

## Algoritmos MPPT de perturbación y observación para sistemas con carga DC

MPPT disturbance and observation algorithms for systems with DC load

Algoritmos de perturbação e observação MPPT para sistemas com carga DC

**Carlos Iván Rueda Panchano**

ivan.rueda@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5067-6277>

Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

### RESUMEN

Este artículo describe algunos fundamentos sobre los sistemas fotovoltaicos (Photovoltaics – PV) y también estudia muchos aspectos relacionados con el control de la eficiencia de los arreglos fotovoltaicos acoplados directamente a una carga de corriente continua (DC). Los arreglos fotovoltaicos tienen algunas características intrínsecas que pueden afectar su potencia de salida durante diferentes condiciones de funcionamiento. Por lo tanto, la potencia de salida de los arreglos fotovoltaicos generalmente se mantiene relativamente constante mediante el uso de algoritmos de control. El algoritmo de perturbación y observación – Perturb and Observe (P&O) – es uno de estos algoritmos de control y es estudiado con detalle en el presente artículo. Se analizan las fallas del algoritmo P&O para mantener estable la eficiencia del arreglo con condiciones ambientales variables rápidas. En ese sentido, se plantea la posibilidad de investigar algunos algoritmos P&O modificados que se pueden encontrar en la literatura para mejorar los resultados del algoritmo P&O con respecto a su efectividad para controlar la eficiencia del arreglo y su facilidad de implementación en un sistema fotovoltaico.

**Palabras clave:** Algoritmo de Perturbación y Observación (P&O), algoritmo MPPT, convertidor DC-DC, algoritmo P&O modificado.

### ABSTRACT

This paper describes some fundamentals about Photovoltaic (PV) Systems and also studies many aspects related to the control of the efficiency of PV arrays directly coupled to a DC load. PV arrays has some intrinsic characteristics that can affect its output power during different operating conditions. Hence, PV arrays output power is usually maintained relatively constant by using control algorithms. The Perturb and Observe (P&O) algorithm is one of this control algorithms which is studied in the present paper. Additionally, it is also analyzed the faults of the P&O algorithm in maintaining stable the efficiency of the array with rapid variable ambient conditions. In that sense, it is stated the possibility of investigating some modified P&O algorithms that can be found in the literature in order to improve the results of the P&O algorithm with respect to its effectiveness to control the efficiency of the array and its ease of implementation in a PV system.

**Keywords:** Perturbation and Observation (P&O) algorithm, MPPT algorithm, DC-DC converter, modified P&O algorithm.

### RESUMO

Este artigo descreve alguns fundamentos de sistemas fotovoltaicos e também estuda diversos aspectos relacionados ao controle de eficiência de arranjos fotovoltaicos acoplados diretamente a uma carga de corrente contínua (DC). Os arranjos fotovoltaicos possuem algumas características intrínsecas que podem afetar sua potência de saída durante diferentes condições de operação. Portanto, a potência de saída dos arranjos fotovoltaicos é geralmente mantida relativamente constante através do uso de algoritmos de controle. O algoritmo Perturb and Observe (P&O) é um desses algoritmos de controle e é estudado em detalhes neste artigo. As falhas do algoritmo P&O para manter a eficiência da matriz estável sob condições ambientais em rápida mudança são analisadas. Nesse sentido, levanta-se a possibilidade de investigar alguns algoritmos de P&O modificados que podem ser encontrados na literatura para melhorar os resultados do algoritmo de P&O quanto à sua eficácia no controle da eficiência do arranjo e sua facilidade de implementação em um sistema fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Algoritmo de Perturbação e Observação (P&O), algoritmo MPPT, conversor DC-DC, algoritmo P&O modificado.

## INTRODUCCIÓN

La resistencia característica de un arreglo fotovoltaico es un parámetro importante al momento de controlar la potencia de salida del arreglo. De acuerdo con (Honsberg & Bowden, 2022), si la resistencia de la carga es igual a la resistencia característica de la celda solar, entonces la potencia máxima se transfiere a la carga y la celda solar opera en su Punto de Máxima Potencia (MPP). Este hecho significa que la cantidad de energía extraída del arreglo fotovoltaico depende de la impedancia a la que se enfrenta. Por lo tanto, el mejor rendimiento (o la mayor eficiencia) del arreglo fotovoltaico se puede alcanzar cuando la impedancia de carga tiene un valor que provoca una operación en el MPP incluso con diferentes condiciones ambientales; también, se debe tener en cuenta que las condiciones atmosféricas, como la temperatura de trabajo y la radiación solar, pueden afectar el rendimiento energético del conjunto fotovoltaico.

