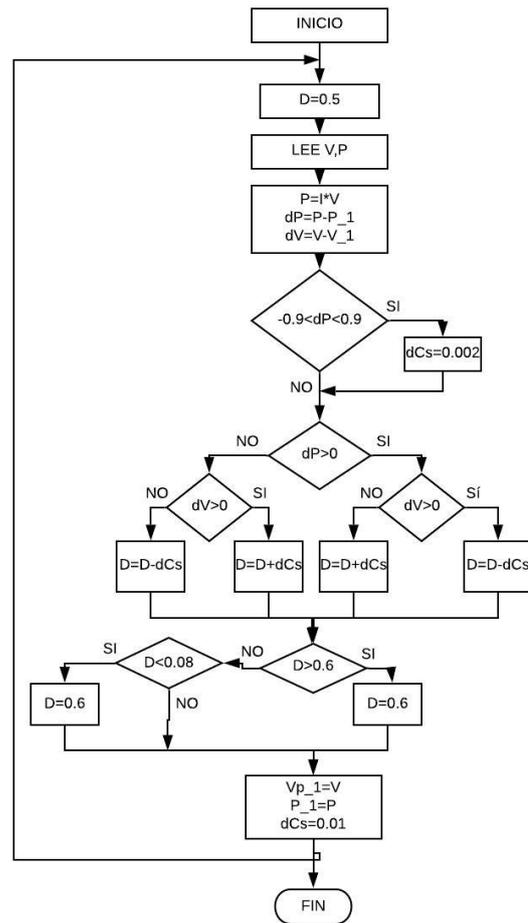


Figura 7. Algoritmo P&O tradicional modificado. Fuente: Autores.

El diseño de una nueva topología de control empleando fundamentos que se enfocan en técnicas de control inteligente como las redes neuronales, modelos matemáticos y ecuaciones, solo generan una pequeña parte en lo que se refiere a solventar el problema, para esta investigación, está destinada a un MPPT el cual permite elevar la eficiencia en el suministro de energía eléctrica entregada por un arreglo solar.

La propuesta del artículo se basa en la implementación de una red neuronal artificial (RNA) tipo FFNN, el cual implementa un método de retro-propagación para su entrenamiento y evaluación, permitiendo hacer uso de del modelo matemático de la celda y las ecuaciones del convertidor elevador, los cuales permiten modificar el punto del ciclo de trabajo D.

En este caso se utiliza como datos de salida la temperatura y la irradiación, como datos de entrada se utiliza el voltaje y la corriente generada por el panel solar, al igual que el ciclo de trabajo, esto con el fin de obtener el máximo punto de transferencia.

III. RESULTADOS

En el siguiente apartado se presenta la simulación del algoritmo P&O tradicional y modificado, el convertidor boost y el panel solar descrito por la ecuación (1), igualmente la simulación de la red neuronal.

Resultados de la simulación del algoritmo P&O tradicional y modificado.

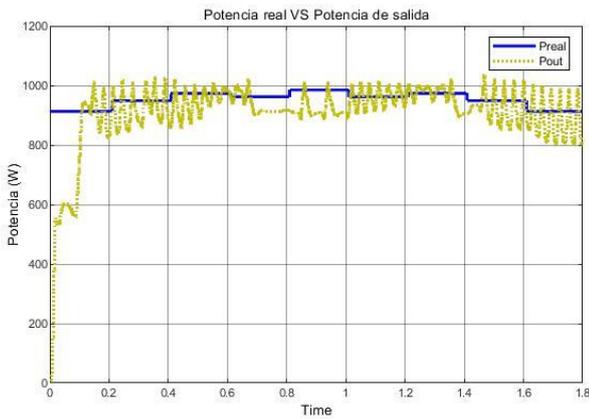


Figura 8. Potencia real vs potencia de salida (P&O Tradicional). Fuente: Autores.

