

MPPT CONTROL STRATEGIES APPLIED ON A DC/DC BOOST CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ESTRATEGIAS DE CONTROL MPPT APLICADAS EN UN CONVERTIDOR DC/DC TIPO BOOST PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Heynler Acevedo Meza, José L. Mendoza García, MSc. Ing. Sergio B. Sepúlveda Mora

Universidad Francisco de Paula Santander, grupo de Investigación GIDMA
Departamento de Electricidad y Electrónica, Cúcuta, Norte de Santander,
Colombia. Tel.: 57-7-5776655, Ext. 202.
E-mail: {heynlernorbeyam, joseluismga, sergio.sepulveda}@ufps.edu.co

Resumen: Se desarrolló el estudio e implementación de algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia mediante el microcontrolador PIC16f877A, el cual ejerce control sobre un convertidor DC/DC tipo boost. El sistema fue diseñado para garantizar una alta eficiencia, utilizando la técnica de PWM de una señal de 30 kHz. Con el fin de validar los resultados experimentales, se llevó a cabo el análisis del sistema mediante el software Matlab/Simulink.

Palabras clave: Conductancia incremental, convertidor boost, MPPT, perturbar y observar, sistema fotovoltaico.

Abstract: We developed and implemented maximum power point tracking algorithms using PIC16f877A microcontroller, which controls a boost converter. The system was designed for high efficiency, and we used a 30 kHz PWM signal. In order to validate the experimental data, we performed an analysis with Matlab/Simulink software.

Keywords: Incremental conductance, boost converter, MPPT, perturb and observe, photovoltaic system.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación y aprovechamiento de las energías renovables en diversas partes del mundo ha tenido gran acogida por ser fuentes alternativas y limpias que permiten el suministro de energía sin causar grandes daños al medio ambiente, como sí lo hace el uso de recursos fósiles (Díaz y Díez, 2007).

Una de las principales soluciones a estos problemas es el aprovechamiento de la energía solar por ser una fuente que tiene ventajas con respecto a otros tipos de energía como la eólica (Leal y Hernández, 2013), entre ellas su naturaleza renovable e inagotable.

La energía proveniente del Sol puede ser captada y transformada en forma de calor (energía térmica) o electricidad (energía fotovoltaica) y ser entregada a la red de distribución (Alvares y Arango, 2013). La energía fotovoltaica tuvo su inicio en el año 1954 donde investigadores de los laboratorios Bell desarrollaron la primera celda solar usando silicio cristalino basado en el efecto fotoeléctrico en donde aprovechan la energía de los fotones provenientes del Sol (Chapin, Fuller y Pearson, 1954).

Sin embargo, las características eléctricas en los terminales del panel no son suficientes para alimentar las cargas convencionales debido a los bajos niveles de tensión que presentan. Esto genera la necesidad de procesar y transformar esa energía

en niveles adecuados con la mayor eficiencia posible. Los paneles solares presentan baja eficiencia energética, sumado a los altos costos de implementación es necesario la aplicación de estrategias tecnológicas para operar continuamente los módulos fotovoltaicos en el punto de máxima potencia (PMP) independiente-mente de las variaciones en los niveles de radiación y temperatura; además existen sistemas que permiten realizar el control y supervisión del PMP basados en sistemas mecánicos (Vides, Pardo y Torres, 2014).

Con base en lo expuesto anteriormente, el principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de estrategias de control para la máxima extracción de potencia de los módulos fotovoltaicos utilizando un convertidor DC/DC que permita elevar la tensión a niveles adecuados para la conexión con inversores DC/AC.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema desarrollado se muestra en la figura 1 el cual se compone de tres bloques principales: un panel solar que actúa como fuente de entrada; el convertidor DC/DC y el controlador que permite el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

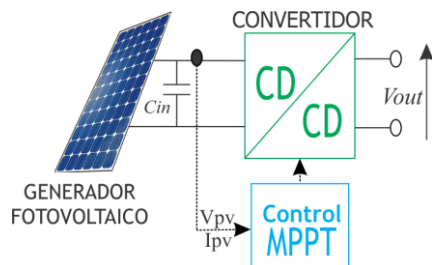


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

3. DESARROLLO METODOLÓGICO

Las celdas solares poseen la característica de producir energía eléctrica al ser expuestas a la radiación solar (Huerta, Mata y Estudillo, 2016). En el desarrollo de este trabajo se utilizó un panel solar de 245W del fabricante Yingli Solar, cuyas curvas características de I-V y P-V se muestran en la Figura 2.