En la literatura, existen muchas técnicas que se pueden utilizar para obtener el MPP de un arreglo fotovoltaico de forma constante, incluso con carga o condiciones ambientales variables. Básicamente, estas técnicas rastrean (tracking) el MPP del arreglo controlando la resistencia característica del arreglo fotovoltaico por medio de la impedancia de entrada de un convertidor DC-DC.

## METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente artículo se ha utilizado el método deductivo de investigación científica y la técnica de investigación documental. Con esta metodología se han podido obtener y clasificar información centrada en la identificación de un problema de investigación bajo un contexto en el que se ha buscado deducir o plantear una propuesta de solución a través del estudio de diversas fuentes de información escrita o de otra índole.

## DESARROLLO

### Planteamiento del problema

Los sistemas fotovoltaicos exhiben naturalmente características I-V y P-V no lineales que varían con la intensidad radiante y la temperatura de la celda (Tsai, Tu, & Su, 2008, p. 1). Dado que una celda fotovoltaica tiene un coeficiente de temperatura negativo, su voltaje terminal disminuye al aumentar su temperatura. Por otro lado, cuanto mayor sea el flujo de fotones sobre la celda fotovoltaica, mayor será su corriente generada por luz o corriente terminal (*Solar Electricity*, 1997). Estos dos hechos, indican

que el voltaje de circuito abierto de la celda fotovoltaica aumenta cuando la temperatura de la celda disminuye y la corriente de cortocircuito aumenta cuando también aumenta la radiación solar. En este sentido, un sistema fotovoltaico debe estar diseñado para proporcionar la máxima potencia a la carga incluso con condiciones atmosféricas variables de temperatura e irradiancia solar. En la literatura, hay muchas técnicas para superar este problema que se basan principalmente en el control de la impedancia de salida del arreglo fotovoltaico mediante el uso de un convertidor DC-DC entre la carga del sistema DC y el arreglo fotovoltaico que alimenta a este sistema. Este artículo se centra en los algoritmos Perturb and Observe (P&O) para controlar el MPP de un sistema fotovoltaico.

## Revisión Literaria

### *Energía Solar Fotovoltaica*

Los sistemas fotovoltaicos funcionan con energía eléctrica producida por celdas fotovoltaicas (Messenger & Ventre, 2004). Una sola celda fotovoltaica produce poca energía, por lo que una sola celda no puede producir suficiente energía para suministrar satisfactoriamente a una carga típica. Debido a este hecho, las celdas fotovoltaicas se conectan entre sí en circuitos serie y paralelo en un panel para aumentar su capacidad de voltaje y corriente; esta configuración de grupo se conoce como módulo fotovoltaico. Dado que un módulo fotovoltaico todavía no es adecuado para satisfacer los requisitos de potencia de una carga típica, se crea un conjunto fotovoltaico conectando en combinaciones paralelo o en serie muchos módulos fotovoltaicos para convertir el conjunto fotovoltaico en una fuente de alimentación de DC adecuada.

En los casos en los que el conjunto fotovoltaico tiene que suministrar a una carga de AC, es necesario un inversor para convertir la potencia de DC del conjunto fotovoltaico en potencia de AC. La selección de este inversor debe tener en cuenta la distorsión armónica en la fuente de alimentación de la carga, la sobrecorriente y los requisitos de forma de onda de la carga, y considerar si el sistema fotovoltaico será un sistema conectado a la red o un sistema independiente (autónomo o aislado) (Messenger & Ventre, 2004).

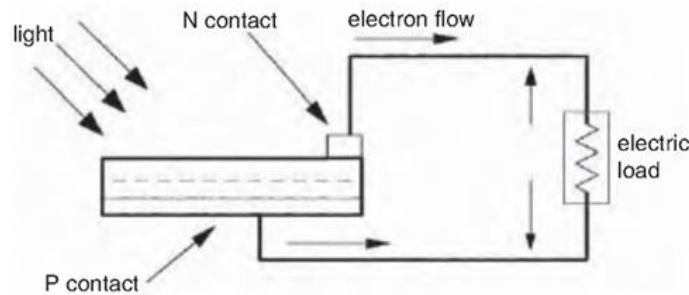
### *Operación de la Celda Fotovoltaica y su Modelo Eléctrico Equivalente*

La física de la celda fotovoltaica (PV Cell) es muy similar a la del diodo clásico con una unión pn (Patel, 2006, p. 163). Cuando la unión de la celda fotovoltaica recibe luz, genera portadores de carga que producen un potencial en la unión (efecto fotovoltaico) y, en consecuencia, una corriente en un

circuito externo conectado (figura 1) (Patel, 2006). Una celda fotovoltaica puede ser representada por medio de cualquiera de los circuitos mostrados en la figura 2.