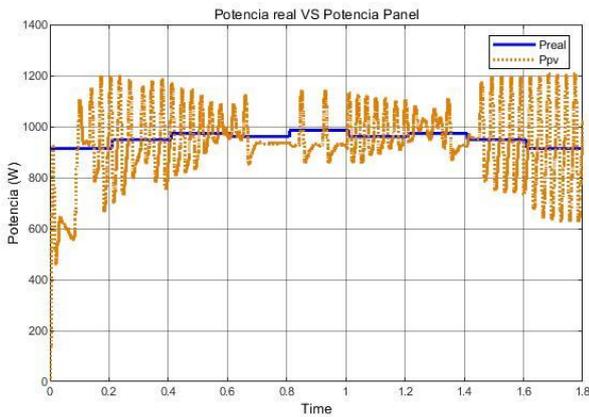


Figura 9. Potencia real vs potencia paneles (P&O Tradicional). Fuente: Autores.

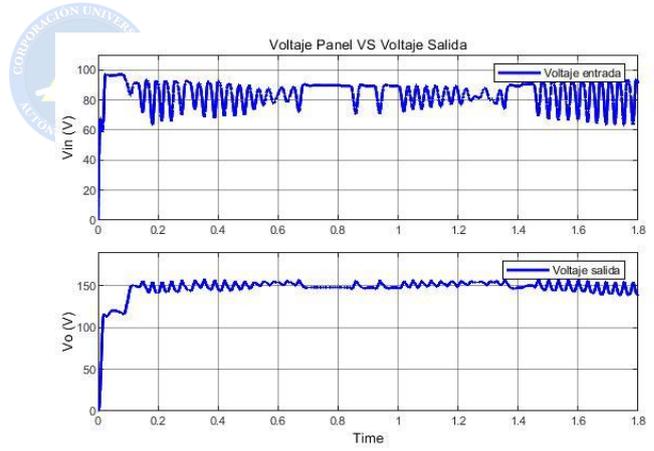


Figura 10. Voltaje panel vs voltaje de salida (P&O Tradicional). Fuente: Autores.

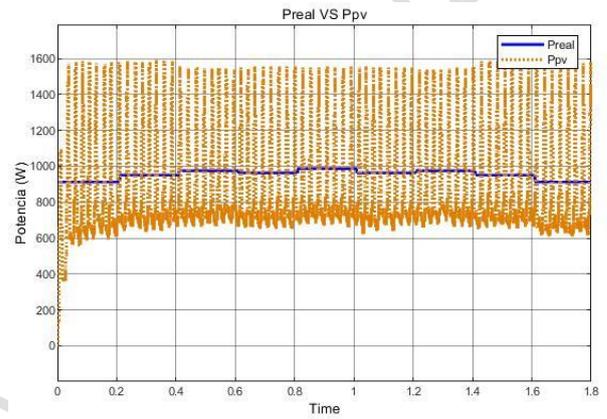


Figura 11. Potencia real vs potencia panel (P&O Modificado). Fuente: Autores.

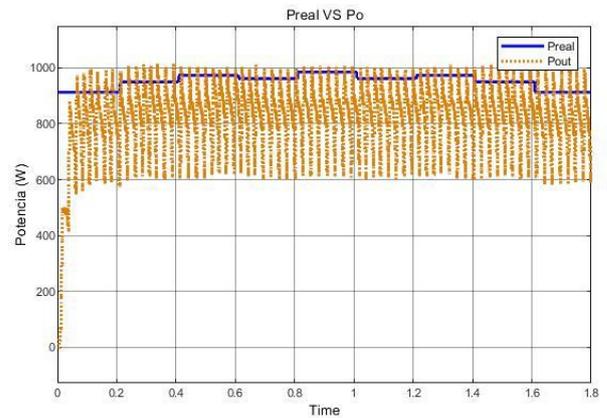


Figura 12. Potencia real vs potencia de salida (P&O Modificado). Fuente: Autores.

