



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**Técnicas de seguimiento de punto de máxima potencia para módulos fotovoltaicos
bifaciales**

POR

Mikel Luciano Contreras Inostroza

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Eléctrico(a)

Profesor Guía y Supervisor
PhD. Leonardo M. Palma

Agosto 2024
Concepción (Chile)

©2024 Mikel Luciano Contreras Inostroza



©2024 Mikel Luciano Contreras Inostroza

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



Con amor a mis padres y a la ciencia

Agradecimientos

Agradecimientos a la institución que siempre me ha recibido con brazos abiertos, al Estado que me ha brindado la beca para poder estudiar sin preocupaciones financieras. Un especial agradecimiento a mis amigos y gente que me ha apoyado en todo momento sin importar la situación y en especial a mi familia que me ha dado todo lo que uno puede pedir y más cada día de mi vida con la única esperanza de que el que está escribiendo esto sea la mejor persona posible.



Resumen

En el contexto del creciente interés por las energías renovables, los módulos fotovoltaicos bifaciales se han posicionado como una tecnología prometedora debido a su capacidad para captar radiación solar tanto por su cara frontal como por la trasera, aumentando así la captación de energía. Sin embargo, este diseño bifacial introduce una mayor complejidad en la operación de los sistemas fotovoltaicos, ya que la variabilidad de la irradiancia en ambas caras dificulta el seguimiento preciso del punto de máxima potencia. Actualmente, los algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) más comunes, como Perturb and Observe (P&O) e Incremental Conductance (IncCond), son ampliamente utilizados debido a su simplicidad y bajo costo, pero presentan limitaciones significativas en condiciones de irradiancia no uniformes, lo que reduce la eficiencia del sistema. Estos métodos tienden a perder precisión y generar fluctuaciones alrededor del punto de máxima potencia, especialmente en escenarios de alta variabilidad de luz y temperatura.

Para abordar estas deficiencias, en el presente trabajo se realiza el análisis de métodos actualmente en uso como P&O e IncCond junto con otros más avanzados, como el uso de lógica difusa para determinar o Inteligencia Artificial para averiguar cuál presenta mejores características para este tipo en particular de módulo.

A partir del análisis teórico y de los resultados obtenidos a partir de simulaciones computacionales se tiene que tanto los métodos básicos (P&O e IncCond) como los más sofisticados (Fuzzy Logic) son capaces de conseguir un buen seguimiento del punto máximo para condiciones variables. Sin embargo, frente a condiciones complejas que afectan drásticamente la curva de P-V como los es el partial shading los métodos convencionales fallan en encontrar el MPP mientras que el método Fuzzy Logic logra determinar con éxito el punto de máxima potencia del sistema

Summary

In the context of the growing interest in renewable energy, bifacial photovoltaic modules have positioned themselves as a promising technology due to their ability to capture solar radiation both on their front and rear sides, thus increasing energy capture. However, this bifacial design introduces greater complexity in the operation of photovoltaic systems, as the variability of irradiance on both sides makes precise tracking of the maximum power point more challenging. Currently, the most common maximum power point tracking (MPPT) algorithms, such as Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IncCond), are widely used due to their simplicity and low cost, but they have significant limitations under non-uniform irradiance conditions, which reduces system efficiency. These methods tend to lose accuracy and generate fluctuations around the maximum power point, especially in scenarios of high light and temperature variability.

To address these shortcomings, this work analyzes methods currently in use such as P&O and IncCond, along with more advanced techniques, such as fuzzy logic or Artificial Intelligence, to determine which presents better characteristics for this particular type of module.

Ultimately, based on the results, it is analyzed that both basic methods (P&O and IncCond) and more sophisticated ones (Fuzzy Logic) can achieve good tracking of the maximum power point under variable conditions. However, under complex conditions that drastically affect the P-V curve, such as partial shading, conventional methods fail to find the MPP, while the Fuzzy Logic method successfully determines the system's maximum power point.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.2 TRABAJOS PREVIOS	13
1.2.1 Discusión	16
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo General.....	17
1.4.2 Objetivos Específicos.....	17
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	18
1.6 TEMARIO Y METODOLOGÍA	18
CAPÍTULO 2. MODELADO DE MÓDULOS BIFACIALES.....	19
2.1 INTRODUCCIÓN	19
2.2 MODELO DE CIRCUITO	19
2.3 CURVAS I-V Y P-V	22
2.4 TEMPERATURA Y RADIACIÓN	22
2.5 MODELO EXTENDIDO PARA UN PANEL COMPLETO	23
2.6 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	25
CAPÍTULO 3. ALGORITMOS DE MPPT	26
3.1 INTRODUCCIÓN	26
3.2 MÉTODOS DE SEGUIMIENTO CONVENCIONALES.....	26
3.2.1 PERTURBAR Y OBSERVAR (P&O)	26
3.2.2 CONDUCTANCIA INCREMENTAL (IncCOND)	28
3.2.3 VOLTAJE DE CIRCUITO-ABIERTO Y CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO	30
3.3 MÉTODOS ESTOCÁSTICOS	32
3.3.1 LÓGICA DIFUSA	33
3.3.1.1 ETAPAS DEL PROCESO DIFUSO	34
3.3.2 ALGORITMOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL	35
3.3.2.1 REDES NEURONALES	35
3.3.2.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	36
3.3.2.3 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)	37
3.3.2.4 VENTAJAS Y LIMITACIONES	38
3.4 CONCLUSIÓN	39
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE ALGORITMOS MPPT A SISTEMAS BIFACIALES.....	40
4.1 INTRODUCCIÓN	40
4.2 IMPACTO DE LA IRRADIANCIA DIFERENCIAL	40
4.3 EFECTOS DEL PARTIAL SHADING.....	41
4.4 DESAFÍOS PARA LOS ALGORITMOS MPPT EN SISTEMAS BIFACIALES	42
4.4.1 Algoritmos P&O	42
4.4.2 IncCond.....	42
4.4.3 Algoritmos Estocásticos.....	42
4.5 MODIFICACIONES Y ADAPTACIONES EN LOS ALGORITMOS MPPT PARA SISTEMAS BIFACIALES	42
4.6 CONCLUSIÓN	43
CAPÍTULO 5. VERIFICACIÓN COMPUTACIONAL DE LA OPERACIÓN DE ALGORITMOS MPPT	44
5.1 INTRODUCCIÓN	44
5.2 IRRADIANCIA VARIABLE	44
5.3 TEMPERATURA VARIABLE	49
5.4 COMPORTAMIENTO ANTE PARTIAL SHADING	52
5.5 CONCLUSIONES	55

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	57
6.1 SUMARIO	57
6.2 CONCLUSIONES.....	57
CAPÍTULO 7. ANEXOS.....	60
ABREVIACIONES.....	67
REFERENCIAS	68



Lista de Tablas

Tabla 3.1 Tabla de Reglas de Lógica Difusa [3] 33

Tabla 5.1 Datos de Panel Fotovoltaico 45

Tabla 5.2 Eficiencia de Cada Método en Condiciones de Irradiancia Variable 48

Tabla 5.3 Eficiencia de Cada Método en Condiciones de Temperatura Variable 52

Tabla 5.4 Datos de Panel Fotovoltaico 52

Tabla 5.5 Eficiencia en Estado Estable de Cada Método en Condiciones de Partial Shading.. 55



Lista de Figuras

Fig.1.1 Fuentes de Luz que Recibe un Panel Bifacial	11
Fig.2.2 Circuito Equivalente de Celda Fotovoltaica.....	20
Fig. 2.3 Circuito Equivalente de Celda Fotovoltaica Bifacial	21
Fig. 2.4 Formas Características de Curvas I-V y P-V para Paneles Fotovoltaicos	22
Fig. 2.5 Familia de Curvas V-I para un Panel Fotovoltaico KC200GT	23
Fig. 2.6 Representación de Módulos en Serie y Comportamiento de Curva [6]	24
Fig. 2.7 Representación de Módulos en Paralelo y Comportamiento de Curva [6]	24
Fig. 3.3 Diagrama de Flujo Algoritmo Voltaje en Circuito Abierto	31
Fig. 3.4 Diagrama de Flujo Algoritmo Corriente de Cortocircuito	32
Fig. 3.5 Diagrama de Flujo Algoritmo Lógica Difusa [3]	34
Fig. 3.6 Tres Etapas de Estructura de Red Neuronal [3].....	36
Fig. 3.7 Diagrama de Flujo de Algoritmo Genético [3].....	37
Fig.4.1 Comparación de Curva PV en Condiciones Normales vs Partial Shading [3]	41
Fig. 5.1 Curva de Irradiancia en la Cara Frontal y Trasera del Panel Bifacial.	45
Fig. 5.2 Máxima Potencia Generada Posible Respecto a la Irradiancia Recibida.	46
Fig. 5.3 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Irradiancia Variable.	46
Fig. 5.4 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Irradiancia Variable.	47
Fig. 5.5 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Irradiancia Variable.	47
Fig. 5.6 Curva de Temperatura del Panel.....	49
Fig. 5.7 Máxima Potencia Generada Posible Respecto a la Temperatura del Sistema.....	49
Fig. 5.8 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Temperatura Variable.	50
Fig. 5.9 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Temperatura Variable.	50
Fig. 5.10 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Temperatura Variable.	51
Fig. 5.11 Puntos de Potencia Máxima en Condiciones Ideales y de Partial Shading.	53
Fig. 5.12 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Condición de Partial Shading.	53
Fig. 5.13 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Condición de Partial Shading.....	54
Fig. 5.14 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Condición de Partial Shading.....	54
Fig. 7.1 Diagrama Simulink para método P&O	60
Fig. 7.2 Diagrama Simulink para método IncCond	60
Fig. 7.3 Diagrama Simulink para método Fuzzy Logic	61
Fig. 7.4 Tabla de reglas Fuzzy Logic	61
Fig. 7.5 Diagrama Simulink para ejemplo partial shading	62
Fig. 7.6 Diagrama Simulink para partial shading en P&O	63
Fig. 7.7 Diagrama Simulink para partial shading en IncCond	63
Fig. 7.8 Diagrama Simulink para partial shading en Fuzzy Logic	64
Fig. 7.9 Función de membresía de entrada e	64
Fig. 7.10 Función de membresía de entrada ce.....	65
Fig. 7.11 Función de membresía de salida	65
Fig. 7.12 Código Matlab para calcula potencia máxima.	66
Fig. 7.13 Código Matlab para calcular eficiencia de los algoritmos.	66

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción General

El cambio climático y la creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles han impulsado una transición hacia fuentes de energía más sostenibles. En este contexto, la energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las tecnologías más prometedoras y ampliamente adoptadas para la generación de electricidad a partir de una fuente renovable inagotable como lo es la radiación solar. La capacidad de convertir directamente la luz solar en electricidad mediante módulos fotovoltaicos ha hecho que esta tecnología se extienda rápidamente a nivel global, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro del área de la energía fotovoltaica, los módulos bifaciales representan una innovación clave que está transformando el panorama de la tecnología solar. A diferencia de los módulos tradicionales, que solo capturan la luz solar incidente en su cara frontal, los módulos bifaciales son capaces de captar radiación por la cara frontal y posterior. Esto permite aprovechar tanto la radiación directa como la luz reflejada desde el suelo u otras superficies cercanas, lo que resulta en una mayor producción de energía. Este tipo de módulos tiene el potencial de incrementar significativamente la captación de energía de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en instalaciones optimizadas para maximizar la captación de luz en la cara posterior.

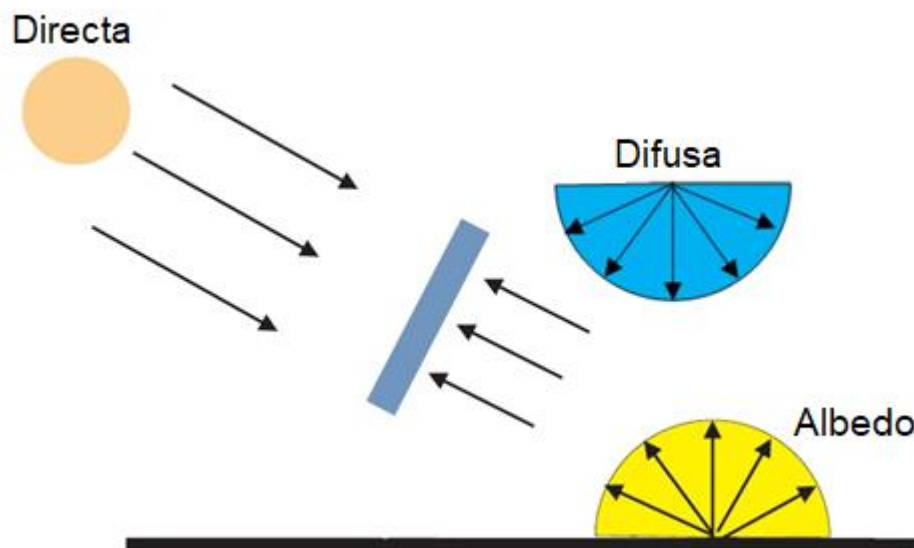


Fig.1.1 Fuentes de Luz que Recibe un Panel Bifacial

Sin embargo, para maximizar el aprovechamiento de la energía generada por estos módulos,

es crucial implementar técnicas avanzadas de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés). El Punto de Máxima Potencia (MPP, Maximum Power Point) es el punto en el que un módulo fotovoltaico produce la máxima cantidad de potencia eléctrica bajo condiciones ambientales específicas, que pueden variar debido a factores como la irradiancia solar, la temperatura, y en el caso de los módulos bifaciales, el albedo o capacidad de reflexión del entorno.

El desafío para los sistemas fotovoltaicos, especialmente los que emplean módulos bifaciales, es que este punto de máxima potencia no es fijo, sino que cambia continuamente en función de las condiciones de operación. Los algoritmos de MPPT están diseñados para ajustar constantemente la carga conectada al módulo de modo que se logre el punto de mayor eficiencia energética en tiempo real. Este proceso es más complejo en módulos bifaciales debido a la variabilidad en la cantidad y distribución de la radiación que llega a ambas caras del módulo. El albedo del suelo, la orientación del módulo, la altura y otros factores como la estación del año, influyen directamente en el rendimiento del sistema [1].

Por lo tanto, el desarrollo y la optimización de técnicas de MPPT son fundamentales para aprovechar al máximo el potencial de los módulos fotovoltaicos bifaciales. Esta tesis se centra en el análisis y comparación de diferentes técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia aplicadas específicamente a este tipo de módulos. Se exploran los métodos convencionales, como los algoritmos de Perturbación y Observación (P&O) y Conductancia Incremental (IncCond), así como técnicas más avanzadas que utilizan inteligencia artificial o algoritmos de optimización. Además, se evalúan las ventajas y limitaciones de cada método en condiciones de operación variables y se propondrán mejoras para su implementación en sistemas fotovoltaicos bifaciales.

El objetivo principal de esta investigación es contribuir a la optimización de los sistemas de generación fotovoltaica mediante el uso eficiente de técnicas de MPPT que se adapten a la complejidad inherente de los módulos bifaciales. Al abordar tanto los aspectos teóricos como prácticos del seguimiento del MPP, esta tesis pretende sentar las bases para un mejor rendimiento de estos sistemas en el futuro, permitiendo un mayor aprovechamiento de la energía solar.

1.2 Trabajos Previos

A continuación, se analizan de manera breve los estudios más destacados relacionados con los métodos de MPPT aplicados a paneles fotovoltaicos tanto convencionales como bifaciales. A través de esta revisión, se pretende identificar las principales tendencias en la investigación, las metodologías utilizadas, así como las innovaciones y desafíos que han emergido en este campo.

La revisión aborda los desarrollos históricos y recientes, considerando cómo los paneles bifaciales, con su capacidad de captar luz tanto en su cara frontal como posterior, han influido en la evolución de los métodos de seguimiento de potencia. Además, se examinan los diferentes algoritmos propuestos para maximizar la eficiencia en diversas condiciones ambientales, destacando aquellos enfoques que han mostrado mayor eficacia o presentan un potencial significativo para futuras investigaciones.

- ♣ N. Siddiqui and M. S. Ghole, "Comparative Analysis of P&O and Fuzzy logic based MPPT methods for Bi-facial Photovoltaic module," *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS61402.2024.10482061.[2]

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de dos métodos MPPT, el algoritmo de Perturbación y Observación (P&O) y el control basado en Fuzzy Logic (lógica difusa o FLC), aplicados a módulos fotovoltaicos bifaciales. Se destaca que los paneles solares bifaciales tienen la capacidad de generar más energía en comparación con los paneles solares convencionales, gracias a su diseño que permite la captura de luz desde ambas caras. El estudio evalúa la efectividad de ambos métodos de MPPT en función de factores como la ganancia bifacial, el factor de bifacialidad y la eficiencia del panel. Los resultados indican que el control basado en Fuzzy Logic supera al método P&O convencional tanto en condiciones estándar como en condiciones variables de temperatura e irradiancia.

- ♣ Nur Atharah Kamarzaman, Chee Wei Tan. "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 585-598, Junio. 2014.[3]

En este trabajo se presenta una revisión exhaustiva de las técnicas de seguimiento del MPPT aplicadas a sistemas fotovoltaicos. Se discuten los desafíos actuales que enfrenta la generación de

energía fotovoltaica, como los altos costos de los materiales y la baja eficiencia de conversión. El documento clasifica las técnicas de MPPT en dos categorías principales: métodos convencionales para condiciones de irradiancia solar uniforme y algoritmos basados en estocásticos e inteligencia artificial para condiciones de sombreado parcial. Además, se analizan las características de los modelos de celdas solares y se comparan las diferentes técnicas de MPPT, destacando su importancia en la optimización de la producción de energía y en la satisfacción de la creciente demanda energética mundial.

- ♣ N. Siddiqui, A. Verma and D. Shrivastava, "Fuzzy Logic-based MPPT Control for Bifacial Photovoltaic Module," *2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, pp. 1-6, 2023.[7]

En este trabajo se presenta un control de seguimiento del punto de máxima potencia basado en Fuzzy Logic para módulos fotovoltaicos bifaciales. Se destaca la importancia de los módulos bifaciales en la generación de energía solar, ya que pueden capturar irradiancia tanto del lado frontal como del trasero, lo que mejora su eficiencia. El estudio incluye un modelado detallado del módulo solar utilizando un circuito equivalente que considera las características eléctricas de las celdas solares.

Se implementa un controlador MPPT que utiliza técnicas de FLC para optimizar la extracción de potencia, adaptándose a las variaciones en la irradiancia y temperatura. El enfoque se basa en la creación de funciones de membresía y reglas difusas que permiten al sistema ajustar su operación en tiempo real. Los resultados muestran que el controlador propuesto mejora significativamente la eficiencia del sistema fotovoltaico, maximizando la producción de energía en diversas condiciones ambientales.

- ♣ Jose, K., Sheik Mohammed, S., Mohammed Mansoor, O. "Performance Study of Solar PV System with Bifacial PV Modules". *"Smart Energy and Advancement in Power Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering"*, vol 926, pp. 659-670. Springer, Singapore. 2023.[5]

En este trabajo se presenta un estudio de rendimiento de sistemas fotovoltaicos utilizando módulos bifaciales. Se desarrolla un sistema PV autónomo que incorpora un controlador de seguimiento del punto de máxima potencia, el cual se simula en MATLAB para analizar su comportamiento bajo diferentes niveles de irradiación. Los resultados de la simulación indican que el

sistema tiene una eficiencia cercana al 96% en todas las condiciones de prueba. Además, se discuten los beneficios de utilizar un convertidor buck para ajustar la tensión del módulo en aplicaciones conectadas a la red, lo que optimiza la extracción de energía. Este estudio contribuye a la comprensión del rendimiento de los módulos bifaciales y su integración en sistemas de energía solar más eficientes.

- ♣ Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). “MPPT techniques for photovoltaic applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 793-813.[12]

En este trabajo se presenta una revisión de las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia aplicadas a sistemas fotovoltaicos. Se discuten las características no lineales de las curvas de corriente-tensión (I-V) y potencia-tensión (P-V) de los generadores fotovoltaicos, que varían con la irradiación y la temperatura. Dado que la eficiencia de conversión de los arreglos fotovoltaicos es relativamente baja, se enfatiza la necesidad de implementar técnicas de control MPPT para maximizar la producción de energía. El artículo examina diversos métodos de MPPT, incluyendo el método de perturbación y observación, la conductancia incremental, el control basado en lógica difusa y las redes neuronales, analizando sus ventajas y desventajas en diferentes condiciones operativas.

- ♣ Bidram, A., Davoudi, A., & Balog, R. S. (2023). Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(2), 545-560.[13]

En este trabajo, se presentan técnicas de control y circuitos innovadores para mitigar los efectos del partial shading (sombreados parciales) en arreglos fotovoltaicos. Se destaca que el partial shading puede reducir significativamente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, lo que representa un obstáculo importante para el crecimiento de la energía solar. El documento clasifica las soluciones en cuatro categorías principales: técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia modificadas, configuraciones de arreglos, arquitecturas de sistemas y topologías de convertidores. Se analizan diversas estrategias para optimizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos bajo condiciones de partial shading, incluyendo el uso de convertidores avanzados y configuraciones de módulos que permiten una mejor recolección de energía.

- ♣ Sun, X., Khan, M. R., Deline, C., & Alam, M. A. (2018). Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied Energy*, 220, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>.[14]

En este trabajo, se presenta un análisis global y una optimización de diversas configuraciones de módulos solares bifaciales. Los resultados revelan que la ganancia bifacial de los módulos montados en el suelo no supera el 10% en todo el mundo para un albedo de 0.25, típico de la vegetación y el suelo. Sin embargo, al aumentar el albedo a 0.5 mediante reflectores artificiales, como el concreto blanco, la ganancia bifacial puede duplicarse hasta aproximadamente el 20%. Además, elevar el módulo 1 metro sobre el suelo puede mejorar la ganancia bifacial hasta un 30%.

