

## Analysis of a Multiport DC/DC Converter used for energy extraction from a photovoltaic system.

L. I. de los Reyes-Suárez\*, A. E. Mares-Gardea\*\*, J. García-Morales\*\*, M. Adam-Medina\*\*,  
M. Cervantes-Bobadilla\*\*\*, G. V. Guerrero-Ramírez\*\*

\* Posgrado del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,  
Int. Internado Palmira S/N, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México

\*\* Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,  
Int. Internado Palmira S/N, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México

\*\*\* Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp-IICBA)/UAEM,  
Av. Universidad 1001, Chamilpa, 62209 Cuernavaca, Morelos, México

---

**Abstract:** In this paper, a simulation analysis of a multiport DC/DC converter with Boost topology has been carried out. The converter topology consists of two inputs and one output. This analysis aims to obtain the first version to cope with partial shading in a PV system using a multiport converter. The analysis shows the multiport converter's functionality to track the maximum power point of the two PV panels using the Perturb and Observe (P&O) algorithm in normal irradiance conditions and partial shading situations. A switching time of the switches was established to perform individual power extraction from each panel connected to each port individually. These findings will contribute to the feasibility of the proposed methodology for efficient energy extraction using multiport converters as another alternative to cope with partial shading.

*Keywords:* PV systems, multiport converter, Boost, MPPT, P&O, partial shading, Simulink.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de las energías renovables ha logrado gran impacto en el bienestar de la humanidad por su riqueza inagotable y, al encontrarse en cualquier parte de nuestro planeta, son más accesibles para las personas con bajos recursos (Güney, 2019). En el año 2021, el 29.5 % de la energía generada en México provino de fuentes limpias, presentando un incremento del 2.9% respecto al año 2020. Por su parte, la generación fotovoltaica total durante el año 2021, representó el 6.15% de la generación total de energía eléctrica, percibiendo un incremento del 27.5% respecto a la generación fotovoltaica total de 2020 (SENER, 2022). Como se puede apreciar la generación solar fotovoltaica en los últimos años está experimentando un incremento exponencial, sin embargo, entre sus principales limitaciones se encuentra su dependencia de las condiciones ambientales, propiedad no lineal y disponibilidad intermitente (Zhu & Xiao, 2020). En particular el sombreado parcial derivado de obstáculos como árboles, edificios, nubes y la acumulación de polvo, son elementos que influyen en la cantidad de energía generada por los sistemas fotovoltaicos.

Para abordar el problema del sombreado parcial se han utilizado técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés), diodos de derivación y reconfiguración del campo fotovoltaico. Debido al impacto que tiene la generación fotovoltaica en la matriz energética actual, este trabajo está enfocado en desarrollar

otra alternativa para solucionar esta problemática, empleando un convertidor DC/DC multipuerto con topología Boost, con el fin de extraer la máxima energía de dos paneles fotovoltaicos utilizando el algoritmo Perturbar y Observar (P&O) en condiciones normales de irradiancia y situaciones de sombra parcial.

A continuación, se describen las etapas que componen el sistema de cosecha de energía solar fotovoltaico en estudio. Posteriormente se analiza y valida el comportamiento de un convertidor multipuerto DC/DC controlado por el algoritmo P&O para extraer la potencia de los paneles fotovoltaicos conectados por cada puerto del convertidor en condiciones de irradiancia solar uniforme y no uniforme.

### 2. METODOLOGÍA

#### 2.1 Panel solar fotovoltaico.

Una célula fotovoltaica está formada por una unión p-n, dos electrodos, una rejilla conductora y un revestimiento antirreflectante. Estas células realizan la función de convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica, basándose en el efecto fotovoltaico. La tensión generada por una célula fotovoltaica suele ser inferior a 0,6 V y no es suficiente para las aplicaciones prácticas. Por tal motivo, estas células se conectan en serie para obtener tensiones más elevadas y en paralelo para conseguir una mayor corriente. El conjunto de células fotovoltaicas conectadas en serie y en

paralelo se le denomina panel solar fotovoltaico. La unión en serie y paralelo de estos paneles se le llama parques o granjas fotovoltaicas, las cuales son afectadas por los sombreados parciales.