En la figura 2a, se evidencia el punto de operación de máxima potencia sobre la curva I-V ante niveles variantes de radiación y temperatura y la figura 2b, destaca la relación del voltaje y la potencia. Como

se puede observar en ambas figuras, la radiación y temperatura son factores importantes en la búsqueda del punto de máxima potencia debido a que inciden de manera directa en la cantidad de potencia que genera el panel fotovoltaico.

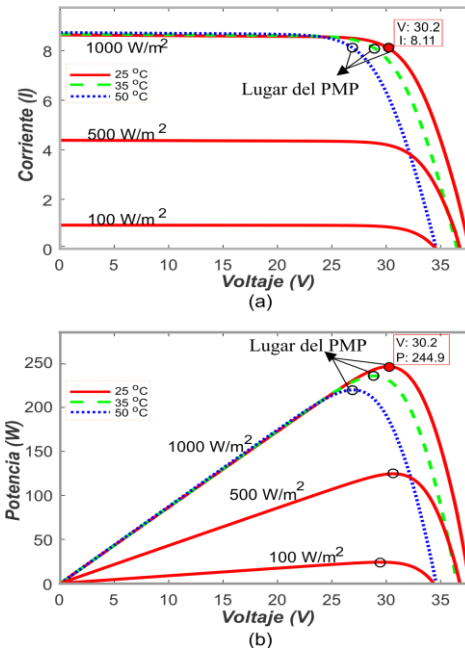


Fig. 2. Curvas características panel solar: (a). Curva I-V. (b). Curva P-V.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 1 se dan a conocer los valores característicos de funcionamiento del panel solar, los cuales son usados en el diseño del convertidor DC-DC y los algoritmos MPPT.

Tabla 1. Parámetros de operación del panel solar Yingli Energy 245W.

Parámetro	Valor
Máxima Potencia	245 W
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	37.8 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	8.63 A
Voltaje en punto de máxima potencia (V_{mp})	30.2 V
Corriente en punto de máxima potencia (I_{mp})	8.11 A

Para aplicar los algoritmos de MPPT y poder acondicionar la tensión del panel solar, se analizan algunas topologías de convertidores conmutados. Entre ellas se encuentran los convertidores tipo buck, que permiten reducir la tensión de entrada, el tipo boost que eleva la misma, el convertidor tipo buck-boost que pueden elevar o reducir la tensión de entrada y el convertidor Flyback que utiliza

aislamiento galvánico pero el uso del transformador eleva el costo del convertidor.

Debido a que la tensión en los terminales del panel no supera los 40 voltios, y en este caso se requiere obtener niveles de tensión elevados para realizar la futura conexión a la red a través de inversores como los propuestos en Álvarez, García y Torregroza (2014), se selecciona el convertidor *boost* o elevador de tensión, debido a que permite elevar la tensión del panel utilizando un circuito relativamente sencillo con pocos elementos en comparación con las otras topologías; además, es de bajo costo y fácil implementación. En la figura 3, se presenta el circuito del convertidor elevador, el cual fue diseñado para garantizar su operación en el modo de conducción continuo (MCC).

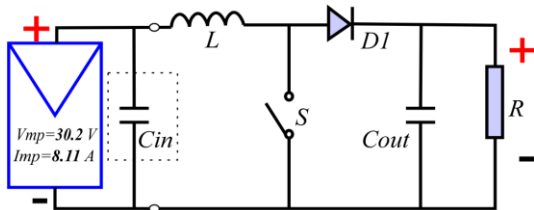


Fig. 3. Convertidor BOOST.

Fuente: Adaptado de: D'Alessio, González y Cáceres (2014)

3.1 Diseño del convertidor Boost

El funcionamiento del convertidor tipo *Boost* se clasifica de acuerdo al modo de operación del inductor, el cual puede ser en modo continuo (MCC) o en modo discontinuo (MCD), por ser éste el elemento encargado de elevar la corriente para almacenarla en el capacitor y así poder generar elevados voltajes a la salida y entregarlos a la carga (Valderrama, Moreno y Vega, 2011).