El estudio también anticipa que, para módulos bifaciales montados en el suelo con un albedo de 0.5, los módulos instalados verticalmente orientados de este a oeste superarán a los módulos orientados de sur a norte en hasta un 15% en latitudes dentro de los 30°, mientras que en latitudes superiores a 30° será al revés.

1.2.1 Discusión

Los trabajos [3] y [12] proporcionan una base conceptual sólida sobre las técnicas de MPPT, categorizándolas en métodos convencionales (P&O, conductancia incremental) y avanzados (inteligencia artificial, Fuzzy Logic). Si bien ambos artículos se centran en sistemas fotovoltaicos generales, sus principios son aplicables a módulos bifaciales al considerar sus características no lineales y su respuesta a condiciones de irradiancia y temperatura. La categorización y análisis de ventajas y desventajas de cada método sirven como un marco teórico para identificar qué técnicas podrían adaptarse mejor a los paneles bifaciales, que presentan variaciones dinámicas debido a la captura de irradiación por ambas caras.

Los trabajos [2] y [7] centrados en módulos bifaciales destacan la eficacia de los métodos avanzados, como Fuzzy Logic, sobre los métodos convencionales como P&O. Este hallazgo es crucial para la tesis, ya que la lógica difusa puede manejar de manera más eficiente las variaciones en las condiciones de irradiancia y temperatura que afectan significativamente a los módulos bifaciales. Además, estos estudios resaltan factores específicos como la ganancia bifacial y el factor de bifacialidad, que deben incluirse en el modelado y simulación de algoritmos MPPT adaptados a esta tecnología.

Los artículos [5] y [14] analizan el rendimiento y optimización de módulos bifaciales bajo diferentes configuraciones y condiciones ambientales. La información sobre la ganancia bifacial, el impacto del albedo y las orientaciones óptimas ofrece datos empíricos valiosos para modelar el

comportamiento de los módulos en escenarios reales. La integración de estos factores en la lógica de los algoritmos MPPT puede mejorar significativamente la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos bifaciales.

Finalmente, el sombreado parcial es un desafío crítico para cualquier sistema fotovoltaico, y su impacto puede ser más pronunciado en módulos bifaciales debido a su diseño bidireccional. El artículo [13] es relevante para explorar técnicas MPPT específicas, como algoritmos modificados y arquitecturas de sistema que minimicen las pérdidas de energía bajo condiciones de sombreado. La incorporación de estrategias de mitigación puede complementar los métodos MPPT avanzados para optimizar el rendimiento en condiciones adversas.

1.3 Hipótesis de Trabajo

El uso de técnicas avanzadas de seguimiento del punto de máxima potencia, como algoritmos basados en inteligencia artificial y lógica difusa, mejora significativamente la eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos bifaciales en condiciones de irradiancia variable en comparación con los métodos tradicionales como P&O e IncCond, optimizando así el rendimiento global del sistema.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Realizar en base a la bibliografía disponible un modelo para los módulos bifaciales y estudiar los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia aplicables a dicha tecnología.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar a partir de la literatura existente el modelo para los módulos fotovoltaicos bifaciales.
- Estudiar y analizar los algoritmos de MPPT actualmente en uso, identificando sus ventajas y desventajas en el contexto de módulos bifaciales.
- Verificar los algoritmos de MPPT existentes para adaptarlos a las características particulares de los módulos bifaciales.
- Realizar simulaciones para evaluar la efectividad de los algoritmos en la captura de la máxima potencia instantánea en módulos bifaciales.
- Realizar un análisis comparativo entre los algoritmos estudiados, evaluando su rendimiento en términos de eficiencia y capacidad de generación de energía.

1.5 Alcances y Limitaciones

Debido a las limitaciones de tiempo y complejidad de implementación se acotarán los análisis de la comparación de los distintos métodos de seguimiento de MPPT en condiciones de temperatura e irradiancia variable en base a corroboraciones de carácter computacional sin llegar a la implementación práctica. Además de esto, dentro de los métodos de seguimiento del MPP no se incluye el diseño de controladores de potencia para maximizar la eficiencia del sistema completo, siendo así un enfoque principalmente en los algoritmos utilizados actualmente en la literatura disponible.

1.6 Temario y Metodología

Este documento se estructura en seis capítulos que cubren el análisis, implementación y evaluación de técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia para módulos fotovoltaicos bifaciales.

En el Capítulo 2, se aborda el modelado de los módulos bifaciales, comenzando con la descripción del modelado de un módulo fotovoltaico convencional. Se explican los pasos necesarios para adaptar este modelo a la estructura de los módulos bifaciales, considerando las particularidades de la radiación en ambas caras del panel.

El Capítulo 3 presenta una revisión exhaustiva de los métodos de MPPT utilizados actualmente en sistemas fotovoltaicos. Se describen los algoritmos tradicionales, como Perturb and Observe (P&O) e Incremental Conductance (IncCond), así como técnicas avanzadas como lógica difusa, redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos.

En el Capítulo 4, se discute la aplicación de estos algoritmos a sistemas bifaciales, analizando cómo se adaptan o modifican las técnicas de MPPT para abordar la complejidad de la captación de radiación en ambas caras del módulo.

El Capítulo 5 detalla las simulaciones realizadas aplicando los algoritmos de MPPT a los módulos bifaciales. Se describen las condiciones de simulación, las herramientas utilizadas y los resultados obtenidos en diferentes escenarios de irradiancia. Además, se compara los resultados de los algoritmos en términos de rendimiento energético, evaluando el impacto de cada método en las condiciones específicas de los módulos bifaciales.

Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones finales del trabajo, discutiendo las implicaciones de los resultados y las posibles áreas de mejora y desarrollo futuro en las técnicas de MPPT para sistemas fotovoltaicos bifaciales.

Capítulo 2. Modelado de módulos bifaciales

2.1 Introducción

Para poder predecir el comportamiento de los paneles bifaciales frente a distintas condiciones de entorno es necesaria su correcta modelación. A diferencia de los paneles monofaciales tradicionales, los bifaciales capturan irradiación tanto en la parte frontal como en la trasera, lo que introduce complejidad en su modelado [9]. Para abordar este proceso de manera precisa, es necesario seguir una serie de pasos fundamentales que permiten representar de manera realista el comportamiento de estos dispositivos.

El primer paso es modelar la corriente generada por la irradiación en ambas caras del panel, considerando la irradiancia frontal y la irradiancia reflejada o albedo. En este punto, se incorpora el factor de bifacialidad, que define la eficiencia relativa de la parte trasera en comparación con la frontal. Luego, es crucial tener en cuenta el efecto de la temperatura, que impacta principalmente en el voltaje de salida del panel, afectando la potencia máxima generada [6]. Por último, se revisan las curvas corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) para observar cómo las variaciones de irradiación y temperatura influyen en el rendimiento del panel, especialmente en su punto de máxima potencia.

A lo largo de este proceso, la combinación de factores como la irradiancia, el albedo y la temperatura permite un modelado más preciso y optimizado, haciendo posible aprovechar al máximo la capacidad de los paneles bifaciales en diferentes entornos y aplicaciones.

2.2 Modelo de Circuito

El modelo básico de una celda solar convencional puede representarse mediante un circuito equivalente que incluye un diodo, una fuente de corriente que representa la corriente generada por la luz, y una resistencia en serie y paralelo que tiene en cuenta las pérdidas [7].

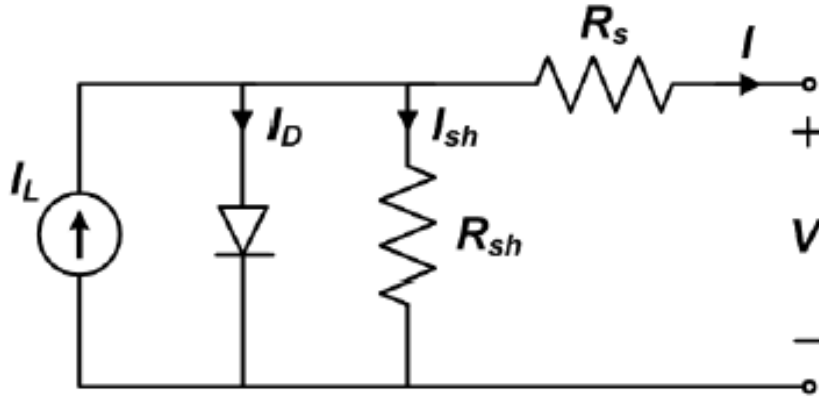


Fig.2.2 Circuito Equivalente de Celda Fotovoltaica

Donde la corriente de salida de la celda fotovoltaica I se puede expresar mediante la ecuación característica del diodo [7]:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Donde:

- I : Corriente de salida de la celda.
- I_L : Corriente generada por la irradiación solar.
- I_0 : Corriente de saturación inversa del diodo.
- V : Voltaje de salida de la celda.
- R_s : Resistencia en serie.
- R_{sh} : Resistencia en paralelo.
- n : Factor de idealidad del diodo.
- q : Carga del electrón ($1.602 \times 10^{-19} C$).
- T : Temperatura de la celda en Kelvin.
- K : Constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)

Para el caso de un panel bifacial sigue siendo similar al de un panel monofacial, con la adición de la corriente generada por la cara trasera. Así, la ecuación de la corriente de salida se modifica para incluir la suma de las corrientes generadas en ambas caras [2]:

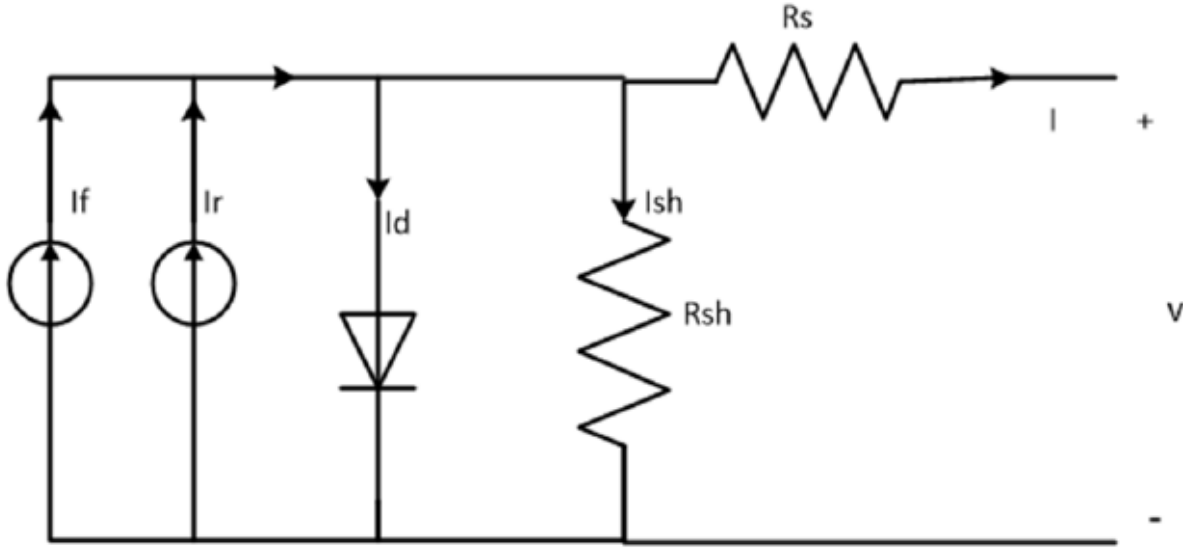


Fig. 2.3 Circuito Equivalente de Celda Fotovoltaica Bifacial

$$I = (I_{Lf} + I_{Lr}) - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Donde:

- I_{Lf} : Corriente generada por la irradiancia frontal.
- I_{Lr} : Corriente generada por la irradiancia trasera.

Estas corrientes pueden ser calculadas como:

$$I_{Lf} = \frac{G_f}{G_{stc}} \cdot I_{sc,stc}$$

$$I_{Lr} = \frac{G_r}{G_{stc}} \cdot I_{sc,stc} \cdot BF$$

Donde:

- G_f : Corresponde a la radiación solar directa y difusa en la cara frontal del panel.
- G_r : Corresponde a la radiación capturada por la parte trasera del panel, que depende de factores como el tipo de superficie (suelo, techo, etc.) y su reflectividad.
- G_{stc} : Es la irradiancia de referencia en condiciones estándar de prueba (1000 W/m²).
- $I_{sc,stc}$: Corriente de cortocircuito en condiciones estándar de prueba.
- BF : Factor de bifacialidad, que representa la eficiencia relativa de la parte posterior en comparación con la frontal.

La irradiación en la parte trasera del panel depende mayoritariamente del albedo. Los valores típicos de albedo para diferentes superficies son [11]:

- Nieve: 0.6
- Hierba: 0.05 - 0.3
- Áreas urbanas: 0.05 - 0.2
- Suelo desnudo: 0.05 - 0.3

Este factor puede incluirse en el modelo ajustando la irradiación reflejada en función del tipo de superficie y la inclinación del panel.

2.3 Curvas I-V y P-V

El comportamiento del panel fotovoltaico se representa gráficamente mediante la curva corriente-voltaje (curva I-V) y la curva potencia-voltaje (curva P-V). Estas curvas muestran cómo varían la corriente y la potencia generada en función del voltaje, y permiten identificar el MPP [6], en este caso a distintos niveles de irradiancia.

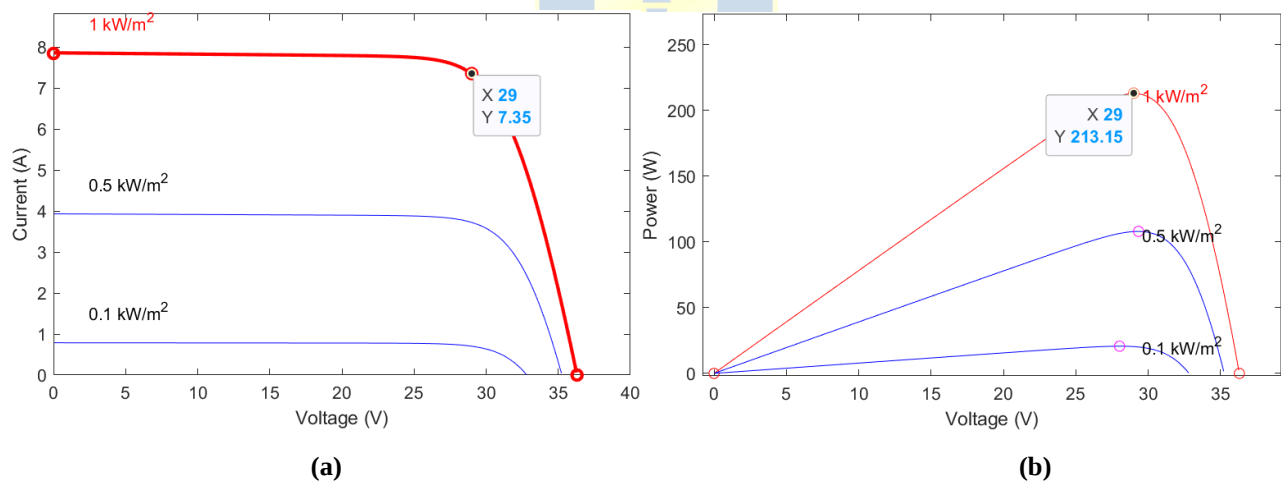


Fig. 2.4 Formas Características de Curvas I-V y P-V para Paneles Fotovoltaicos

(a) Curva I-V del Panel Fotovoltaico; (b) Curva P-V del Panel Fotovoltaico

2.4 Temperatura y Radiación

La irradiancia solar y la temperatura tienen efectos significativos sobre el rendimiento de los paneles fotovoltaicos. En el caso de la irradiación solar, a medida que esta aumenta, la corriente generada por el panel (I_L) también lo hace de manera lineal. Esto significa que más energía solar

disponible se traduce en una mayor producción de corriente. Sin embargo, la temperatura afecta principalmente al voltaje de salida (V) del panel. A medida que la temperatura aumenta, el voltaje disminuye, lo que resulta en una reducción de la potencia total generada. Por lo tanto, aunque un incremento en la irradiación solar mejora la corriente generada, un aumento en la temperatura puede contrarrestar este beneficio al reducir el voltaje y, por ende, la eficiencia general del panel [6].

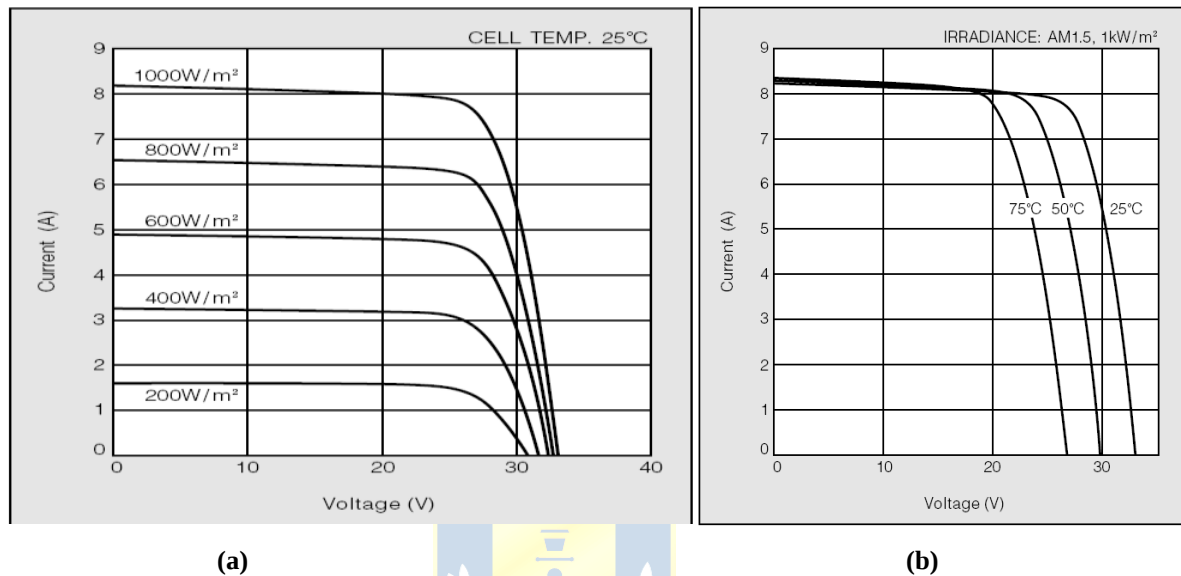


Fig. 2.5 Familia de Curvas V-I para un Panel Fotovoltaico modelo KC200GT del fabricante Kyocera

(a) Curvas frente a distintos niveles de radiación; **(b)** Curvas frente a distintos niveles de temperatura.

El efecto de la temperatura y la irradiación solar son factores críticos en el modelado de los paneles fotovoltaicos (monofaciales o bifaciales), ya que ambos afectan directamente el rendimiento del panel y su capacidad de generar energía. En el caso de los paneles bifaciales, donde la captación de irradiación se produce por ambas caras, la influencia de estos factores se vuelve aún más importante debido a la exposición adicional de la parte trasera [4]. Aunque en última instancia estas diferencias no llegan a añadir mayores cambios en el circuito equivalente o ecuaciones del modulo respecto a su comportamiento frente a condiciones de irradiancia y/o temperatura variable, debido a que la temperatura del sistema se toma como una sola (temperatura promedio del sistema) y la irradiancia se puede simular y calcular individualmente en las ecuaciones equivalentes.

2.5 Modelo Extendido para un Panel Completo

Por último, al modelar un panel fotovoltaico completo, que consta usualmente de muchas celdas conectadas en serie, se escala el modelo de una sola celda. Cuando las celdas están conectadas

en serie, el voltaje total del panel es la suma de los voltajes individuales de cada celda, mientras que la corriente se mantiene constante y es igual a la de una sola celda. En el caso de las celdas conectadas en paralelo, la corriente total del panel es la suma de las corrientes generadas por cada celda, mientras que el voltaje permanece igual al de una sola celda. Este enfoque permite modelar el comportamiento global del panel a partir de las características individuales de sus celdas.

