

## MAXIMUM POWER POINT TRACKING, STATE OF THE ART.

## SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA, ESTADO DEL ARTE.

**PhD. Carlos Lizardo Corzo Ruiz,  
PhD. Ómar Lengerke Pérez,  
PhD. Daniel Alexander Velasco Capacho  
Ana María Berenice Colmenares Espinosa  
Estiven Corzo Díaz**

### Unidades Tecnológicas de Santander – UTS

Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, Grupo de Investigación en Control Avanzado  
GICAV

Calle de los Estudiantes, No. 9-82, Bucaramanga. Tel.: (+577) 6917700, Ext. 1341

E-mail: ccorzo@correo.uts.edu.co; olengerke@correo.uts.edu.co;

dvelazco@correo.uts.edu.co

**Abstract:** The low efficiency of solar panels and the high cost of implementation of photovoltaic systems have promoted the development of efficient controllers for monitoring the maximum power point -MPPT- with improved performance parameters, which increase the performance of these systems. For this reason, this state of the art was proposed, which identified as relevant parameters, the conversion efficiency in the controller, the location speed of the maximum power point, the oscillation in steady state, the difficulty of implementation and the cost of development. In the same way, it allowed to establish that the algorithm most used by the scientific community, is the improved disturb and observe technique -P & O-. Secondly, the Incremental Conductance technique -INC- was identified and as a third option, the Fuzzy Logic-based technique -FLC- was classified.

**Keywords:** Efficient algorithms, Programmable systems, Optimization, Photovoltaic energy, Boost-Buck controllers, Microcontroller

**Resumen:** La baja eficiencia de los paneles solares y el alto costo de implementación de los sistemas fotovoltaicos ha promovido el desarrollo de controladores eficientes de seguimiento del punto de máxima potencia -MPPT- con parámetros de desempeño mejorados, que incrementan el rendimiento de estos sistemas. Por esta razón, se planteó este estado del arte, que identificó como parámetros relevantes, la eficiencia de conversión en el controlador, la velocidad de ubicación del punto de máxima potencia, la oscilación en estado estable, la dificultad de implementación y el costo de desarrollo. De igual forma permitió establecer que el algoritmo de mayor uso por parte de la comunidad científica, es la técnica de perturbar y observar mejorada -P&O-. En segundo lugar, se identificó la técnica de Conductancia Incremental -INC- y como tercera opción, se clasificó la técnica basada en Lógica Difusa -FLC-.

**Palabras clave:** Algoritmos eficientes, Sistemas programables, Optimización, Energía fotovoltaica, Controladores Boost-Buck, Microcontroladores.

### 1. INTRODUCCION

La luz solar con altos niveles de radiación útil para la generación de energía eléctrica, se ha

aprovechado mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos basados en arreglos de paneles solares, que obtienen energía eléctrica a menor costo que la disponible en la red de

servicios públicos, lo que ha generado un auge en la formulación de proyectos que involucran esta tecnología, al punto que según La Unidad de Planeación Minero Energética (Upme), alcanzó en el año 2017, el 88,3% del total de los proyectos presentados (Rojas, 2017). Sin embargo, la inversión inicial para el montaje de estos sistemas, es alta a pesar de los beneficios tributarios ofrecidos por el Estado para apoyar su proliferación (SunColombia, 2017) (Ley 1715, 2014).

Para disminuir el costo y mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, la comunidad científica ha diseñado varias estrategias que incluyen el uso de algoritmos eficientes sobre controladores programables, integración de reguladores elevadores-reductores y uso de electrónica integrada de alta complejidad. Con este enfoque y luego de una indagación preliminar, se estableció que los controladores de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT, implementados mediante dispositivos de control programables y gestionados a través de algoritmos eficientes como: Perturbar y Observar P&O, Conductancia Incremental INC y basados en Lógica Difusa FLC; son una propuesta idónea, suficientemente estudiada, documentada y validada que al categorizarse y clasificarse permitió establecer los criterios necesarios en la selección de los parámetros de desempeño de interés, ponderándolos para escoger un algoritmo eficiente útil en la implementación de sistemas fotovoltaicos.

## 2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El desarrollo metodológico privilegió las construcciones de sentido sobre los documentos que apoyaron la búsqueda referente a los algoritmos de mayor uso y sus parámetros de desempeño, de la cual se estableció una muestra de 67 documentos científicos y académicos que fueron el insumo para concretar el presente estado del arte constituido por 50 referencias bibliográficas. Entre los instrumentos utilizados en el estudio se integró una matriz bibliográfica implementada en Excel, así como una matriz analítica de contenido en la que se relacionaron las categorías de análisis en contraste con los documentos científicos y académicos referenciados, de los cuales se tomaron algunos apartes relevantes como insumo para su clasificación.

### 2.1 Procedimiento

Se realizó la recopilación documental sobre documentos disponibles en Science Direct, Jstor e IEEE Express. El análisis de la literatura seleccionada se realizó en dos rondas de lectura.

En la primera, se clasificaron y agruparon los documentos referentes a los parámetros de desempeño de los algoritmos MPPT, para establecer las categorías que se contrastarían en el estudio. En la segunda revisión, se realizó la ponderación de los parámetros de desempeño categorizados, para establecer su relevancia y pertinencia. Se identificaron repeticiones y vacíos de información que permitieron depurar las categorías y parámetros de desempeño a comparar; concretándose tres técnicas de implementación de los algoritmos MPPT: Implementación mediante Controlador basado en Lógica Difusa (FLC), implementación mediante evaluación de Conductancia Incremental (INC) y la implementación mediante la técnica de Perturbar y Observar (P&O). Los parámetros Seleccionados fueron: Eficiencia, oscilación presente en el MPPT, velocidad de respuesta, facilidad de implementación y costo. Las técnicas revisadas se organizaron en los apartes, 2.2 - Lógica Difusa, 2.3 Impedancia Incremental, 2.4 Perturbar y Observar. Así mismo se realizó en el aparte 2.5, la relación de las referencias integradas que compararon los tres algoritmos con los criterios seleccionados.