Este caso se enfoca en el modo de operación continua MCC, para mantener un rango de corriente máxima y mínima sobre el inductor evitando que éste tome un valor de cero manteniendo un régimen permanente de operación. Basados en la potencia suministrada por el panel solar y el modo de operación continuo, se diseña el convertidor Boost siguiendo las especificaciones propuestas por D'Alessio, González y Cáceres (2014) y Díaz (2011), en donde se destaca el diseño del inductor y el capacitor acorde a la frecuencia de conmutación, el rizado de corriente y voltaje de inductor y el capacitor respectivamente. Las ecuaciones (1) y (2) permiten el cálculo de estos componentes.

$$L_{min} > \frac{V_{pv} * D}{2 * I_{pv} * f_{sw}} \quad (1)$$

$$C > \frac{I_{out} * D}{f_{sw} * \Delta V_{out}} \quad (2)$$

Donde I_{pv} y V_{pv} son la corriente y voltaje del panel, D es el ciclo de trabajo, f_{sw} es la frecuencia de conmutación, I_{out} es la corriente en la carga y ΔV_{out} es el voltaje rizo deseado en el capacitor. La función de transferencia que permite establecer la relación de la tensión de entrada y salida del convertidor se muestra en la ecuación (3) donde 'D' representa el ciclo de trabajo del convertidor y V_{out} es el voltaje de salida.

$$V_{out} = \frac{V_{pv}}{1 - D} \quad (3)$$

3.2 Punto de transferencia máxima potencia

Un componente importante en los sistemas fotovoltaicos es el seguimiento del punto de máxima potencia, es por ello que durante años se han desarrollado métodos o algoritmos para extraer la máxima energía entregada por los mismos a partir de controles directos e indirectos; las técnicas más utilizadas y difundidas en la literatura científica son las de *Perturbar y Observar* (Ruiz, Beristáin, Sosa y Hernández, 2010), *Conductancia Incremental* (Molina y Mercado, 2007) y (Azevedo, Calvancanti y Oliveira, 2008) y *Lógica difusa* (Robles y Villa, 2011). Además, existen sistemas de posicionamiento automático que permite ubicar al panel con un ángulo de incidencia solar de 90° para mejorar el rendimiento de estos módulos (Beleño, Pardo y Torres, 2013).

La generación de energía en el sistema fotovoltaico está sujeto a cambios en los niveles de radiación solar y temperatura, es por ello que estos algoritmos MPPT se enfocan en optimizar y aumentar la eficiencia del sistema fotovoltaico. En este caso se seleccionan las técnicas *Perturbar y Observar* (P&O) y el de *Conductancia Incremental* (*Incremental Conductance*, IC), por ser métodos de MPPT directos, además son los algoritmos más implementados, con mayor eficiencia y menor costo computacional, a diferencia de otros métodos como el de *lógica difusa*. El funcionamiento y aplicación de estos algoritmos se lleva a cabo para corregir el comportamiento no lineal del panel fotovoltaico ante los factores de radiación y temperatura variantes (Kasa, Iida y Majumdar, 2002).

3.2.1 Algoritmo perturbar y observar (P&O).

El método de P&O se basa en la modificación de la relación de disparo o ciclo de trabajo (D) del convertidor boost el cual modifica el valor de la corriente suministrada por el panel fotovoltaico; este método consiste en realizar un seguimiento del voltaje de operación del panel (V_{pv}); por ejemplo, si se eleva el voltaje (perturbar) y la potencia extraída por la carga se incrementa (observar) significa que el punto de operación se ha movido hacia el punto de máxima potencia, entonces el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección; de forma contraria, si la potencia extraída por la carga disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta al punto de máxima potencia, por tal motivo el voltaje de operación deberá ser perturbado de forma contraria a la que se tenía (Ruiz, Beristáin, Sosa y Hernández, 2010), como se evidencia en el diagrama de flujo de la figura 4.

