

# Comparación entre diferentes algoritmos de control de convertidores estáticos para encontrar el MPPT mediante herramientas de simulación

Liza Maria Cerinza Salazar<sup>1</sup>, *Estudiante, PUJC*. Daniela Morales Quintana<sup>2</sup>, *Estudiante, PUJC*.  
Alejandro Paz Parra<sup>3</sup>, *PhD, PUJC*. Carlos Andrés Giraldo Castañeda<sup>4</sup>, *MSc, PUJC*.

**Resumen**—En el siguiente artículo se presenta la implementación, evaluación y comparación de cuatro algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracker), conocidos como algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en curvas características (Corriente vs. Voltaje) de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Los algoritmos estudiados en el desarrollo de este trabajo son: el P&O (Perturbar y Observar), el P&O Modificado (paso variable), un Controlador Difuso y una Red Neuronal. Para la implementación de estos algoritmos de seguimiento se usó la herramienta de Software Simulink de Matlab.

Los parámetros que se usan como punto de comparación entre los algoritmos están determinados por: el tiempo de convergencia al punto de máxima potencia, el error de estado estable entre el punto de máxima potencia nominal y el punto al que converge el sistema con el algoritmo.

**Palabras claves**—MPPT, Convertidores estáticos, Sistema solar PV, Eficiencia energética, Fuentes no convencionales de energía renovable FNCER

## I. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo la demanda energética mundial ha aumentado, esto ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas de generación de energía que sean amigables con el medio ambiente, lo cual ha impulsado el crecimiento principalmente de los sistemas fotovoltaicos ya que el sol es considerado una de las fuentes de energía más prometedoras. Actualmente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos es baja lo que lleva a una constante investigación acerca de cómo mejorar el desempeño de estos sistemas, una de estas técnicas es la implementación de algoritmos de seguimiento del Punto de Máxima Potencia, más conocidos como MPPT.

Los paneles solares se pueden modelar de tal forma que es posible obtener las curvas características I-V (Corriente vs. Voltaje) y P-V (Potencia vs. Voltaje), las cuales definen el comportamiento de las celdas solares ante diferentes condiciones de operación, estas condiciones dependen de factores como la temperatura de la celda y la irradiancia solar, lo que hace que el punto de máxima potencia varíe en función de estos. La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente y el voltaje de la misma. El punto de máxima potencia (MPP) es el producto del voltaje en el punto máximo (VMPP) y corriente en el punto máximo (IMPP) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (PMPP).

Los algoritmos de seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) se usan principalmente para maximizar la energía entregada por el panel solar, estos algoritmos generalmente se basan en el principio de variar el ciclo de trabajo útil del convertidor DC/DC, de tal manera que la recta de carga del panel tenga una intersección con el punto MPP, debido a que la carga que percibe el panel tiene una relación directa con el ciclo útil del convertidor, esto permite mover el voltaje de operación del panel para encontrar el MPP. Existen muchos algoritmos MPPT, por mencionar los más conocidos: Perturbar y Observar, (P&O), diferentes modificaciones al mencionado anteriormente, Conductancia Incremental (CI), basados en Redes Neuronales, basados en Lógica Difusa, entre otros; estos se diferencian en parámetros como la dificultad en implementación, el tiempo de convergencia al punto máximo, el costo computacional, sensores utilizados para sus respectivos variables de entrada, entre otros. Los algoritmos MPPT seleccionados para realizar la evaluación son: Perturbar y Observar, Perturbar y Observar de paso variable, un controlador basado en Lógica Difusa y una Red Neuronal.

El objetivo de este trabajo es poder dar una visión amplia y aceptada sobre el tema de sistemas solares fotovoltaicos trabajando en conjunto con los algoritmos MPPT, ya que la importancia de estos radica en el incremento de la eficiencia combinada, para finalmente realizar una comparación entre ellos y verificar cómo se comportan con las diferentes condiciones atmosféricas de la ciudad de Cali, Colombia.