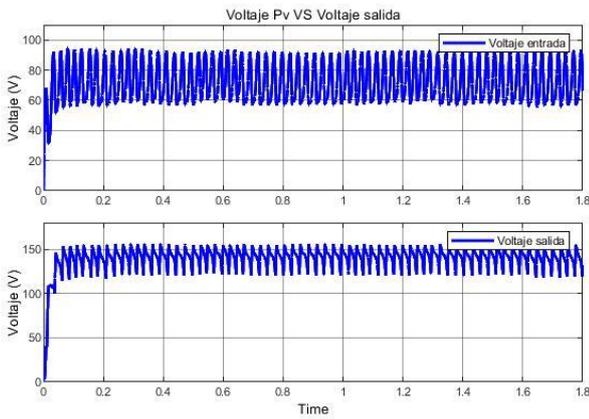


Figura 13. Voltaje panel vs voltaje de salida (P&O Modificado). Fuente: Autores.

En las figuras anteriores se muestran la simulación del algoritmo P&O modificado y tradicional, para radiación y temperatura variable, donde inicialmente se define una irradiancia de 760W/m² posteriormente se varían a 790W/m² hasta 0.4, luego a 630W/m² en 0.8s, luego sube a 800W/m² en 1.2s y finalmente sube a 820W/m² en 1.6s, luego hace el proceso inverso en los mismos tiempos de muestreo o simulación.

Las Figuras 9 a 13 muestran la búsqueda del MPP por parte del algoritmo P&O tradicional y modificado, resaltando la diferencia del tiempo de estabilización del sistema en donde se puede observar la superposición de las señales de potencia de la celda solar a la entrada y la potencia a la salida del convertidor, el voltaje de entrada y salida, las simulaciones muestran que el algoritmo P&O modificado converge en la búsqueda del MPP en un tiempo menor que el algoritmo P&O tradicional, disminuyendo también las oscilaciones.

El diseño y selección del modo de operación del convertidor Boost fue de gran importancia debido a que este sistema es el que realiza el proceso de conversión y elevación de voltajes, por lo cual el diseñar un mal sistema representaría un aumento en las pérdidas de potencia, una mayor oscilación en el punto de trabajo, afectando a cada uno de los sistemas y elementos en general. En las Figuras 9 y 10 se observa que el sistema tiene un tiempo de establecimiento largo (0.18 s), este tiempo se considera una pérdida para el aprovechamiento de la energía que le llega al PV, otra deficiencia son las oscilaciones que se presentan en el establecimiento del punto de estabilidad

Con la ayuda de la modificación del algoritmo P&O permite tener una eficiencia del 99,6 en la obtención de la máxima potencia entregada por el sistema frente a perturbación cumpliendo con las expectativas de esta investigación, este dato se puede obtener restando la potencia real generada por el sistema que no es más que la máxima potencia a la que puede llegar el panel con la potencia de salida del sistema en lazo cerrado. El tamaño de las perturbaciones en las respuestas de salida del convertidor puede ser reducidas incrementando el valor del capacitor de entrada C_{in} , teniendo como resultado una mejor apreciación al observar el valor final deseado.

Al observar los anteriores resultados de la simulación se puede concluir que con el algoritmo modificado los valores deseados se aproximan a la forma real.

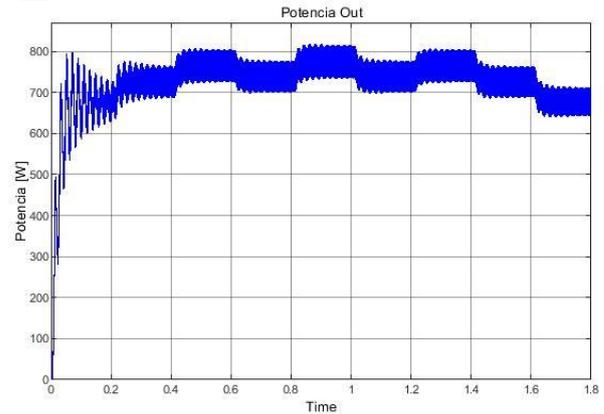


Figura 14. Potencia salida de los paneles usando redes neuronales. Fuente: Autores.