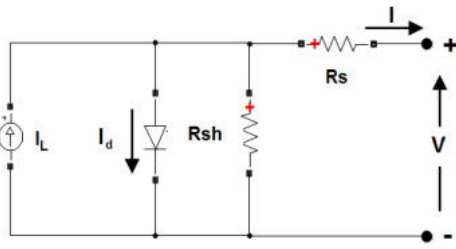


Figura 1. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.

Una célula fotovoltaica se puede representar mediante el circuito equivalente de la Fig. 1. Las características básicas de corriente-tensión del módulo fotovoltaico pueden expresarse de la siguiente manera (Granda-Gutiérrez et al., 2013; Park et al., 2014; Petreuş et al., 2008; Pukhrem, 2013):

$$I_s = N_p \left[ \frac{G}{G_{ref}} * (I_{sc} + k_l * (T_{op} - T_{ref})) - I_0 * \left[ e^{\frac{q*(V_s + R_s*I_c)}{a*k*N_s*T_{op}}} - 1 \right] \right] \quad (1)$$

Donde:

$I_s$ : corriente entregada por el panel.

$N_p$ : número de células conectadas en paralelo.

$G$  y  $G_{ref}$ : radiación recibida y radiación de referencia ( $W/m^2$ ).

$I_{sc}$ : corriente nominal de cortocircuito.

$k_l$ : constante de dependencia con la temperatura de operación de  $I_{sc}$ .

$T_{op}$  y  $T_{ref}$ : temperatura operacional y de referencia.

$I_0$ : corriente de saturación inversa.

$q$ : carga del electrón ( $1.602*10^{-19}$  C).

$V_s$ : voltaje del panel fotovoltaico.

$R_s$ : resistencia intrínseca de la celda.

$I_c$ : corriente total producida por la celda.

$a$ : factor de idealidad del diodo (1.0~1.5).

$k$ : constante de Boltzmann ( $1.38*10^{-23}$  J/K).

## 2.2 Efectos del sombreado parcial.

El sombreado parcial en sistemas fotovoltaicos se refiere a la situación en la que ciertas secciones del arreglo fotovoltaico no reciben la radiación solar completa debido a la presencia de obstáculos como árboles, edificios, nubes o acumulación de polvo. Esto limita la capacidad del panel solar para captar eficientemente la radiación. En una cadena de módulos fotovoltaicos, cuando los paneles tienen diferentes corrientes

de cortocircuito, aquellos con una corriente más baja que el resto pueden revertir su polaridad y comenzar a absorber energía de los demás, lo que los lleva a operar en una región de saturación inversa. La energía absorbida por las células solares en condiciones de sombreado parcial se convierte en calor, lo que resulta en un aumento de la temperatura y posibles daños en las células. Este fenómeno se conoce como efecto de punto caliente. Para mitigar estos problemas, se utilizan comúnmente diodos de derivación conectados en paralelo a las células solares para limitar el voltaje inverso en las células sombreadas, reduciendo las pérdidas. Una de las limitantes de utilizar estos diodos es que cuando ocurre un sombreado parcial se limita la potencia generada por todo el conjunto fotovoltaico, creando varios máximos locales de potencia en la curva P-V (Fig. 2), por lo que no se aprovecha toda la energía generada en ese instante.

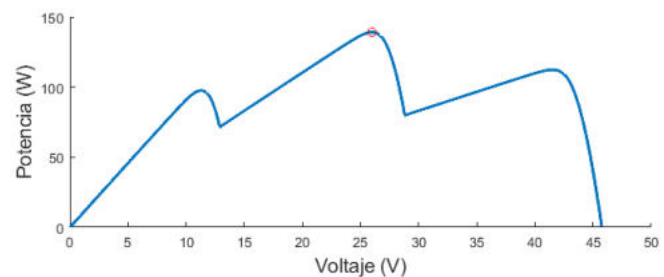


Figura 2. Curva P-V bajo irradiación solar no uniforme.

Para abordar los desafíos de eficiencia mencionados, se han creado metodologías que posibilitan el seguimiento del punto de máxima potencia con el fin de maximizar la generación de energía solar en presencia del sombreado parcial.