## II. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se usó la siguiente metodología:

1. Revisar la literatura disponible para comprender y modelar el comportamiento de un convertidor estático en un sistema solar fotovoltaico.
  - a) Recopilar bibliografía y refinarla.
  - b) Construir un modelo de convertidor en una herramienta de simulación (Multisim).
  - c) Obtener curvas que permitan definir el desempeño del convertidor en diferentes puntos de operación.
2. Revisar la literatura disponible para comprender el funcionamiento de los algoritmos MPPT.

- a) Identificar los parámetros básicos de programación y seguimiento del MPP de los algoritmos estudiados.
3. Comparar los algoritmos MPPT escogidos por medio de modelos realizados en Matlab.
4. Modelar el sistema solar fotovoltaico en su totalidad y hacer un análisis de sensibilidad que permita establecer la relación entre la eficiencia del convertidor y la eficiencia del sistema solar fotovoltaico teniendo en cuenta las variaciones climáticas.
5. Establecer un mínimo de criterios técnicos que permitan seleccionar el algoritmo más adecuado de acuerdo a las características del sitio.

### III. MARCO TEÓRICO

Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT son una serie de técnicas que permiten mejorar la eficiencia de un sistema fotovoltaico. La base fundamental de funcionamiento de estos se encuentra apoyada en las curvas características de un módulo fotovoltaico. El objetivo de estos algoritmos es mantener el panel solar funcionando en su punto máximo de potencia (MPP) que esta determinado por las condiciones de operación [1], así como se puede observar en la Figura 1 y la Figura 2.

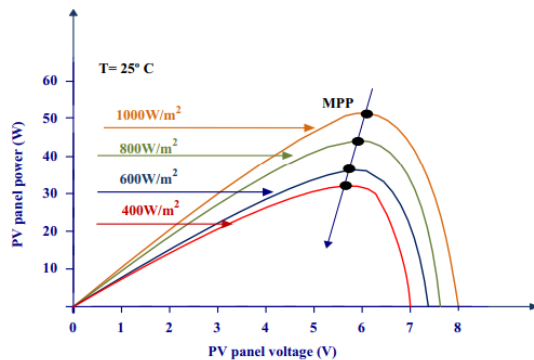


Figura 1: Comportamiento curvas características módulo fotovoltaico con diferentes niveles de radiación [2].

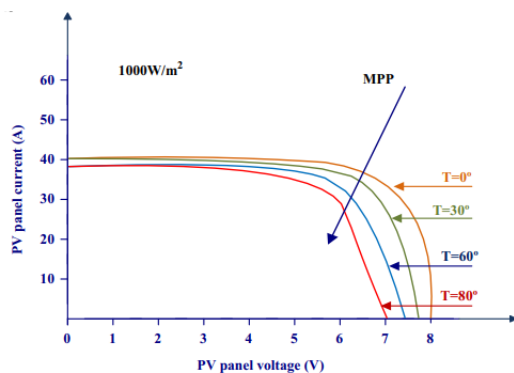


Figura 2: Comportamiento curvas características módulo fotovoltaico con diferentes niveles de temperatura [2].

En las gráficas de la Figura 1 y la Figura 2 se puede evidenciar cómo la radiación y la temperatura mueven el punto

MPP a través de las curvas de operación. A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los algoritmos seleccionados.

#### III-A. Algoritmo P&O

El funcionamiento de este algoritmo se basa en aplicar una perturbación al ciclo de trabajo del convertidor y observar si la potencia aumenta o disminuye, dependiendo del resultado se continua aplicando variaciones. Las perturbaciones que se aplican son de un valor constante y el tamaño de esta determina el tiempo de convergencia y la oscilación del alrededor del MPP [3]. En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo que describe el comportamiento de este algoritmo.

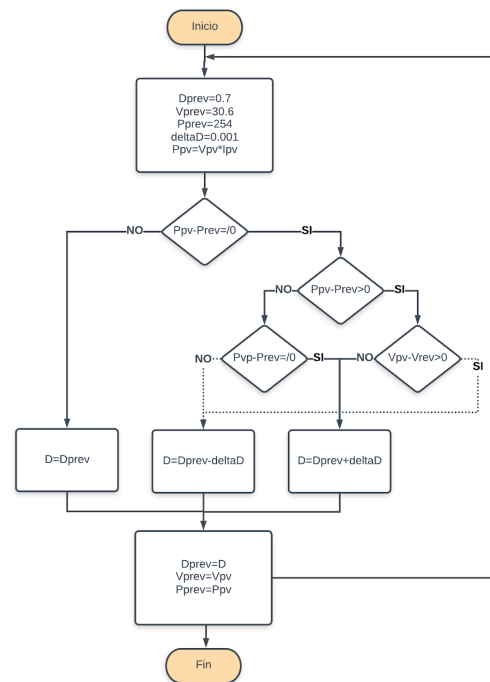


Figura 3: Diagrama de flujo algoritmo P&O.

