

Revisión de técnicas de control aplicadas a sistemas fotovoltaicos para el seguimiento del punto de máxima potencia

Cantero Abreu. N.E.¹, González Montañez F.², Jiménez Mondragón V.²
Aragón Verduzco D.²

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electromagnética, Av. San Pablo 420, Col.Nueva El Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, CDMX., al2222802086@uam.azc.mx

² Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía, Av. San Pablo 420, Col.Nueva El Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, CDMX., fjgm@uam.azc.mx

Resumen

En este artículo se presenta una revisión y evaluación de las estrategias de control predominantes utilizadas en el seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en sistemas de generación de energía renovable, centrándose específicamente en aplicaciones fotovoltaicas. Se abordan diversas técnicas de control, como el método Perturbar y Observar (P&O), el enfoque de Conductancia Incremental (Incremental Conductance IC), el algoritmo de búsqueda de eficiencia (seek algorithm), y se destaca la exploración de los algoritmos basados en lógica difusa. El análisis detalla las ventajas y desventajas de estas estrategias, así como su aplicabilidad en sistemas de generación de energía fotovoltaica. Como resultado, se resalta la efectividad de los algoritmos basados en lógica difusa para mejorar el seguimiento del Punto de Máxima Potencia y su creciente relevancia en la industria de energía renovable. Este trabajo contribuye al avance de técnicas de control más precisas y eficientes en sistemas fotovoltaicos sostenibles.

Palabras clave— MPPT, energía renovable, estrategias de control, paneles solares.

Abstract

This article presents a review and evaluation of the predominant control strategies used in Maximum Power Point Tracking (MPPT) for renewable energy generation systems, focusing specifically on photovoltaic applications. Various control techniques are discussed, such as the Perturb and Observe method (P&O), the Incremental Conductance (IC) approach, the efficiency-seeking algorithm, and particular emphasis is placed on the exploration of fuzzy logic-based algorithms. The analysis details the advantages and disadvantages of these strategies, as well as their applicability in photovoltaic energy generation systems. As a result, the effectiveness of fuzzy logic-based algorithms in improving Maximum Power Point Tracking is highlighted, along with their growing relevance in the renewable energy industry. This work contributes to the advancement of more precise and efficient control techniques in sustainable photovoltaic systems.

Keywords— MPPT, renewable energy, control strategies, solar panels.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar, como fuente renovable inagotable, tiene un gran potencial para la generación de electricidad a través de paneles solares. Sin embargo, existen desafíos que limitan su eficiencia y rentabilidad. En la actualidad, los paneles solares más comunes en el mercado tienen una eficiencia de conversión de luz solar a energía eléctrica que oscila entre el 9% y el 17% [1]. Además, esta eficiencia varía a lo largo del día debido a factores ambientales como la irradiancia y la temperatura.

Las variaciones en la cantidad de luz solar que alcanza el panel solar pueden ser causadas por diversas interferencias entre el sol y el panel. Estas interferencias tienen un efecto inmediato en la cantidad de energía eléctrica generada [2]. Sin embargo, en muchas situaciones, no es práctico conectar directamente la carga al panel solar. Por lo tanto, se hace necesario incorporar un componente de conversión de energía, como un convertidor DC-DC, que ajusta la salida del panel solar para adaptarla a los requerimientos de la carga [3]. Esta fase de conversión también brinda la posibilidad de controlar la potencia generada por el panel solar para aprovecharla de

manera óptima. Con este fin, se persigue que el panel funcione en su punto de máxima potencia (PMP), que es el punto en el cual el producto del voltaje y la corriente alcanza su valor máximo.

En los últimos años, se han investigado y propuesto diversas técnicas de control para llevar a cabo el seguimiento del Punto de Máxima Potencia (PMP) en paneles fotovoltaicos. Estos métodos han sido propuestos por diferentes investigadores, y cada uno tiene su enfoque particular para lograr la eficiencia óptima del sistema fotovoltaico. Algunos de los métodos mencionados en la literatura incluyen el control de las características del módulo fotovoltaico para adaptarse a condiciones de carga específicas [4]. La aplicación de redes neuronales en la tarea de seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en paneles fotovoltaicos ha surgido como una estrategia altamente prometedora para mejorar la eficiencia y el rendimiento en sistemas de energía solar. Estas redes, basadas en el aprendizaje automático, han sido ampliamente estudiadas y aplicadas en la industria fotovoltaica. Investigaciones como las de [5] [6] [7] [8] han demostrado la eficacia de las redes neuronales en el seguimiento del MPPT, logrando mejorar la eficiencia de los paneles solares y maximizar la producción de

energía. Estas técnicas innovadoras ofrecen una alternativa sofisticada y precisa a los tradicionales métodos de seguimiento de MPPT, abriendo nuevas posibilidades para la optimización de la generación de energía solar [9].