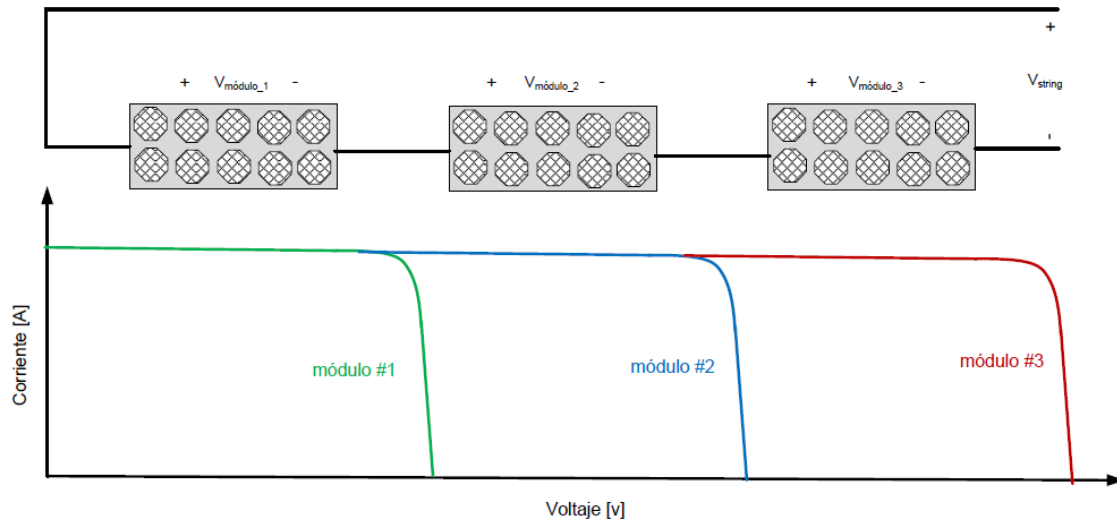


Fig. 2.6 Representación de Celdas/Módulos en Serie y Comportamiento de Curva [6]

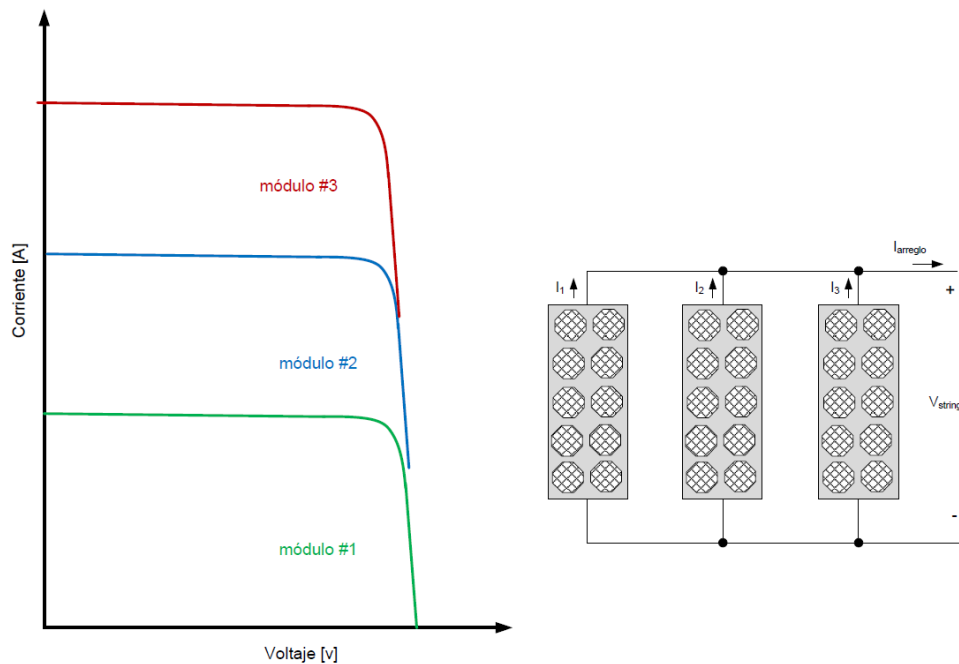


Fig. 2.7 Representación de Celdas/Módulos en Paralelo y Comportamiento de Curva [6]

2.6 Discusión y Conclusiones

El modelado de paneles fotovoltaicos bifaciales es un proceso fundamental para entender y optimizar el rendimiento de estos. A diferencia de los paneles monofaciales, los bifaciales aprovechan la irradiación reflejada por el suelo, lo que introduce una nueva variable en el análisis. Al incluir esta irradiación adicional en el modelo, se requiere ajustar las ecuaciones de corriente y voltaje, considerando tanto la irradiación frontal como la trasera y el factor de bifacialidad, que mide la eficiencia relativa de la parte posterior del panel.

Además de la irradiación, la temperatura es un factor clave en el modelado, ya que afecta directamente el rendimiento del panel. A medida que la temperatura aumenta, el voltaje de salida disminuye, mientras que la corriente tiende a aumentar ligeramente. Este balance entre temperatura e irradiación es crucial para predecir con precisión el comportamiento del panel bajo condiciones reales de operación. La interacción entre ambos factores puede afectar la posición del MPP, que es esencial para maximizar la generación de energía.

En conclusión, el proceso de modelado de un panel fotovoltaico bifacial no solo implica adaptar los modelos convencionales a un diseño de doble cara, sino también considerar detalladamente las condiciones ambientales, como el albedo y la temperatura. Al combinar estos elementos en un modelo matemático preciso, es posible optimizar el uso de estos paneles en una amplia gama de condiciones, lo que puede resultar en una mayor eficiencia y generación de energía en comparación con los paneles monofaciales.

Capítulo 3. Algoritmos de MPPT

3.1 Introducción

El seguimiento del punto de máxima potencia es una técnica fundamental en los sistemas fotovoltaicos, ya que permite maximizar la conversión de energía bajo diferentes condiciones ambientales. Este capítulo presenta una revisión detallada de los métodos de MPPT desarrollados y aplicados en la actualidad, analizando sus principios operativos, ventajas y limitaciones.

Se comienza con la descripción de los métodos tradicionales más ampliamente empleados, como Perturb and Observe (P&O) e Incremental Conductance (IncCond), que se caracterizan por su sencillez y bajo coste, pero presentan limitaciones en escenarios de irradiancia y temperatura variables. Asimismo, se incluyen métodos basados en mediciones específicas del módulo, como el método de voltaje de circuito abierto y el de corriente de cortocircuito, los cuales aprovechan características particulares del panel para aproximar el punto de máxima potencia con menores requerimientos de cálculo. A continuación, se examinan técnicas más avanzadas basadas en enfoques como FLC e inteligencia artificial (redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos), los cuales han demostrado una mayor precisión y adaptabilidad en condiciones dinámicas de operación.

El objetivo de este capítulo es proporcionar una base técnica sólida sobre los algoritmos de MPPT disponibles, sirviendo como marco de referencia para su posterior aplicación y evaluación en módulos fotovoltaicos bifaciales.

3.2 Métodos de Seguimiento Convencionales

3.2.1 Perturbar y Observar (P&O)

El método de Perturbar y Observar es uno de los algoritmos más populares y sencillos para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos [10]. Su principio de funcionamiento se basa en la observación de cómo varía la potencia generada por el panel fotovoltaico al modificar, o "perturbar", el voltaje o la corriente del sistema.

Como se ve en la Figura 3.1 el algoritmo P&O comienza midiendo el voltaje y corriente del panel para así con estos valores, mediante su producto, calcular la potencia instantánea de este. En primera instancia se mide el voltaje y corriente del siguiente instante para poder hacer así la primera comparación de potencia en distintos instantes de tiempo. Luego de comprobar si la potencia aumentó

o disminuyó en el instante de tiempo comparado, introduce una pequeña perturbación en el voltaje del sistema, alterando levemente las condiciones de operación. Si la perturbación produce un aumento en la potencia, significa que el sistema está acercándose al punto de máxima potencia, por lo que la perturbación continuará en la misma dirección.

Por el contrario, si la perturbación reduce la potencia, se deduce que el sistema se está alejando del punto de máxima potencia. En este caso, se invierte la dirección de la perturbación para acercarse nuevamente al punto óptimo. Este proceso se repite continuamente, ajustando gradualmente el voltaje del panel en busca de maximizar la potencia.

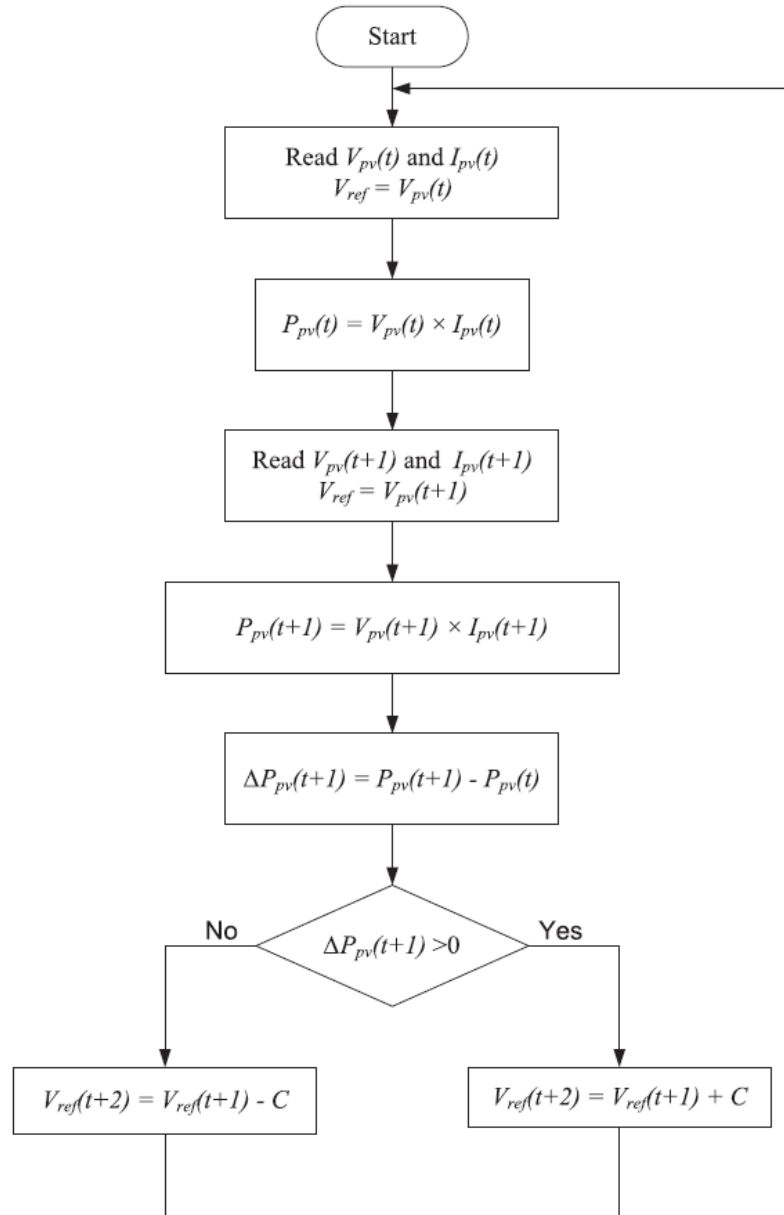


Fig. 3.1 Diagrama de Flujo de Algoritmo P&O [3]

3.2.1.1 Ventajas y limitaciones

Aunque el método P&O es simple y efectivo bajo condiciones estables, presenta ciertas limitaciones. Una de ellas es que puede causar oscilaciones alrededor del punto de máxima potencia debido a la naturaleza de las perturbaciones constantes. Además, bajo condiciones de irradiancia variables, como cambios rápidos en la luz solar, el algoritmo puede malinterpretar estas fluctuaciones y desviarse del punto de máxima potencia, reduciendo su eficiencia [2].

El método P&O es una técnica de búsqueda iterativa que, a través de pequeñas variaciones en el voltaje, ajusta continuamente el punto de operación del sistema fotovoltaico para alcanzar y mantener la máxima potencia posible. Su simplicidad y facilidad de implementación lo hacen popular, aunque su desempeño en condiciones dinámicas es inferior comparado con métodos más avanzados.

3.2.2 Conductancia Incremental (IncCond)

El método de Conductancia Incremental es un algoritmo más avanzado que el método P&O para el MPPT. Este método se basa en la observación de la pendiente de la curva P-V de los paneles solares. En el punto de máxima potencia, la derivada de la potencia respecto al voltaje es cero. Por lo tanto, el algoritmo utiliza esta relación matemática para ajustar el punto de operación del sistema.

El funcionamiento del método IncCond se basa en la comparación de la conductancia incremental, ósea, el cambio de la corriente respecto al cambio del voltaje, $\Delta I/\Delta V$, y la conductancia instantánea del sistema (la relación entre la corriente y el voltaje, I/V). En el punto de máxima potencia, la pendiente de la curva P-V es cero, lo que significa que la conductancia incremental es igual en magnitud, pero de signo opuesto, a la conductancia instantánea ($\Delta I/\Delta V = -I/V$). Como se ve en la figura 3.2 el algoritmo primero comprueba si ΔV es igual a 0 para evitar divisiones por 0, si ΔI también es 0 entonces V_{ref} no se ve afectado, por otro lado, si ΔI tiene un valor distinto a 0 dependiendo de su signo V_{ref} aumentará o disminuirá para proseguir con la iteración del algoritmo. Si el sistema está operando a la izquierda del punto de máxima potencia, la pendiente es positiva ($\Delta I/\Delta V > -I/V$), lo que indica que se debe aumentar el voltaje. Si el sistema está operando a la derecha del punto de máxima potencia, la pendiente es negativa ($\Delta I/\Delta V < -I/V$), por lo que se debe reducir el voltaje.

El algoritmo ajusta continuamente el voltaje de operación del panel solar en función de estos cálculos, buscando igualar la conductancia incremental con la conductancia instantánea. Al hacer esto, el sistema puede converger al punto de máxima potencia de manera más precisa que con el método P&O, especialmente en condiciones de irradiancia variables [3]. Esto se debe a que el método IncCond

puede detectar de forma más precisa la dirección en la que se encuentra el punto de máxima potencia sin depender únicamente de pequeñas perturbaciones en el voltaje o la corriente.

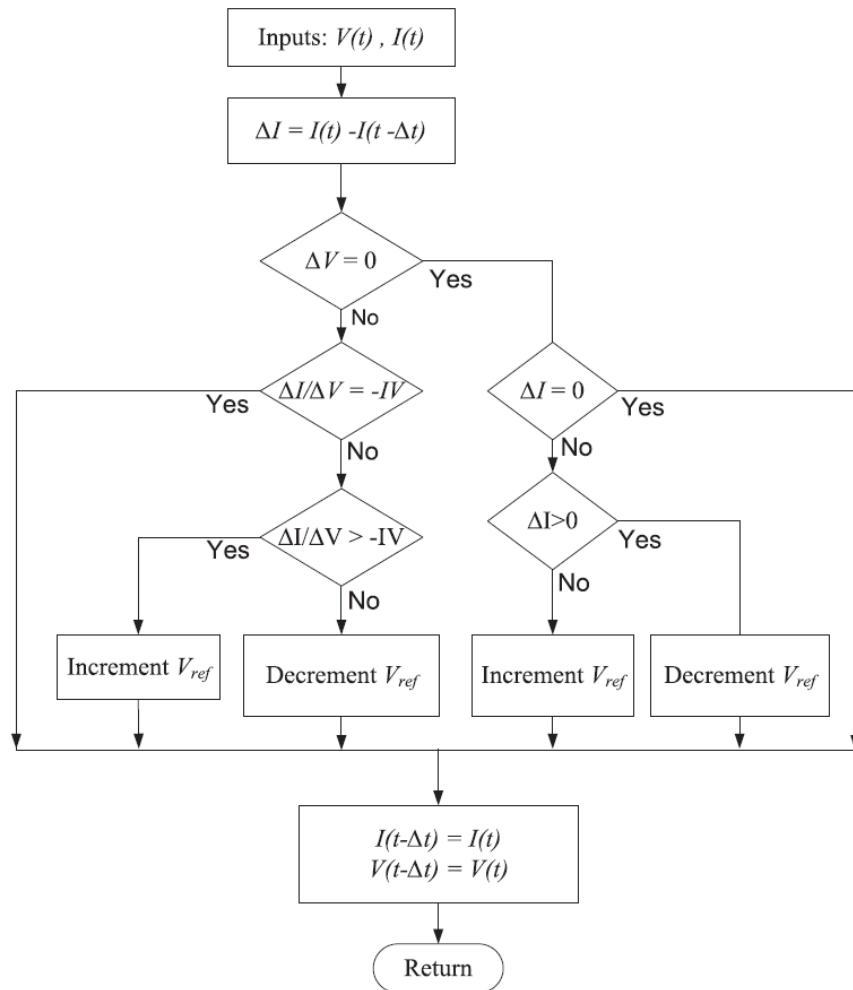


Fig. 3.2 Diagrama de Flujo Algoritmo Conductancia Incremental [3]

3.2.2.1 Ventajas y limitaciones

Una ventaja clave del método de conductancia incremental es su capacidad para manejar cambios rápidos en la irradiancia y las condiciones ambientales. Mientras que el método P&O podría confundir estas variaciones con fluctuaciones normales en la potencia, IncCond puede identificar con mayor precisión la ubicación del punto de máxima potencia, lo que lo hace más eficiente bajo condiciones dinámicas. Sin embargo, esta precisión adicional viene a costa de una leve mayor complejidad computacional y de la necesidad de medir tanto la corriente como el voltaje de manera precisa y en tiempo real.

Con esto se puede afirmar que el método de conductancia incremental ofrece una solución más

robusta y precisa para el seguimiento del punto de máxima potencia en comparación con el método P&O, al basarse en un análisis matemático detallado de la curva P-V. Esto lo hace ideal para sistemas en los que las condiciones ambientales pueden variar rápidamente, aunque requiere más recursos para su implementación.

3.2.3 Voltaje de Circuito-Abierto y Corriente de Cortocircuito

El método de voltaje en circuito abierto y corriente de cortocircuito es una técnica simple para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos. A diferencia de otros métodos como P&O o IncCond, este enfoque se basa en una estimación aproximada de las condiciones óptimas para extraer la máxima potencia de los paneles solares.

3.2.3.1 Voltaje en circuito abierto (V_{oc})

Este método parte del hecho de que el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}) es una fracción conocida del voltaje en circuito abierto, es decir, el voltaje cuando no hay carga conectada y el panel no suministra corriente. En la práctica, el V_{mp} es aproximadamente entre el 70% y el 80% [3] de V_{oc} , dependiendo de las características del panel y las condiciones ambientales. El algoritmo primero desconecta momentáneamente el panel de la carga para medir V_{oc} y, luego, establece el voltaje de operación del panel en un porcentaje de este valor, generalmente ajustado entre el 70-80%.

El proceso de medición del V_{oc} es rápido, pero puede provocar breves interrupciones en la generación de energía debido a que el sistema debe detener temporalmente la producción de energía para medir el voltaje en circuito abierto. En la figura 3.3 se puede observar su diagrama de flujo.

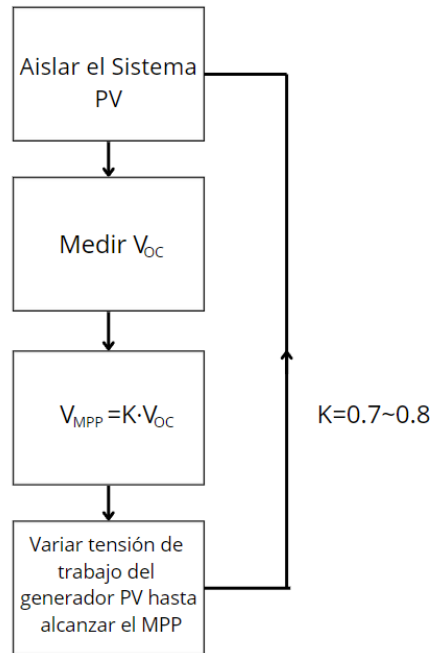


Fig. 3.3 Diagrama de Flujo Algoritmo Voltaje en Circuito Abierto

3.2.3.2 Corriente de cortocircuito (I_{sc})

Similar al método de V_{oc} , en el caso de la corriente de cortocircuito, el algoritmo se basa en la relación entre la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}) y la corriente de cortocircuito. Se estima que la corriente de máxima potencia es una fracción del I_{sc} , que generalmente varía entre el 80% y el 90% [3]. Como se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 3.4 para aplicar este método, el panel fotovoltaico es brevemente cortocircuitado para medir I_{sc} . Luego, se ajusta la corriente del sistema a un valor que esté entre el 80-90% de I_{sc} para operar cerca del punto de máxima potencia.

Al igual que en el método de V_{oc} , este enfoque puede provocar breves pérdidas de energía durante la medición de I_{sc} , ya que el panel debe ser cortocircuitado temporalmente.

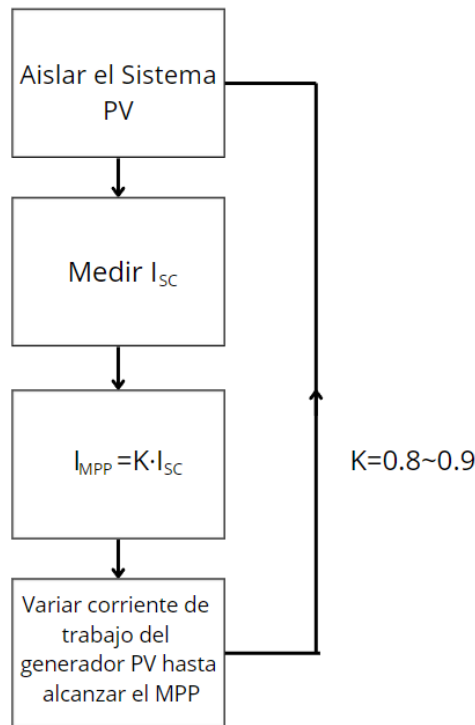


Fig. 3.4 Diagrama de Flujo Algoritmo Corriente de Cortocircuito

3.2.3.3 Ventajas y limitaciones

Una ventaja de estos métodos es su simplicidad de implementación. No requieren un análisis complejo o ajustes continuos del sistema, lo que los hace atractivos para aplicaciones de baja potencia o sistemas con recursos computacionales limitados. Además, no dependen de la condición de la curva de potencia-voltaje como otros métodos.

Sin embargo, su precisión es limitada. Debido a que estos métodos se basan en estimaciones aproximadas del V_{mp} e I_{mp} , la eficiencia general puede ser inferior a la de los algoritmos más sofisticados, especialmente bajo condiciones cambiantes de irradiancia y temperatura [3]. Además, las breves interrupciones para medir el V_{oc} o I_{sc} pueden reducir la eficiencia del sistema, particularmente si las mediciones se realizan con demasiada frecuencia.

3.3 Métodos Estocásticos

Los métodos estocásticos de seguimiento de MPPT emplean principios probabilísticos para encontrar el punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos, siendo especialmente útiles en condiciones variables o con múltiples máximos locales. Ejemplos como la optimización por enjambre

de partículas (PSO), lógica difusa (Fuzzy Logic) y el redes neuronales (RN) exploran aleatoriamente el espacio de búsqueda, adaptándose a curvas no lineales y evitando quedar atrapados en máximos locales. Aunque son más complejos y pueden requerir más tiempo de convergencia, destacan por su capacidad para encontrar el MPP global en escenarios dinámicos y desafiantes.