### 2.2 Algoritmo MPPT - Lógica Difusa (FLC)

Se revisaron inicialmente seis referencias de la implementación de algoritmos MPPT mediante la técnica de controladores de Lógica Difusa para contextualizar las características sobresalientes de este tipo de algoritmos.

En el primer estudio Reddy (2017) y su equipo implementaron un controlador sobre una red fotovoltaica trifásica, del tipo Boost con algoritmo MPPT mejorado a través de Lógica Difusa. Los resultados obtenidos mostraron una reducción del 5% en la oscilación en régimen permanente, por debajo del límite de la norma IEEE-519.

En segunda instancia Patil (2017) propuso una técnica de control MPPT basada en Lógica Difusa para sistema fotovoltaicos con convertidores DC-DC, que compensan en cierto grado las variaciones debidas a las condiciones climáticas, irradiación solar y temperatura atmosférica. Según los resultados se estableció que el convertidor presenta mayor eficiencia en contraste con el convertidor Buck.

Como tercer estudio se tomaron las comparaciones realizadas por Padmamabhan Vippin (2015) entre un controlador sin algoritmo MPPT, y otro con algoritmo MPPT con Lógica Difusa. Se logró establecer que se mejora ostensiblemente la eficiencia energética del sistema y se determinó que la escogencia

apropiada de las funciones de membresía, puede lograr un controlador robusto y relativamente simple de diseñar, sin la necesidad de conocer un modelo exacto de la dinámica del sistema.

En el cuarto artículo relacionado, se estudió el diseño de un controlador basado en Lógica Difusa (FLC) simulado con MATLAB / SIMULINK, que se contrastó con un controlador tipo Perturba y Observa clásico. Los resultados indicaron que el método propuesto con FLC, presentó mayor rapidez en establecer el punto de máxima potencia en comparación con el método P&O clásico, cuando se comparan parámetros como el voltaje de salida, la corriente de salida y la eficiencia (Samal, 2018).

Seguidamente en la quinta referencia estudiada, Canny (2018) diseñó un método MPPT con FLC, con un convertidor Boost que alcanzó el máximo punto de potencia en un corto lapso de tiempo, lo que redundó en la rápida adaptación del controlador ante condiciones de variabilidad climática. Los resultados mostraron que el MPPT propuesto, alcanzó rápidamente el punto de máxima potencia de forma precisa, tanto con cambios lentos como rápidos en la irradiancia.

Por último, Bahrami (2016), propuso un método híbrido que integró un algoritmo de medición de tres puntos relevantes, y métodos FLC para establecer la dirección de cambio en el voltaje en comparación con el estado anterior, lo que generó un error medio cuadrático bajo. Estos resultados indicaron que el punto de máxima potencia se logró con mayor rapidez con el método híbrido en comparación con el controlador basado en lógica Difusa FLC o el método de medición de los tres puntos.

### 2.3 Algoritmo MPPT - Conductancia Incremental (INC).

Esta técnica pretende mantener el máximo de potencia al variar la magnitud de la carga vista por el panel solar y así mantener una pendiente corriente-voltaje igual a cero. La característica de los algoritmos que utilizan esta técnica corresponde a la comparación de la conductancia instantánea ( $I/V$ ) versus la conductancia incremental ( $\Delta I/\Delta V$ ). Del resultado de la comparación se modifica el ciclo de trabajo del controlador que se utilice, para aproximar el sistema al punto de máxima potencia. Para contextualizar la técnica se revisaron cuatro trabajos de investigación, los cuales se reseñan a continuación.

Prasetyono (2017) y su equipo presentaron una modificación al algoritmo INC con fluctuaciones de irradiación solar, que integró un ajuste de

control de potencia para limitar la alimentación máxima. Se pretendió con esta estrategia la regulación por potencia de referencia y por referencia superior. Se evidenció reducción en la oscilación alrededor del punto de máxima potencia, en el control del sobrepaso, con un tiempo de reacción pequeño en estado estable del sistema.

Deopare (2016) implementó un controlador INC con algoritmo de FLC, para atenuar la oscilación en la potencia de salida y mejorar la precisión del control. Se logró una mejora significativa para diferentes irradiancias y temperaturas de operación del sistema. A partir de los resultados se evidenció que la mayor ventaja de la implementación de INC con FLC, fue la reducción de la oscilación en un 70%, con mejor respuesta en comparación con un controlador convencional.

En este estudio, se pretendió resolver la dificultad del INC para fijar el punto de máxima potencia en condiciones de sombra, mediante un controlador CuK y la técnica INC modificada. Se evidenció que el INC modificado resuelve la dificultad incluso con condiciones atmosféricas adversas (Lakshmi, 2017).

El Cuarto trabajo revisado, fue el realizado por Rahim (2016) quien propuso un método adaptativo de tamaño de paso para el control de ancho de pulso tipo Euler de escalado dual y control directo sobre el MPPT, para corregir los cambios de potencia causados por el escalado inadecuado ante un factor constante de las variables de paso de tipo. El método propuesto disminuyó la oscilación en un rango del 65% y por ende mejoró el desempeño al compararlo con la implementación convencional.

### 2.4 Algoritmo MPPT - Perturbar y Observar (P&O)

El algoritmo Perturbar y Observar (P&O) es el de menor complejidad en la implementación y el de mayor simplicidad en la operación. Estas características han hecho que sea una técnica de amplio uso en el desarrollo de controladores para lograr y mantener el punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos. Su principio básico de operación consiste en variar el ciclo de trabajo de un convertidor de potencia a la salida de un arreglo de paneles, para variar la corriente extraída del arreglo y por consiguiente afectar la potencia entregada. Debido a la popularidad de este algoritmo, se han implementado múltiples estrategias para mejorar sus parámetros de desempeño tales como, velocidad de convergencia, oscilación en estado estable, eficiencia, facilidad de implementación y costo.