## 2.3 Técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés).

Para optimizar la generación de energía y la transferencia de potencia de un sistema fotovoltaico, se emplean diversas técnicas MPPT. Sin embargo, surge la confusión al momento de seleccionar el MPPT adecuado para configuraciones y condiciones específicas del sistema fotovoltaico, dado que cada método presenta sus propias ventajas y desventajas (Ali et al., 2020; Kebede & Worku, 2020; Sarvi & Azadian, 2022). Los MPPT en cuanto a la fiabilidad para trabajar bajo irradiación solar uniforme y no uniforme se clasifican en: algoritmos convencionales “online” y “offline”, como Perturbar y observar (P&O), Conductancia incremental (INC), Control de lógica difusa (FLC), Método de la célula piloto (PC), Método de tabla de consulta (LT) y Método de maximización de la tensión y la corriente de carga (LV & LC); algoritmos metaheurísticos como Optimización por enjambre de partículas (PSO), Redes neuronales artificiales (ANN), Optimización por colonia de hormigas (ACO) y Algoritmo genético (GA); y los algoritmos de optimización híbrida como Perturbar y Observar con Algoritmo Genético (P&O-GA), Perturbar y Observar con Optimización por enjambre de partículas (P&O-PSO), Conductancia

Incremental con Optimización por enjambre de partículas (INC-PSO), Red Neuronal Artificial Mejorada con Optimización por enjambre de partículas (IANN-PSO) (Ali et al., 2020).

El método seleccionado para este trabajo es el conocido como Perturbar y Observar (P&O), el cual es ampliamente utilizado en la práctica y reconocido por la mayoría de los expertos en la materia. Este método se basa en un enfoque de prueba y error con el objetivo de identificar y seguir el Punto de Máxima Potencia (MPP, por sus siglas en inglés). En cada ciclo, el controlador de seguimiento evalúa la corriente y la tensión generadas por el sistema fotovoltaico, y utiliza esta información para deducir la potencia real generada. A continuación, se realiza una perturbación en el punto de operación, variando la tensión de funcionamiento y controlando la respuesta de la potencia generada. Si la potencia aumenta, la próxima perturbación en la tensión de funcionamiento se realiza en la misma dirección. Por otro lado, si la potencia disminuye, la tensión de funcionamiento se perturba en dirección opuesta. Este proceso se repite hasta alcanzar el MPP (Ali et al., 2020; Karami et al., 2017). El diagrama de flujo del algoritmo P&O se muestra en la Fig. 3.

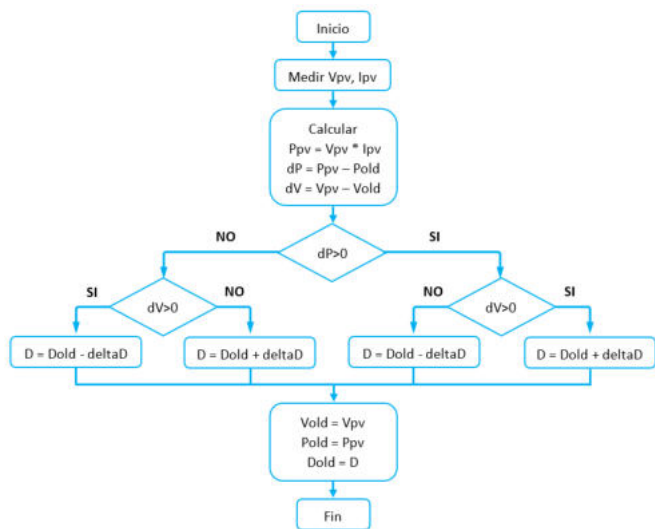


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.

#### 2.4 Convertidor multipuerto DC/DC.

Un convertidor multipuerto se define como un circuito que cosecha e integra la energía de múltiples fuentes y abastece al menos una carga, donde la regulación de potencia se realiza mediante controladores. En este sistema, toda la estructura se trata como un único convertidor de potencia. Entre las principales ventajas de utilizar un convertidor multipuerto tenemos el aumento de la eficiencia y la fiabilidad del sistema, flexibilidad en su operación y nos permite obtener un flujo de potencia unidireccional o bidireccional, útil para la carga de baterías (Rehman et al., 2015).

El convertidor multipuerto DC/DC de topología Boost con dos puertos de entrada y uno de salida se presenta en la Fig. 4. La topología Boost permite aumentar el voltaje de entrada variando el ciclo de trabajo del convertidor.