### Figura 1.

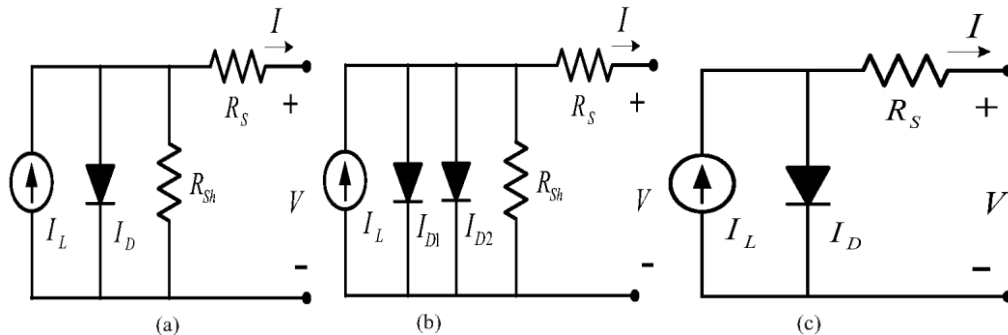
La energía de los fotones es convertida en voltaje debido al efecto fotovoltaico a través de la juntura pn.



Fuente: (Patel, 2006, p. 164).

### Figura 2

Modelos eléctricos equivalentes de la celda fotovoltaica: (a) modelo de un diodo, (b) modelo de doble diodo, (c) circuito equivalente PV simplificado.



Fuente: (Krismadinata, Rahim, Ping, & Selvaraj, 2013, p. 538).

Los modelos de celdas fotovoltaicas equivalentes de la figura 2 comparten en común una corriente  $I_L$  generada por luz, un diodo o dos diodos, una resistencia en serie  $R_S$  que representa la resistencia interna al flujo de corriente y una resistencia en derivación  $R_{SH}$  que representa fuga a tierra (Patel, 2006).

Con dos diodos, el modelo de doble diodo permite obtener un mejor ajuste de curvas de comportamiento (Krismadinata et al., 2013), sin embargo, el modelo de un solo diodo se ha vuelto más popular en la literatura debido a las limitaciones que existen en el modelo de dos diodos para desarrollar expresiones para los parámetros de la curva V-I (Tsai et al., 2008). Por otro lado, la eficiencia de la celda fotovoltaica es insensible a la variación de  $R_{SH}$ , por lo que se puede suponer que esta resistencia es infinita; bajo esta condición se desarrolla el modelo de la figura 2(c). El modelo de la

figura 2(c) se conoce como el "modelo generalizado de celdas fotovoltaicas" y es el modelo más utilizado debido a su aceptable complejidad (Tsai et al., 2008). Cabe señalar que, en condiciones ideales (es decir, sin pérdida en serie ni fuga a tierra), el modelo generalizado se convierte en un "modelo ideal" más simple con un diodo y cero resistencia  $R_S$ .

Según Tsai (Tsai et al., 2008), las ecuaciones que gobiernan el modelo generalizado de la figura 2(c) son las siguientes:

$$I = I_L - I_S \left[ e^{\left( \frac{q(V+I R_S)}{k T_C A} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_L = [I_{SC} + K_I(T_C - T_{Ref})] \lambda \quad (2)$$

$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_C}{T_{Ref}} \right)^3 e^{\left[ \frac{q E_G \left( \frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{k A} \right]} \quad (3)$$

Donde  $I$  y  $V$  son la corriente de salida y el voltaje de salida de la celda fotovoltaica,  $I_L$  es la corriente generada por la luz,  $I_S$  es la saturación de la celda de corriente oscura,  $I_{RS}$  es la corriente de saturación inversa de la celda a 25 °C y 1000 W/m<sup>2</sup>,  $I_{SC}$  es la corriente de cortocircuito de la celda,  $q$  es igual a la carga de un electrón,  $k$  corresponde a la constante de Boltzmann,  $E_G$  es la brecha de energía (band-gap) del material semiconductor de la celda,  $A$  es un factor ideal que depende del material semiconductor de la celda,  $\lambda$  es la irradiancia solar en kW/m<sup>2</sup>,  $K_I$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito de la celda,  $T_C$  es la temperatura de trabajo de la celda,  $T_{Ref}$  es la temperatura de referencia de la celda,  $R_{SH}$  es la resistencia en derivación y  $R_S$  es la resistencia en serie de la celda (Tsai et al., 2008).