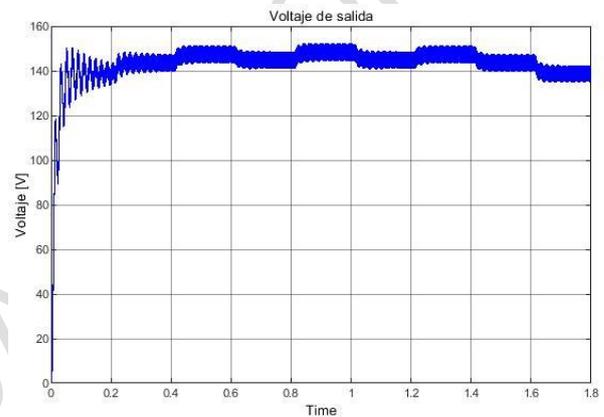


Figura 15. Voltaje de salida de los paneles. Fuente: Autores.

En la Figura 15 y 16 se muestra los resultados de la simulación de la red neuronal, demostrando que la oscilación y el tiempo de convergencia es de mayor eficacia frente a los algoritmos clásicos antes mencionados y estudiados.

En contraparte se deduce que existen otros MPPT con algoritmos clásicos o modernos, los cuales tienen una mayor eficiencia respecto al MPPT propuesto, sin embargo, estos MPPT no reportan si el valor de la eficiencia es para días en donde la presencia de nubosidad es relativamente alta, esto se puede ver en la figura 16, en donde el traspaso de la nubosidad varía con diferentes picos, permitiendo siempre mantener el nivel de voltaje dentro de lo esperado.

De acuerdo con las gráficas se determina que tanto la red neuronal y el algoritmo P&O cumplen con las expectativas de esta investigación, sin descartar mejoras para incrementar la eficiencia.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza un estudio de efecto de las sombras parciales que inciden en los paneles solares, debido a ello se plantean las siguientes conclusiones.

La respuesta en los algoritmos P&O difiere en la convergencia, por un lado, el algoritmo tradicional no posee etapas de acondicionamiento de señal y acondicionamiento del ciclo de trabajo, totalmente opuesto al algoritmo P&O modificado que, si las posee, esto conlleva a que se reduzca las oscilaciones alrededor del MPPT permitiendo obtener un mayor aprovechamiento de la energía generada por la matriz solar.

Se puede determinar que la oscilación de potencia al rededor del MPP son directamente proporcionales al tamaño de las sombras generadas en el arreglo solar, así mismo el tiempo de convergencia es inversamente proporcional al tamaño de las perturbaciones, en la mayoría de las simulaciones se puede observar esto, pero en algunos casos no es así debido a la respuesta de salida no es tan rápida con los datos de entrada.

La Figura 15 muestra que a mayor tamaño de perturbación existe un menor aprovechamiento de la energía disponible, generando mayores oscilaciones.

Se puede implementar etapas de acondicionamiento de señales en la entrada de los algoritmos, con la finalidad de disminuir las oscilaciones y entregar una señal más limpia y estable.

La red neuronal tiene una mayor tasa de transferencia en su entrada que en la salida, esto quiere decir que los datos de la entrada varían con una velocidad diferente a los datos de la salida. Esto produce que los datos que genera la entrada sean erróneos en forma de velocidad, afectando a la estabilización del sistema, esto conlleva a obtener oscilaciones grandes a la salida y que estas oscilaciones no permitan estabilizar al sistema de forma deseada.

Con respecto a la red neuronal utilizada se determina que, a mayor número de neuronas, los resultados de la RNA reducen el error, a cambio de un mayor procesamiento.