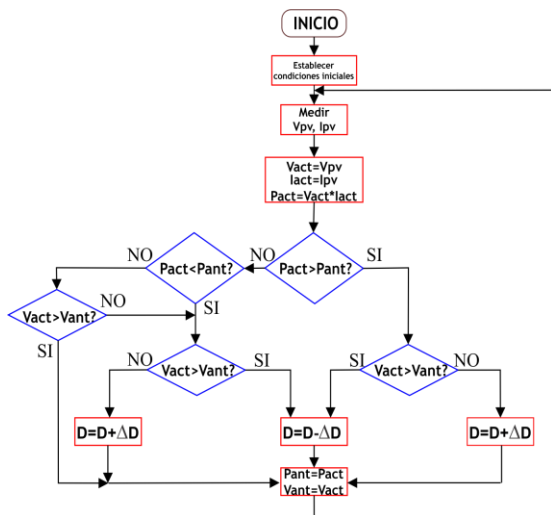


Fig. 4. Diagrama de flujo del algoritmo perturbar y observar (P&O). Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Algoritmo conductancia incremental (IC).

El método de conductancia incremental consiste en el ajuste del ciclo de trabajo (D), del convertidor boost aumentando o disminuyendo de acuerdo a la ecuación (4), donde se relaciona la derivada de la potencia con respecto al voltaje del panel fotovoltaico (Mohammed y Devaraj, 2015).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$$

$$\frac{dV_{pv} I_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + \left[\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right] V_{pv} =$$

$$I_{pv}(n) + \left[\frac{I_{pv}(n) - I_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)} \right] V_{pv}(n) = 0$$

$$\frac{I_{pv}(n)}{V_{pv}(n)} + \frac{d(I_{pv})}{dV_{pv}} = 0$$

$$\frac{d(I_{pv})}{dV_{pv}} = - \frac{I_{pv}(n)}{V_{pv}(n)} \quad (4)$$

Apartir de la ecuación (4), se deduce lo siguiente, cuanto más lejos se está del punto de máxima potencia, mayor es dP_{pv}/dV_{pv} , lo que ocasiona una variación en el ciclo de trabajo (D) buscando ajustar la tensión del módulo para que opere en $dP_{pv}/dV_{pv} = 0$ (Mejía, Torres, y Díaz, 2014), este cambio dinámico del ciclo de trabajo se ve reflejado en el diagrama de flujo de la figura 5.

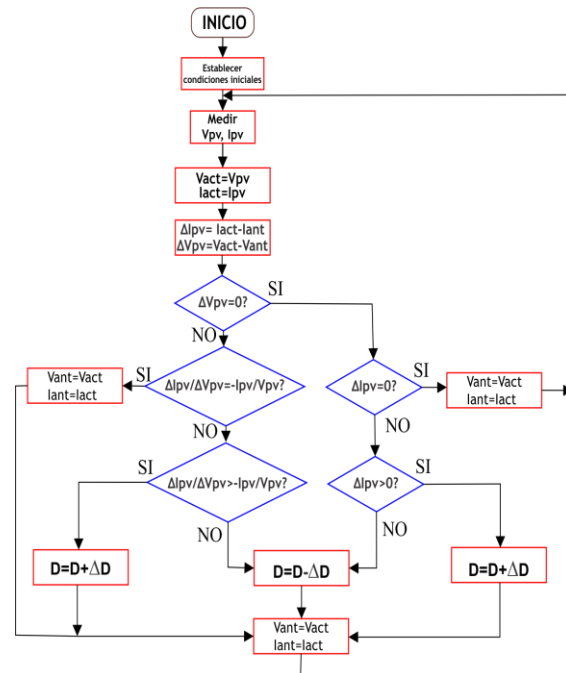


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo conductancia incremental (IC). Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS

El diseño y selección del modo de operación del convertidor *boost*, realizado de forma adecuada y eficiente fue de gran importancia en el sistema fotovoltaico, debido a que éste es el encargado del

proceso de conversión y elevación de voltajes, por lo que un mal diseño del mismo representaría un aumento de pérdidas de potencia en cada uno de los dispositivos y el sistema en general. Los principales parámetros usados en el diseño del convertidor son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de diseño del convertidor boost.