Las ecuaciones para el arreglo fotovoltaico son similares a las ecuaciones de la celda fotovoltaica, pero consideran el número de módulos en paralelo ( $N_P$ ) y módulos en serie ( $N_S$ ) que existen en el arreglo. Por lo tanto, la ecuación (1) que representa la corriente terminal de la celda fotovoltaica (considerando el modelo generalizado) es adecuada para ser representada de la siguiente forma para un arreglo fotovoltaico:

$$I = N_p I_L - N_p I_S \left[ e^{\left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right)}{k T_c A} \right)} - 1 \right] \quad (4)$$

### **Características I-V y P-V de la Celda Fotovoltaica**

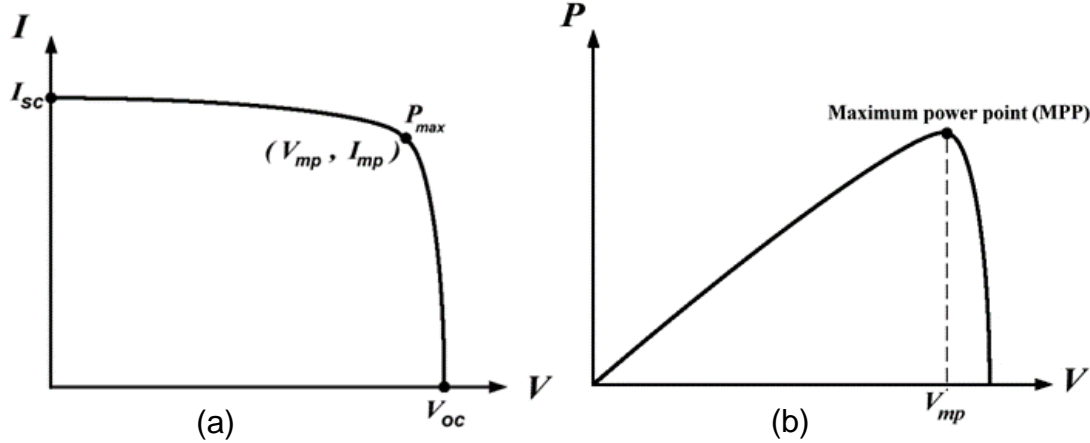
La figura 3 indica las características I-V y P-V típicas de una celda fotovoltaica. La figura 3(a) muestra la característica I-V que se obtiene conectando una impedancia variable a los terminales de salida (ALQahtani, 2012) de la celda fotovoltaica. La figura 3(b) indica la curva característica P-V de la celda fotovoltaica que se obtiene multiplicando las coordenadas I y V de la curva característica I-V. Observe que de acuerdo con el valor de impedancia que está conectado a la celda fotovoltaica, habrá una potencia específica que debe producirse. Esto significa que la cantidad de energía extraída de la celda fotovoltaica depende de la impedancia que encuentra la celda fotovoltaica en sus terminales de salida. Note que el mejor rendimiento de la celda fotovoltaica se alcanza cuando la impedancia de carga tiene un valor que provoca una operación en el punto MPP.

Tres parámetros importantes de las celdas fotovoltaicas son el punto de máxima potencia (MPP), la corriente máxima ( $I_{sc}$ ) y el voltaje máximo ( $V_{oc}$ ) que la celda fotovoltaica puede producir efectivamente cuando la impedancia de carga cambia de cero (cortocircuito) a infinito (circuito abierto). Dado que  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  definen los valores máximos de corriente y tensión de la curva I-V durante un cortocircuito y un circuito abierto respectivamente, también indican claramente la dependencia de la célula fotovoltaica con respecto a las condiciones ambientales, como la temperatura de trabajo y la radiación solar como se muestra en la figura 4.

Cabe señalar en la figura 4 que la corriente de cortocircuito se ve ligeramente afectada por la temperatura de la celda y además la irradiancia solar tiene un efecto mínimo sobre el voltaje de circuito abierto. Este es un punto de partida importante que suelen tener en cuenta los diseñadores de sistemas fotovoltaicos. Por lo general, no se consideran ni los efectos en la tensión de circuito abierto relacionados con la radiación solar ni los efectos en la corriente de cortocircuito relacionados con la temperatura en el diseño de sistemas prácticos fotovoltaicos (*Solar Electricity*, 1997). Sin embargo, los diseñadores de sistemas fotovoltaicos ciertamente deben tener en cuenta el efecto de la radiación solar sobre la corriente de cortocircuito y el efecto de la temperatura sobre el voltaje de circuito abierto del arreglo fotovoltaico.