En referencia al trabajo citado en [10], se implementaron algoritmos de control basados en lógica difusa en un sistema fotovoltaico aislado en simulación. Este sistema fue potenciado mediante un convertidor DC-DC de empuje y tracción, que incorpora un transformador para garantizar el aislamiento y aumentar adecuadamente el voltaje. En [1] [11] [12] [13] [14], emplean este algoritmo como una solución innovadora y prometedora para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, así como el ajuste continuo de la carga vista por el sistema fotovoltaico para encontrar el PMP [15] [16].

A través del presente estudio, se persigue la mejora sustancial de la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de generación de energía solar. El enfoque adoptado se fundamenta en la implementación de algoritmos y técnicas de control altamente avanzados, los cuales posibilitan la maximización óptima del potencial inherente a los paneles solares. En este sentido, la investigación se orienta hacia la exploración de soluciones innovadoras que permitan optimizar la captación y conversión de la radiación solar en energía utilizable.

II. MODELO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Las células solares se constituyen esencialmente de una unión p-n ubicada en una capa delgada o lámina de semiconductor. Mediante el efecto fotovoltaico [17], la energía electromagnética proveniente del sol puede transformarse de manera directa en electricidad. Cuando están expuestas a la luz solar, los fotones con una energía superior a la banda prohibida del semiconductor son absorbidos, dando origen a pares electrón-hueco en proporción a la intensidad de la irradiación. Estos portadores de carga se separan debido a los campos eléctricos internos de la unión p-n, generando una corriente fotovoltaica que es directamente proporcional a la cantidad de luz incidente [18].

En la Fig. 1 se ilustra el circuito eléctrico equivalente de una celda solar fotovoltaica (FV). En este circuito, se representa una fuente de corriente generada por la luz incidente, que simboliza la conversión de energía solar en corriente eléctrica. La corriente generada está relacionada con la intensidad radiante incidente y otros factores, como la temperatura.

Además, se incluye un diodo (D), que representa la resistencia no lineal de la juntura p-n de la celda solar. Este diodo tiene la función de permitir que la corriente fluya en una dirección específica, evitando corrientes inversas no deseadas. La resistencia intrínseca paralela (R_p) y la resistencia intrínseca en serie (R_s) también forman parte del circuito, y representan las resistencias internas de la celda solar.

En la Fig. 2 se ilustran las curvas de corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) de salida del sistema FV. Se puede observar cómo el punto de máxima potencia (PMP) del sistema fotovoltaico sigue una trayectoria específica en diferentes condiciones climáticas, lo que determina los valores máximos y mínimos de tensión en los terminales del sistema. Este PMP

es crucial para ajustar la tensión y lograr la máxima eficiencia y generación de energía en distintas situaciones.

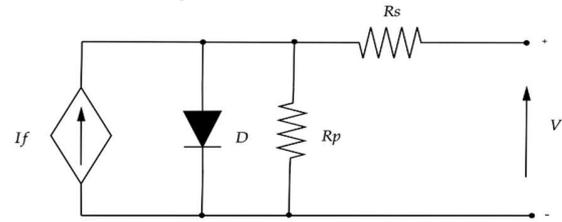


Fig. 1. Modelo equivalente de una celda FV.

Las estrategias de control basadas en el seguimiento del PMP permiten optimizar el rendimiento de los paneles solares, adaptándose de manera continua a las variaciones de radiación solar y temperatura, independientemente de la carga. Estas estrategias son especialmente relevantes en aplicaciones conectadas a la red eléctrica, donde es necesario garantizar la generación óptima de energía y aprovechar al máximo las condiciones climáticas cambiantes.

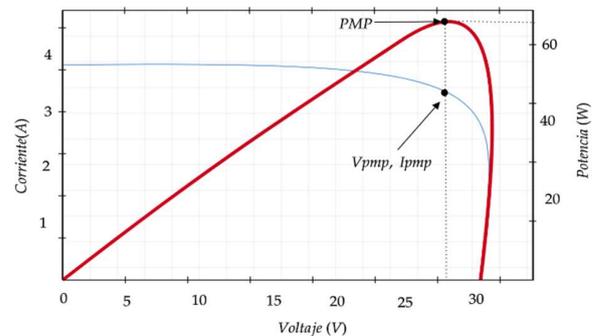


Fig. 2. Curvas I-V, P-V para el MPPT.

III. PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL MPPT

El MPPT es de vital importancia en los sistemas fotovoltaicos, ya que asegura una eficiencia óptima en la generación de energía a partir de paneles solares. Con el fin de mejorar este proceso y maximizar la producción de energía solar, se han desarrollado diversas estrategias de control. A continuación, se describen las principales estrategias de control utilizadas en este contexto:

1. Algoritmo P&O (Perturb and Observe)

El método "Perturbar y Observar" (P&O) constituye una de las estrategias de control más ampliamente adoptadas para el rastreo del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. Su metodología radica en introducir perturbaciones al punto de funcionamiento del panel solar y observar las modificaciones resultantes en la potencia generada, con la finalidad de identificar el punto de máxima potencia (Ver Fig. 3).

El principio detrás del algoritmo P&O es simple. Consiste en realizar pequeñas perturbaciones en el voltaje o corriente de entrada del panel solar y observar cómo varía la potencia generada [19]. El algoritmo ajusta la perturbación en función de la dirección en la que cambia la potencia. Si esta potencia aumenta, entonces el algoritmo continúa en la misma dirección

de perturbación, ya que está acercándose al punto de máxima potencia. Si la potencia disminuye, el algoritmo cambia la dirección de perturbación, ya que está alejándose del punto de máxima potencia. El objetivo es encontrar el punto de operación donde la potencia generada es máxima.

El algoritmo P&O opera mediante un lazo de retroalimentación básico. En este método, se recopilan mediciones del voltaje y corriente generados por el panel solar, lo que permite calcular la potencia actual generada. Estos valores se comparan con los de la potencia previa para determinar la dirección en la que debe aplicarse la perturbación. Dependiendo de la implementación específica, las perturbaciones pueden ser realizadas variando el voltaje o la corriente del panel. El algoritmo se repite continuamente, realizando perturbaciones y ajustando la dirección hasta que se alcanza el punto de máxima potencia.

En cuanto a los métodos de ajuste del algoritmo P&O, existen diferentes enfoques para optimizar su rendimiento. Algunos métodos de ajuste incluyen la adaptación de la amplitud de las perturbaciones en función de la velocidad de seguimiento, la utilización de retrasos para evitar oscilaciones en el PMP en el punto de máxima potencia y la incorporación de técnicas de filtrado para reducir el impacto del ruido en las mediciones [20]. Estos ajustes buscan mejorar la eficiencia y la estabilidad del algoritmo P&O en diferentes condiciones de operación.

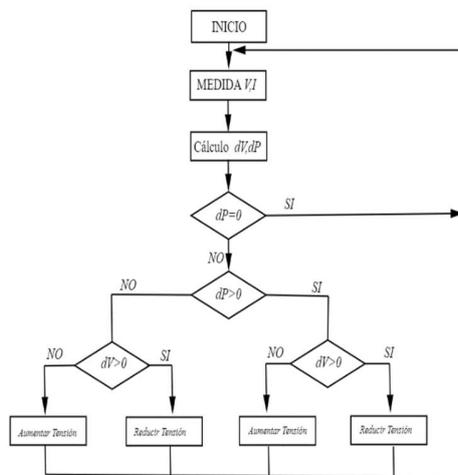


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.

2. Algoritmo Conductancia Incremental (Incremental Conductance)

Este método representa otra estrategia ampliamente empleada para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos. Su fundamento se sustenta en el reconocimiento de que el punto de máxima potencia se logra cuando la pendiente de la curva de potencia-voltaje es igual a cero [21].

El algoritmo se basa en el análisis de la relación entre los cambios en la potencia y el voltaje para determinar la dirección óptima de ajuste del punto de operación del panel solar. Si la pendiente de la curva de potencia-voltaje es positiva, esto indica que el panel se encuentra lejos del punto de máxima potencia y

requiere un ajuste en esa dirección. Por el contrario, si la pendiente es negativa, significa que el panel ha pasado el punto de máxima potencia y necesita ser ajustado en la dirección opuesta. Cuando la pendiente es cero, se ha logrado alcanzar el punto de máxima potencia [22].

El algoritmo Conductancia Incremental calcula la pendiente de la curva de potencia-voltaje mediante la diferenciación de las mediciones de corriente y voltaje en el panel solar. La relación incremental entre los cambios de potencia (dP) y voltaje (dV) se compara con un umbral predefinido. Si la relación dP/dV es mayor que el umbral, se ajusta el punto de operación del panel solar hacia una dirección específica. Si es menor que el umbral, se ajusta en la dirección opuesta. Si dP/dV es igual al umbral, significa que se ha alcanzado el punto de máxima potencia y no se requiere ningún ajuste adicional [23].

Este algoritmo es conocido por su rápida convergencia y su capacidad para adaptarse a las variaciones ambientales y de carga. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones y desventajas. Una de ellas es que puede generar oscilaciones alrededor del punto de máxima potencia en condiciones de cambio rápido de la irradiancia solar o la temperatura del panel. Esto puede afectar la eficiencia del sistema y provocar un desgaste prematuro del panel solar [24].