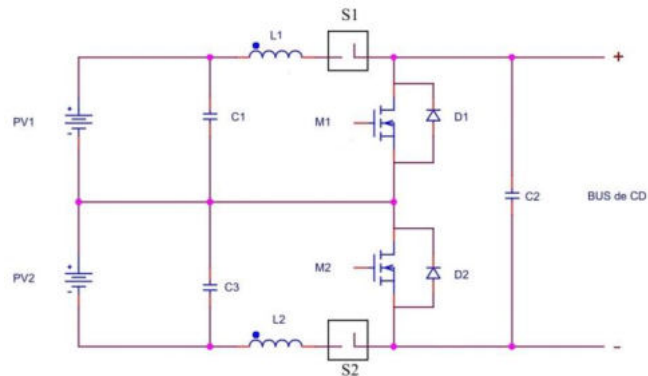


Figura 4. Topología Boost de tres puertos con Mosfet de reconfiguración.

Con el objetivo de extraer la energía de los paneles conectados por cada puerto del convertidor, se utilizan dos Mosfet S1 y S2, para indicar qué puerto está funcionando. De este modo, cuando S1 está activado se extrae la energía del panel PV1 por el puerto 1 mientras el puerto 2 está desactivado (S2=0). De modo contrario, cuando se activa S2 y S1 está abierto (S1=0), se extrae la energía del panel PV2 conectado por el puerto 2. Es importante aclarar que se debe dejar un margen de tiempo entre el switcheo de los interruptores para evitar el cortocircuito. La Tabla 1 muestra el estado de los Mosfet del convertidor multipuerto.

Tabla 1. Estado de los Mosfet de configuración.

Puerto	Mosfet				Topología
	S1	S2	M1	M2	
Puerto 1: PV1	1	0	1	0	Boost
Puerto 2: PV2	0	1	0	1	

### 3. CASO DE ESTUDIO

Los principales componentes del sistema fotovoltaico son los paneles fotovoltaicos y el convertidor multipuerto. A continuación, se describen las características principales que componen el sistema. Se emplearon dos paneles de la marca EPCOM modelo EPL33024. La Tabla 2 presenta sus principales parámetros.

Los parámetros del sistema se presentan en la Tabla 3. Con base en las características eléctricas del panel EPL33024 se realizó un análisis del convertidor multipuerto de topología Boost, con el fin de calcular los parámetros y el diseño del convertidor los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 2. Especificaciones del panel fotovoltaico EPCOM modelo EPL33024.

Parámetros	Valor
Potencia máxima en STC (P <sub>máx</sub> )	330 W
Eficiencia del módulo	17,01 %
Voltaje de máxima potencia (V <sub>mp</sub> )	37,87 V
Corriente de máxima potencia (I <sub>mp</sub> )	8,71 A
Voltaje de circuito abierto (V <sub>oc</sub> )	46,79 V
Corriente de cortocircuito (I <sub>sc</sub> )	9,18 A
Coefficiente de temperatura de P <sub>máx</sub>	-0,396 %/°C
Coefficiente de temperatura de V <sub>oc</sub>	-0,31 %/°C
Coefficiente de temperatura de I <sub>sc</sub> (k <sub>i</sub> )	+0,06 %/°C
Cantidad de células en serie (N <sub>s</sub> )	72
Condiciones Estándar de Medida (STC)	1000W/m <sup>2</sup> , 25°C

Tabla 3. Parámetros del sistema.

Parámetro	Potencia	Frecuencia	Voltaje en Bus DC	Voltaje en panel
Valor	330 W	100kHz	180 V	37.87 V

Tabla 4. Valores de los componentes del convertidor multipuerto.

Componentes del convertidor	Valor
Inductancias L1 y L2	343.308 μH
Capacitores de entrada (C1 y C3)	13.72 μF
Capacitor de salida (C2)	4.0211 μF

Una vez parametrizado el sistema, se procede al diseño del esquema de control. La Fig. 5 muestra el sistema creado en Matlab-Simulink, el cual está compuesto por dos paneles fotovoltaicos representados mediante el circuito equivalente, convertidor multipuerto y el algoritmo P&O.

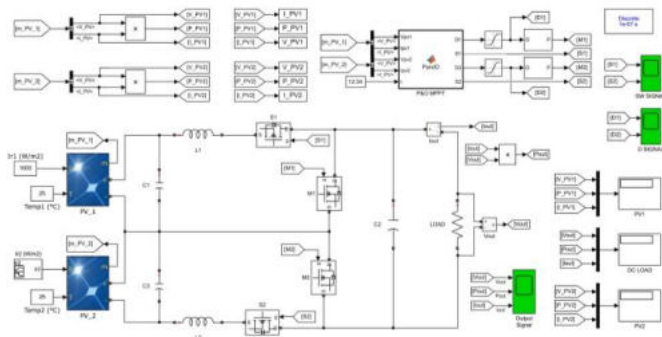


Figura 5. Representación del sistema de paneles fotovoltaicos acoplados a un convertidor multipuerto con MPPT simulado en Matlab Simulink.