3.3.1 Lógica Difusa

El método de control basado en lógica difusa es una técnica avanzada utilizada para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos. Este enfoque aprovecha la capacidad de la lógica difusa para manejar la incertidumbre en los sistemas no lineales, como es el caso de los paneles solares, donde factores como la irradiancia y la temperatura pueden variar de manera impredecible. La lógica difusa, a diferencia de los sistemas convencionales de control, no requiere un modelo matemático preciso del sistema, lo que la hace ideal para entornos con condiciones cambiantes [7].

El control basado en lógica difusa utiliza un conjunto de reglas "si-entonces" que emulan el razonamiento humano. Estas reglas están diseñadas para ajustar de manera óptima el voltaje de operación del panel fotovoltaico de acuerdo con las condiciones cambiantes. El proceso comienza con la recopilación de datos sobre las variables de entrada, que normalmente incluyen el cambio en la potencia (ΔP) y el cambio en el voltaje (ΔV). Estos datos se ingresan al controlador difuso, que interpreta las señales en términos de "grados de pertenencia" a ciertas categorías predefinidas, por ejemplo, "pequeño", "mediano", "grande" tanto positivos como negativos para el cambio de potencia. En la Tabla 3.1 se puede apreciar un ejemplo de una tabla de reglas de lógica difusa con valores de "big", "medium", "small" y "zero".

Tabla 3.1 Tabla de Reglas de Lógica Difusa [3]

MF	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PM	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

A continuación, estas entradas difusas se comparan con un conjunto de reglas que determinan la acción de control. Por ejemplo, si ΔP es positivo y ΔV es pequeño, las reglas podrían indicar que se debe incrementar el voltaje ligeramente para acercarse al punto de máxima potencia. Si ΔP es negativo y ΔV es grande, el sistema podría reducir el voltaje. La salida del sistema es una señal de control que ajusta el voltaje o la corriente del panel para maximizar la potencia generada.

3.3.1.1 Etapas del proceso difuso

Como se puede observar en la Figura 3.5 el algoritmo de Fuzzy Logic consta de 3 principales etapas.

1. Fuzzification: En esta etapa, las variables de entrada (cambio de potencia y cambio de voltaje) se transforman en valores difusos, asignando grados de pertenencia a diferentes conjuntos predefinidos. Por ejemplo, un cambio pequeño en el voltaje podría tener una alta pertenencia al conjunto "pequeño" y una baja pertenencia al conjunto "grande".
2. Lógica de toma de decisión: Aquí se aplica el conjunto de reglas "si-entonces" para decidir cómo ajustar el sistema. Estas reglas son establecidas por expertos, basándose en el comportamiento esperado del sistema. Las reglas consideran los grados de pertenencia de las entradas difusas para determinar la acción adecuada.
3. Defuzzification: Finalmente, la salida difusa se convierte en un valor preciso, que luego se utiliza para ajustar el voltaje del sistema fotovoltaico. Este valor se traduce en una acción concreta que el controlador puede implementar para modificar el punto de operación del sistema.

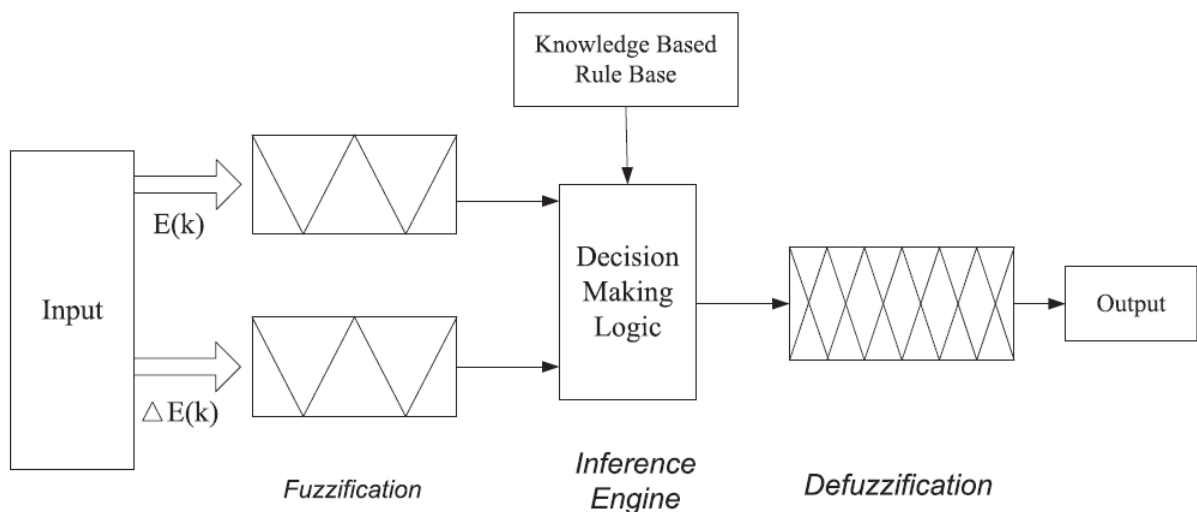


Fig. 3.5 Diagrama de Flujo Algoritmo Lógica Difusa [3]

3.3.1.2 Ventajas y limitaciones

Una de las principales ventajas del control basado en lógica difusa es su capacidad para adaptarse a situaciones complejas e imprecisas. Debido a que no requiere un modelo matemático exacto del sistema, puede manejar variaciones rápidas en la irradiancia solar y la temperatura, que son características comunes en sistemas fotovoltaicos. Además, es muy robusto frente a perturbaciones externas y puede encontrar el punto de máxima potencia de manera eficiente bajo una amplia gama de condiciones ambientales [7].

Sin embargo, una desventaja es que el diseño de un controlador difuso requiere el establecimiento de un conjunto de reglas adecuadas, lo que puede ser un proceso complejo y dependiente de la experiencia del diseñador. Además, aunque el método es más robusto que los enfoques tradicionales, su implementación es más costosa en términos computacionales, ya que requiere un mayor poder de procesamiento.

3.3.2 Algoritmos Basados en Inteligencia Artificial

Los algoritmos basados en inteligencia artificial (IA) para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos son técnicas avanzadas que utilizan enfoques como redes neuronales, algoritmos genéticos, y optimización por enjambre de partículas para maximizar la eficiencia de los paneles solares. A diferencia de los métodos tradicionales como P&O o IncCond, estos algoritmos son capaces de adaptarse y aprender de las condiciones cambiantes del entorno, lo que les permite realizar predicciones más precisas y mejorar la eficiencia energética [3].

3.3.2.1 Redes Neuronales

Uno de los métodos más comunes basados en IA es el uso de redes neuronales artificiales. Estas redes imitan el funcionamiento del cerebro humano al aprender patrones complejos a partir de datos de entrada, como la irradiancia solar, la temperatura y el voltaje del panel. El entrenamiento de una red neuronal se realiza mediante el uso de datos históricos del sistema fotovoltaico, donde la red ajusta sus "pesos" internos para minimizar el error entre la salida predicha y la salida real.

Como se ve en la Figura 3.6 una red neuronal está compuesta por varias capas interconectadas de "neuronas" artificiales, organizadas en una estructura que incluye tres tipos principales de capas. La capa de entrada recibe las variables del sistema, como irradiancia solar, temperatura, voltaje o

corriente, y las introduce en la red para su procesamiento. Las capas ocultas son las encargadas de realizar los cálculos internos; estas capas contienen neuronas conectadas entre sí mediante pesos ajustables y utilizan funciones de activación no lineales para extraer patrones complejos y relaciones entre las entradas. Finalmente, la capa de salida proporciona el resultado deseado, como el voltaje o corriente óptimos para maximizar la potencia generada por el sistema fotovoltaico. Esta estructura permite que la red neuronal aprenda y procese información de manera eficiente, ajustando sus pesos durante el entrenamiento para modelar relaciones no lineales y adaptarse a condiciones variables [12].

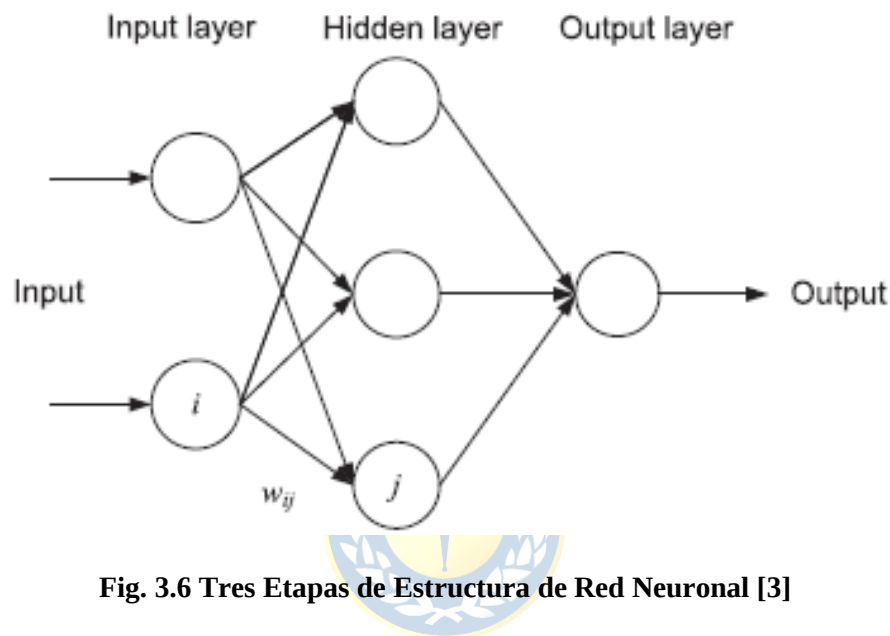


Fig. 3.6 Tres Etapas de Estructura de Red Neuronal [3]

3.3.2.2 Algoritmos genéticos

Otro enfoque basado en AI es el uso de algoritmos genéticos, los cuales están inspirados en los principios de la evolución natural, como la selección, el cruce y la mutación. Los algoritmos genéticos buscan el punto de máxima potencia a través de una población de posibles soluciones, en este caso, configuraciones de voltaje o corriente, que evoluciona con el tiempo para encontrar la solución óptima.

Como se ve en la figura 3.7 el algoritmo se comienza identificando los parámetros de diseño, Con esto se busca maximizar la potencia generada por el panel fotovoltaico la cual se define como la función objetivo. Posteriormente se genera una población inicial de soluciones aleatorias. Las soluciones más exitosas se seleccionan para reproducirse, combinándose entre sí o mutando ligeramente para generar nuevas soluciones. Este proceso se repite durante varias generaciones hasta que el algoritmo converge en el punto de máxima potencia. Los algoritmos genéticos son efectivos en sistemas con muchas variables, ya que exploran una gran cantidad de posibles soluciones.

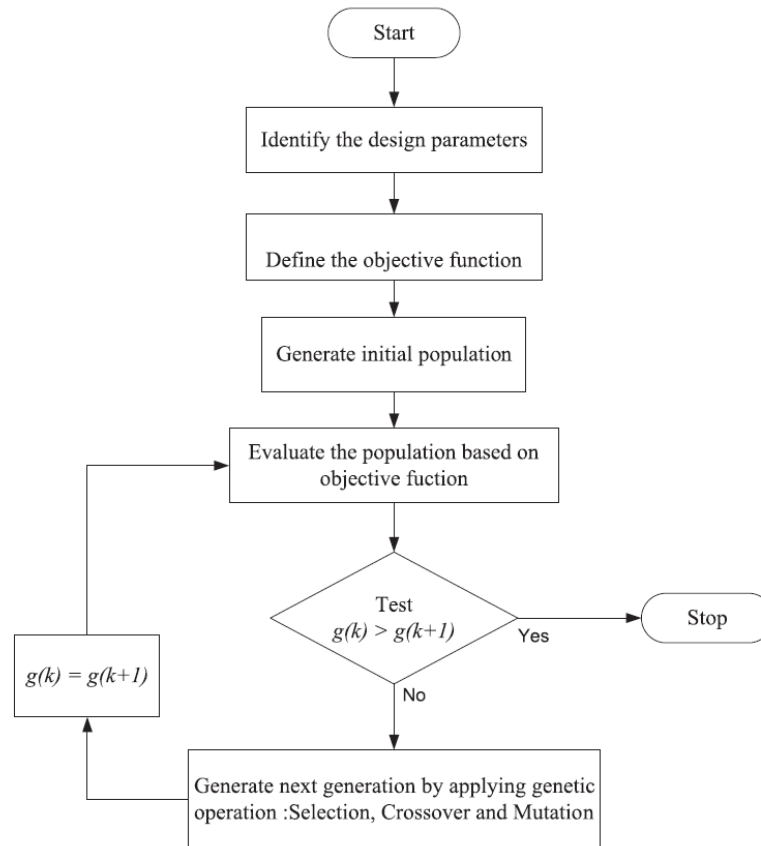


Fig. 3.7 Diagrama de Flujo de Algoritmo Genético [3]

3.3.2.3 Optimización por enjambre de partículas (PSO)

En PSO, un enjambre de partículas explora el espacio de soluciones para encontrar la óptima. Cada partícula tiene una posición y una velocidad que cambian en cada iteración, con el objetivo de acercarse al punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico. A medida que las partículas se mueven, evalúan la calidad de su posición en función de la potencia generada. El PSO tiene dos componentes principales [3]:

1. Mejor posición individual (p_{best}): Cada partícula recuerda la mejor posición en la que ha estado, es decir, la posición en la que obtuvo la mayor potencia generada por el panel solar.
2. Mejor posición global (g_{best}): Las partículas también tienen acceso a la mejor posición encontrada por todo el enjambre, es decir, la posición donde cualquier partícula ha logrado la mayor potencia.

En cada iteración, las partículas ajustan su velocidad y posición en función de dos factores:

- Experiencia individual: La partícula se mueve hacia su mejor posición pasada p_{best} , tratando de mejorar su desempeño.
- Experiencia del grupo: La partícula también se mueve hacia g_{best} , es decir, la mejor posición descubierta por todo el enjambre.

La actualización de la velocidad de una partícula se calcula utilizando la siguiente fórmula:

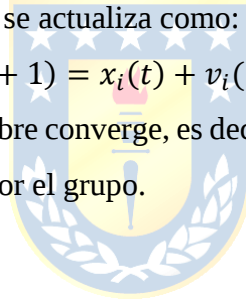
$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{best} - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best} - x_i(t))$$

- $v_i(t + 1)$: Velocidad de la partícula i en la próxima iteración.
- w : Factor de inercia que controla el impacto de la velocidad anterior.
- c_1 y c_2 : Coeficientes de aceleración que determinan cuánto se deben mover las partículas hacia p_{best} y g_{best} .
- r_1 y r_2 : Números aleatorios entre 0 y 1, utilizados para introducir variabilidad y evitar que las partículas se muevan de manera determinista.
- $x_i(t)$: Posición actual de la partícula i .

Luego, la nueva posición de la partícula se actualiza como:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1)$$

Este proceso se repite hasta que el enjambre converge, es decir, todas las partículas se acercan al mejor punto de máxima potencia encontrado por el grupo.



3.3.2.4 Ventajas y limitaciones

Los algoritmos de inteligencia artificial para MPPT tienen varias ventajas clave. En primer lugar, son altamente adaptativos y pueden aprender y ajustarse a cambios rápidos en las condiciones ambientales, lo que mejora significativamente la eficiencia en comparación con métodos tradicionales. Además, pueden manejar la no linealidad y la complejidad inherente a los sistemas fotovoltaicos, encontrando soluciones óptimas donde otros métodos podrían fallar.

Sin embargo, estos métodos también tienen algunas desventajas. Requieren un procesamiento computacional considerable y, en algunos casos, una gran cantidad de datos para entrenar los modelos, lo que puede hacer que su implementación sea costosa. Además, el diseño y el entrenamiento de redes neuronales o el ajuste de algoritmos genéticos pueden ser complejos y requerir conocimientos especializados. Esto último hace que a día de hoy sean los métodos menos implementados en la industria energética. [10]

3.4 Conclusión

Los métodos MPPT en sistemas fotovoltaicos son esenciales para optimizar la eficiencia energética, especialmente en condiciones de irradiancia y temperatura variables. Cada uno de los métodos analizados ofrece ventajas y desventajas, lo que permite elegir la técnica más adecuada según las características del sistema y el entorno de aplicación.

Los métodos clásicos, como el P&O y el IncCond, son los más comunes debido a su simplicidad y facilidad de implementación. Si bien estos métodos son efectivos en condiciones estables, pueden tener limitaciones en ambientes con variaciones rápidas, ya que pueden causar oscilaciones alrededor del punto de máxima potencia y tardar en adaptarse a cambios repentinos [10].

Los métodos basados en mediciones directas, como el de voltaje en circuito abierto y corriente de cortocircuito, son fáciles de implementar, pero tienen limitaciones en términos de precisión, ya que se basan en estimaciones aproximadas de las condiciones óptimas y requieren interrupciones breves en la operación del sistema.

Por otro lado, los métodos avanzados, como el control basado en lógica difusa y los algoritmos de inteligencia artificial, ofrecen soluciones más sofisticadas y robustas. Estos métodos son altamente adaptativos, lo que les permite ajustarse rápidamente a cambios en las condiciones ambientales y manejar la complejidad no lineal de los sistemas fotovoltaicos. El uso de redes neuronales, algoritmos genéticos y la optimización por enjambre de partículas permite una búsqueda más precisa y eficiente del punto de máxima potencia, aunque a costa de una mucha mayor complejidad computacional.

En conclusión, la selección del método de MPPT depende del equilibrio entre la simplicidad y el rendimiento requerido. Los métodos tradicionales siguen siendo efectivos para la gran mayoría de aplicaciones, pero a medida que las necesidades de eficiencia energética aumentan y los entornos se vuelven más complejos, los enfoques avanzados basados en algoritmos más complejos son cada vez más relevantes para maximizar el rendimiento de los futuros sistemas fotovoltaicos.

Capítulo 4. Aplicación de algoritmos MPPT a sistemas bifaciales

4.1 Introducción

La tecnología bifacial ha emergido como una solución innovadora en la industria fotovoltaica, permitiendo a los paneles solares captar irradiancia tanto en su cara frontal como posterior. Esta capacidad aumenta significativamente la eficiencia energética al aprovechar no solo la luz solar directa, sino también la irradiancia reflejada por el entorno. Sin embargo, este avance introduce nuevos desafíos en la operación óptima del sistema, especialmente en el seguimiento del punto de máxima potencia. Los algoritmos MPPT fueron diseñados inicialmente para condiciones más homogéneas, como las que presentan los paneles monofaciales. En un sistema bifacial, las fluctuaciones de irradiancia en ambas caras del panel, junto con fenómenos como el sombreado parcial, hacen que las curvas P-V sean más complejas y dinámicas. Por ello, es necesario adaptar o rediseñar los algoritmos MPPT para garantizar un seguimiento eficiente en estos sistemas avanzados. En este capítulo, se analiza cómo los algoritmos MPPT tradicionales interactúan con los paneles bifaciales, los retos específicos que enfrentan, y las soluciones propuestas para optimizar su rendimiento en estas nuevas configuraciones.

4.2 Impacto de la Irradiancia Diferencial

En un sistema fotovoltaico bifacial, la irradiancia que llega a la cara frontal y la irradiancia reflejada en la cara posterior no son constantes ni homogéneas. Esto genera diferentes curvas I-V y P-V en función de las condiciones ambientales, la inclinación del panel y la reflectividad del suelo [4]. Los algoritmos MPPT deben adaptarse para seguir estas curvas cambiantes.

Los sistemas bifaciales son más propensos a tener picos de potencia en sus curvas P-V debido a la combinación de una cara frontal y posterior, lo que complica la tarea de localizar el MPP óptimo. Los algoritmos MPPT tradicionales, como el P&O o el de IncCond, están diseñados para condiciones más predecibles, donde solo se tiene en cuenta una curva I-V. En sistemas bifaciales, el MPP varía con mayor frecuencia, ya que las contribuciones de ambas caras del panel fluctúan de manera independiente.

4.3 Efectos del partial shading

El partial shading o sombreado parcial afectan significativamente el comportamiento de la curva P-V de un panel bifacial, ya que, al recibir irradiancia desigual en distintas partes del panel, especialmente entre la cara frontal y trasera, se generan múltiples puntos de potencia máxima local [13]. En condiciones normales, la curva P-V tiene un solo punto de máxima potencia, pero cuando ocurre partial shading, pueden formarse varios picos debido a las diferentes condiciones de irradiancia en las celdas del panel, este efecto se puede apreciar en la figura 4.1 donde el efecto puede llegar a confundir a los algoritmos MPPT tradicionales, llevándolos a operar en puntos de potencia subóptimos. En paneles bifaciales, este fenómeno es más complejo debido a la doble fuente de irradiancia (directa y reflejada), lo que incrementa la posibilidad de obtener una irradiancia dispereja en la totalidad del panel, afectando así la curva P-V, lo que dificulta aún más el seguimiento preciso del verdadero punto de máxima potencia.