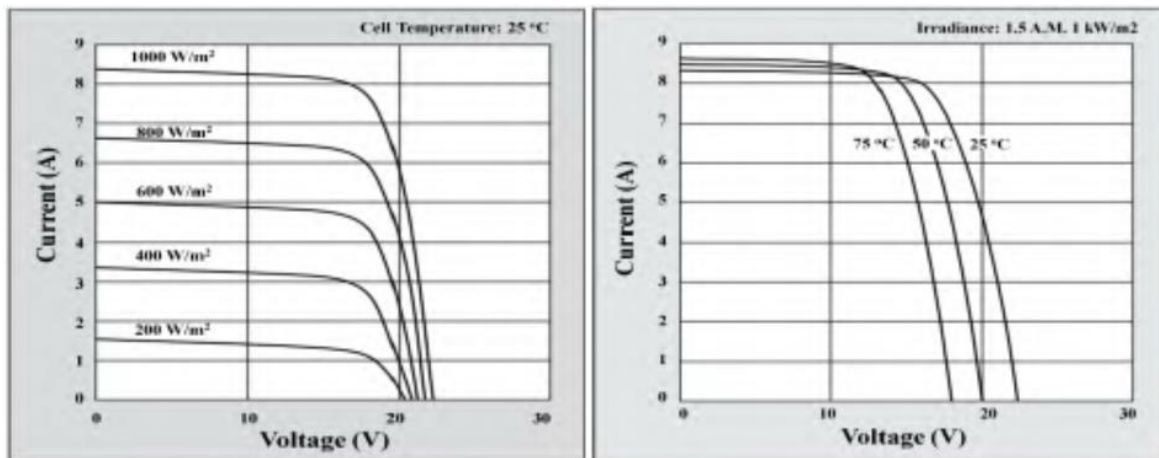
### Figura 3

Características típicas de una celda fotovoltaica: (a) característica I-V, (b) característica P-V.



### Figura 4

Efectos de la temperatura y la irradiancia solar en las curvas de un arreglo fotovoltaico comercial.



Fuente: (Krismadinata et al., 2013, p. 542).

### Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

La intersección entre la característica de carga y la característica I-V del arreglo fotovoltaico define el punto de funcionamiento del sistema fotovoltaico (figura 5). Usualmente, cuando la carga y el arreglo están directamente acoplados, el punto de operación obtenido no corresponde a la tensión y corriente que producen la potencia máxima (MPP) que el arreglo fotovoltaico puede transferir a la carga (Enrique, Andújar, & Bohórquez, 2010). Por lo tanto, es necesario un algoritmo de control para mantener estable el punto de operación en el MPP.

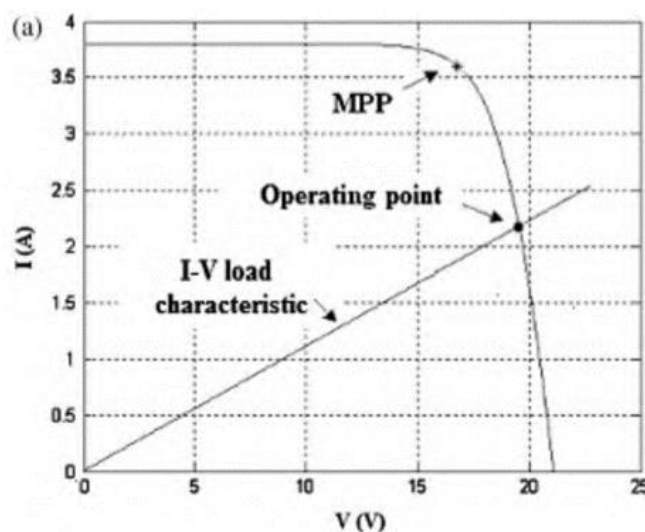


Las características I-V y P-V del arreglo fotovoltaico, desde cero voltios hasta el voltaje de circuito abierto, podrían obtenerse experimentalmente conectando una resistencia variable a los terminales del arreglo (Enrique et al., 2005). Sin embargo, este método para obtener las curvas I-V y P-V no es viable en aplicaciones prácticas, por lo que se puede utilizar otro método que consiste en utilizar un algoritmo de control para manipular la impedancia de entrada de un convertidor DC-DC. Como se muestra en la figura 6, la impedancia de entrada de este convertidor DC-DC básicamente se convierte en la impedancia terminal del arreglo fotovoltaico, de modo que el convertidor DC-DC puede comportarse como un emulador de carga para el arreglo.

La impedancia de entrada de los convertidores DC-DC es una cantidad variable que depende básicamente de la relación de trabajo ( $\delta$ ) y la carga que está conectada al convertidor (Enrique et al., 2010). Esto significa que, al controlar la relación de trabajo del convertidor, la resistencia característica del arreglo fotovoltaico podría coincidir con la impedancia de entrada del convertidor, de modo que el punto de funcionamiento de máxima potencia MPP del arreglo fotovoltaico podría rastrear incluso con temperatura y condiciones de radiación solar variables. Esta es la función del bloque del algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT Algorithm) indicado en la figura 6, que debe proporcionar control sobre la impedancia terminal del arreglo fotovoltaico modificando la relación de trabajo del convertidor para mantener continuamente el punto de operación del sistema en el MPP.