## 4. RESULTADOS

En este apartado se presentan las gráficas obtenidas del sistema fotovoltaico conectado al convertidor multipuerto DC/DC tipo Boost. Las gráficas muestran el ciclo de trabajo determinado por el algoritmo P&O, el tiempo de activación de los Mosfet que controlan los puertos del convertidor para extraer la energía de los paneles fotovoltaicos de forma independiente y se muestra la potencia extraída de los paneles. Además, la simulación contempla radiación solar uniforme y condiciones de sombreado parcial en el panel del puerto 2.

### 4.1 Sistema con radiación solar uniforme.

En la primera simulación se considera que el sistema se encuentra bajo una radiación solar uniforme de 1000 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de los paneles de 25°C (STC). El objetivo de esta simulación es extraer primeramente energía del panel 1 y posteriormente del panel 2, con la finalidad de verificar la extracción máxima de energía de cada puerto. La Fig. 6 exhibe el ciclo de trabajo de ambos puertos del convertidor, lo que permite la extracción de energía de ambos paneles (extracción no simultánea). Como se puede observar, mientras al panel 1 se le extrae energía por el puerto 1, el puerto 2 se encuentra inactivo y cuando se extrae energía del panel 2 por el puerto 2, el puerto 1 se encuentra inactivo. Esto es con la finalidad de evitar cortocircuitos.

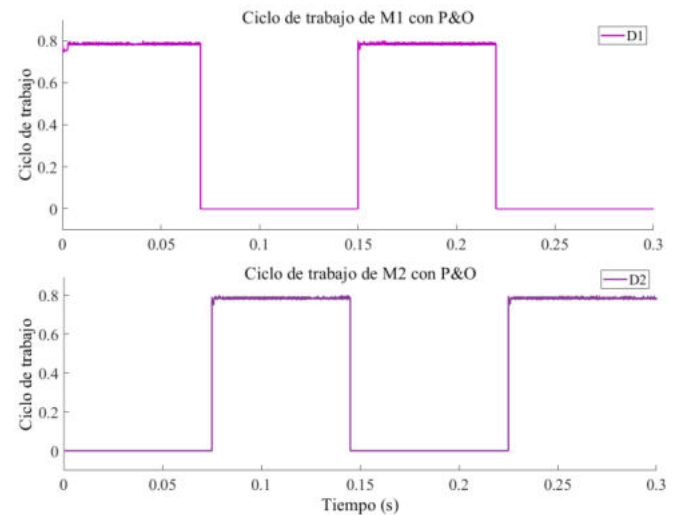


Figura 6. Ciclo de trabajo de los Mosfet M1 (puerto 1) y M2 (puerto 2) del convertidor en condiciones normales de irradiancia.

La Fig. 7 muestra el comportamiento del voltaje, la potencia y la corriente en el Bus de DC. En las tres gráficas se puede observar que en los primeros 30 milisegundos (ms) el algoritmo P&O está realizando la búsqueda del MPPT hasta llegar a 330 W, a los 70 ms se observa una caída de las tres variables debido a que se desactiva S1 y M1 y se activa S2 y M2 con la finalidad de extraer la energía del puerto 2. El tiempo que transcurre entre desactivar el puerto 1 y activar el

puerto 2 es de 5 ms, el cual llamamos tiempo muerto. El tiempo muerto es necesario para evitar un corto circuito entre los puertos, una vez transcurrido el tiempo muerto se activa el puerto 2 mediante S2 y M2.