En cuanto al ajuste del algoritmo Conductancia Incremental, existen diferentes enfoques. Algunos métodos utilizan un umbral fijo predefinido que determina la sensibilidad del algoritmo a los cambios en la pendiente de la curva de potencia-voltaje. Otros métodos más avanzados emplean técnicas de ajuste adaptativo que permiten optimizar el rendimiento del algoritmo en función de las condiciones específicas del panel solar y el entorno.

El comportamiento y el criterio principal se pueden detallar en la Fig. 4, mediante su diagrama de flujo, donde se aprecian sus funciones principales.

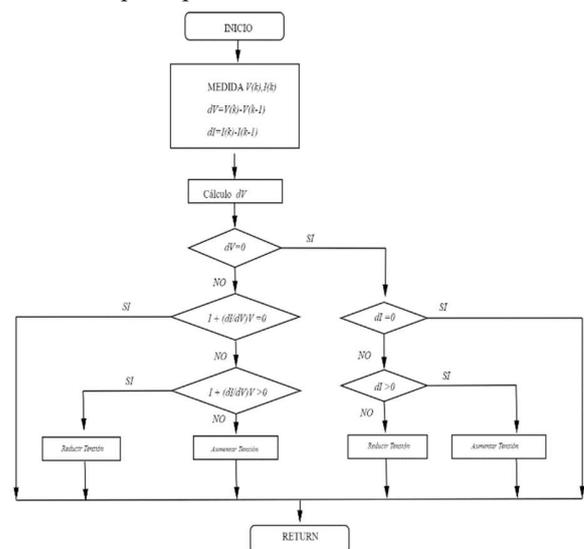


Fig. 4. Diagrama de flujo del algoritmo Conductancia Incremental.

3. Algoritmos basados en redes neuronales

Una técnica de control para el MPPT, basada en redes neuronales, capitaliza el poder del aprendizaje automático para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Esta aproximación se basa en el principio de que las redes neuronales pueden aprender y adaptarse a partir de datos de entrada para producir una salida óptima.

La esencia de esta estrategia basada en redes neuronales radica en entrenar la red utilizando un conjunto de datos históricos que contenga información acerca de las condiciones ambientales, tales como radiación solar, temperatura y humedad, así como los valores de corriente y voltaje del panel fotovoltaico [22]. A lo largo del proceso de entrenamiento, la red neuronal ajusta sus pesos y conexiones internas para encontrar la relación óptima entre las condiciones ambientales y el PMP [8] [25].

Una vez entrenada, la red neuronal puede utilizarse en tiempo real para predecir el PMP en función de las condiciones actuales del sistema. Para ello, se introducen las variables ambientales actuales en la red neuronal y se obtiene una predicción del PMP. Esta predicción se utiliza para ajustar la operación del sistema fotovoltaico y maximizar su eficiencia [26].

El ajuste de los algoritmos basados en redes neuronales implica principalmente dos etapas: entrenamiento y validación. Durante el entrenamiento, se utiliza un conjunto de datos históricos para ajustar los pesos y conexiones de la red neuronal. El objetivo es minimizar la diferencia entre la salida predicha por la red y los valores reales del PMP.

Después del entrenamiento, se realiza la etapa de validación utilizando un conjunto de datos separado que no se utilizó en el entrenamiento. Esto permite evaluar el rendimiento de la red neuronal en condiciones nuevas y asegurar que pueda generalizar correctamente.

4. Algoritmos basados en lógica difusa

Los algoritmos basados en lógica difusa son estrategias de control que utilizan conjuntos difusos y reglas lingüísticas para ajustar el seguimiento del punto de máxima potencia (PMP) en paneles fotovoltaicos. Estos algoritmos basan su principio en la lógica difusa, que permite manejar la incertidumbre y la imprecisión en los datos [27].

El enfoque principal de estos algoritmos es capturar la relación no lineal entre las variables de entrada, como la radiación solar y la temperatura, y la salida deseada, que es el ajuste del voltaje o la corriente del panel solar para maximizar la generación de energía. En lugar de utilizar reglas rígidas, las reglas lingüísticas en la lógica difusa describen la relación entre las variables de manera más flexible, utilizando términos lingüísticos como "bajo", "medio" y "alto" [28].

El funcionamiento de los algoritmos basados en lógica difusa implica tres etapas principales: fuzzificación, inferencia difusa y defuzzificación. En la etapa de fuzzificación, las variables de entrada se asignan a conjuntos difusos mediante funciones de membresía que representan su grado de pertenencia a cada conjunto. Luego, en la etapa de inferencia difusa, se aplican las reglas lingüísticas para determinar el grado de activación de cada regla en función de los conjuntos difusos de entrada.

Finalmente, en la etapa de defuzzificación, se obtiene una salida precisa mediante técnicas de agregación y defuzzificación, que convierten los resultados difusos en un valor concreto de ajuste del voltaje o la corriente [28].