#### III-B. Algoritmo P&O Modificado

Este algoritmo es una variación del P&O, para este caso el valor de la perturbación es variable. Dicha magnitud depende de la diferencia de potencia que se encuentre al aplicar la perturbación anterior, para esto se establecieron los siguientes rangos: si la diferencia expresada en porcentaje es mayor al 60% la perturbación es del 8% del ciclo de trabajo, si la diferencia esta entre el 60% y el 20% la perturbación es del 3% y en el caso que la diferencia este por debajo del 20%, lo que significa que se esta cerca del MPP, el tamaño de la perturbación es de 0.1% del ciclo de trabajo.

#### III-C. Controladores Basados en Lógica Difusa

En el caso de los sistemas fotovoltaicos los controladores basados en lógica difusa son bastante eficientes a la hora de

seguir el punto de máxima potencia [4]. Para este caso se planteo el siguiente esquema de control que se muestra en la Figura 4.

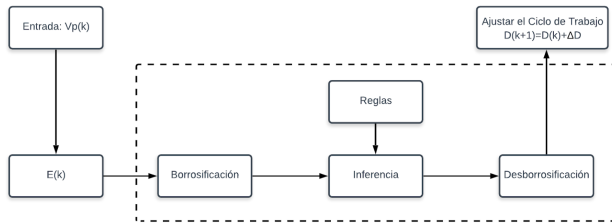


Figura 4: Diagrama controlador Lógica Difusa [4].

Como entrada del sistema se tiene el voltaje medido del panel solar, con este voltaje se calcula un error que es la entrada al controlador difuso. Este error se da debido a la diferencia entre el voltaje medido y un voltaje de referencia establecido para las condiciones de funcionamiento de panel, es decir, dicho voltaje de referencia se obtuvo de la interpolación de diferentes curvas características del panel a diferente temperatura e irradiación. Con el error calculado se realiza la borrosificación con el método de Mamdani, se establecen el conjunto de reglas de inferencia y para la desborrosificación se utiliza el centro de gravedad. La salida del controlador genera una variación el el ciclo del trabajo actual [4].

### III-D. Redes Neuronales

Las redes neuronales son colecciones de unidades de procesamiento interconectadas llamadas neuronas, a través del cual pasan las señales y la información. Una red neuronal es configurada para una aplicación específica por medio de un proceso de aprendizaje, en este caso, para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia de un módulo solar. El historial de entrada es un comportamiento climático a lo largo del tiempo asociado a los valores de voltaje y corriente del panel solar [5]. En este caso, se tiene un red neuronal con tres entradas que corresponden al Voltaje, Corriente y Temperatura del panel solar, cuenta con una capa que tiene como salida la estimación de la Irradiancia solar, así mismo, esta Irradiancia se convierte en la entrada de una segunda capa, que cuenta con dos entradas, la adicional es nuevamente la Temperatura del panel solar y así finalmente obtener como salida un Voltaje de Referencia; en la Figura 5 se puede ver de una manera gráfica la distribución de la red neuronal implementada.

El algoritmo generalmente usado para el entrenamiento de la red neuronal en objetivos de la energía solar fotovoltaica es el Levenberg-Marquardt [6]. Para la primera capa se estima por lo menos 18200 curvas para el entrenamiento. Para la segunda capa se estiman unas 100 curvas de datos de entrenamiento, con datos de temperatura del panel solar entre los 25°C y 65°C con pasos de 5°C de aumento, para la irradiancia se tienen datos entre los 100W/m2 hasta los 1200 W/m2 con intervalos de 100 W/m2 de aumento. Estos valores de las curvas son estimados gracias a la herramienta de Simulink la cual entrega un número del error dado según