Para contrastar los parámetros indicados se integraron 15 reseñas pertinentes al P&O, las cuales se presentan a continuación.

En esta investigación, se pretendió dirimir las contradicciones entre la precisión y la velocidad de convergencia al punto de máxima potencia. El método de observación de perturbaciones de paso variable combinado con Lógica Difusa, redujo el tiempo de seguimiento y mejoró la precisión, así como la estabilidad y la solidez del sistema. Adicionalmente redujo favorablemente la oscilación alrededor del punto de máxima potencia, y evitó los cambios repentinos del punto de operación debidos a condiciones desfavorables del ambiente (Na y De-min, 2017).

En la reseña referente al trabajo realizado por (Shourov, 2018) se propuso la integración de la técnica de Flujo de Estado con el Algoritmo P&O, para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia a diferentes niveles de irradiancia y temperatura. Se logró mantener el punto de máxima potencia independientemente de la variación de los parámetros, y se redujo la oscilación en régimen permanente con mejoras en la eficiencia del sistema.

En el trabajo realizado por Kumar. D (2015) se presentó un convertidor basado en un microcontrolador de bajo costo con y sin algoritmo MPPT. Los resultados indicaron que la potencia promedio entregada por el controlador sin MPPT alcanzó un 11,4 % de la irradiancia recibida ( $W/m^2$ ) en contraste con la entregada por el controlador con MPPT integrado que alcanzó un 81,56%.

Un estudio de comparación entre la implementación de controladores con algoritmos P&O convencional y de cambio de paso variable, sometidos a variaciones de la temperatura y la irradiancia fue realizado. Se determinó que el algoritmo P&O convencional no es muy efectivo en condiciones climáticas variables debido a su respuesta lenta en el ciclo de servicio fijo, mientras que en el algoritmo P&O de tamaño de paso variable, la velocidad de seguimiento aumentó y la oscilación en régimen permanente se redujo (John, 2017).

Mediante el desarrollo de un convertidor de refuerzo del tipo Buck/Boost basado en un algoritmo P&O controlado directamente y el uso de sólo dos sensores (Voltaje y Corriente) en la salida, se facilitó el análisis de estado estable del convertidor DC-DC, para varias cargas desde cero a infinito. Se evidenció la facilidad de implementación de técnica P&O (Vivek, 2016).

En la Escuela Nacional de Ingeniería de Sousse, en Túnez se propuso el algoritmo P&O implementado sobre una placa de desarrollo Virtex-5-FPGA. Los parámetros de desempeño obtenidos fueron contrastados con los obtenidos en la simulación del controlador y los resultados indicaron parámetros de desempeño comparables a variaciones rápidas entre 100 mS y 400 mS, de la temperatura y la irradiancia (Moussua, 2017).

En su Tesis Doctoral Ortiz (2017) presentó el diseño de un controlador en modo deslizante basado en la medición de la corriente del inductor, en cascada con un algoritmo P&O y un regulador de voltaje; el cual evitó colapsos en el sistema debido a la disminución en la irradiancia. Para el diseño aplicó una técnica de control adaptativo basada en un control por modelo de referencia. Los resultados obtenidos mostraron mayor rapidez y mejor eficiencia del sistema frente a una implementación clásica P&O.

Una técnica P&O modificada para prevenir el desperdicio de energía, mediante la incorporación de nuevas cotas a la región de búsqueda con el fin de evitar un tiempo de convergencia muy largo, fue validada bajo diferentes condiciones iniciales de voltaje. Los resultados obtenidos mostraron un tiempo de establecimiento inferior a 100 mS con lo que se demostró que el algoritmo propuesto rastrea con mayor eficiencia y precisión el punto de potencia máxima (Salazar, 2016).

En este estudio se agregó un algoritmo de verificación simple al algoritmo P&O para mejorar las características de desempeño del controlador en condiciones de sombreado parcial. Se estableció que la implementación de este controlador es de baja complejidad y bajo costo, con un desempeño estable ante diferentes niveles de irradiación (Alik, 2015).

Mediante el uso de una combinación de extrapolación lineal, (Sivaramakrishnan, 2015) planteó un nuevo algoritmo P&O híbrido, para determinar el punto de máxima potencia de un módulo fotovoltaico. Los resultados de la simulación del algoritmo propuesto mostraron una mejora en el rendimiento hasta en un 50% por encima del P&O convencional.

A través del software PSIM se simuló el algoritmo P&O con un tamaño de paso variable y se comparó con la técnica P&O de tamaño de paso fijo. Las técnicas se simularon con y sin corrector de integrador proporcional. Los resultados muestran el buen seguimiento, la alta eficiencia y la precisión de la técnica de paso variable mediante el corrector PI. Aunque los resultados de las simulaciones del método de

paso fijo fueron satisfactorios, la adición del controlador PI mejoró considerablemente la eficiencia del sistema, y aumentó la velocidad de búsqueda del punto de máxima potencia (Khadidja, 2017).

La implementación de un inversor del tipo puente H es el eje del estudio realizado por (Dannier, 2018), en el que comparó un P&O tradicional y un esquema MPPT mejorado. Los resultados obtenidos mostraron que se mejoró considerablemente la eficiencia del sistema, al aumentar la velocidad de búsqueda del punto máxima de potencia. el MPPT mejorado logró un incremento de alrededor del 0.5% con respecto al P&O.