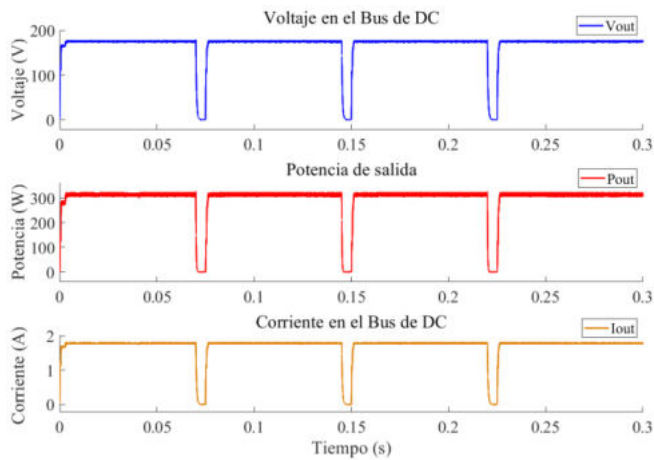


Figura 7. Voltaje, potencia y corriente a la salida del convertidor en condiciones normales de irradiancia.

#### 4.2 Sistema bajo condiciones de sombreado parcial.

En el presente caso de estudio, se asume que el Panel 2, conectado al Puerto 2, experimenta sombreado parcial desde los 75 ms hasta los 260 ms, recibiendo entre el 60% y el 80% de la irradiancia que recibe el Panel 1. Posteriormente a los 260 ms, la irradiancia se vuelve uniforme para el Panel 2. Mientras tanto, el Panel 1 recibe una radiación uniforme durante todo el período de simulación. Dada estas condiciones, el sistema de control determina el ciclo de trabajo óptimo del Mosfet M2 en el Puerto 2.

En la Fig. 8, se puede apreciar que el algoritmo P&O realiza el seguimiento del MPP de forma satisfactoria, ajustando de manera eficaz el ciclo de trabajo del Puerto 2 (Mosfet M2). Es importante destacar que este ajuste se realiza mientras el Panel 2 se encuentra en condiciones de sombreado parcial.

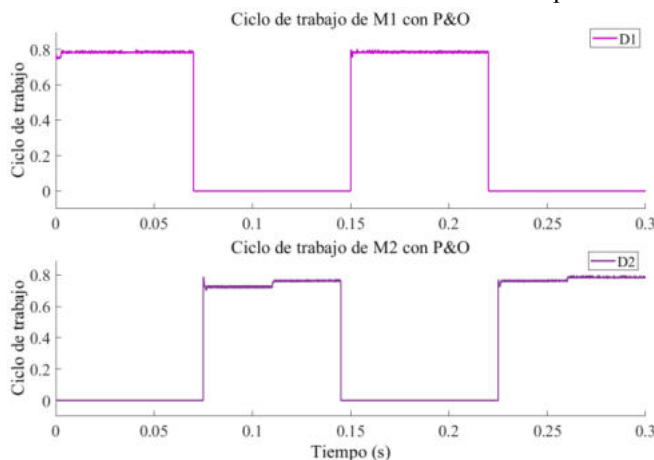


Figura 8. Ciclo de trabajo de los Mosfet M1 y M2 del convertidor en condiciones de sombreado parcial del panel conectado al puerto 2.

En la Fig. 9 se puede observar el comportamiento del voltaje, la potencia y la corriente en el Bus de DC. Como se puede apreciar, existe variación en la potencia de salida cuando el panel del puerto 2 está afectado por el sombreado parcial. Sin embargo, el P&O logra extraer la máxima energía disponible de ese panel, también se puede observar que en los primeros 30 ms el algoritmo P&O está realizando la búsqueda del MPPT logrando su objetivo de 330 W, a los 70 ms se observa una caída de las tres variables debido a que se desactiva S1 y M1 y se activa S2 y M2 como ocurrió en la prueba anterior. El tiempo muerto de igual forma son 5 ms para desactivar el puerto 1 y activar el puerto 2 mediante S2 y M2. La potencia de salida no será uniforme durante el lapso de tiempo que se encuentre activo el puerto 2 debido a que se emula un sombreado parcial, sin embargo, el algoritmo P&O logra extraer la máxima energía del panel sombreado.