### Figura 5

*Efectos de la temperatura y de la irradiancia solar en la curva de un arreglo fotovoltaico comercial.*

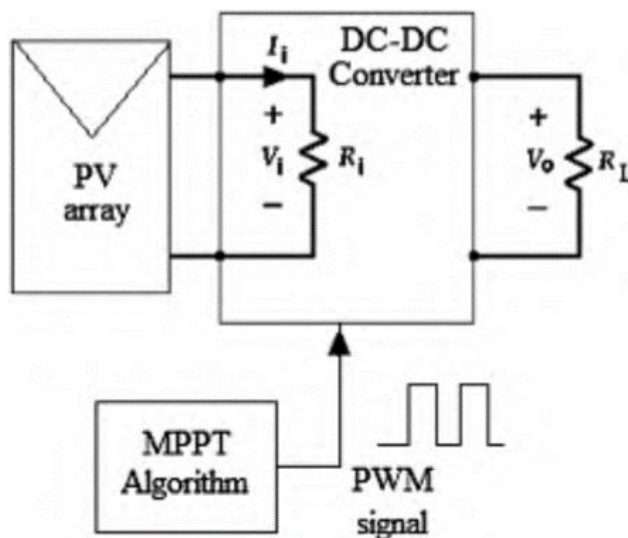


Fuente: (Enrique et al., 2010, p. 80).

### Figura 6



### Control de la impedancia de entrada del arreglo fotovoltaico usando un convertidor DC-DC.



Fuente: (Enrique et al., 2010, p. 80).

### Algoritmo MPPT de Perturbación y Observación (P&O)

El MPP en la curva característica P-V representa la potencia máxima que el arreglo fotovoltaico puede transferir a la carga. Además, el MPP es el punto de inflexión (con curvatura negativa) de las características P-V, lo que significa que cualquier cambio (o perturbación) en el voltaje alrededor de este punto disminuirá la potencia del conjunto fotovoltaico. El algoritmo P&O MPPT aprovecha esta situación para obtener, en estado estacionario, una operación relativamente constante en el MPP del campo fotovoltaico.

Hay cuatro casos en la característica P-V de un arreglo fotovoltaico, que el algoritmo P&O debe evaluar continuamente para rastrear el MPP del arreglo para iteraciones “ $i$ ” e iteraciones anteriores, “ $i-1$ ” (Enrique et al., 2005). Estos casos son:

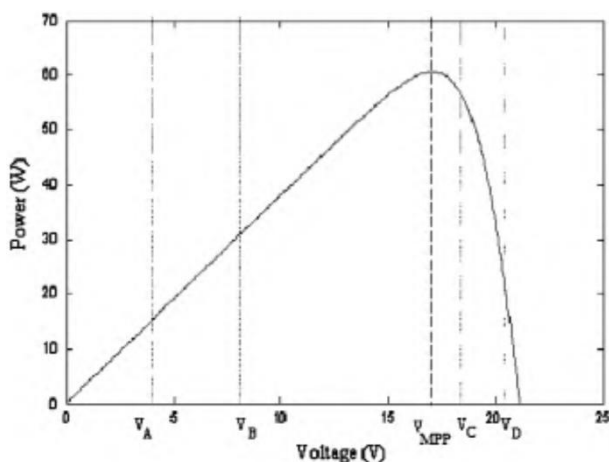
- 1)  $\Delta P = P(i) - P(i-1) > 0$  y  $\Delta V = V(i) - V(i-1) > 0$ . En este caso la variación de potencia ( $\Delta P$ ) y la variación de tensión ( $\Delta V$ ) del arreglo, son positivos, por lo que según la figura 7, este es el caso de una transición en el voltaje del arreglo de  $V_A$  a  $V_B$ .

- 2)  $\Delta P = P(i) - P(i-1) < 0$  y  $\Delta V = V(i) - V(i-1) < 0$ . En este caso la variación de potencia ( $\Delta P$ ) es negativa y la variación de tensión ( $\Delta V$ ) también es negativa, por lo que según la figura 7, este es el caso de una transición en el voltaje del arreglo de  $V_B$  a  $V_A$ .
- 3)  $\Delta P = P(i) - P(i-1) < 0$  y  $\Delta V = V(i) - V(i-1) > 0$ . En este caso la variación de potencia ( $\Delta P$ ) es negativa y la variación de tensión ( $\Delta V$ ) es positiva, por lo que según la figura 7, este es el caso de una transición en el voltaje del arreglo de  $V_C$  a  $V_D$ .
- 4)  $\Delta P = P(i) - P(i-1) > 0$  y  $\Delta V = V(i) - V(i-1) < 0$ . En este caso la variación de potencia ( $\Delta P$ ) es positiva y la variación de voltaje ( $\Delta V$ ) es negativa, entonces de acuerdo a la figura 7, este es el caso de una transición en el voltaje del arreglo de  $V_D$  a  $V_C$ .