El algoritmo P&O basado en ascenso de colinas, es un método independiente de las características de la fuente fotovoltaica y por tanto de los niveles de radiación, cambios de temperatura, desgaste y envejecimiento. Se observó que, ante un aumento en el valor de la resistencia de salida, el sistema tarda más en encontrar el MPP y presenta más ruido en las señales de tensión y corriente que lleva al sistema a operar en un ciclo útil elevado (Bolaños, 2015).

En este trabajo se propuso un algoritmo P&O modificado, en el cual se definió un valor del ciclo útil del 50%, que corresponde a un valor teórico aproximado al MPP en condiciones ideales. Se pudo observar que el algoritmo P&O modificado converge al MPP en un tiempo menor que el algoritmo tradicional y las oscilaciones alrededor de este punto disminuyen (Botina & Jurado, 2015).

Se implementó un P&O mejorado utilizando el método de corriente de cortocircuito fraccional (FSCC), en el que inicialmente se toma el punto de operación en cortocircuito y luego se pasa a la técnica P&O convencional. La ventaja de este algoritmo de dos etapas es un seguimiento rápido en condiciones ambientales cambiantes y las bajas oscilaciones en torno al MPP; con lo que se mejora la eficiencia en comparación con el método P&O convencional (Sher, 2015).

### 2.5 Comparación entre algoritmos basados en Conductancia Incremental (IC), Perturbar y Observar (P&O) y Lógica Difusa (FL)

Con el fin de contrastar el desempeño y los parámetros relevantes de los tres algoritmos estudiados, se implementó una comparación de estos en referencia a la eficiencia en el desempeño, la velocidad en el seguimiento del punto de máxima potencia, la oscilación en régimen permanente, la facilidad de implementación y su costo. Se relacionaron 25

documentos cuya evaluación y revisión condujeron al establecimiento tabulado y ponderado de sus características, para derivar un esquema de resultados en tablas que facilitó la inferencia de conclusiones y la selección de una técnica específica para una aplicación con requerimientos particulares. Las referencias relacionadas se presentan a continuación.

Mahmoud (2016) realizó la comparación entre los algoritmos INC, P&O y FLC considerando los criterios: tiempo de establecimiento, Seguimiento de precisión, complejidad de implementación y eficiencia. Se concluyó que el método FLC proporciona mejores resultados: respuesta más rápida, reducción de las perturbaciones en estado estable y mayor eficiencia; por lo tanto, puede considerarse como el rastreador de mayor robustez.

En este estudio se realizó el diseño y simulación de los controladores de seguimiento de potencia máxima INC y P&O con variaciones de irradiancia desde 600 W/m<sup>2</sup> hasta 900 W/m<sup>2</sup>. Los resultados mostraron que el sistema que utiliza el método P&O aumenta la eficiencia de la producción de energía a partir de energía fotovoltaica y tiene mejor respuesta de velocidad, menor oscilación y presenta mayor exactitud en el seguimiento del paso a paso (Saidi, 2016).

En Kolkata, India, se realizó una comparación de los tres algoritmos propuestos bajo condiciones de sombra parcial y abrupto. Se concluyó que, tanto sombreado parcial o sombreado abrupto, el algoritmo FLC ofrece mejor respuesta en comparación con los algoritmos P&O e INC. (Mandal, 2018).

Para reducir las oscilaciones en régimen permanente se propuso unir los métodos de P&O y INC para seguir las variaciones de irradiancia grandes y pequeñas. Los resultados de la comparación mostraron que el algoritmo P&O de tamaño de paso variable hizo un seguimiento rápido, mientras que el algoritmo INC de tamaño de paso variable tardó mayor tiempo en alcanzar el valor de punto máximo de potencia. Se concluyó que, el algoritmo mejorado de tamaño de paso variable logró una mayor eficiencia que los algoritmos P&O e INC (Serrano, 2016).

Igualmente, en Coimbatore India se presentó el modelado de las tres técnicas bajo estudio para varios valores de irradiación solar con la temperatura de la celda constante, y convertidor de refuerzo. Los resultados se compararon basándose en factores como la dependencia de la matriz fotovoltaica, las oscilaciones en el punto de máxima potencia, la complejidad del algoritmo y la convergencia. Las oscilaciones



observadas en los resultados son máximas en P&O y mínimas en FL. Además, el costo y el factor de complejidad son incrementados para el logro de las bajas oscilaciones (Raj, 2017)..

Así mismo, en Chandigarh India se presentó la comparación en términos de velocidad de convergencia, confiabilidad, complejidad y costo para los tres métodos comparados. Se determinó que los métodos P&O y IC presentan mayor eficiencia. El método FLC, es rápido y preciso, pero el costo de implementación es mayor en comparación con los dos anteriores. Se concluyó que la mejor técnica a utilizar es P&O, debido a la facilidad de implementación con menor costo y buena eficiencia al momento de encontrar el punto de máxima potencia (Guar, 2015).

Harrag, (2017) realizó un estudio de la eficiencia de controladores P&O e INC para alimentar una motobomba de CC alimentada por treinta y seis módulos fotovoltaicos. Los resultados mostraron que el INC supera al P&O en velocidad de convergencia; mientras que el P&O presenta mejor rendimiento para la oscilación de estado estable en caso de alto nivel de insolación. En caso de insolación de bajo nivel, las oscilaciones de estado estable son menores en el INC.

En este estudio se simularon las técnicas de P&O e INC. La simulación de ambas técnicas de acuerdo con la curva de potencia vs voltaje, mostraron que cuando la irradiación es alta, el método P&O es eficiente, pero cuando la irradiación es baja, la técnica INC muestra mayor eficiencia (Chowdhury, 2018).

Hammad (2016) comparó los algoritmos P&O y INC en complejidad computacional, así como en oscilaciones cerca del punto de máxima potencia. El rendimiento del sistema mostró que, a una irradiación constante el algoritmo P&O encuentra el máximo punto de potencia rápidamente, pero oscila en este mismo punto. Mientras que con el algoritmo INC se encuentra el máximo punto de potencia con algún retardo, pero las oscilaciones a irradiación constante son menores en comparación con P&O.