En cuanto a los métodos de ajuste, se utilizan diferentes enfoques. Uno de los métodos comunes es el ajuste manual o basado en la experiencia de expertos en el campo fotovoltaico. Los expertos pueden ajustar los conjuntos difusos, las reglas lingüísticas y los umbrales de activación para mejorar el rendimiento del algoritmo. Otro enfoque es el ajuste automático mediante técnicas de optimización, como algoritmos genéticos o algoritmos de búsqueda, que buscan encontrar los mejores valores de los parámetros del controlador difuso a través de la retroalimentación del sistema y la comparación con los valores esperados de generación de energía.

En resumen, los algoritmos basados en lógica difusa en el seguimiento del PMP de paneles fotovoltaicos utilizan conjuntos difusos y reglas lingüísticas para ajustar el voltaje o la corriente del panel solar. Su enfoque flexible y adaptable permite capturar la relación no lineal entre las variables de entrada y salida. Mediante la fuzzificación, inferencia difusa y defuzzificación, se obtiene una salida precisa. Los métodos de ajuste pueden ser manuales o automáticos, utilizando la retroalimentación del sistema y técnicas de optimización para mejorar el rendimiento del algoritmo.

IV. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ALGORITMOS EN EL MPPT

A continuación, se brinda una argumentación más detallada sobre las ventajas y desventajas de las estrategias de control para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos:

1. Algoritmo P&O

Ventajas

Fácil implementación y bajo costo: El algoritmo P&O es relativamente sencillo de implementar, lo que lo hace una opción atractiva en términos de costo. No requiere componentes o algoritmos adicionales complejos, lo que facilita su aplicación en sistemas fotovoltaicos.

No requiere un modelo matemático preciso del panel solar: A diferencia de otros algoritmos, el P&O no depende de un modelo matemático preciso del panel solar. Esto lo hace más robusto ante variaciones en las características del panel y simplifica su implementación en sistemas de control en tiempo real.

Buen rendimiento en condiciones de sombreado parcial: El algoritmo P&O ha demostrado ser eficiente en condiciones de sombreado parcial, donde algunos segmentos del panel reciben menos radiación solar que otros. Esto permite una mayor extracción de energía en situaciones en las que solo una parte del panel está sombreada [29].

Desventajas

Puede ser lento en la convergencia hacia el punto de máxima potencia: El algoritmo P&O puede experimentar oscilaciones y

un tiempo de convergencia más lento cuando las condiciones de irradiancia cambian rápidamente. Esto puede limitar su capacidad para seguir de manera eficiente el punto de máxima potencia en condiciones dinámicas.

Puede presentar oscilaciones alrededor del punto óptimo: En algunos casos, el algoritmo P&O puede oscilar alrededor del punto óptimo debido a cambios en las condiciones ambientales. Estas oscilaciones pueden afectar la estabilidad del sistema y reducir su rendimiento general.

Sensible a perturbaciones y ruido en las mediciones de tensión y corriente: El P&O puede verse afectado por perturbaciones o ruido en las mediciones de tensión y corriente del panel. Estas perturbaciones pueden introducir errores en la estimación del punto de máxima potencia y afectar la eficiencia del sistema [30].

2. Algoritmo Conductancia Incremental

Ventajas

Rápida convergencia hacia el punto de máxima potencia: Alta capacidad de respuesta, incluso en condiciones de cambios rápidos de irradiancia. Esto permite una extracción más eficiente de energía en situaciones donde las condiciones ambientales varían con frecuencia.

Mejor rendimiento en comparación con el algoritmo P&O en escenarios de sombreado parcial: Ha demostrado ser más efectivo que el P&O en condiciones de sombreado parcial. Su capacidad para rastrear rápidamente el punto de máxima potencia en presencia de sombras parciales mejora el rendimiento general del sistema fotovoltaico en estas condiciones.

No requiere un modelo matemático preciso del panel solar: Al igual que el algoritmo P&O, el Incremental Conductance no depende de un modelo matemático preciso del panel solar, lo que lo hace más robusto ante variaciones en las características del panel y más fácil de implementar en sistemas en tiempo real [30].

Desventajas

Mayor complejidad de implementación en comparación con el algoritmo P&O: El Incremental Conductance implica un mayor nivel de complejidad en la implementación en comparación con el P&O. Requiere un mayor número de cálculos y operaciones para estimar el punto de máxima potencia, lo que puede aumentar los requisitos de procesamiento y recursos computacionales del sistema.

Mayor sensibilidad a errores de medición y perturbaciones: Puede ser más sensible a errores en las mediciones de tensión y corriente, así como a perturbaciones en el sistema. Estos errores y perturbaciones pueden afectar la precisión del algoritmo y reducir su rendimiento en condiciones no ideales.