REFERENCIAS

[1] M. Pourakbari-Kasmaei, M. Lehtonen, J. Contreras and J. R. S. Mantovani, "Carbon Footprint Management: A Pathway Toward Smart Emission Abatement," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 935-948, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2922394.

[2] J. Heinonen, J. Ottelin, S. Ala-Mantila, T. Wiedmann, J. Clarke, S. Junnila, "Spatial consumption-based carbon footprint assessments - A review of recent developments in the field," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120335>

[3] V. Wittmann and D. Meissner, "The Nexus of Energy for Free and World Society," 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702953.

[4] G. Sagar, D. Pathak, P. Gaur, V. Jain, "A Su Do Ku puzzle based shade dispersion for maximum power enhancement of partially shaded hybrid bridge-link-total-cross-tied PV array," *Solar Energy*, vol.204, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.054>

[5] P. R. Satpathy, R. Sharma, S. Dash, "An efficient SD-PAR technique for maximum power generation from modules of partially shaded PV arrays," *Energy*, vol.175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.078>

[6] A. Fathy, "Recent meta-heuristic grasshopper optimization algorithm for optimal reconfiguration of partially shaded PV array," *Solar Energy*, vol.171, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.014>

[7] M. Z. Ramli, Z. Salam, "Performance evaluation of dc power optimizer (DCPO) for photovoltaic (PV) system during partial shading," *Renewable Energy*, vol.139, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.072>

[8] H. M. El-Helw, A. Magdy and M. I. Marei, "A Hybrid Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11900-11908, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2717540.

[9] D. S. G. Krishna and M. Ravali, "An intelligent MPPT controller for a PV source using cascaded artificial neural network controlled DC link," 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), Paralakhemundi, 2016, pp. 983-988, doi: 10.1109/SCOPEs.2016.7955588.

[10] S. Allahabadi, H. Iman-Eini and S. Farhangi, "Neural Network based Maximum Power Point Tracking Technique for PV Arrays in Mobile Applications," 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Shiraz, Iran, 2019, pp. 701-706, doi: 10.1109/PEDSTC.2019.8697564.

[11] H. Rezk, M. AL-Oran, M. R. Gomaa, M. A. Tolba, A. Fathy, M. A. Abdelkareem, A.G. Olabi, A. H. M. El-Sayed, "A novel statistical performance evaluation of most modern optimization-based global MPPT techniques for partially shaded PV system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.115, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109372>

[12] M. A.M. Ramli, S. Twaha, K. Ishaque, Y. A. Al-Turki, "A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.013>

[13] Hart, D.W., *Electrónica de potencia*. Madrid, España: Pearson Educación, 2001, pp. 212-217.

[14] F. Rodríguez Paler, "Predicción mediante redes neuronales de la producción de energía de un parque fotovoltaico," Tesis B.S, Dept. Electron. Eng., Alcalá Univ., Alcalá, España 2017.

[15] H. Fernández, A. Martínez, V. Guzmán, M. I. Giménez, "Obtención de la máxima potencia en paneles fotovoltaicos mediante control directo: corriente a modulación por ancho de pulsos," *scielon*, vol.10, 2006.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212006000300009&nrm=iso



[16] F. Dulce and N. Espana, "Numerical Comparison Between GSC and P&O Controller for MPPT Applications," 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ROPEC.2018.8661417.

Author 1 received the M.Sc. degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in solid state physics from the Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, in 1974 and 1977, respectively. Since then, he has been with Danfoss Compressors GmbH, Flensburg, Germany, where he is currently the Senior Director of Technology and R&D. <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>

Author 2 received the M.Sc. degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in solid state physics from the Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, in 1974 and 1977, respectively. Since then, he has been with Danfoss Compressors GmbH, Flensburg, Germany, where he is currently the Senior Director of Technology and R&D. <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>

PROHIBIDA SU COPIA