Gothwman (2018) y su equipo diseñaron diferentes controladores y compararon la eficiencia del sistema propuesto en cada caso. Esto se realizó mediante el modelado del sistema de generación fotovoltaica con algoritmos P&O INC. De acuerdo con los resultados concluyó que el método de INC tiene mejor rendimiento que el algoritmo P&O para el convertidor de un solo interruptor, tanto como en velocidad de respuesta como en potencia de salida.

Así mismo, Barua (2016) realizó un estudio centrado en estimar el algoritmo adecuado para la implementación del controlador de carga con base en los datos recopilados en diferentes niveles de irradiancia. Se concluyó que el método INC mostró mayor eficacia que el método P&O. El algoritmo INC presentó superioridad en condiciones climáticas adversas.

Este trabajo se centró en la prueba de los métodos P&O e INC en diferentes condiciones climáticas con variaciones en la irradiancia solar. De los resultados obtenidos se concluyó que la tasa de convergencia de INC hacia una salida de potencia de estado estable es más rápida que la técnica P&O, y aunque la diferencia en la eficiencia de ambos métodos sigue siendo baja, aún el método INC demostró ser superior (Swarup, 2018).

Otra comparación de los algoritmos P&O, INC y FLC fue realizada por (Sagonda, 2018), en la que encontró que FLC ofrece mejor rendimiento y mayor confiabilidad que los métodos convencionales, ya que puede rastrear el punto de máxima potencia más rápido y minimizar las oscilaciones de potencia alrededor del punto de potencia máxima. Igualmente observó que el algoritmo P&O se pierde en el seguimiento del punto de máxima potencia bajo irradiación de variación rápida y, cómo el INC es inestable a baja irradiancia.

En este estudio la técnica INC se comparó con la técnica de INC modificada bajo condiciones de prueba estándar. Se comparó el INC modificado con una técnica FLC, para evaluar el mejor controlador para el MPPT. Se determinó la eficiencia del panel cuando se usa INC modificado es ligeramente superior al algoritmo FLC. Se observó que se produce una reducción para la corriente que proviene del módulo PV y la corriente que ingresa al CUK modificado, mientras que los voltajes en los dos niveles son lo mismo (Farayola, 2018).

En esta investigación se propuso un convertidor zeta alimentado desde un panel solar con controlador MPPT P&O e INC. Con base en los resultados se estableció que el método de INC produce mejores resultados cuando se compara con el método P&O y que, para condiciones variables la INC se adapta mejor a las condiciones constantes, en contraste con el algoritmo P&O. Por tanto, para el sistema propuesto el algoritmo INC presenta mayor eficiencia (Jayashree, 2018).

Sankar (2017) propuso un control digital FLC y un controlador dual MPPT, para lograr mayor eficiencia de las celdas solares. El primer

controlador MPPT fue un seguidor solar astronómico de dos ejes. El segundo controlador MPPT controla el convertidor de potencia entre el panel fotovoltaico y la carga mediante un algoritmo P&O mejorado con FLC. Los resultados obtenidos mostraron que la técnica propuesta fue capaz de reducir las oscilaciones de estado estable y mejorar la velocidad de convergencia del punto de operación. De igual forma elimina las oscilaciones resultantes alrededor del punto de máxima potencia.

El objetivo de este estudio fue realizar una comparación entre los métodos de INC y P&O usando MATLAB/SIMULINK. Los resultados obtenidos confirmaron la estabilidad del controlador INC en comparación con el controlador P&O. Así mismo, el método INC presentó mejor rendimiento. Sin embargo, la velocidad de seguimiento del punto de máxima potencia es menor (Maamoun, 2017).

En la investigación realizada por Ahmed, (2016) se comparó el desempeño de los algoritmos P&O y INC, bajo diferentes condiciones operativas (temperatura e irradiación solar). Se estableció que el algoritmo P&O puede alcanzar el punto de máxima potencia con mayor velocidad que el algoritmo INC. El algoritmo INC presentó menores perturbaciones, menor velocidad de conmutación y mayor eficiencia (Ahmed, 2016).

Andaloussi (2017) realizó un estudio para mejorar la eficiencia de un controlador MPPT mediante la integración de un algoritmo de selección automática (ASA) para dos controladores convencionales INC y P&O. Se estudió la robustez, la velocidad, la precisión y el rendimiento del sistema fotovoltaico. La técnica propuesta mostró precisión en el seguimiento del punto de máxima potencia respuesta satisfactoria en estado estable y adaptabilidad en condiciones transitorias.

Otra comparación entre los algoritmos P&O e INC modificados bajo niveles de irradiación solar variable se realizó. Se determinó que el algoritmo INC modificado realizó el seguimiento al punto de máxima potencia con mayor velocidad y mayor exactitud que los otros MPPT. Adicionalmente, no exhibió oscilación de estado estable lo que resulta en menor pérdida de potencia. Por lo que se concluyó que el algoritmo INC opera mejor, bajo condiciones variables de irradiancia solar (Ahmad, 2015).

En este artículo se presentó una comparación teórica y experimental entre los algoritmos P&O e INC. Se observó que, a bajas tasas de perturbación, se pueden implementar los dos algoritmos con un microcontrolador de bajo

precio. Mientras que, para altas tasas de perturbación, ambos algoritmos exigen un microcontrolador de mayor velocidad, ya que se requiere un cálculo adicional para el algoritmo INC. El aumento en el costo de implementación (Elgendy, 2016).