Parámetro	Valor
Voltaje entrada	30 V
Voltaje de salida	90 V
Inductancia	2.5 μ H
Ciclo de trabajo (D)	0.67
Frecuencia de conmutación	30 kHz
Potencia entrada	245 W
Potencia salida	245 W

Al considerar las pérdidas en los dispositivos utilizados, la eficiencia teórica del convertidor puede ser aproximada como se muestra en la ecuación (5) (Díaz, 2011).

$$\eta = \frac{V_{out} * (1-D)}{V_{pv}} \quad (5)$$

Donde D es el ciclo de trabajo del convertidor, el voltaje de salida V_o (incluyendo pérdidas) es de 87.52 V y el voltaje de entrada $V_{pv} = 30$ V.

Reemplazando estos valores en la ecuación 5, se alcanza una eficiencia del 96.26% bajo condiciones de operación nominal, la cual es considerablemente alta en estos convertidores. Las pruebas experimentales arrojan una eficiencia de 94.52%, esto se puede observar en la figura 6 donde el ciclo de trabajo utilizado es de 0.32, el voltaje de entrada de 30 V y el voltaje de salida obtenido es de 41.7 V. La diferencia en la eficiencia es del 1.74 % con respecto al diseño teórico. Estas pruebas también se realizaron variando el ciclo de trabajo desde 0.2 hasta 0.8 donde siempre se obtuvo una eficiencia superior al 94% en cualquier caso.

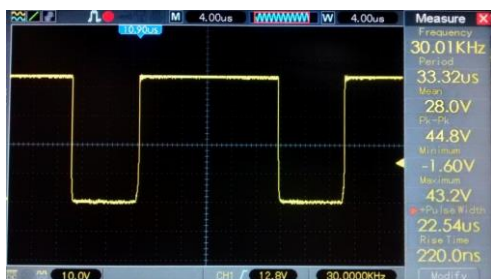


Fig. 6. Onda de voltaje durante el proceso de conmutación del mosfet. $V_{out}=41.7v$, $D=0.32$

Una vez conocido el comportamiento del convertidor e implementado los algoritmos MPPT en el microcontrolador PIC16f877A, se realizaron pruebas para diferentes condiciones de radiación medidas con el piranometro SP-110 del fabricante Apogee Instruments, donde se obtuvieron los diferentes niveles de tensión y corriente tanto en la entrada como en la salida del convertidor con el fin de validarlos con las simulaciones realizadas y los datos obtenidos experimentalmente de las curvas I-V del panel solar utilizado. En la figura 7 se observa el comportamiento del algoritmo P&O ante escalones en la radiación (800 W/m^2 , 500 W/m^2 y 600 W/m^2) y condiciones similares en la carga. En dicha figura se muestra la potencia ideal ante las variaciones mencionadas anteriormente P_{max} , la potencia en los terminales del panel P_{pv} y la potencia de salida entregada a la carga impuesta al convertidor, P_{out} .

En el primer intervalo de tiempo de la figura 7, comprendido entre 0.8 y 1 segundos el panel solar entrega una potencia de 197.7 W, de la cual son transferidos 190 W a la carga mediante el algoritmo P&O, esto representa una eficiencia del 96.1% en la transferencia de potencia hacia la carga. El algoritmo de conductancia incremental (figura 8) fue evaluado ante condiciones similares de radiación y carga en donde se percibe una pequeña mejora de 1W en la cantidad de potencia entregada a la carga equivalente a una eficiencia del 96.6%.

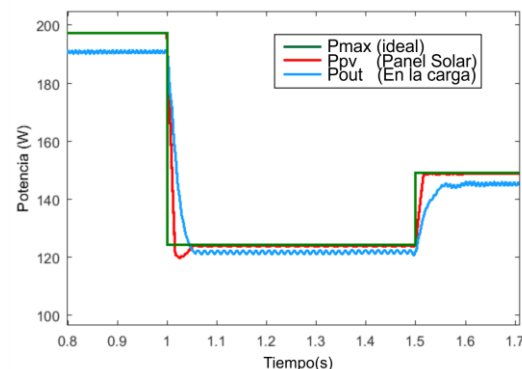


Fig. 7. Comportamiento de algoritmo P&O ante variaciones en la radiación.

Se puede notar que existen pérdidas de potencia en el sistema convertidor, las cuales están asociadas a las pérdidas causadas por los transitorios en el proceso de conmutación del mosfet y al consumo de potencia del sistema de control. En la figura 9 se observa el tiempo de respuesta y las oscilaciones del algoritmo P&O alrededor del punto de transferencia de máxima potencia.