Requiere un mayor procesamiento computacional: Debido a la naturaleza del algoritmo y la necesidad de realizar cálculos adicionales, puede requerir un mayor procesamiento computacional en comparación con el P&O. Esto puede tener implicaciones en sistemas con recursos limitados o en aplicaciones de tiempo real [30] [31].

3. Controladores basados en lógica difusa

Ventajas

Capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales y configuraciones de paneles solares: Capacidad de adaptarse a diferentes condiciones ambientales, como cambios en la irradiancia y la temperatura, así como a diferentes configuraciones de paneles solares. Esto les permite ajustar el seguimiento del punto de máxima potencia de manera óptima en una variedad de escenarios.

Buen rendimiento en condiciones de sombreado parcial y variaciones de temperatura: Los controladores difusos han demostrado ser efectivos en condiciones de sombreado parcial, donde algunos segmentos del panel están sombreados, así como en situaciones de variaciones de temperatura. Su capacidad para considerar múltiples variables y adaptarse a estas condiciones mejora el rendimiento general del sistema fotovoltaico.

Menor sensibilidad a ruido y perturbaciones en las mediciones: Los controladores difusos son menos sensibles a ruido y perturbaciones en las mediciones de tensión y corriente en comparación con otros algoritmos. La lógica difusa puede manejar de manera más robusta estas fluctuaciones y reducir el impacto negativo en la estimación del punto de máxima potencia [32].

Desventajas

Mayor complejidad de diseño y ajuste de los parámetros difusos: La implementación de un controlador difuso requiere un diseño y ajuste adecuado de los conjuntos de reglas y los parámetros difusos. Esto implica un nivel adicional de complejidad en la etapa de diseño, así como una mayor dificultad en la optimización de los parámetros difusos para lograr un rendimiento óptimo.

Requiere una mayor cantidad de recursos computacionales en comparación con los algoritmos convencionales: Los controladores difusos suelen requerir un mayor número de operaciones y recursos computacionales en comparación con los algoritmos convencionales. Esto puede limitar su aplicabilidad en sistemas con restricciones de recursos o en entornos con capacidad computacional limitada [32].

V. APLICACIONES

A continuación, se presentan ejemplos de aplicaciones de las estrategias de control en el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos:

Sistemas de energía solar en edificios comerciales: Las estrategias de control en el seguimiento del PMP permiten optimizar la eficiencia de los paneles solares instalados en edificios comerciales, lo que puede reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y disminuir los costos de energía.

Sistemas de energía solar en plantas industriales: Las plantas industriales pueden implementar paneles fotovoltaicos para generar energía eléctrica y reducir así su dependencia de fuentes de energía tradicionales. El uso de estrategias de control adecuadas asegura la máxima eficiencia y producción de energía de los paneles solares.

Sistemas de energía solar en granjas agrícolas: Las granjas agrícolas pueden utilizar paneles solares para generar energía eléctrica y alimentar sistemas de riego, iluminación de invernaderos y otras aplicaciones agrícolas. Las estrategias de control garantizan la operación eficiente de los paneles solares y maximizan la producción de energía en condiciones cambiantes.

Sistemas de energía solar en instalaciones remotas: En áreas donde la conexión a la red eléctrica es limitada o inexistente, los sistemas de energía solar son una solución viable. Las estrategias de control aseguran el seguimiento del PMP, lo que permite una generación constante de energía y una mayor autonomía en instalaciones remotas.

Sistemas de energía solar en vehículos eléctricos: Los paneles solares integrados en vehículos eléctricos pueden proporcionar energía adicional para cargar las baterías y aumentar la autonomía. Las estrategias de control en el seguimiento del PMP optimizan la captación de energía solar y mejoran la eficiencia de carga de los vehículos eléctricos.

Sistemas de energía solar en centrales eléctricas: Las centrales eléctricas solares utilizan matrices de paneles fotovoltaicos a gran escala para generar energía eléctrica a partir de la radiación solar. Las estrategias de control en el seguimiento del PMP son fundamentales para garantizar la máxima eficiencia de la central y la generación óptima de energía.

Estas aplicaciones demuestran la versatilidad y el potencial de las estrategias de control en el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos en diversas industrias y sectores. Al optimizar la generación de energía solar, estas estrategias contribuyen a la eficiencia energética, la sostenibilidad y la reducción de costos en el ámbito industrial [33].

VI. CONCLUSIONES

En resumen, el MPPT en sistemas fotovoltaicos es un campo de investigación y desarrollo crucial para optimizar la eficiencia de conversión de energía solar en una variedad de aplicaciones. A medida que la energía solar continúa desempeñando un papel fundamental en la transición hacia fuentes de energía más limpias, las técnicas de MPPT evolucionan para abordar desafíos cambiantes y aprovechar nuevas oportunidades.