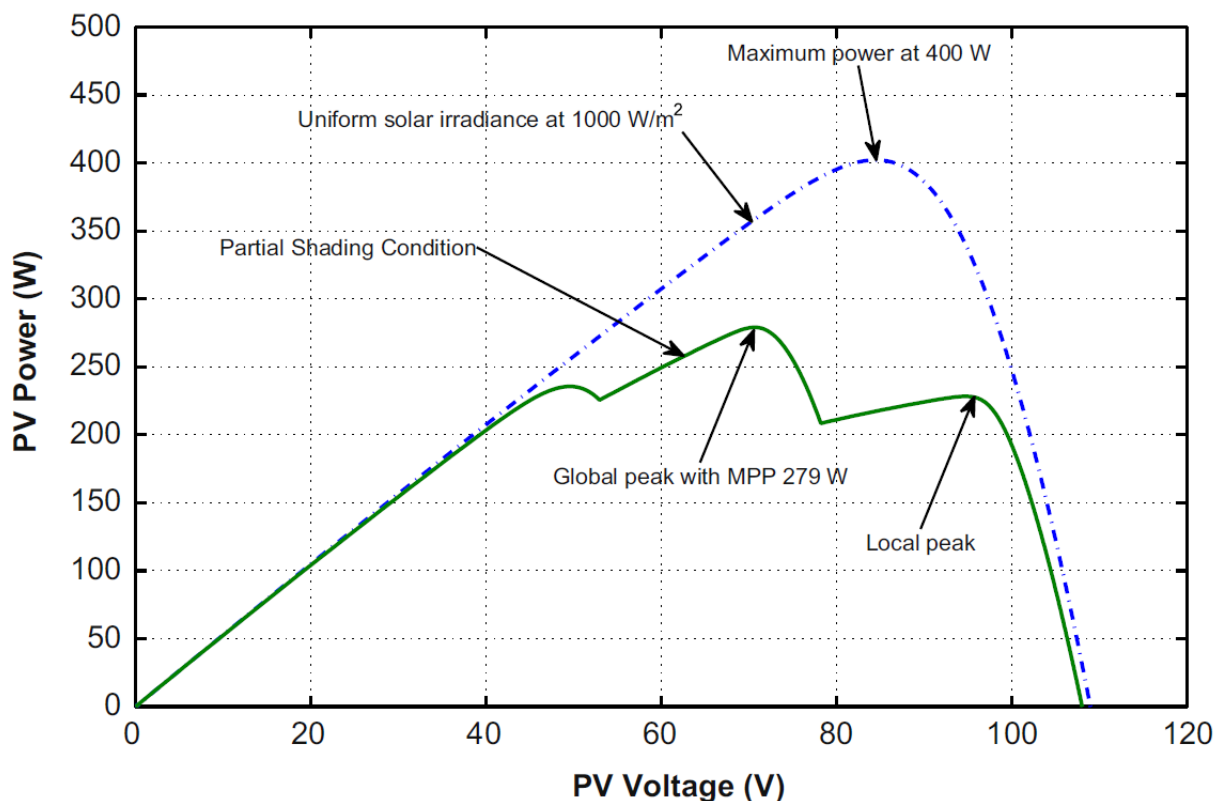


Fig.4.1 Comparación de Curva PV en Condiciones Normales vs Partial Shading [3]

4.4 Desafíos para los Algoritmos MPPT en Sistemas Bifaciales

Uno de los principales retos al aplicar algoritmos MPPT a paneles bifaciales es la dificultad para identificar con precisión el punto de máxima potencia debido a la naturaleza dinámica de la irradiancia en ambas caras. Esto puede dar lugar a un rendimiento subóptimo si el algoritmo MPPT utilizado no es lo suficientemente ágil o preciso para adaptarse a cambios rápidos en la irradiancia.

4.4.1 Algoritmos P&O

Este algoritmo realiza pequeñas perturbaciones en el voltaje o corriente del panel y monitorea el cambio en la potencia. Aunque funciona adecuadamente en paneles monofaciales bajo condiciones estables, su capacidad de respuesta ante fluctuaciones rápidas en paneles bifaciales puede no ser suficiente, conduciendo a errores de seguimiento.

4.4.2 IncCond

Este algoritmo mejora la precisión al calcular la derivada de la conductancia. Puede lidiar con variaciones más rápidas que el P&O, pero aún puede experimentar dificultades con la variabilidad bifacial, ya que solo utiliza información local y no tiene en cuenta las fluctuaciones irradiancia-voltaje en ambas caras simultáneamente.

4.4.3 Algoritmos Estocásticos

Recientemente, se ha explorado el uso de técnicas de inteligencia artificial, como redes neuronales, lógica difusa o algoritmos genéticos, para mejorar el rendimiento del MPPT en paneles bifaciales. Estas técnicas permiten predecir y ajustar dinámicamente el MPP en función de las condiciones ambientales, pero requieren mayor poder de procesamiento y un entrenamiento previo con datos reales que raramente se llega a dar en la industria.

4.5 Modificaciones y Adaptaciones en los Algoritmos MPPT para Sistemas Bifaciales

Para maximizar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos bifaciales, es crucial realizar modificaciones en los algoritmos MPPT tradicionales, que están diseñados principalmente para paneles monofaciales con una única fuente de irradiancia. En los sistemas bifaciales, donde las curvas de potencia-voltaje se ven afectadas por la irradiancia recibida en ambas caras del panel, se necesitan adaptaciones que permitan un seguimiento más preciso del MPP. Una de las modificaciones más destacadas es la inclusión de sensores de irradiancia dual en las caras frontal y posterior del panel. Estos sensores proporcionan información en tiempo real sobre las condiciones de luz en ambas superficies, lo que permite que el algoritmo ajuste de manera más precisa el punto de operación. Al

tener datos de irradiancia directa y reflejada, el algoritmo puede calcular con mayor exactitud el MPP en función de las contribuciones combinadas de ambas caras, mejorando el rendimiento energético del sistema. Esta estrategia es especialmente efectiva en entornos donde las condiciones de luz cambian rápidamente, como en áreas urbanas o regiones con alta reflectividad del suelo.

Por otra parte, los algoritmos predictivos ofrecen una solución avanzada para optimizar el seguimiento del MPP en sistemas bifaciales. Estos algoritmos utilizan datos históricos y predicciones meteorológicas para anticipar los cambios en la irradiancia y ajustar el punto de máxima potencia de manera proactiva. Esta técnica es especialmente útil en entornos donde los cambios en las condiciones de iluminación, como el sombreado parcial o la variabilidad de la luz reflejada, son frecuentes. Aunque requieren grandes bases de datos y una mayor capacidad de procesamiento, los algoritmos predictivos pueden mejorar sustancialmente la eficiencia del sistema, maximizando la captura de energía y reduciendo las pérdidas debidas a fluctuaciones de irradiancia.

4.6 Conclusión

A diferencia de los paneles monofaciales, los sistemas bifaciales capturan irradiancia por ambas caras, lo que incrementa el potencial de generación de energía, pero también introduce complejidad en la identificación del punto de máxima potencia debido a las fluctuaciones constantes entre la irradiancia frontal y posterior.

Los algoritmos MPPT tradicionales, como P&O e IncCond, no son completamente efectivos en este contexto sin adaptaciones. El partial shading debido a las variaciones dinámicas de irradiancia en las dos caras del panel pueden generar múltiples puntos de potencia máxima, lo que dificulta el seguimiento óptimo. Por lo tanto, es crucial adaptar o desarrollar algoritmos más avanzados que consideren estas características distintivas de los paneles bifaciales.

Las adaptaciones más prometedoras incluyen la incorporación de sensores de irradiancia dual y el uso de algoritmos predictivos pueden mejorar significativamente la capacidad de los sistemas bifaciales para aprovechar al máximo la energía disponible. Estos enfoques avanzados permiten ajustar el punto de operación en tiempo real y anticiparse a las variaciones de irradiancia, optimizando el rendimiento del sistema.

En conclusión, la combinación de los algoritmos MPPT con la tecnología bifacial requiere un enfoque más sofisticado y flexible para alcanzar su máximo potencial. Si bien existen retos considerables, las soluciones emergentes, como los algoritmos lógicos y predictivos, ofrecen una vía prometedora para maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos bifaciales en el futuro.

Capítulo 5. Verificación computacional de la operación de algoritmos MPPT

5.1 Introducción

En este capítulo se verifica mediante simulaciones computacionales la operación de tres métodos de seguimiento del punto de máxima potencia: Conductancia Incremental (IncCond), Perturbación y Observación (P&O) y Lógica Difusa. Estos algoritmos fueron seleccionados por su amplio uso en sistemas fotovoltaicos, y debido a su capacidad para optimizar la extracción de energía bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura.

La simulación se lleva a cabo en MATLAB/Simulink, un entorno ampliamente utilizado para modelado y análisis de sistemas dinámicos. Este enfoque permite evaluar el rendimiento de los algoritmos considerando la ganancia bifacial y las condiciones ambientales características de los módulos bifaciales. En el caso de los métodos estocásticos, se optó por analizar únicamente el control basado en Lógica Difusa, debido a su viabilidad para aplicaciones industriales en comparación con otras alternativas basadas en inteligencia artificial, como son las redes neuronales o los algoritmos genéticos, que suelen requerir mayores recursos computacionales y complejidad en su implementación.[15]

El análisis computacional se enfoca en comparar los métodos en términos de eficiencia energética, velocidad de convergencia y robustez frente a variaciones ambientales. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para determinar el método más adecuado para maximizar la eficiencia en sistemas fotovoltaicos bifaciales, contribuyendo al desarrollo de soluciones prácticas y optimizadas para la industria.

5.2 Irradiancia variable

A continuación, en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se muestra la energía generada por el panel respecto a la irradiancia entregada en el tiempo, con ello se puede apreciar la capacidad de los algoritmos de llegar al punto máximo de potencia frente a condiciones de irradiancia variable en ambas caras del panel.

Para ello, se entrega un input de irradiancia hipotéticos con variados niveles de irradiación para ambas caras del panel (esto con el fin de comprobar su comportamiento frente a múltiples

condiciones), estas se pueden apreciar en la figura 5.1, y comparando los resultados de potencia obtenida en cada método con los de potencia máxima teórica que se obtienen al nivel de irradiancia entregado, se calcula la eficiencia de cada algoritmo.

Para estas simulaciones se utilizaron los parámetros del panel mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Datos de Panel Fotovoltaico

Parámetro	Valor
Potencia Máxima	200 [W]
Células por Modulo	54
V_{OC}	32.9 [V]
I_{SC}	8.21 [A]
V_{mp}	26.3 [V]
I_{mp}	7.61 [A]
Coeficiente de temperatura V_{OC}	-0.355 [%/°C]
Coeficiente de temperatura I_{SC}	0.06 [%/°C]
Corriente de Saturación de diodo	2.3234e-10 [A]
Factor de idealidad del diodo	0.97734
R_{sh}	150.6844 [Ω]
R_s	0.34484 [Ω]

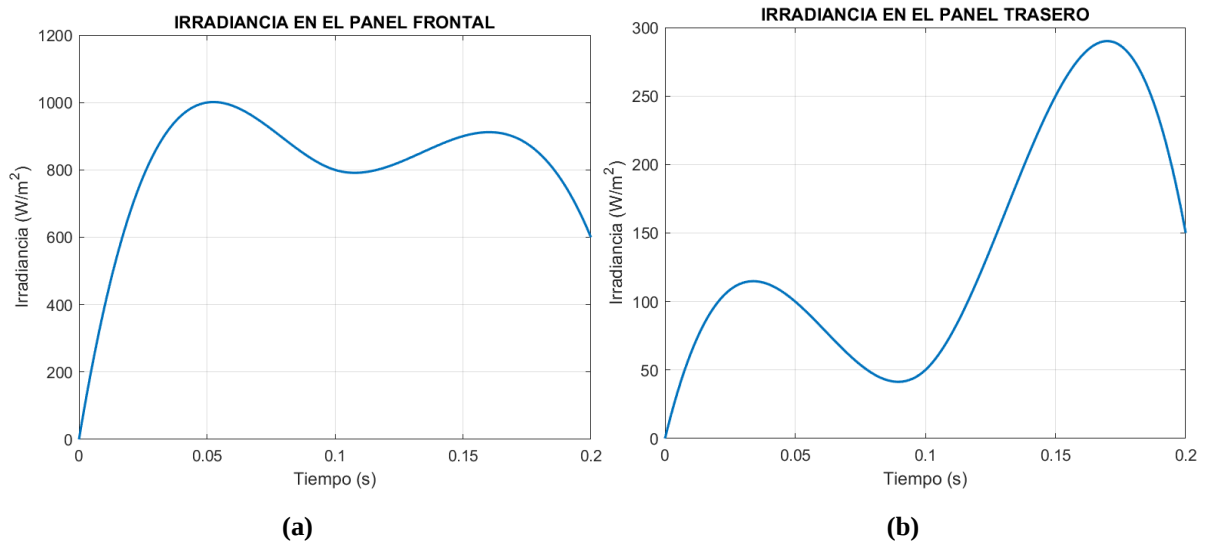


Fig. 5.1 Curva de Irradiancia en la Cara Frontal y Trasera del Panel Bifacial.

(a) Irradiancia en la cara frontal de panel (b) Irradiancia en la cara trasera del panel.

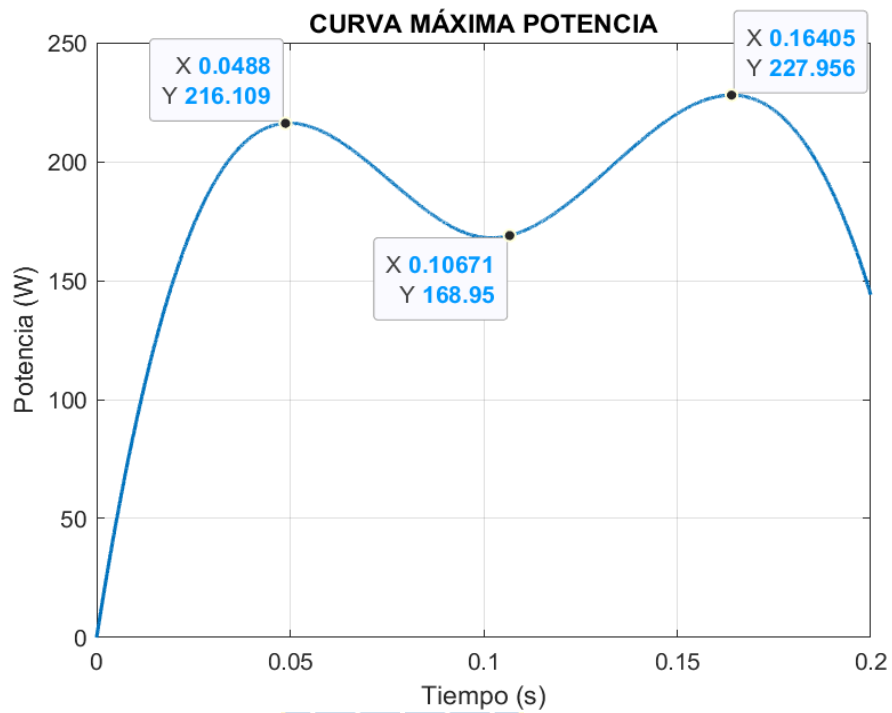


Fig. 5.2 Máxima Potencia Generada Posible Respecto a la Irradiancia Recibida.

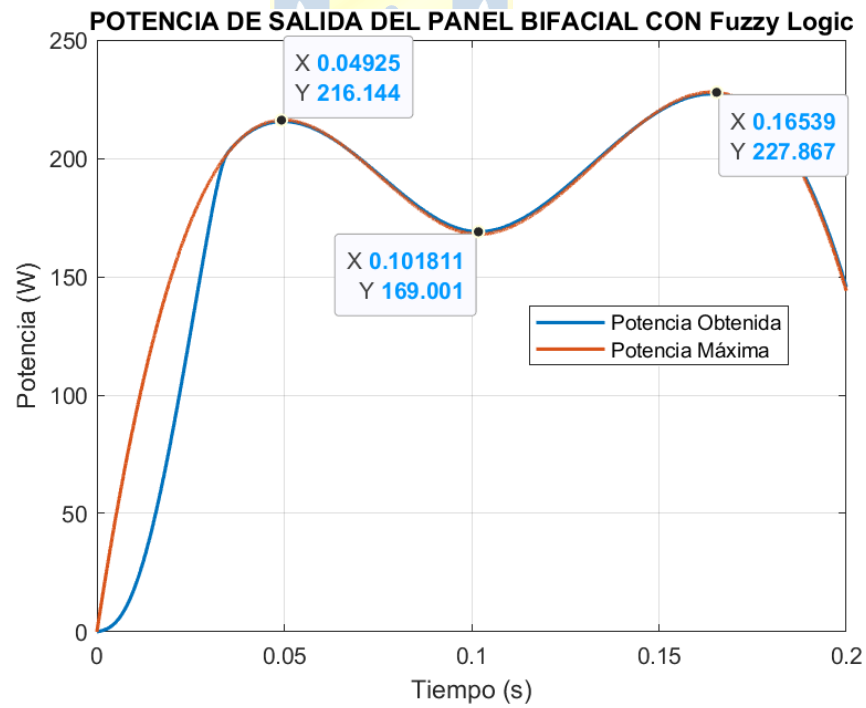


Fig. 5.3 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Irradiancia Variable.

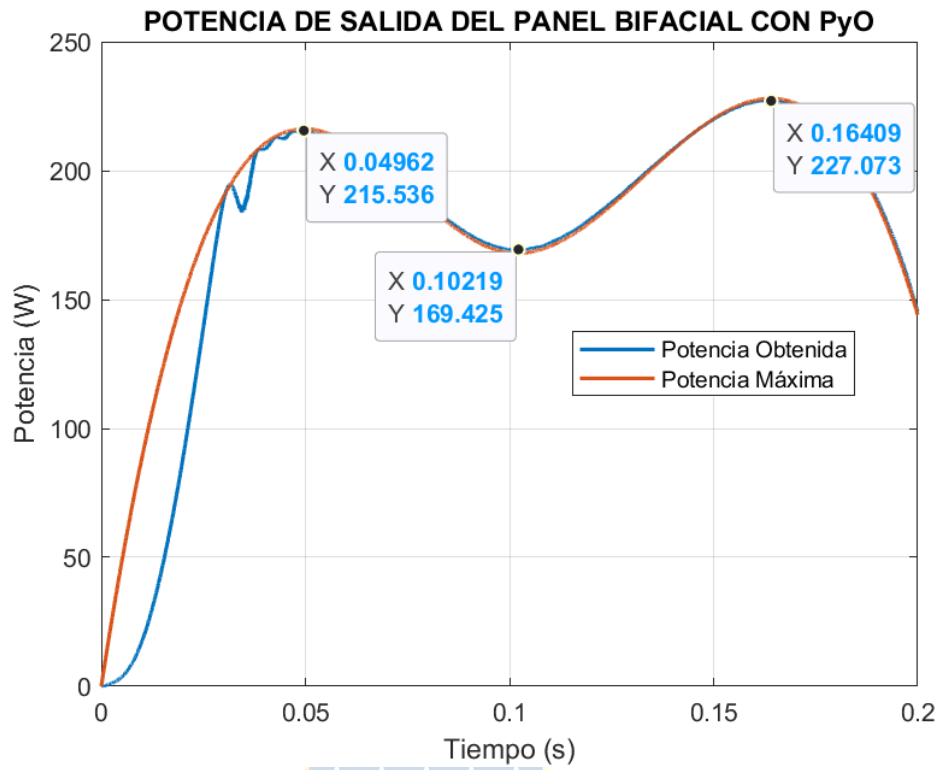


Fig. 5.4 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Irradiancia Variable.

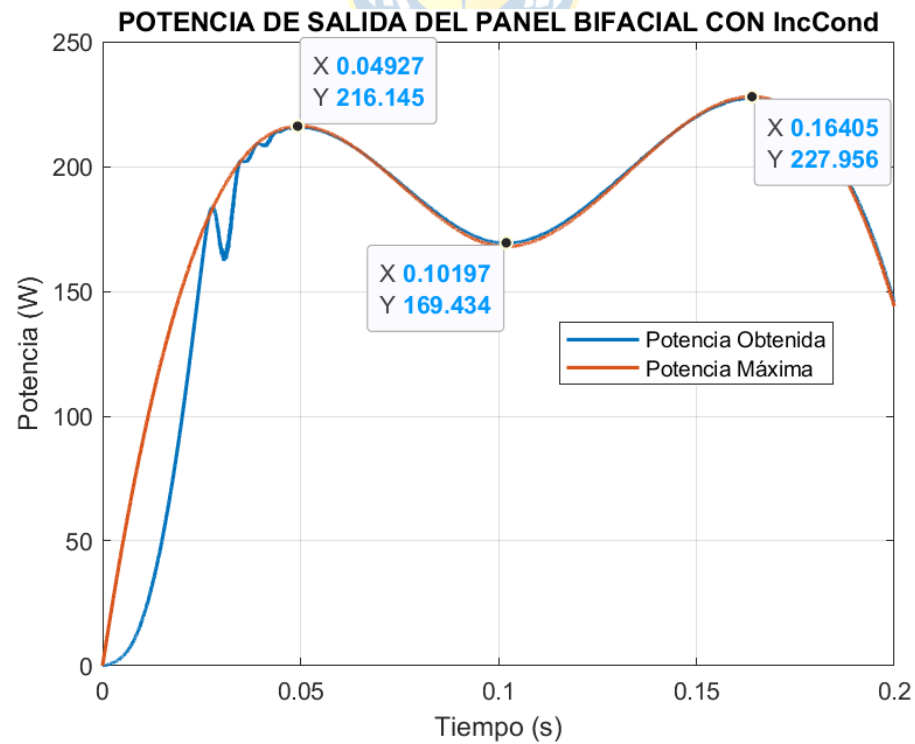


Fig. 5.5 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Irradiancia Variable.

De las figuras se puede apreciar que los métodos P&O, IncCond y Fuzzy Logic demostraron su capacidad para identificar exitosamente los puntos de máxima potencia bajo condiciones de irradiancia variable, lo cual se evidencia en la Figura 5.2. En dicha figura, se observa cómo los algoritmos lograron identificar la potencia máxima correspondiente a cada nivel de irradiancia simulado, lo que confirma su efectividad en el seguimiento del MPP. Este resultado permite corroborar que, incluso en escenarios de fluctuación de irradiancia, los métodos analizados son capaces de maximizar la eficiencia energética del sistema fotovoltaico. En particular, P&O e IncCond lograron ajustar el punto de operación del sistema de manera eficaz en entornos con cambios moderados de potencia, mientras que el método basado en lógica difusa destacó por su capacidad de adaptarse rápidamente a variaciones más dinámicas y no lineales. Estos resultados confirman la efectividad de estos algoritmos para maximizar la eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos, incluso en escenarios con fluctuaciones ambientales significativas. A pesar de lo anterior mencionado se puede apreciar que el método de Fuzzy Logic converge hasta el MPP de manera más limpia y rápida, teniendo estas muchas menos oscilaciones de potencia alrededor del MPP y por ende siendo más eficiente.