Shadlu, (2018) comparó las técnicas P&O y INC en cuanto a su rendimiento. Los resultados demostraron que el método INC presenta mejor comportamiento en términos de potencia de salida PV y potencia de oscilaciones de carga trifásica y también la extracción del punto de máxima potencia desde el panel fotovoltaico. Se concluyó que el algoritmo INC tiene mejor desempeño en comparación con el algoritmo P&O con respecto a seguimiento del punto de máxima potencia con menos oscilaciones en la potencia activa extraída del panel fotovoltaico.

Así mismo, Meng (2016) realizó un estudio para comparar los algoritmos P&O y INC para estudiar la exactitud, velocidad de seguimiento y eficiencia, bajo condiciones de irradiancia con cambios leves y en condiciones de irradiancia cambiante. La comparación mostró que el algoritmo INC modificado realizó el seguimiento con mayor rapidez y eficiencia bajo condiciones de irradiancia variable en comparación con el algoritmo P&O convencional.

Mediante una revisión de los esquemas MPPT se encontró que el algoritmo P&O es el de mayor uso por su facilidad de implementación. También se consideró el algoritmo INC por su velocidad, precisión, y baja oscilación en régimen permanente, pero cuya implementación es de mayor complejidad. Se determinó que el algoritmo INC es capaz de rastrear la potencia máxima para todas las variaciones dinámicas y, por lo tanto, sería una solución atractiva para un sistema trifásico con sistemas fotovoltaicos conectados a la red (Prakash, 2015).

Finalmente, en el estudio de (Zinelaabidine, 2017) se compararon los algoritmos P&O, INC y FLC. Según los resultados, el algoritmo P&O presentó fácil implementación. El algoritmo INC presentó oscilaciones alrededor del punto de máxima potencia, pero es ventajoso debido a la velocidad de respuesta ante cambios rápidos de las condiciones meteorológicas siendo de mayor complejidad que el P&O en su implementación. Desde otra perspectiva el algoritmo FLC realizó con mayor precisión el seguimiento del punto de máxima potencia, aunque la complejidad en su implementación es mayor que los algoritmos de P&O y INC.

### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se sistematizaron mediante la herramienta Excel y se clasificaron y ponderaron de acuerdo con las categorías y parámetros de desempeño establecidos en el diseño metodológico de este estado del arte.

Inicialmente se relacionan las características relevantes del algoritmo FLC, derivadas de las seis referencias relacionadas en el aparte 2.2 las cuales se presentan en la tabla 1.

*Tabla 1: Características MPPT Lógica Difusa*

Ref.	Rend.	Osc.	Vel.
7		1	
8	1		
9	1		
10			1
11			1
12			1
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>

De acuerdo con la ponderación (número mayor corresponde a la característica de mayor relevancia) realizada sobre los resultados de la tabla 1, la técnica FLC ofrece alta velocidad en el seguimiento del punto de potencia máxima, eficiencia media en referencia a la potencia entregada y alta oscilación en régimen permanente.

En la tabla 2 se presenta la ponderación de las características relevantes de la técnica INC, derivadas de las cuatro referencias relacionadas en el aparte 2.3.

*Tabla 2: Características MPPT Conductancia Incremental INC.*

Ref.	Rend.	Osc.	Vel.
13		1	1
14		1	
15	1		
16	1	1	
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

De acuerdo con la ponderación (número mayor corresponde a la característica de mayor relevancia) realizada sobre los resultados de la tabla 2, la técnica INC ofrece baja oscilación en régimen permanente, eficiencia media en referencia a la potencia entregada y baja velocidad en el seguimiento del punto de potencia máxima.

En la tabla 3 se presenta la ponderación de las características relevantes de la técnica P&O, derivadas de las 15 referencias relacionadas en el aparte 2.4. De igual forma se manifiesta que en cuanto a facilidad de implementación esta técnica es mayor lo que redundará en un bajo costo.

*Tabla 3: Características MPPT Perturbar y Observar P&O.*

Ref.	Rend.	Osc.	Vel.
17		1	1
18	1	1	
19	1		
20		1	1
21			1
22			1
23	1		1
24			1
25	1		
26	1		1
27	1	1	1
28	1		1
29	1	1	
30		1	1
31	1	1	
<b>TOTAL</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>11</b>

De acuerdo con la ponderación (número mayor corresponde a la característica de mayor relevancia) realizada sobre los resultados de la tabla 3, la técnica P&O ofrece alta velocidad en el seguimiento del punto de máxima potencia, eficiencia media en referencia a la potencia entregada y baja oscilación en régimen permanente.

Finalmente, con el objetivo de facilitar la escogencia de una técnica específica para una aplicación particular, en el aparte 2.5 se relacionaron 25 reseñas que compararon las técnicas estudiadas de acuerdo con los parámetros escogidos en el diseño metodológico del estado del arte, las cuales se relacionan en la tabla 4, donde B=bajo, M=medio y A=alto; FLC=Lógica Difusa, INC=Conductancia Incremental y P&O=Perturbar y Observar. El color verde representa la mejor opción, el color naranja representa la opción media y el color rojo la peor opción.



*Tabla 4: Comparativo y ponderación de las características de las técnicas FLC, INC y P&O.*

Parámetro	FLC			INC			P&O		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A
Rendimiento			8		11	2	7	9	5
Baja Oscilación	4			5	6		1	5	2
Alta Velocidad			4	2	5	2		1	12
Baja Dificultad			1	1	2	1	8		
Bajo Costo			2		2		3		

De los resultados de la tabla 4 se infiere que en referencia al parámetro “RENDIMIENTO” que se refiere a la eficiencia del controlador con respecto a la potencia la técnica que presenta el mayor rendimiento FLC, la técnica INC presenta rendimiento medio y la técnica P&O presenta bajo rendimiento.

Así mismo, en referencia al parámetro “OSCILACIÓN” que se refiere a la oscilación producida por el controlador MPPT en régimen permanente, la técnica FLC presenta la menor oscilación, la técnica INC oscilación moderada y la técnica P&O la oscilación presente es alta.