Las conclusiones derivadas de este análisis son claras: en primer lugar, la implementación de técnicas de seguimiento del MPPT conlleva mejoras significativas en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, lo que resulta en una mayor generación de energía a partir de la misma área de paneles solares. Esta mejora en la eficiencia es esencial para aumentar la viabilidad y la competitividad de la energía solar como fuente de energía confiable.

En segundo lugar, se destaca la adaptabilidad como una ventaja clave de las técnicas de MPPT. Las condiciones ambientales cambiantes, como la variación en la intensidad y el ángulo de incidencia de la luz solar, pueden reducir la eficiencia de un sistema fotovoltaico al operar en su punto de máxima potencia. Sin embargo, las técnicas de MPPT permiten que los

sistemas se adapten en tiempo real para maximizar la generación de energía, incluso en entornos variables.

Además, se reconoce la diversidad de aplicaciones que se benefician del seguimiento del MPPT. Desde instalaciones residenciales y comerciales hasta sistemas industriales a gran escala, vehículos eléctricos y dispositivos portátiles, el MPPT encuentra aplicación en una amplia gama de escenarios. Es importante tener en cuenta que la elección de la técnica de MPPT adecuada dependerá de los requisitos específicos de cada aplicación, considerando factores como el costo, la complejidad y la eficiencia.

Las tendencias emergentes en este campo también son notablemente relevantes. Estas incluyen el uso de técnicas de aprendizaje profundo para un seguimiento más preciso, la combinación de algoritmos para aprovechar las fortalezas individuales de cada uno, la consideración de objetivos múltiples (como la eficiencia y la estabilidad) y la integración de tecnologías de comunicación avanzadas para permitir el monitoreo y la gestión remotos de los sistemas.

En consecuencia, se puede concluir que la selección de la técnica de MPPT apropiada debe basarse en una evaluación detallada de las necesidades y restricciones específicas de cada proyecto. Ya sea mediante enfoques tradicionales como Perturb and Observe (P&O) en sistemas más simples, o a través de técnicas de aprendizaje profundo en sistemas más complejos, el seguimiento del MPPT seguirá siendo esencial para maximizar el aprovechamiento de la energía solar y avanzar hacia un futuro más sostenible y energéticamente eficiente.

REFERENCIAS

- [1] A. Berzoy, E. Baethge, J. Restrepo, and J. Viola, "Fuzzy control system for maximum power point tracking in solar panels based on DC-DC converter PI current control," in *2012 VI Andean Region International Conference*, 2012: IEEE, pp. 119-122.
- [2] R. Hemalatha, B. Suman, C. Hariprasad, P. C. Reddy, and R. V. S. Prasad, "Maximum Powerpoint Tracking by ANN under Conditions of Uniform Irradiance and Partial Shading," in *2023 Eighth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*, 2023: IEEE, pp. 1-11.
- [3] X. Zhu *et al.*, "Effects of Nonlinear MPPT Control and PV Array on Stability Analysis for a Utility-scale PV Energy System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023.
- [4] D. K. Barton *et al.*, "Cumulative Index on Radar Systems for 1977-1984," *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, vol. 25, no. 4, 1989.
- [5] A. Sadick, "Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm," 2023.
- [6] M. I. Mosaad, M. O. abed-el-Raouf, M. A. Al-Ahmar, and F. A. Banakher, "Maximum power point tracking of PV system based cuckoo search algorithm; review and comparison," *Energy procedia*, vol. 162, pp. 117-126, 2019.
- [7] S. Shapsough, R. Dhaouadi, and I. Zualkernan, "Using linear regression and back propagation neural networks to predict performance of soiled PV modules," *Procedia Computer Science*, vol. 155, pp. 463-470, 2019.
- [8] S. Samara and E. Natsheh, "Intelligent real-time photovoltaic panel monitoring system using artificial neural networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50287-50299, 2019.
- [9] T. Ahmad *et al.*, "Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125834, 2021.
- [10] R. M. Asif *et al.*, "Design and analysis of robust fuzzy logic maximum power point tracking based isolated photovoltaic energy system," *Engineering Reports*, vol. 2, no. 9, p. e12234, 2020.
- [11] S. J. Zand, S. Mobayen, H. Z. Gul, H. Molashahi, M. Nasiri, and A. Fekih, "Optimized Fuzzy controller based on Cuckoo optimization algorithm for