Después de muchas iteraciones, el algoritmo P&O (figura 8) debería obtener el MPP y alcanzar el estado estacionario. Sin embargo, no se obtiene un MPP constante puesto que el algoritmo produce oscilaciones de voltaje alrededor del  $V_{MPP}$  en cada nueva iteración, lo que evita una operación relativamente estable en el MPP.

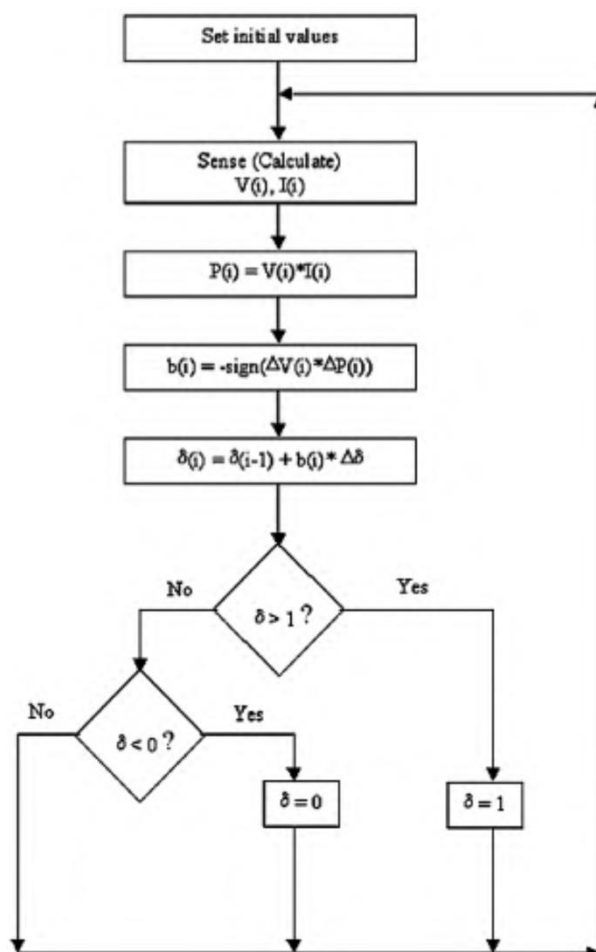
### Figura 7

*Curva característica PV para analizar el comportamiento del algoritmo MPPT P&O.*



### Figura 8

*Diagrama de flujo del algoritmo MPPT P&O.*



## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El algoritmo P&O MPPT se ha vuelto popular especialmente para aplicaciones de bajo costo debido a su facilidad de implementación y baja complejidad. Sin embargo, este algoritmo presenta dos inconvenientes que están relacionados con la eficiencia en arreglo fotovoltaico y la falta de un buen seguimiento del MPP.

El algoritmo P&O MPPT provoca, en cada ciclo del algoritmo, una nueva perturbación en la tensión del arreglo fotovoltaico, lo que a su vez provoca que esta tensión nunca coincida, en el funcionamiento en régimen permanente, con el voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ). En otras palabras, el algoritmo P&O provoca oscilaciones en torno al MPP del arreglo fotovoltaico y por lo tanto la eficiencia, que se define como la relación entre la energía de salida real del arreglo y la energía máxima que el arreglo podría producir (Femia, Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2005, p .964), se ve afectada. Además, el P&O MPPT presenta otro problema relacionado con las rápidas variaciones de irradiancia

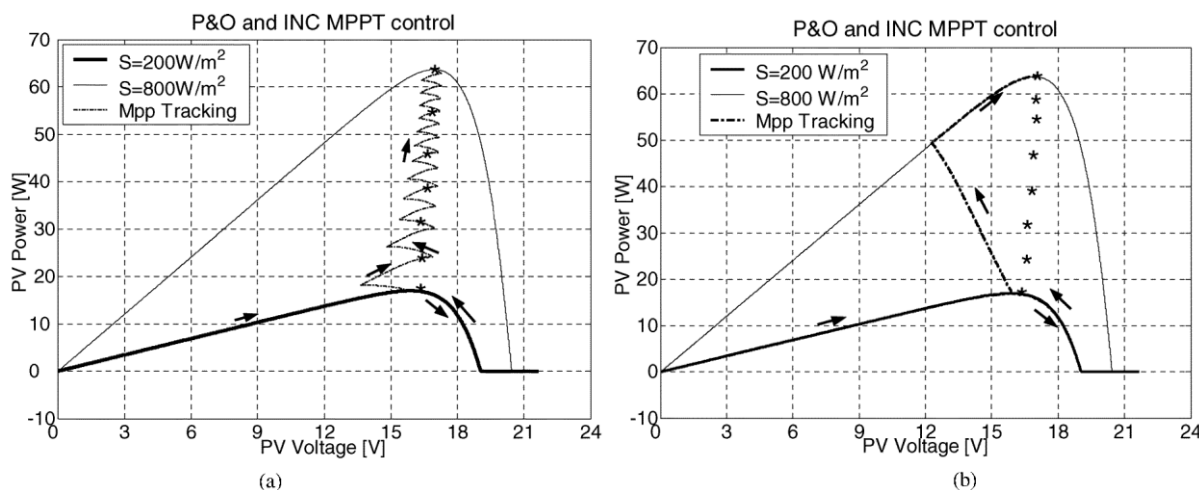
en el arreglo. Durante ese tipo de condiciones atmosféricas, el algoritmo generalmente deja de rastrear el MPP hasta que las condiciones atmosféricas se estabilizan nuevamente.