De igual forma, con respecto al parámetro “VELOCIDAD” que se refiere a la rapidez con la cual el controlador MPPT converge al punto de potencia máxima, la técnica P&O presenta alta velocidad, la técnica INC presenta velocidad media y la técnica FLC presenta baja velocidad de convergencia al punto de potencia máxima.

El parámetro “DIFICULTAD DE IMPLEMENTACIÓN” se refiere a la complejidad de la implementación de las técnicas para los controladores MPPT. La técnica P&O presenta la menor complejidad de implementación, la técnica INC presenta dificultad media y la técnica FLC presenta alta complejidad en su implementación.

Por último, el parámetro “COSTO” se refiere a lo oneroso que resulta la implementación de un controlador MPPT con las técnicas estudiadas. Para este parámetro la técnica que presenta menor costo en su implementación P&O, mientras que la técnica INC presenta un costo de implementación medio. Finalmente, técnica FLC presenta el mayor costo entre las técnicas estudiadas.

#### 4. CONCLUSIONES

Con fundamento en los resultados obtenidos se concluye que entre las técnicas estudiadas la que consigue indicadores de mejor desempeño es Perturbar y Observar P&O que se caracteriza por la baja dificultad para su implementación y su bajo costo, lo que ha convertido la técnica en la preferida por la comunidad científica, la cual ha subsanado el bajo rendimiento y la oscilación en régimen permanente mediante mejoras integradas, que convierten la técnica en Perturbar y Observar Mejorado.

En segunda instancia se tiene a la técnica de Conductancia Incremental INC que presenta un comportamiento medio en los cinco parámetros estudiados con baja oscilación en régimen permanente.

Por último, se tiene a la técnica basada en Lógica Difusa FLC que presenta alto rendimiento y baja oscilación en régimen permanente, que además requiere el conocimiento previo de la dinámica del sistema para integrarlo a su base de conocimiento. Estas características podrían compensar su dificultad en la implementación y el alto costo de desarrollo.

#### REFERENCIAS

- Ahmad. S, R. T. (2015). *A thecnical comparasion among different PV-MPPT algorithms to observe the effect of fast changing solar irradiation*. 2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 155-158.
- Ahmed. S, A. B. (2016). *MPPT Algorithms: Performance and Evaluation*. 2016 11th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), 461-466.
- Alik. R, J. A. (2015). *An Improved Perturb and Observe Checking Algorithm MPPT for Photovoltaic System under Partial Shading Condition*. 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 398 - 402.
- Andaloussi. Z, A. R. (2017). *Toward an approach to Improve MPPT Efficiency for PV System*. 2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 1-5.
- Avance Jurídico (2017). *Ley 1715 de 2014. Bogotá, Colombia*
- Bahrami. M, Z. G. (2016). *A New Hybrid Method of MPPT for Photovoltaic Systems*

- Based on FLC and Three Point-Weight Methods*. 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016), 446-450.
- Bolaños, M. (2015). *Técnicas de optimización en paneles solares: Seguimiento del punto máxima de potencia*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Botina, O., & Jurado, O. (2015). *Desarrollo de un controlador electrónico con MPPT para sistemas fotovoltaicos*. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- Canny, D, Y. F. (2018). *Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm Simulation Based on Fuzzy Logic Controller on Solar Cell with Boost Converter*. 2018 2nd International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 117 - 121.
- Chowdhury, A, R. T. (2018). *A Complete Comparison of the two Maximum Power Point Tracking Technique (MPPT) for Photovoltaic systems*. 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 72-76.
- Barua, N, D. C. (2016). *Efficient Implementation of Cost-effective MPPT Solar Photovoltaic System Based on the Comparison between Incremental Conductance and P&O Algorithm*. 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 143 - 146.
- Dannier, A, C. M. (2018). *Enhanced MPPT algorithm for Multilevel PV Inverter*. 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 847-852.
- Deopare, H, D. A. (2016). *Fuzzy Based Incremental Conductance Algorithm for PV system*. 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), 683- 687.
- Elgendy, M. (2016). *A Comparative Investigation on Hill Climbing MPPT Algorithms at High Perturbation Rates*. 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), 1-6.
- Farayola, A, H. A. (2017). *Comparison of Modified Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Algorithm Using Modified CUK Converter*. 8th International Renewable Energy Congress (IREC), 1-6.
- Galeano Bate, S. (2014). *Beneficios de la utilización de energía solar en la escuela básica N°4765 de la comunidad indígena la promesa en el departamento de presidente Hayes*. Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación. Buenos Aires, Argentina.
- Gaur, P, P. V. (2015). *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications: A Comparative Study*. Proceedings of 2015 RAECS UIET Panjab University Chandigarh 21-22nd December 2015, 1-5.
- Gowtham, T, R. (2018). *Comparative analysis of incremental conductance and perturb & observe MPPT Methods for single-switch DC/DC converter*. 2018 National Power Engineering Conference (NPEC), 1-5.
- Hammad, M, B. C. (2016). *Comparision of 'Perturb & Observe' and 'Incremental Conductance', Maximum Power Point Tracking algorithms on real environmental conditions*. 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube), At Quetta, Pakistan, 313 - 317.
- Harrag, A, T. A. (2017). *P&O or IC for PV pumping system: What MPPT algorithm to improve performances?* 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC), 220 - 225.
- Jayashree, U, N. D. (2018). *An Implementation of basic MPPT techniques for zeta converter*. 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 601-604.
- John, R, M. S. (2017). *Variable Step Size Perturb and Observe MPPT Algorithm for Standalone Solar Photovoltaic System*. 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TECHNIQUES IN CONTROL, OPTIMIZATION AND SIGNAL PROCESSING, 1-6.
- Khadidja, S, M. M. (2017). *Simulation and analysis of variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic power control*. 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 1- 4.
- Kumar, D, K. M. (2015). *Experimental Assessment of PV Arrays Connected to Buck-Boost Converter using MPPT and Non-MPPT Technique by Implementing in Real Time Hardware*. Proceedings of 2015 3rd International Conference on Advances in Electrical Engineering, 306-309.
- Lakshmi, D, R. M. (2017). *A modified incremental conductance algorithm for partially shaded PV array*. 2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 1-6.