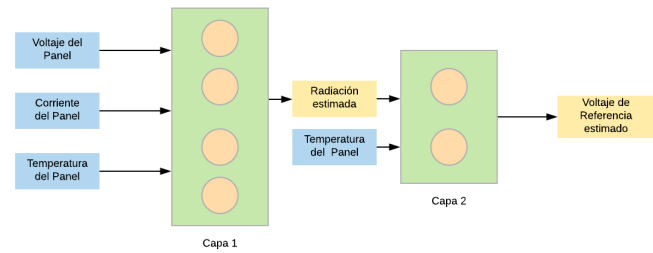


Figura 5: Esquema de la Red Neuronal.

las curvas de entrenamiento.

## IV. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con la ejecución de los algoritmos MPPT implementados y puestos en marcha en Simulink, esto con el fin de caracterizar el comportamiento de cada uno de los algoritmos a diferentes condiciones. Para lograr dicho objetivo se establecieron los valores de temperatura y radiación a los cuales se realiza la simulación y se midieron los siguientes parámetros: la potencia promedio y el tiempo de estabilización, los resultados se pueden observar a continuación.

		T = 25 °C				Potencia Teórico
		P&O	P&O Variable	Cont. Fuzzy	Red Neuronal	
Potencia promedio (W)	1000 W/m2	240,40	242,90	252,80	257,20	254,60
	600 W/m2	149,60	149,70	145,50	151,00	155,90
	800 W/m2	196,90	197,10	204,00	204,20	206,10
tiempo estabilización (ms)	1000 W/m2	12,20	6,50	3,44	8,96	
	600 W/m2	9,63	11,83	3,00	13,23	
	800 W/m2	6,10	2,02	2,29	8,06	
error (%)	1000 W/m2	5,58	4,60	0,71	1,02	
	600 W/m2	4,04	3,98	6,67	3,14	
	800 W/m2	4,46	4,37	1,02	0,92	
		4,69	4,31	2,80	1,70	Promedio error %

Figura 6: Resultados Simulación temperatura 25 °C.

En la tabla de la Figura 6 se muestran los resultados de la simulación con una temperatura de 25 °C y tres niveles de radiación: 1000 w/m2, 800 w/m2 y 600 w/m2. La fila del error se refiere al porcentaje de error entre el valor teórico del punto de potencia y el valor de potencia promedio obtenido con cada uno de los algoritmos. En la última fila se promedia el error, estos valores dan información sobre cual algoritmo esta más cerca del MPP. Como se evidencia en la tabla la red neuronal presenta los porcentajes de error más bajos.

En la Figura 7 y la Figura 8 se muestran los resultados de las simulaciones a temperaturas de 45 °C y 60 ° respectivamente. También se tiene tres niveles de radiación para cada temperatura: 1000 w/m2, 800 w/m2 y 600 w/m2. Respecto al porcentaje de error el algoritmo P&O presenta mayor porcentaje de error y red neuronal el menor. Si se observa las columnas del tiempo de estabilización se encuentra que el controlador Fuzzy, posee los tiempos más bajos, mientras que los otros tres oscilan entre valores mayores; mientras que la Red Neuronal tiene mejor comportamiento en cuanto

		T = 45 °C				
		P&O	P&O Variable	Cont. Fuzzy	Red Neuronal	P Teórico
Potencia promedio (W)	1000 W/m <sup>2</sup>	216,00	218,70	226,80	236,20	232,4
	600 W/m <sup>2</sup>	135,80	136,00	135,90	138,60	141,7
	800 W/m <sup>2</sup>	178,40	179,50	187,30	187,50	188,7
tiempo estabilización (ms)	1000 W/m <sup>2</sup>	10,81	6,03	3,00	8,04	
	600 W/m <sup>2</sup>	8,64	11,40	2,85	12,70	
	800 W/m <sup>2</sup>	5,47	2,44	1,79	6,52	
error (%)	1000 W/m <sup>2</sup>	7,06	5,90	2,41	1,64	
	600 W/m <sup>2</sup>	4,16	4,02	4,09	2,19	
	800 W/m <sup>2</sup>	5,46	4,88	0,74	0,64	
						Promedio error %

Figura 7: Resultados Simulación temperatura 45°C.