Las figuras 9(a) y 9(b), muestran los problemas antes mencionados relacionados con el P&O MPPT, mostrando el desempeño del algoritmo al rastrear el MPP con condiciones atmosféricas variables lentas como se muestra en la figura 9(a) y rápidas como lo indica la figura 9(b). Como se puede ver en la figura 9(a), el algoritmo P&O MPPT rastrea el MPP, pero nunca estabiliza la potencia del arreglo en el MPP en estado estable (hay oscilaciones), por lo tanto, la eficiencia del arreglo se ve afectada. La Figura 9(b) por otro lado, indica que, con cambios rápidos en las condiciones atmosféricas, este algoritmo falla en el seguimiento del MPP.

Estos dos inconvenientes del algoritmo P&O MPPT se pueden minimizar modificando el código del algoritmo. En la literatura existen muchos procedimientos para obtener versiones “modificadas” del algoritmo P&O para mejorar su eficiencia y seguimiento del rendimiento. En ese sentido, el enfoque propuesto para trabajos futuros sería estudiar el algoritmo P&O “modificado” más adecuado considerando dos aspectos importantes para el diseño de sistemas fotovoltaicos que son: facilidad de implementación y mejora de la eficiencia.

### Figura 9

Camino de la potencia proporcionada por el arreglo fotovoltaico controlado por el P&O MPPT: (a) variaciones lentas de las condiciones atmosféricas, (b) variaciones rápidas de las condiciones atmosféricas.



## CONCLUSIONES

Este artículo ha expuesto algunos fundamentos importantes de los sistemas fotovoltaicos, especialmente centrados en los efectos de la temperatura y la radiación solar sobre el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. Se determinó que la potencia recibida por una carga que está directamente acoplada a un arreglo fotovoltaico no coincide necesariamente con la potencia máxima que es posible extraer del arreglo. Por lo tanto, la potencia del arreglo fotovoltaico debe controlarse en el tiempo para obtener su máxima eficiencia. Como se estudió en este artículo, el algoritmo P&O MPPT ha sido diseñado para hacerlo así. Sin embargo, este algoritmo demuestra algunos inconvenientes durante cambios rápidos en las condiciones atmosféricas (temperatura e irradiancia). Se deduce entonces, que el algoritmo P&O podría ser modificado (mejorado) con el fin de eliminar considerablemente estos inconvenientes. Para trabajos futuros, estas mejoras deseables en el algoritmo P&O MPPT se pueden conseguir al encontrar un algoritmo P&O “modificado” que cumpla principalmente con dos parámetros fundamentales del diseño de los sistemas fotovoltaicos que son: facilidad de implementación y eficiencia mejorada.

## REFERENCIAS

- ALQahtani, A. H. (2012, 28-31 May 2012). *A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using matlab*. Paper presented at the 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics.
- Enrique, J. M., Andújar, J. M., & Bohórquez, M. A. (2010). A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 84(1), 79-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.011>
- Enrique, J. M., Duran, E., Sidrach-de-Cardona, M., Andujar, J. M., Bohorquez, M. A., & Carretero, J. (2005, 3-7 Jan. 2005). *A new approach to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules by using DC-DC converters*. Paper presented at the Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963-973. doi:10.1109/TPEL.2005.850975
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2022). Characteristic Resistance. Retrieved from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/characteristic-resistance>
- Krismadinata, Rahim, N. A., Ping, H. W., & Selvaraj, J. (2013). Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 537-546. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>
- Messenger, R. A., & Ventre, J. (2004). *Photovoltaic Systems Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Patel, M. R. (2006). *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Solar Electricity*. (1997). (T. Markvart Ed.). Chichester, England: J. Wiley and Sons.
- Tsai, H.-L., Tu, C. S., & Su, Y. (2008, October 22-24). *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB / SIMULINK*. Paper presented at the Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008, San Francisco.