- Maamoun. M, K. S. (2017). *Comparative study of incremental conductance and perturb & observe MPPT methods for photovoltaic system*. 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 1-6.
- Mahmoud. Z, H. M. (2016). *A Comparative Study of Four Widely-Adopted MPPT Techniques for PV Power Systems*. Proceedings of 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT-2016) Tunisia, Hammamet- December, 16-18,2016, 1-8.
- Mandal. D, M. B. (2018). *Efficient Power Extraction from SPV system in Partially Shaded Condition: A Comparative Study between Classical and Fuzzy Logic Control*. 2018 Fifth International Conference on Emerging Applications of Information Technology (EAIT), 1- 4.
- Meng. T, D. H. (2016). *Comparative study of P&O and Modified Incremental Conductance algorithm in solar maximum power point tracking*. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016), 1-6.
- Moussua. I, B. K. (2017). *New MPPT Algorithm Modeling for Photovoltaic Emulator Designed in FPGA*. 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 1-7.
- Na. L, D.-m. Z. (2017). *Research on MPPT Control Based on Combined Algorithm of Perturbation Observation*. 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 6989-6994.
- Ortíz, P. (2017). *Metodologías de diseño conjunto de controladores y algoritmos MPPT para sistemas fotovoltaicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Eléctrica, Electrónica y computación.
- Padmanabhan Vipin, B. V. (2015). *Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracker for a Photovoltaic System*. International Conference on Power, Signals, Controls and Computation, 1-6.
- Patil. R, A. (2017). *Comparative Analysis of Fuzzy Based MPPT for Buck and boost converter Topologies for PV Application*. International Conference on Smart Technology for Smart Nation 2017, 1479-1484.
- Prakash. L, A. M. (2015). *Simulation and Performance Analysis of MP PT for Single Stage PV Grid Connected System*. IEEE Sponsored 9th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 1-6.
- Prasetyono. E, O. D. (2017). *A Modified MPPT Algorithm Using Incremental Conductance for Constant Power Generation of Photovoltaic Systems*. International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), 1-6.
- Rahim. N, A. A. (2016). *Modified Incremental Conductance MPPT with Direct Control an Dual Scaled Adaptative Step-size-Method*. 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), 1-8
- Raj. P, J. (2017). *Modeling and performance analysis of perturb & observe, incremental conductance and fuzzy logic MPPT controllers*. 2017 International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT), 13-18.
- Reddy. D, R. S. (2017). *A fuzzy logic MPPT controller based three phase grid-tied solar PV system with improved CPI voltage*. International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies [i-PACT2017], 1-6.
- Saidi. A, B. C. (2016). *Comparasion of IC and P&O algorithms in MPPT for grid connected PV module*. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 213-218.
- Sagonda. A, F. A. (2018). *Comparison of Three Techniques for Maximum Power Point Tracking of Solar PV*. 2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 1-8.
- Salazar. J, O. E. (2016). *Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm Based on a Narrow Set of Initial Conditions*. 2016 IEEE ANDESCON, 1-4. Obtenido de <https://www.thinksrs.com/downloads/programs/therm%20calc/ntccalibrator/ntccalculator.html>.
- Samal. S, B. S. (2018). *Extraction of maximum power from a solar PV system using fuzzy controller based MPPT technique*. 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), 1-6.
- Sankar. R, V. S. (2017). *A Maximum Power Extraction in PV System using Fuzzy Logic and Dual MPPT Control*. International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017), 3764- 3769.

- Serrano, X, G. J. (2016). *Improved variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems*. 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-6.
- Shadlu, M. (2018). *A comparative study between two MPPT algorithms for Photovoltaic Energy Conversion System Based on Modular Multilevel Converter*. 26th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2018), 1154-1159.
- Sher, H, M. A. (2015). *A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 1426 - 1434.
- Shourov, E, S. S. (2018). *A Novel Implementation of the State Flow Approach for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems*. 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 1-6.
- Sivaramakrishnan.S. (2015). *A novel hybrid MPPT algorithm using Linear Extrapolation*. 2015 Intl. Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet'15), Dec. 16-19, 2015, Trivandrum, India, 643-648.
- Swarup, A, S. (2018). *Comparative study and simulation of different MPPT techniques in MATLAB/Simulink*. 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT), 1524 - 1528.
- Vivek, P, A. R. (2016). *A Novel Approach on MPPT Algorithm for Solar Panel using Buck Boost Converter*. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 122-129.
- Zinelaabidine.N, K. B. (2017). *MPPT Algorithm control for Grid Connected PV Module*. 3rd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing - ATSIP'2017, 1-6. Madrid.
- Espada, B. (2018). *ENERGÍA SOLAR VENTAJAS Y DESVENTAJAS*. ERenovable. <https://erenovable.com/energia-solar-ventajas-y-desventajas/> (19 de junio de 2018)
- SunColombia. (2017). *¿Qué es la Ley 1745?* <https://www.suncolombia.com/preguntas-frecuentes/> (23 de junio de 2017).

### SITIOS WEB

- Ahumada, Ó. (2017). *Nueve de cada 10 proyectos para generar energía usarán paneles solares*. El Tiempo, Colombia. <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-colombia-9-de-cada-10-proyectos-de-energia-usaran-paneles-solares-162616>. (17 de diciembre de 2017).