		T = 60 °C				
		P&O	P&O Variable	Cont. Fuzzy	Red Neuronal	P Teórico
Potencia promedio (W)	1000 W/m <sup>2</sup>	198,70	200,80	207,00	217,00	215,7
	600 W/m <sup>2</sup>	125,90	126,00	128,10	129,00	132,12
	800 W/m <sup>2</sup>	164,10	165,60	173,30	174,90	174,59
tiempo estabilización (ms)	1000 W/m <sup>2</sup>	9,18	6,01	2,60	6,07	
	600 W/m <sup>2</sup>	7,94	13,07	2,79	11,11	
	800 W/m <sup>2</sup>	4,28	2,35	1,61	6,45	
error (%)	1000 W/m <sup>2</sup>	7,88	6,91	4,03	0,60	
	600 W/m <sup>2</sup>	4,71	4,63	3,04	2,36	
	800 W/m <sup>2</sup>	6,01	5,15	0,74	0,18	
						Promedio error %

Figura 8: Resultados Simulación temperatura 60 °C.

encontrar el punto MPPT y quedarse estable con el valor correspondiente, esto se percibe con los resultados del Promedio del error entre los valores teóricos y los valores de las simulaciones.

## V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Los algoritmos P&O son de fácil implementación, no requieren altos recursos para su ejecución, pero presentan inconvenientes al momento de ubicar el MPP, ya que con los resultados obtenidos en las mediciones se pudo observar que la mayoría de las veces el error entre el MPP teórico y el encontrado superó el 6 %. Esto se debe a que este tipo de algoritmos suelen encontrar máximos locales en los cuales se quedan oscilando omitiendo el máximo global.
- En la implementación de algoritmos P&O es de gran importancia escoger correctamente el delta de variación del ciclo de trabajo del convertidor, ya que de esto depende si se encuentra o no el MPP. Para este caso particular en la implementación del P&O modificado implicaba diferentes deltas de variación, los cuales en simulación respondieron correctamente.
- Con respecto a los resultados obtenidos en las simulaciones y las mediciones con el módulo fotovoltaico, se llega a la conclusión de que la Red Neuronal presenta el mejor desempeño respecto a los otros 3 algoritmos estudiados.

## REFERENCIAS

- [1] Y. U. López and J. Palacios, "Technical Features in Solar Photovoltaic Mathematical Models", 2018 IEEE ANDESCON, Cali, Colombia, 2018.
- [2] M. Abella, Sistemas Fotovoltaicos. Madrid, 2001.
- [3] Ruiz C. Luis J., Beristáin J. José A., Sosa T. Ian M. and Hernández L. Jesús H. "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar", RIEEC Revista De Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Vol. 8 No. 1, 2010.
- [4] M. Farhat, O. Barambones, J.A. Ramos, E. Duran, J.M. Anduja, "Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico", Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial (2015) 476–487, España, 2015. [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/282848240\\_Diseño\\_e\\_Implementación\\_de\\_un\\_Sistema\\_de\\_Control\\_estable\\_basado\\_en\\_Logica\\_Borrosa\\_para\\_optimizar\\_el\\_rendimiento\\_de\\_un\\_sistema\\_de\\_Generación\\_Fotovoltaico](https://www.researchgate.net/publication/282848240_Diseño_e_Implementación_de_un_Sistema_de_Control_estable_basado_en_Logica_Borrosa_para_optimizar_el_rendimiento_de_un_sistema_de_Generación_Fotovoltaico)
- [5] S. Fernández Posada, "Diseño e Implementación de una Red Neuronal para el Seguimiento del Punto Máximo de Poder de un Panel Solar", Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad De Ingeniería, Programa De Ingeniería en Mecatrónica, Bogotá, Colombia, 2015. [Online]. Available at: [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6762/Informe\\_final\\_Opcion\\_de\\_Grado\\_Fernandez\\_Posada\\_1801679.pdf?sequence=1](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6762/Informe_final_Opcion_de_Grado_Fernandez_Posada_1801679.pdf?sequence=1)
- [6] Elgharbi, Abdessamia et al. "A MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR A PV SYSTEM", 2012.