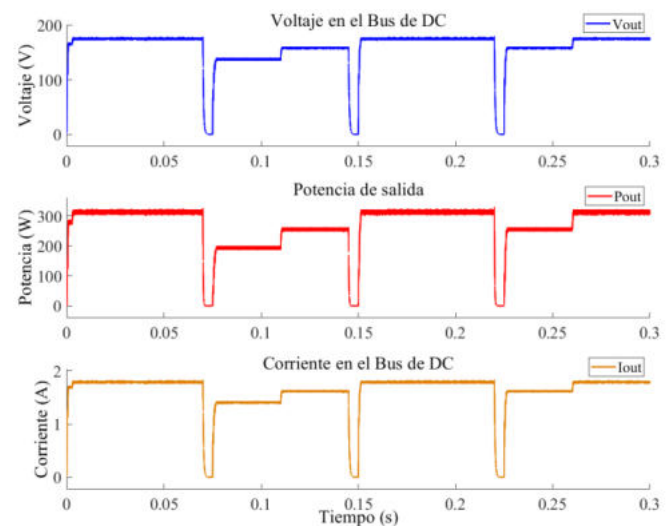


Figura 9. Voltaje, potencia y corriente a la salida del convertidor en condiciones de irradiancia no uniforme en el panel conectado al puerto 2.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis de la simulación de un convertidor multipuerto DC/DC de topología Boost, implementando el algoritmo Perturbar y Observar (P&O) para el seguimiento del punto de máxima potencia de dos paneles fotovoltaicos, tanto en condiciones normales de irradiancia como en situaciones de sombreado parcial. Los resultados obtenidos utilizando la herramienta Matlab-Simulink, demuestran la eficacia del algoritmo P&O propuesto para determinar el ciclo de trabajo óptimo del convertidor y establecer los tiempos de conmutación de los Mosfet de configuración con el fin de extraer la energía de los paneles conectados a cada puerto. Estos hallazgos validan la viabilidad y el rendimiento satisfactorio de la metodología propuesta para la extracción eficiente de energía en sistemas

multipuerto. Existe la posibilidad de mejorar este sistema utilizando técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia más sofisticadas, como las técnicas de optimización basadas en inteligencia artificial. Para una implementación experimental es necesario minimizar los tiempos de switcheo entre ambos puertos del convertidor para lograr una mejor extracción de la energía.

## 6. TRABAJOS FUTUROS

Al lograr extraer energía de manera controlada de los paneles conectados a través de cada puerto, este trabajo sienta las bases para el desarrollo de una metodología destinada a la reconfiguración de un arreglo fotovoltaico en serie en condiciones de sombreado parcial. La finalidad de esta metodología es maximizar la captación de la energía generada por el sistema bajo tales condiciones, aprovechando un convertidor multipuerto. Cuando se detecte una disminución en la producción de energía debida al sombreado parcial, se implementará un sistema de control que reconfigurará el arreglo fotovoltaico para aislar los paneles sombreados mediante un puerto del convertidor. El objetivo principal es garantizar la extracción máxima de energía de manera individual de los paneles afectados por el sombreado, lo que a su vez contribuye a optimizar el rendimiento global del sistema.

## REFERENCIAS

- Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, M. H., Shafiullah, M., & Malik, M. Z. (2020). Investigation of MPPT techniques under uniform and non-uniform solar irradiation condition—a retrospection. *Ieee Access*, 8, 127368-127392.
- Granda-Gutiérrez, E., Orta, O., Díaz-Guillén, J., Jimenez, M., Osorio, M., & González, M. (2013). Modelado y simulación de celdas y paneles solares. Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica,
- Güney, T. (2019). Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(5), 389-397.
- Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1-18.
- Kebede, A. B., & Worku, G. B. (2020). Comprehensive review and performance evaluation of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system. *Global Energy Interconnection*, 3(4), 398-412.
- Park, J., Kim, H.-g., Cho, Y., & Shin, C. (2014). Simple modeling and simulation of photovoltaic panels using Matlab/Simulink. *Advanced Science and Technology Letters*, 73(14), 147-155.
- Petreuş, D., Fărcaş, C., & Ciocan, I. (2008). Modelling and simulation of photovoltaic cells. *Acta Technica Napocensis-Electronics and Telecommunications*, 49(1), 42-47.
- Pukhrem, S. (2013). A photovoltaic panel model in matlab/simulink. *Dublin Institute of Technology, Faculty of Electrical Engineering*.
- Rehman, Z., Al-Bahadly, I., & Mukhopadhyay, S. (2015). Multiinput DC–DC converters in renewable energy applications—An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 521-539.
- Sarvi, M., & Azadian, A. (2022). A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems. *Energy Systems*, 13(2), 281-320.
- SENER, M. (2022). *Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036. Anexo 2 Reporte de Avance de Energías Limpias.* <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Prodesen.aspx>
- Zhu, Y., & Xiao, W. (2020). A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. *Solar Energy*, 196, 346-357.