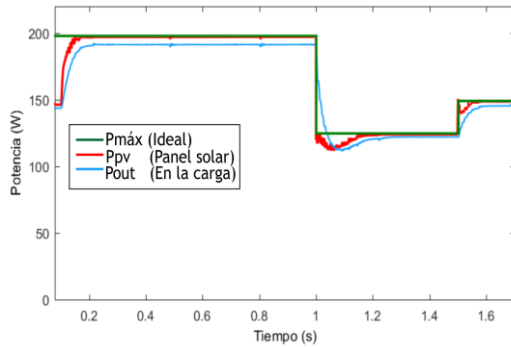


Fig. 8. Comportamiento de algoritmo IC ante variaciones en la radiación.

Esto se debe a que el tamaño de la perturbación realizada incide de manera directa en el comportamiento del algoritmo, si la perturbación es demasiado pequeña el tiempo en alcanzar el PMP aumenta y las oscilaciones en éste se ven atenuadas (figura 9a); por otro lado, si la perturbación es demasiado grande (figura 9b) el tiempo en alcanzar el PMP se reduce, pero las oscilaciones en torno a éste aumentan.

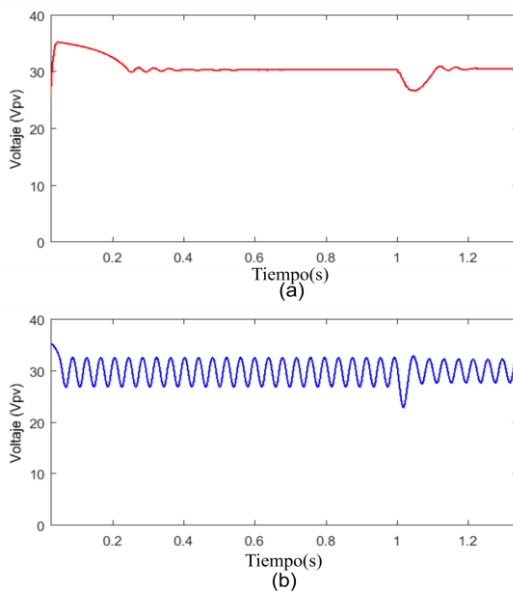


Fig. 9. Comportamiento de algoritmo P&O: (a) Perturbación pequeña. (b) Perturbación grande.

Los resultados arrojados por el algoritmo de conductancia incremental son mostrados en la figura 8 en donde se evidencia que el tiempo en alcanzar el PMP y las oscilaciones entorno a éste son reducidas.

Realizando la comparación entre ambos algoritmos MPPT (Figura 10), se observa que los dos presentan resultados satisfactorios en el seguimiento y entrega de la máxima potencia. Sin

embargo, en el método de conductancia incremental se percibe un menor tiempo de convergencia hacia los diferentes puntos de máxima potencia, con una oscilación relativamente menor en la potencia entregada cuando ocurren cambios rápidos en los niveles de radiación y temperatura con menos errores que el algoritmo P&O.

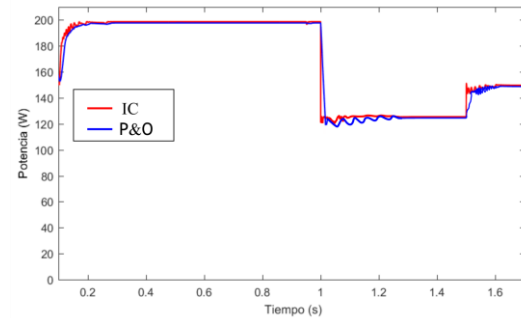


Fig. 10. Comparación de potencia extraída del panel solar con los algoritmos P&O e IC.

5. CONCLUSIONES

Los algoritmos MPPT implementados en el convertidor *Boost*, presentaron una respuesta satisfactoria al ser comparados los resultados obtenidos experimentalmente con los simulados, alcanzando una eficiencia superior al 96%, lo que ratifica la importancia de incluir estos algoritmos para aprovechar al máximo la potencia que generan los módulos fotovoltaicos; cabe señalar que los algoritmos responden de manera correcta en la aplicación propuesta para niveles de radiación superiores a los $100\text{W}/\text{m}^2$.