Basados en los datos presentados en la Tabla 5.2, se aprecia que los tres métodos evaluados: fuzzy logic, P&O e IncCond, presentan niveles de eficiencia muy similares en relación con la potencia máxima generada posible. El método de Fuzzy Logic muestra una ligera ventaja en términos de precisión para alcanzar el punto de máxima potencia, lo que lo hace atractivo en aplicaciones donde la optimización fina es prioritaria. Por otro lado, los métodos P&O e IncCond destacan por su simplicidad y facilidad de implementación, características que los convierten en opciones muy prácticas y adecuadas para sistemas en los que la rapidez y la eficiencia computacional son factores clave. Las diferencias observadas en rendimiento son tan leves que cualquiera de los métodos puede considerarse dependiendo de las necesidades específicas del sistema.

Tabla 5.2 Eficiencia de Cada Método en Condiciones de Irradiancia Variable

Método	Eficiencia (%)
Fuzzy Logic	95.28
IncCond	95.20
P&O	94.83

5.3 Temperatura variable

A continuación, en las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 se muestra la capacidad de los algoritmos de llegar al punto máximo de potencia frente a condiciones de temperatura variable. Las características del panel son las mismas anteriormente evaluadas.

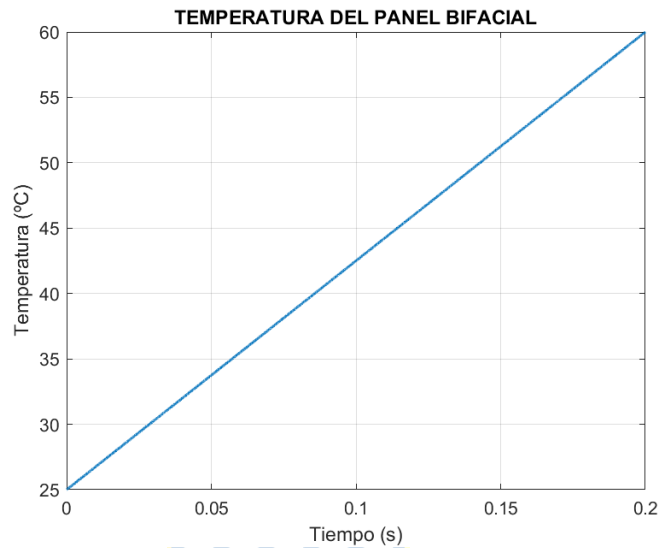


Fig. 5.6 Curva de Temperatura del Panel.

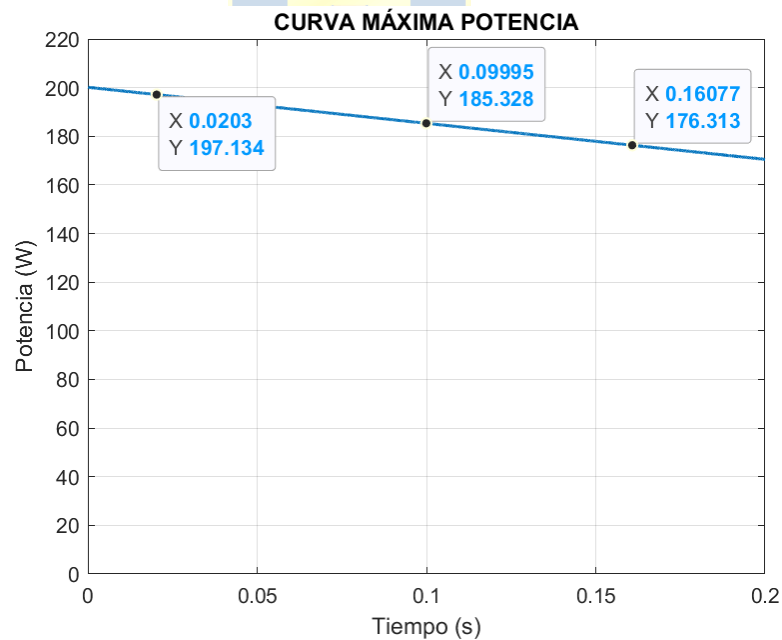


Fig. 5.7 Máxima Potencia Generada Posible Respecto a la Temperatura del Sistema.

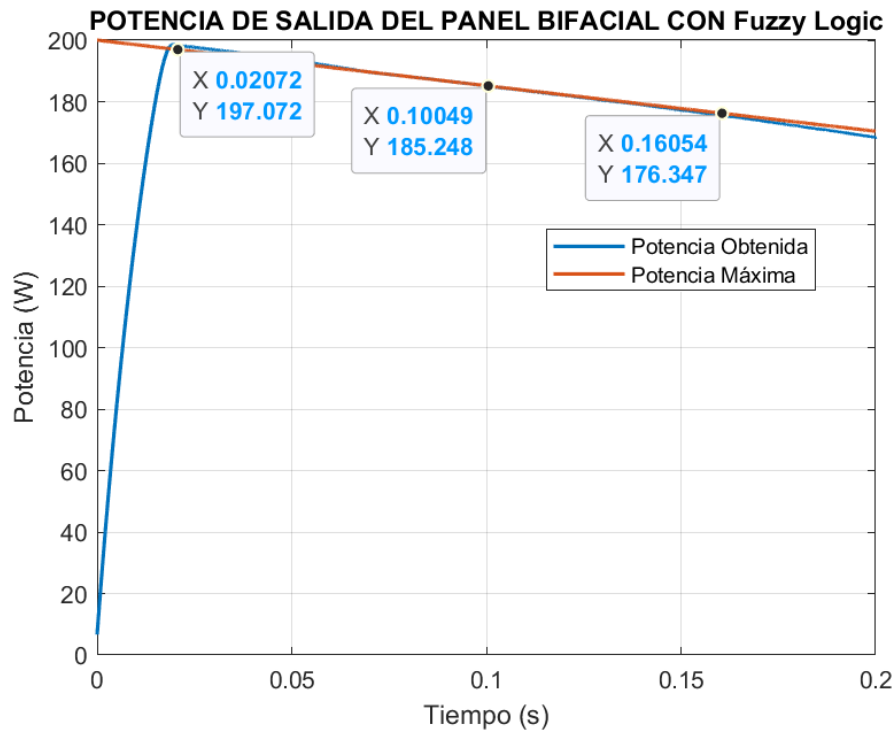


Fig. 5.8 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Temperatura Variable.

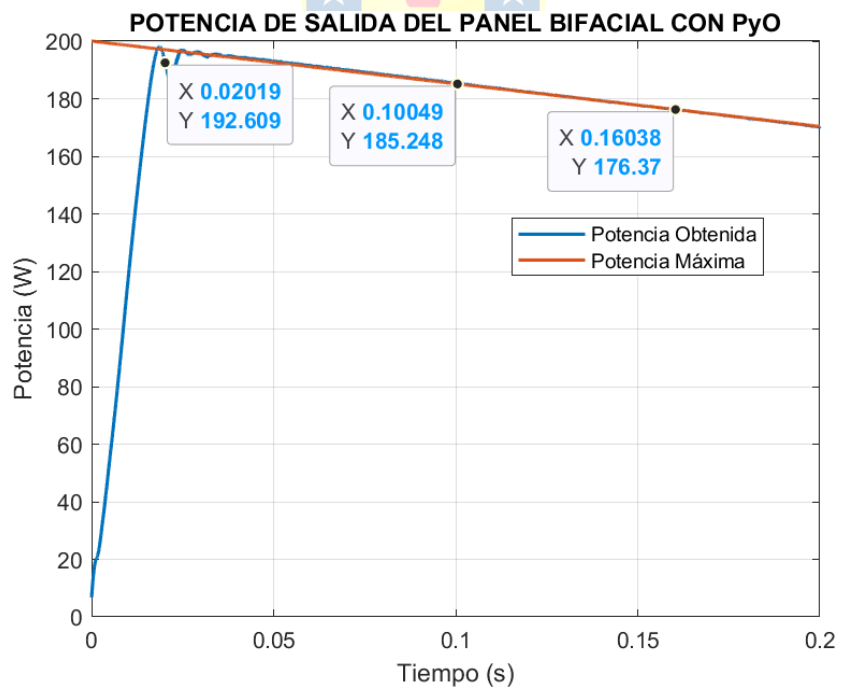


Fig. 5.9 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Temperatura Variable.

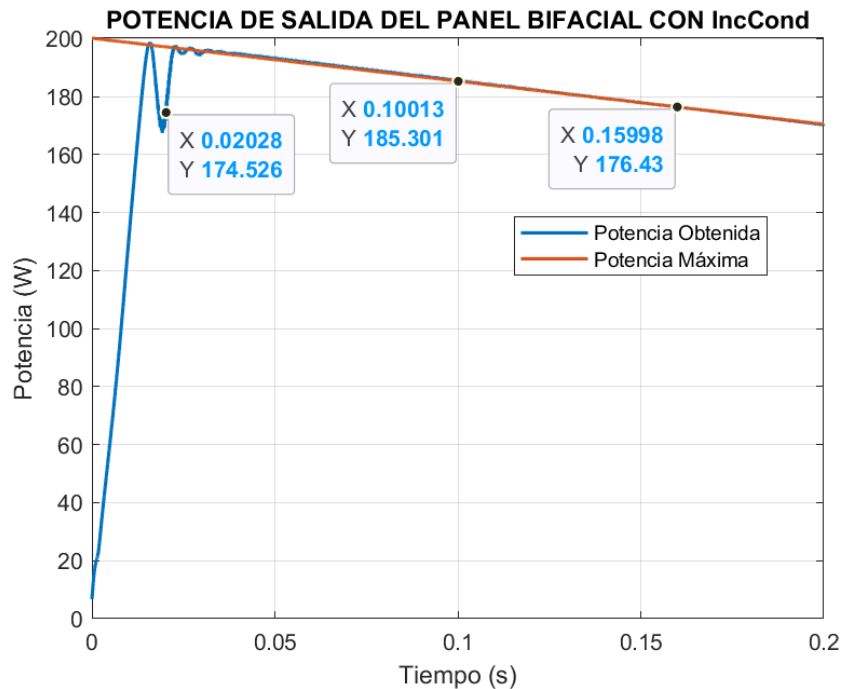


Fig. 5.10 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Temperatura Variable.

En base a estos resultados computacionales se puede apreciar que los métodos P&O, IncCond y Fuzzy Logic demostraron su capacidad para alcanzar el punto de máxima potencia bajo condiciones de temperatura variable, como se evidencia en la Figura 5.7. En esta figura, se observa la potencia máxima obtenida para cada nivel de temperatura simulado, lo que confirma la efectividad de estos algoritmos. Sin embargo, el método de lógica difusa mostró un rendimiento levemente superior, ya que logró una convergencia más precisa MPP, lo que resalta su ventaja en escenarios donde los cambios térmicos afectan significativamente el comportamiento del sistema.

Adicionalmente en base en los resultados presentados en la Tabla 5.3, obtenidos mediante el análisis de eficiencia, se evidencia que los métodos Fuzzy Logic, P&O e IncCond logran desempeños muy similares en términos de potencia generada por los paneles solares bifaciales. Fuzzy Logic sobresale ligeramente debido a su capacidad para ajustarse con precisión a los cambios dinámicos de temperatura, lo que lo convierte en una herramienta útil en escenarios de alta variabilidad ambiental. Por su parte, P&O e IncCond siguen ofreciendo ventajas claras en cuanto a simplicidad y facilidad de implementación, características que los hacen ideales para aplicaciones donde la robustez y la eficiencia operativa son prioritarias. Estos resultados destacan las fortalezas de cada método, permitiendo su selección en función de los requisitos específicos del sistema y las condiciones ambientales.

Tabla 5.3 Eficiencia de Cada Método en Condiciones de Temperatura Variable

Método	Eficiencia (%)
Fuzzy Logic	95.52
IncCond	94.95
P&O	95.25

5.4 Comportamiento ante partial shading

A continuación, en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se muestra la capacidad de los algoritmos de llegar al punto máximo de potencia frente a condiciones de partial shading. Las características del panel se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Datos de Panel Fotovoltaico

Parámetro	Valor
Potencia Máxima	249.8472 [W]
Células por Modulo	60
V_{OC}	37.92 [V]
I_{SC}	8.62 [A]
V_{mp}	30.96 [V]
I_{mp}	8.07 [A]
Coeficiente de temperatura V_{OC}	-0.33969 [%/°C]
Coeficiente de temperatura I_{SC}	0.063701 [%/°C]
Corriente de Saturación de diodo	1.4176e-6 [A]
Factor de idealidad del diodo	0.99132
R_{sh}	82.1161 [Ω]
R_s	0.098625 [Ω]

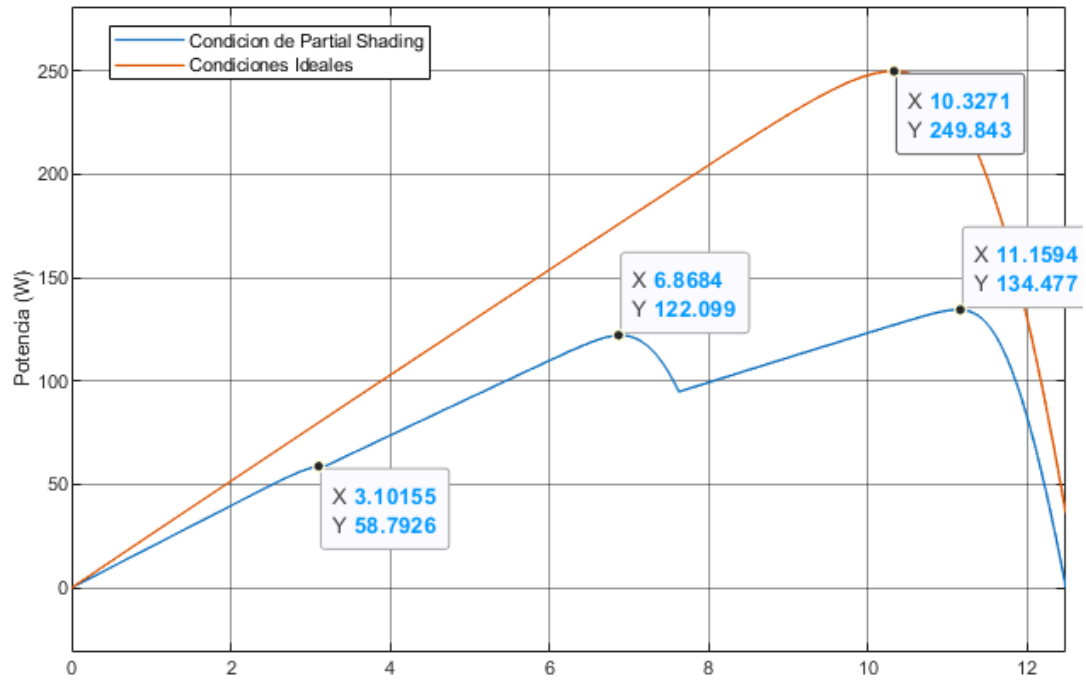


Fig. 5.11 Puntos de Potencia Máxima en Condiciones Ideales y de Partial Shading.

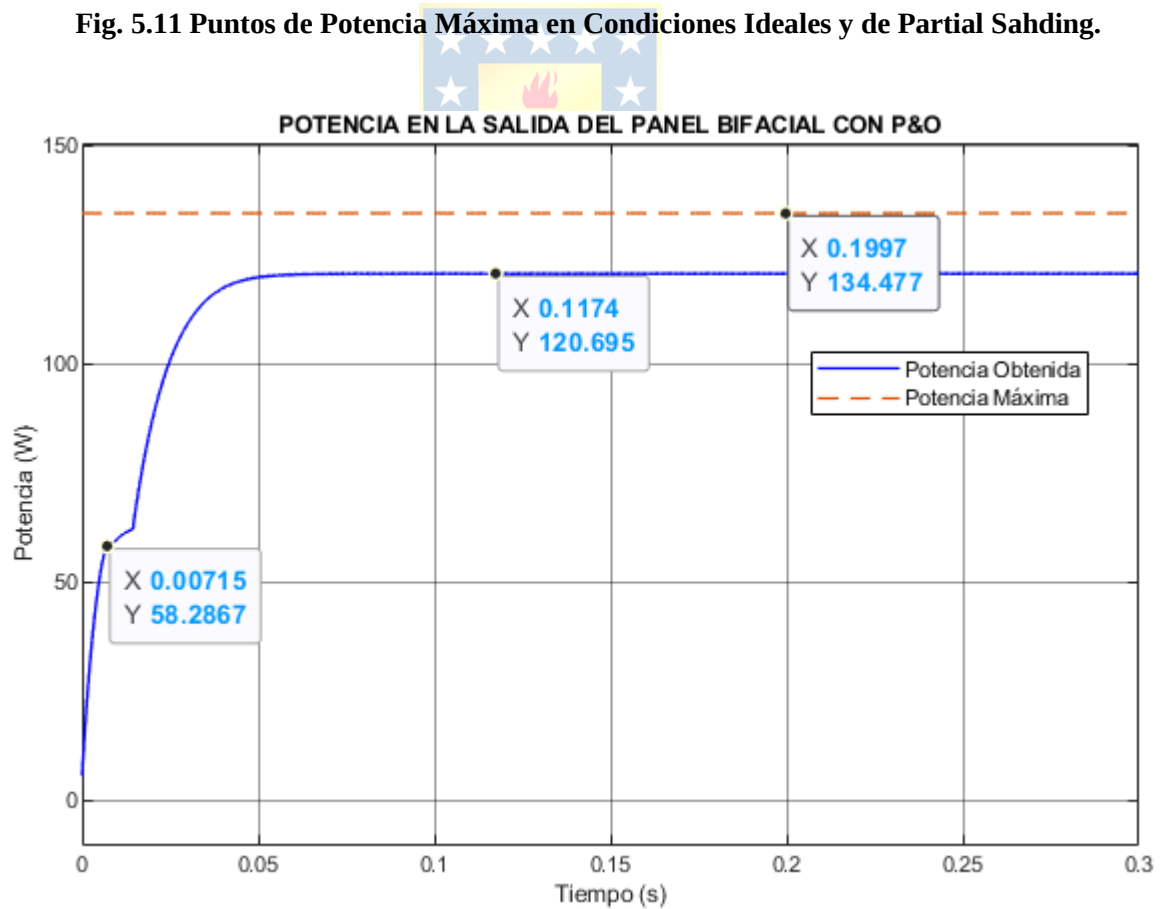


Fig. 5.12 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con P&O Ante Condición de Partial Shading.

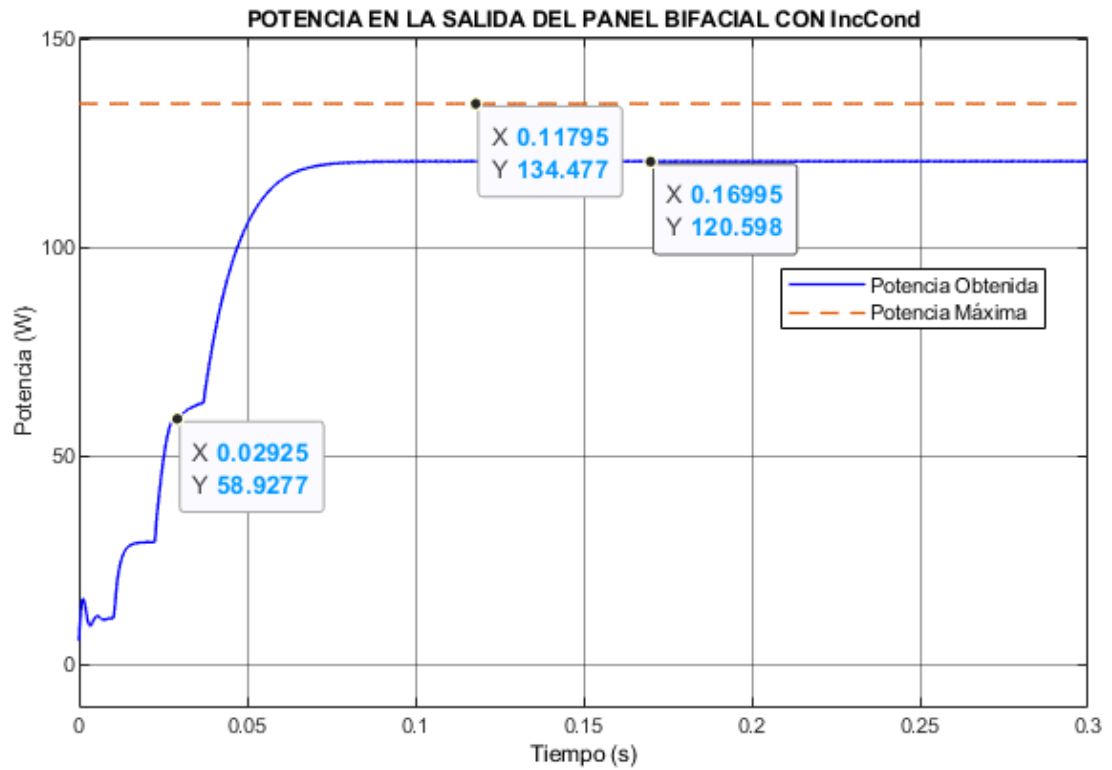


Fig. 5.13 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con IncCond Ante Condición de Partial Shading.