- maximum power-point tracking of photovoltaic systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 71699-71716, 2022.
- [12] S. Echalih *et al.*, "A cascaded controller for a grid-tied photovoltaic system with three-phase half-bridge interleaved buck shunt active power filter: hybrid control strategy and fuzzy logic approach," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 320-330, 2022.
- [13] X. Cui, Z. Kong, L. Jin, G. Jing, X. Yan, and Z. Kou, "Research on Fuzzy Logic Search Method MPPT Control of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Wind Power System," in *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 2022, vol. 6: IEEE, pp. 371-375.
- [14] K. Sahel Hanane, L. Abderrazak, R. Adlene, A. Mohamed, and K. Mohamed, "Fuzzy Logic Control of Maximum Power Point Tracking Controller in an Autonomous Hybrid Power Generation System by Extended Kalman Filter for Battery State of Charge Estimation," *International Journal of Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 199-214, 2023.
- [15] M. Mahato and B. Mukherjee, "An Efficient Dual Control Scheme with Output Voltage Regulation and INC Based MPPT for a PV System with Three Level Boost Converter," in *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, 2022: IEEE, pp. 1-6.
- [16] M. S. S. Chandra, L. V. Kumar, and S. Mohapatro, "Voltage control and energy management of solar PV fed stand-alone low voltage DC microgrid for rural electrification," in *2020 21st National Power Systems Conference (NPSC)*, 2020: IEEE, pp. 1-6.
- [17] H. M. Abd Alhussain and N. Yasin, "Modeling and simulation of solar PV module for comparison of two MPPT algorithms (P&O & INC) in MATLAB/Simulink," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, no. 2, pp. 666-677, 2020.
- [18] F. L. Gualacata Rodríguez, "Análisis comparativo de estrategias de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico," 2022.
- [19] R. I. R. Camacho, L. J. R. Castellanos, R. G. Q. Cetina, E. E. O. López, and B. J. C. Jiménez, "ALGORITMO SEGUIDOR DE MÁXIMA POTENCIA BASADO EN DIFERENCIACIÓN DE TRANSITORIOS PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS (MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM BASED ON TRANSIENT DIFFERENTIATION FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS)," *Pistas Educativas*, vol. 44, no. 144, 2023.
- [20] L. Gil Antonio, "Control de convertidores para aplicaciones fotovoltaicas," 2019.
- [21] R. X. Cuzco Sisa and D. G. Arcos Avilés, "Análisis comparativo del desempeño de algoritmos seguidores del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos."
- [22] C. Arturo, R. Algarín, J. Pauline, V. Porto, D. Andrés, and R. Leal, *Control neuronal y difuso para sistemas fotovoltaicos*. Editorial Unimagdalena, 2022.
- [23] O. P. Aguirre Benalcázar, "Determinación del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos mediante el uso del algoritmo de conductancia incremental," 2023.
- [24] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm," *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 4, no. 1, pp. 108-117, 2012.
- [25] C. E. Sandoval-Ruiz, "Arreglo inteligente de concentración solar FV para MPPT usando tecnología FPGA," *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, vol. 43, no. 3, pp. 122-133, 2020.
- [26] J. Arredondo and J. E. Luyo, "Methods of extracting the point of maximum power (MPPT) in photovoltaic systems, an evaluation with the Entropy of Shannon," in *2018 IEEE ANDESCON*, 2018: IEEE, pp. 1-4.
- [27] Q. Toco and M. Ignacio, "Seguimiento del máximo punto de potencia de sistemas fotovoltaicos utilizando control difuso," 2019.
- [28] K. Vidaña-Aldaba, J. Lara-Cardoso, C. Hernandez-Flores, and M. Arjona-López, "Diseño y evaluación de un controlador de lógica difusa para la extracción de la máxima potencia en un sistema fotovoltaico de 10KW interconectado a la red," *Revista Ciencia*, vol. 1, 2022.
- [29] C. Espinosa Rodríguez, "Desempeño de un controlador de carga en condiciones de sombreado parcial en la ciudad de Manizales," 2021.
- [30] J. L. Díaz-Barnabé and A. Morales-Acevedo, "Experimental study of the equivalence of the Adaptive Incremental Conductance (AIC) and the Adaptive Perturb and Observe (APO) algorithms for PV systems maximum power tracking," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 08, pp. 1237-1243, 2019.
- [31] D. Escobar-Quiroga, S. Cuéllar-Carrillo, and J. González-Llorente, "Evaluation of maximum power point tracking algorithms for small satellites," in *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2017: IEEE, pp. 1-5.
- [32] J. C. P. Aguirre, A. R. Agundis, E. J. R. Segura, and J. J. M. Nolasco, "Control Difuso para un Convertidor CD-CD Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos en los Modos MPPT y CV," *Pistas Educativas*, vol. 39, no. 128, 2018.
- [33] G. Y. Aguirre, J. A. Marteniuk, and F. Botterón, "Implementación de estrategias de MPPT para sistemas de generación fotovoltaicos en un convertidor boost CC-CC," in *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2014: IEEE, pp. 352-357.