Al momento de presentarse cambios bruscos en las condiciones ambientales a las que está sometido el panel fotovoltaico, el algoritmo de conductancia incremental presenta el mejor rendimiento dinámico debido a su tiempo de convergencia casi instantáneo y una reducción notable de las oscilaciones hacia el punto de máxima potencia, en comparación con el tiempo y oscilaciones presentes en el algoritmo de perturbar y observar.

Se comprobó que en el algoritmo de perturbar y observar, el tamaño de la perturbación afecta directamente el tiempo de convergencia al PMP como se evidencia en la figura 9; si la perturbación es pequeña, el tiempo en alcanzar el PMP es muy grande, pero se reducen las oscilaciones en el mismo, lo cual es bueno cuando las condiciones meteorológicas son casi constantes en el día; por otra parte, si la perturbación es muy grande el

tiempo en alcanzar el punto de máxima potencia es pequeño, pero agregando oscilaciones al sistema en estado estable.

A partir de la simulación de los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia, se pudo observar que el algoritmo de conductancia incremental extrae un porcentaje mayor de potencia en comparación con el algoritmo de perturbar y observar, como se evidencia en la figura 10.

REFERENCIAS

- Álvarez L, R. y Arango M, A. (2013). “Implementación de la generación fotovoltaica como respaldo ante fallos en la red de distribución”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol 2, No. 22, p 14-19.
- Álvarez L, R., García A, M. y Terregroza E, A. (2014). “Convertidores fotovoltaicos en módulos integrados basados en inversores de fuente-semi-cuasi $-z$: un nuevo esquema de control por modos deslizantes”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol 1, N° 23, p 61-66.
- Azevedo G, Calvancanti M y Oliveira K, (2008) “Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems”. *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*
- Beleño S, K., Pardo G, A. y Torres C, I. (2014). “control aplicado a una estructura mecánica para el posicionamiento automático de módulos fotovoltaicos”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol 2, N° 22, p 138-144.
- Chapin D, Fuller C. y Pearson G, (1954) “A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power.” *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, No. 5, p.676-677.
- D’Alessio L, González L. y Cáceres R, (2014) “Diseño y construcción de un convertidor boost de pequeña potencia con propósitos educativos y de investigación”. *Avances en ciencias e ingeniería*, Vol. 6, N° 2, p. C15-C20
- Díaz H. y Díez F, (2007) “Análisis, Modelado, Simulación y Validación de un sistema de generación de energía solar autónomo.”
- Díaz N, (2011), “Control de un convertidor estático en sistemas Fotovoltaicos interconectados”, universidad nacional de Colombia.
- Huerta E, Mata R. y Estudillo J, (2016). “Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar.” *Acta Universitaria*, Vol. 26, No 1, p.30-34.
- Kasa N, Iida T, y Majumdar G, (2002). “Robust Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System.” *Power Conversion Conference, Osaka-2002*.
- Leal G, F. y Hernandez C, M. (2013). “estudio del potencial eólico y solar de Cúcuta, Norte de Santander”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol 2, N° 22, p 27-33.
- Mejía D, Torres I, y Díaz J, (2014). “Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos.” *El Hombre y la Máquina*, No 45, p 44-55.
- Mohammed S, y Devaraj D, (2015). “Simulation of Incremental Conductance MPPT based Two phase Interleaved Boost Converter using MATLAB/Simulink.” *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and communication Technologies (ICECCT)*.
- Molina M. y Mercado P, (2007). “Análisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica”. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, Vol. 11.
- Robles C y Villa G, (2011). “Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa”, *Revista electrónica de estudios telemáticos*, Vol 10, N° 2, p 54-72.
- Ruiz L, Beristáin J, Sosa I. y Hernández J, (2010) “Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar.” *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, Vol. 8, No. 1.
- Valderrama F, Moreno H. y Vega H, (2011). “Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost”. *Ingenium*, Vol. 12, No. 24, p.44-55.
- Vides H, C., Pardo G, A. y Torres C, I. (2013). “Módulo robótico de seguimiento solar usando mppt supervisado y controlado vía Ethernet”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol 1, N° 23, p 112-119.