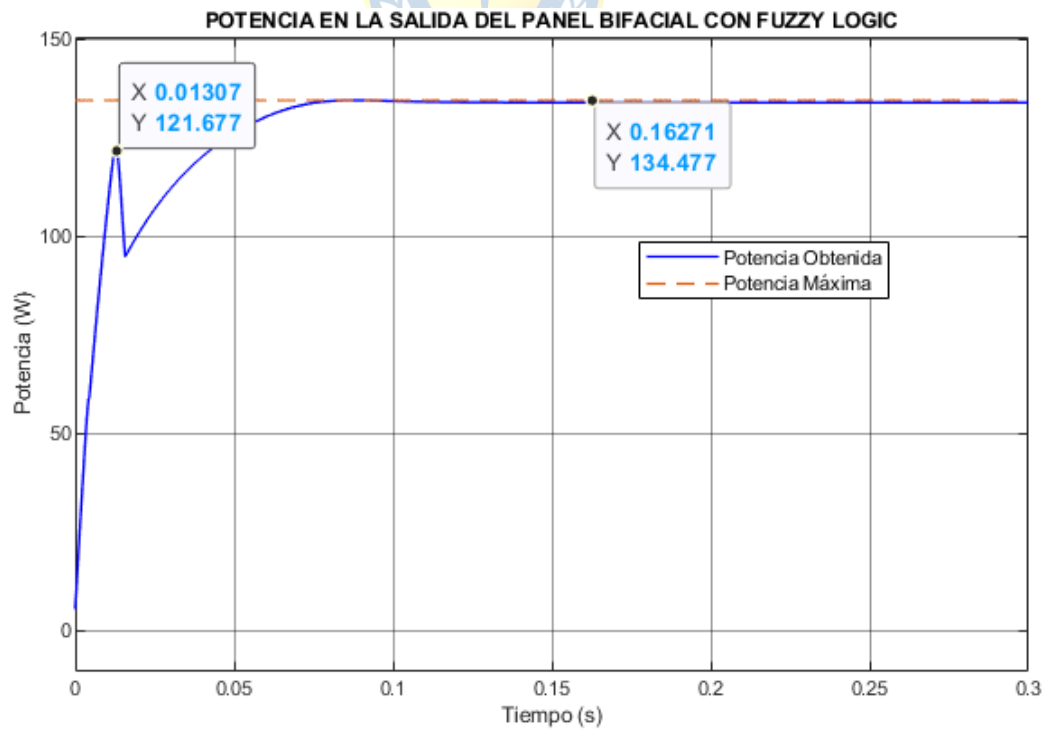


Fig. 5.14 Potencia en la Salida del Panel Bifacial Con Fuzzy Logic Ante Condición de Partial Shading.

En base a la comparación los resultados obtenidos en las figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 se confirma que bajo condiciones de partial shading, los métodos P&O e IncCond enfrentaron dificultades significativas para localizar el punto de máxima potencia global (GMPP, por sus siglas en inglés). Como se observa en las simulaciones, ambos algoritmos tienden a quedarse atrapados en máximos locales dentro de la curva característica P-V del sistema, lo que resulta en una subutilización de la potencia disponible. Este comportamiento se debe a que estos métodos, al depender de perturbaciones locales en la corriente y el voltaje, no son capaces de diferenciar entre un máximo local y el máximo global en escenarios con múltiples picos de potencia.

En contraste, el método de Fuzzy Logic demostró ser robusto frente a estas condiciones, identificando exitosamente el GMPP del sistema. Su capacidad para manejar incertidumbres y no linealidades le permite explorar de manera más efectiva la curva P-V completa, adaptándose dinámicamente a las variaciones introducidas por las sombras parciales y así consiguiendo un rendimiento hasta 10.26% mayor evidenciado en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 y en la Tabla 5.5. Esto resalta la ventaja del enfoque basado en lógica difusa para maximizar la eficiencia en sistemas fotovoltaicos sometidos a escenarios complejos de sombreado parcial.

Tabla 5.5 Eficiencia en Estado Estable de Cada Método en Condiciones de Partial Shading

Método	Eficiencia (%)
Fuzzy Logic	99.93
IncCond	89.79
P&O	89.67

5.5 Conclusiones

En base a los resultados de simular computacionalmente los métodos P&O, IncCond y Fuzzy Logic se logra demostrar la efectividad de estos algoritmos para maximizar la eficiencia energética en diferentes escenarios. En particular, los datos evidenciaron que, bajo condiciones de irradiancia variable, los tres métodos fueron capaces de identificar exitosamente los puntos de máxima potencia, como se observa en al comparar con lo esperado en la Figura 5.2 y la Tabla 5.2. Aunque los niveles de eficiencia fueron muy similares, el método Fuzzy Logic sobresalió ligeramente por su mayor precisión para alcanzar el MPP, mostrando menos oscilaciones de potencia en comparación con los otros métodos.

En condiciones de temperatura variable, los tres métodos lograron un desempeño similar en

términos de potencia generada. Sin embargo, Fuzzy Logic destacó nuevamente por su capacidad para adaptarse a cambios dinámicos y no lineales de temperatura, lo que le permitió converger de manera más limpia hacia el MPP. A pesar de esta ventaja, los métodos P&O e IncCond demostraron ser opciones de igual manera altamente eficientes además de ser más prácticas gracias a su simplicidad y facilidad de implementación, características valiosas en sistemas donde se prioriza la eficiencia operativa y la robustez.

Un comportamiento diferente se observó en condiciones de sombreado parcial, como se muestra en las figuras 5.11 a 5.14 y en la Tabla 5.5. En estos escenarios, P&O e IncCond enfrentaron dificultades significativas para localizar el punto de máxima potencia global (GMPP), quedándose atrapados en máximos locales. Esto resultó en una subutilización de la potencia disponible, un desafío inherente a los enfoques basados en perturbaciones locales. En contraste, Fuzzy Logic mostró una superioridad clara, logrando identificar de manera eficiente el GMPP gracias a su capacidad para manejar incertidumbres y explorar dinámicamente la curva característica P-V, alcanzando un rendimiento hasta un 10.26% mayor en comparación con los otros métodos.

En conclusión, aunque Fuzzy Logic demostró ser más eficiente y adaptable en escenarios complejos como el sombreado parcial o condiciones de alta variabilidad, los métodos P&O e IncCond siguen siendo alternativas válidas y recomendables en sistemas donde la simplicidad de implementación es prioritaria. Las diferencias de rendimiento observadas bajo condiciones normales de irradiancia y temperatura son mínimas, lo que permite elegir cualquiera de los tres métodos dependiendo de las necesidades específicas del sistema fotovoltaico y de las condiciones ambientales predominantes.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Sumario

En este trabajo se realizó un análisis detallado sobre las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia aplicables a módulos fotovoltaicos bifaciales, explorando tanto métodos convencionales como avanzados. Se comenzó con un modelado exhaustivo de los módulos bifaciales, adaptando los enfoques existentes para capturar las particularidades de la irradiancia en ambas caras del panel y su impacto en las curvas características I-V y P-V.

Posteriormente, se investigaron los algoritmos de MPPT más utilizados, como Perturb and Observe y Conductancia Incremental, analizando sus principios operativos y limitaciones. Además, se indagaron de igual manera en métodos avanzados basados en lógica difusa e inteligencia artificial, como redes neuronales y algoritmos genéticos, identificando su potencial para abordar los desafíos asociados a la variabilidad de irradiancia y al fenómeno de sombreado parcial.

El trabajo también incluyó la simulación computacional de diferentes algoritmos (P&O, IncCond y Fuzzy Logic) bajo escenarios de irradiancia y temperatura variables e irregulares, enfocándose en evaluar su desempeño en términos de precisión, robustez y eficiencia. Estas simulaciones permitieron analizar cómo las características únicas de los módulos bifaciales influyen en la efectividad de los métodos estudiados.

Finalmente, se discutieron los resultados obtenidos mediante las pruebas computacionales y se evaluó las condiciones ideales para usar algoritmos tradicionales y la viabilidad de implementar soluciones un poco más complejas para garantizar una mejor eficiencia del sistema. Con ello, se contribuyó al entendimiento y optimización de los sistemas fotovoltaicos bifaciales, proponiendo estrategias para maximizar su captación energética en condiciones operativas reales.

6.2 Conclusiones

1. Optimización de la eficiencia en módulos bifaciales: La investigación demuestra que los módulos fotovoltaicos bifaciales tienen un mayor potencial de generación de energía debido a su capacidad para captar irradiancia tanto en su cara frontal como trasera [14]. Sin embargo, este diseño puede introducir complejidad en el seguimiento del punto de máxima potencia debido a la variabilidad de irradiancia en ambas caras del panel. La optimización de MPPT es clave para maximizar la eficiencia de los sistemas bifaciales.

2. Limitaciones de los métodos tradicionales de MPPT: Los métodos convencionales de MPPT como Perturb and Observe (P&O) y Conductancia Incremental (IncCond) son efectivos bajo condiciones de irradiancia homogénea, pero presentan limitaciones significativas en entornos dinámicos y complejos a los cuales son propensos los sistemas bifaciales [1]. Estos métodos tienden a causar oscilaciones alrededor del punto de máxima potencia si el paso de control es muy grande, lo que reduce su eficiencia en general.
3. Necesidad de adaptaciones en los algoritmos tradicionales: Debido a la naturaleza única de los sistemas bifaciales, es necesario modificar los algoritmos tradicionales para mejorar su desempeño en estos sistemas. Las adaptaciones más efectivas incluyen la implementación de sensores de irradiancia dual para monitorear las condiciones de las dos caras del panel y la adaptación de los algoritmos para tomar en cuenta las fluctuaciones en la irradiancia y temperatura en la superficie del panel [13].
4. Ventajas y limitaciones de los métodos avanzados (IA y lógica difusa): Los métodos avanzados, como la lógica difusa y los algoritmos basados en inteligencia artificial (IA), como redes neuronales y algoritmos genéticos, demuestran una mayor precisión y capacidad para adaptarse a las condiciones cambiantes de irradiancia y temperatura. Estos enfoques permiten una identificación más eficiente del punto de máxima potencia en sistemas bifaciales, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Pero a su vez conllevan una mayor labor al momento de su implementación requiriendo un conocimiento amplio del sistema a optimizar y/o un entrenamiento previo antes de poder empezar a funcionar de manera correcta.
5. Simulaciones y verificación computacional: Las simulaciones realizadas en MATLAB/Simulink demostraron que los algoritmos avanzados, como el control basado en lógica difusa, ofrecen un rendimiento superior en comparación con los métodos clásicos en términos de eficiencia energética y capacidad de adaptación a condiciones variables. La verificación computacional proporcionó una base sólida para evaluar y comparar los métodos de MPPT bajo diversas condiciones ambientales y de irradiancia. Esto se puede comprobar en los resultados obtenidos de las Tablas 5.2, 5.3 y 5.5.
6. Impacto de la irradiancia diferencial y el sombreado parcial: El análisis de la irradiancia diferencial y el efecto del sombreado parcial subraya los desafíos adicionales que enfrentan los algoritmos de MPPT en sistemas bifaciales. Estos fenómenos pueden generar múltiples puntos de máxima potencia en las curvas P-V, lo que dificulta la tarea de identificar el verdadero punto de máxima potencia [13]. Los métodos tradicionales, como P&O e IncCond,

pueden ser ineficaces bajo estas condiciones, lo que requiere una adaptación a algoritmos más avanzados que consideren estas variaciones. Lo cual se puede evidenciar en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14.



Capítulo 7. Anexos

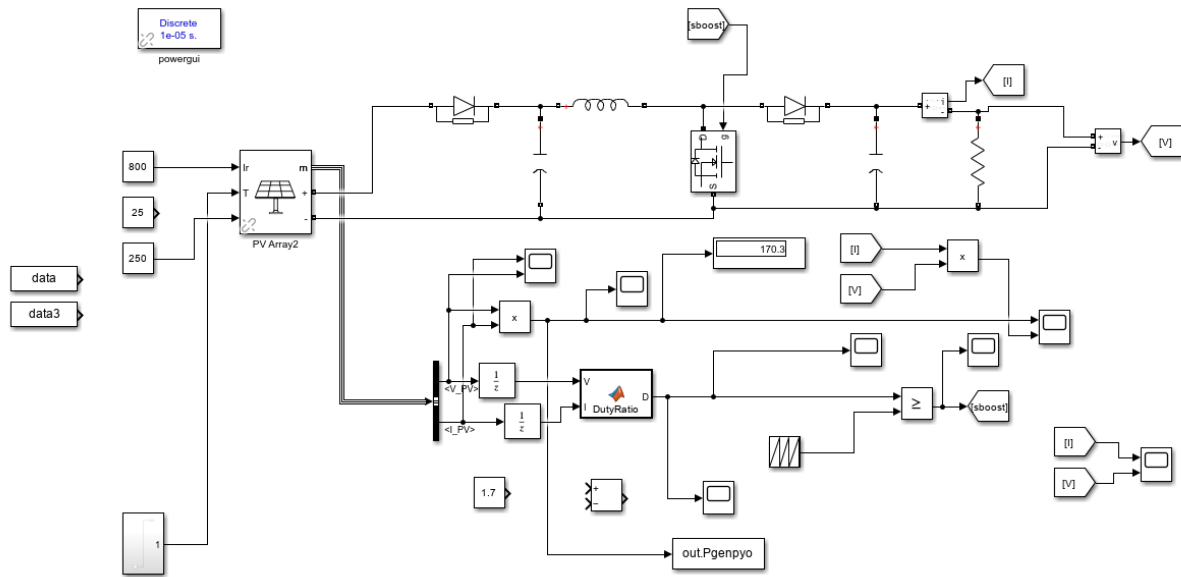


Fig. 7.1 Diagrama Simulink para método P&O

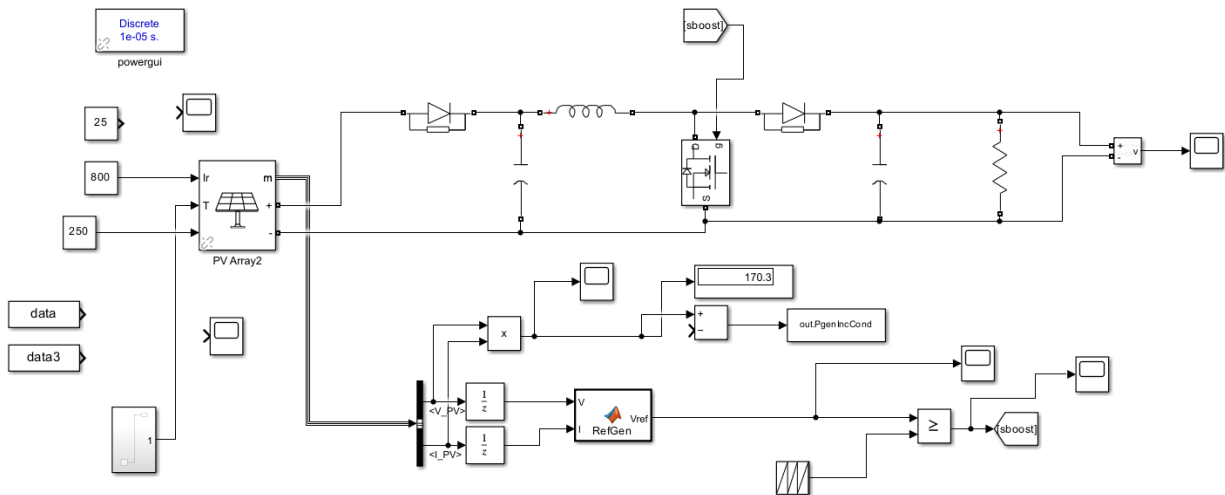


Fig. 7.2 Diagrama Simulink para método IncCond

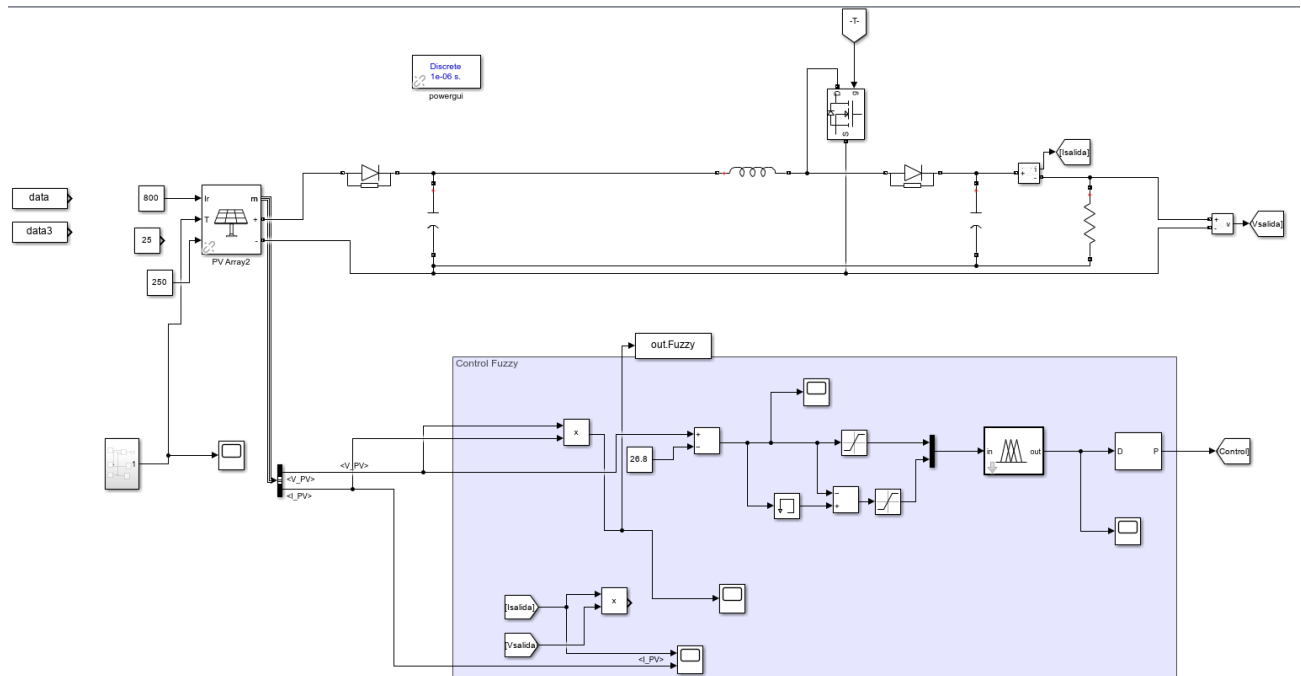


Fig. 7.3 Diagrama Simulink para método Fuzzy Logic

1. If (e is NB) and (ce is NB) then (output is Z) (1)
2. If (e is NB) and (ce is NS) then (output is Z) (1)
3. If (e is NB) and (ce is ZE) then (output is Z) (1)
4. If (e is NB) and (ce is PS) then (output is B) (1)
5. If (e is NB) and (ce is PB) then (output is M) (1)
6. If (e is NS) and (ce is NB) then (output is Z) (1)
7. If (e is NS) and (ce is NS) then (output is Z) (1)
8. If (e is NS) and (ce is ZE) then (output is S) (1)
9. If (e is NS) and (ce is PS) then (output is M) (1)
10. If (e is NS) and (ce is PB) then (output is B) (1)
11. If (e is ZE) and (ce is NB) then (output is Z) (1)
12. If (e is ZE) and (ce is NS) then (output is S) (1)
13. If (e is ZE) and (ce is ZE) then (output is M) (1)
14. If (e is ZE) and (ce is PS) then (output is B) (1)
15. If (e is ZE) and (ce is PB) then (output is VB) (1)
16. If (e is PS) and (ce is NB) then (output is S) (1)
17. If (e is PS) and (ce is NS) then (output is M) (1)
18. If (e is PS) and (ce is ZE) then (output is B) (1)
19. If (e is PS) and (ce is PS) then (output is VB) (1)
20. If (e is PS) and (ce is PB) then (output is VB) (1)
21. If (e is PB) and (ce is NB) then (output is M) (1)
22. If (e is PB) and (ce is NS) then (output is B) (1)
23. If (e is PB) and (ce is ZE) then (output is VB) (1)
24. If (e is PB) and (ce is PS) then (output is VB) (1)
25. If (e is PB) and (ce is PB) then (output is VB) (1)

Fig. 7.4 Reglas de Fuzzy Logic

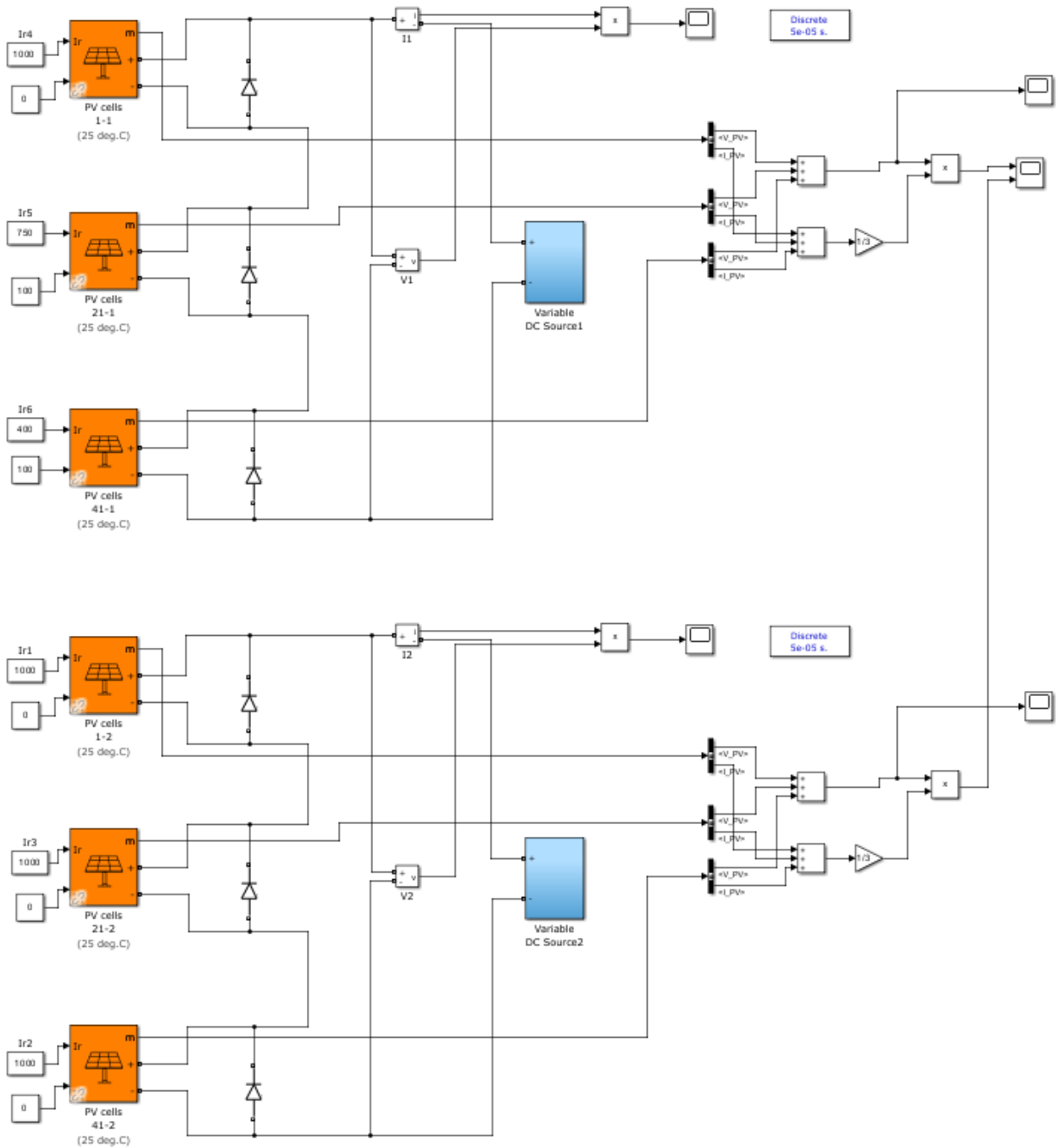


Fig. 7.5 Diagrama Simulink para ejemplo partial shading

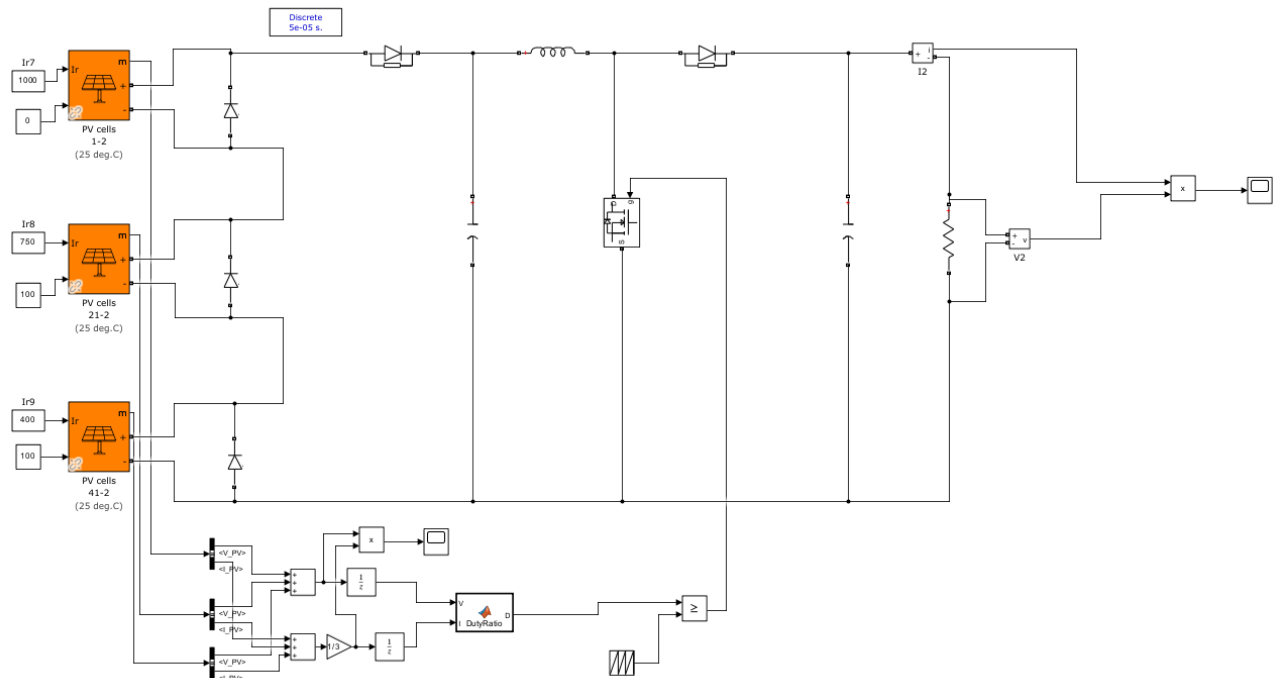


Fig. 7.6 Diagrama Simulink para partial shading en P&O

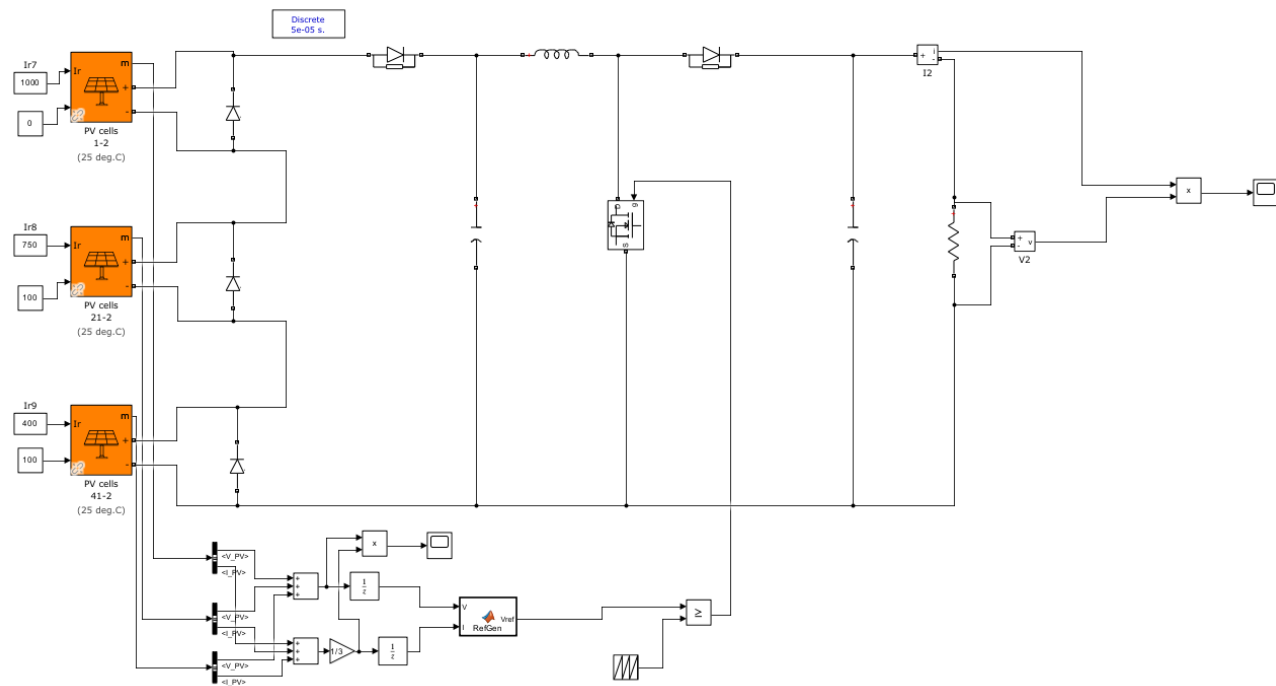


Fig. 7.7 Diagrama Simulink para partial shading en IncCond

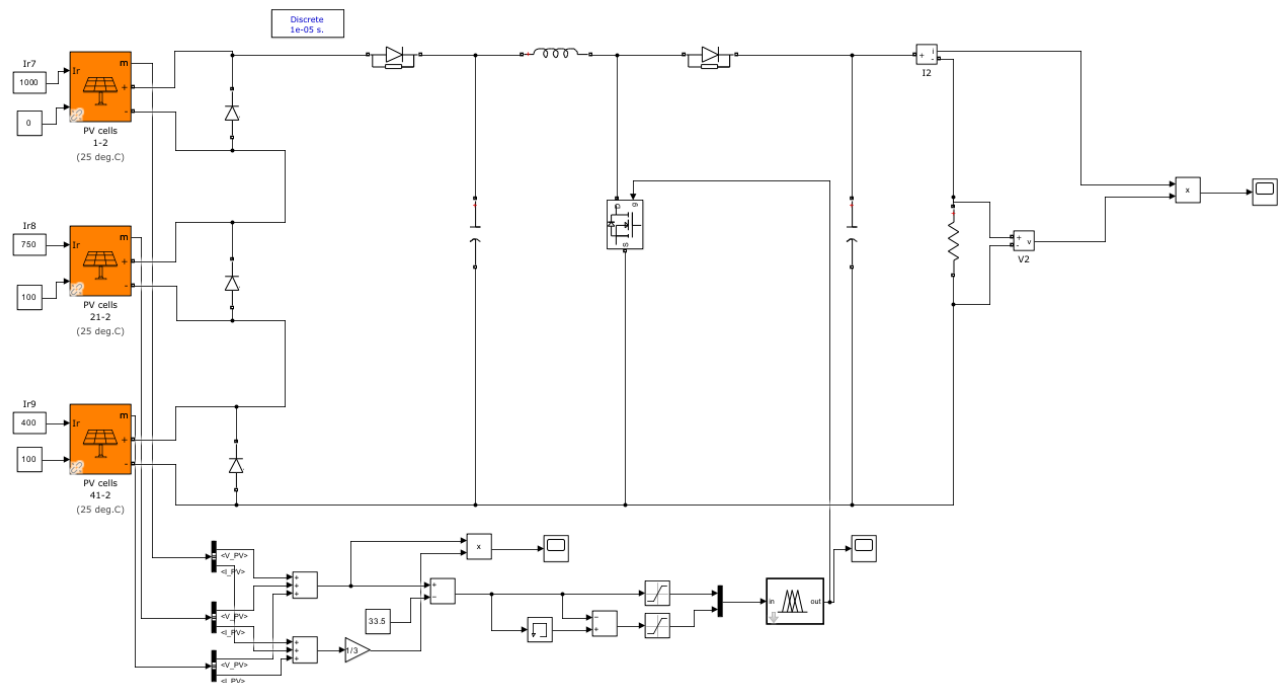


Fig. 7.8 Diagrama Simulink para partial shading en Fuzzy Logic

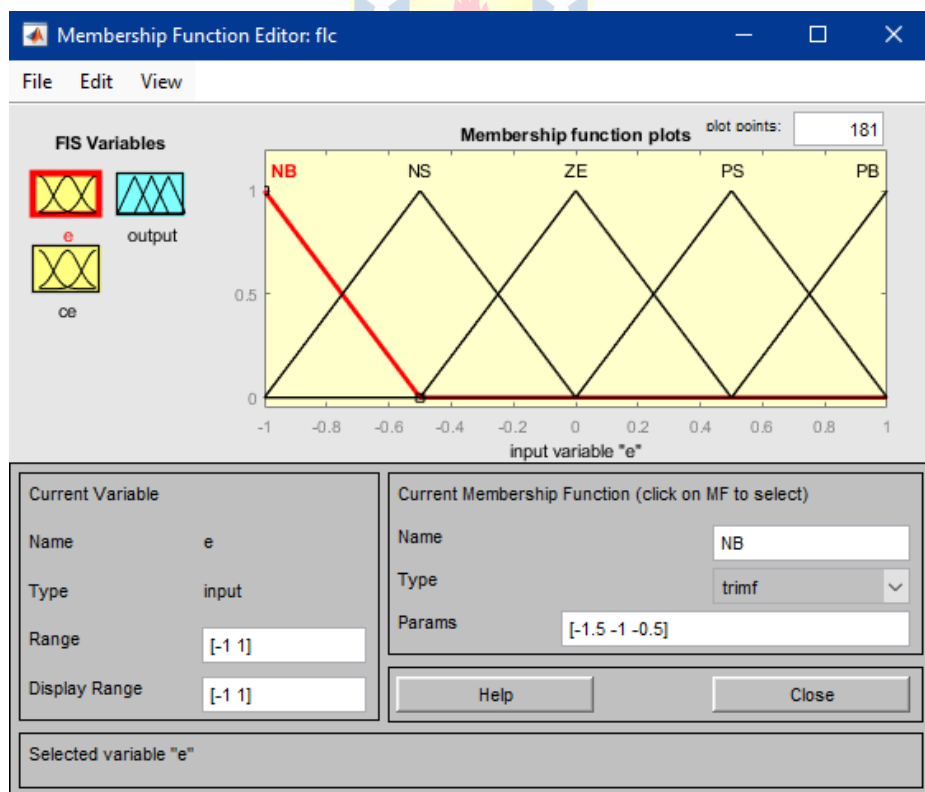


Fig. 7.9 Función de membresía de entrada e

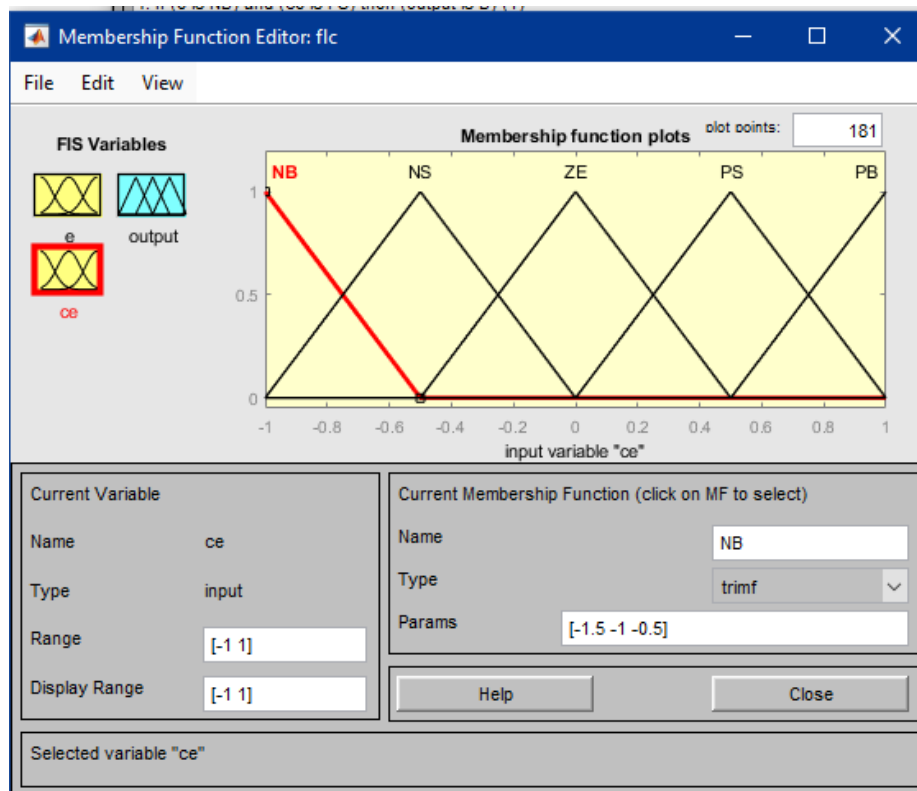


Fig. 7.10 Función de membresía de entrada ce

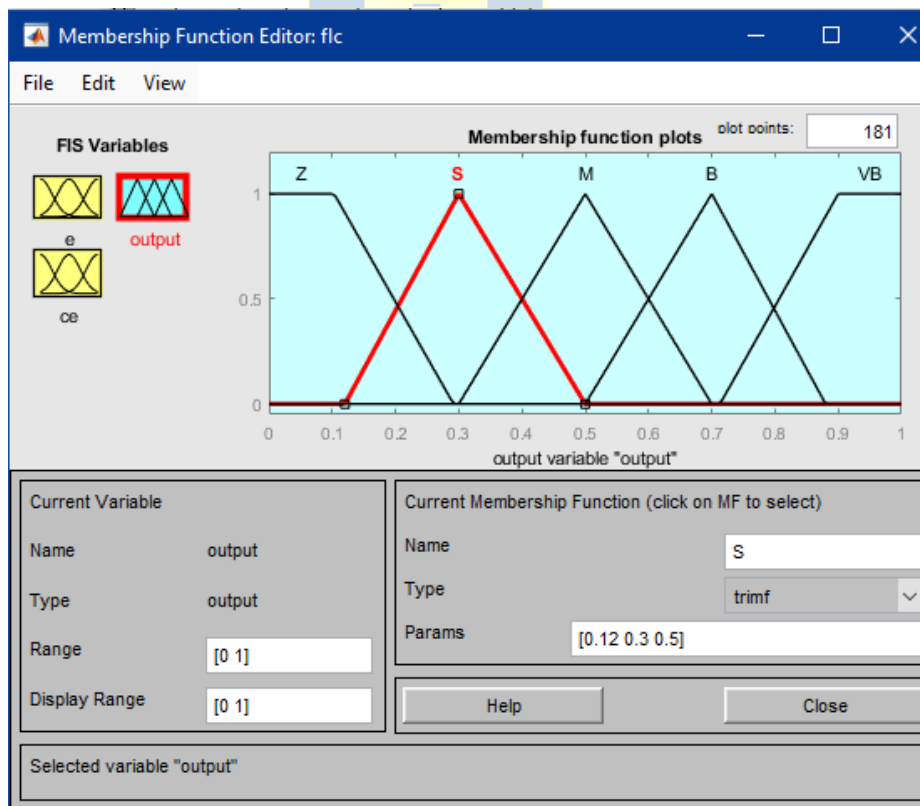


Fig. 7.11 Función de membresía de salida

```

+49  inccond.m  x paperfuzzy.fis  x interpolacion.m  x potenciamaxima.m  x calculodeeficiencia.m  x Datosdegeneracionfotovoltaicasesis.m  x untitled  x +
1    % Datos del panel (tomados de la hoja técnica)
2    Isc_STC = 8.21; % Corriente de cortocircuito a STC (en A)
3    Voc_STC = 32.9; % Voltaje de circuito abierto a STC (en V)
4    Pmax_STC = 200.143; % Potencia máxima a STC (en W)
5    G_STC = 1000; % Irradiancia estándar (en W/m^2)
6    T_STC = 25; % Temperatura estándar (en °C)
7    Kv = -0.355; % Coeficiente de temperatura para Voc (en V/°C)
8    Ki = 0.06; % Coeficiente de temperatura para Isc (en A/°C)
9    xd = 0:0.000001:0.2;
10   xD= 0:0.00001:0.2;
11   % Solicitar condiciones ambientales
12   % G = yq_spline2; % Ejemplo: 800
13   % G2 = yq_spline5;
14   G = 800;
15   G2 = 250;
16   T = 25;
17   T = yq_spline7; % Ejemplo: 35
18
19   % Ajuste de la corriente de cortocircuito
20   Isc = Isc_STC * (G / G_STC) + Ki * (T - T_STC);
21
22   % Ajuste del voltaje de circuito abierto
23   Voc = Voc_STC + Kv * (T - T_STC);
24
25   % Estimación de la potencia máxima (aproximación lineal)
26   Pmax = Pmax_STC * ((G / G_STC)+(G2*0.8 / G_STC)) * (1 + (T - T_STC) * ((Ki * Isc_STC) / Pmax_STC + (Kv * Voc_STC) / Pmax_STC));
27
28   figure;
29   plot(xD, Pmax, 'LineWidth', 1.5);
30   xlabel('Tiempo (s)');
31   ylabel('Potencia (W)');
32   title('CURVA MÁXIMA POTENCIA');
33   ylim([0 220]);
34   grid on;

```

Fig. 7.12 Código Matlab para calcula potencia máxima.

```

Editor - F:\Descargas\calculodeeficiencia.m*
+47  corrientetarea3.m  x PYO.m  x inccond.m  x paperfuzzy.fis  x interpolacion.m  x potenciamaxima.m  x calculodeeficiencia.m*  x Datosdegeneracionfotovoltaicasesis.m  x untitled  x +
3    figure;
4    plot(xD,Fuzzy,xD,Pmax,xD,PyO,xD,IncCond)
5    Eficiencia_promedioPyO= (sum(PyO)/sum(Pmax))*100
6    Eficiencia_promedioIncCond= (sum(IncCond)/sum(Pmax))*100
7    Eficiencia_promedioFuzzy= (sum(Fuzzy)/sum(Pmax))*100
8    figure;
9    plot(xD, PyO, 'LineWidth', 1.5);
10   xlabel('Tiempo (s)');
11   ylabel('Potencia (W)');
12   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON PyO');
13   grid on;
14   figure;
15   plot(xD, IncCond, 'LineWidth', 1.5);
16   xlabel('Tiempo (s)');
17   ylabel('Potencia (W)');
18   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON IncCond');
19   grid on;
20   figure;
21   plot(xD, Fuzzy, 'LineWidth', 1.5);
22   xlabel('Tiempo (s)');
23   ylabel('Potencia (W)');
24   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON Fuzzy Logic');
25   grid on;
26   figure;
27   plot(xD,Tempfuzzylargo,xD,Pmax,xD,TempPyO,xD,TempIncCond)
28   Eficiencia_promedioPyO= (sum(TempPyO)/sum(Pmax))*100
29   Eficiencia_promedioIncCond= (sum(TempIncCond)/sum(Pmax))*100
30   Eficiencia_promedioFuzzy= (sum(Tempfuzzylargo)/sum(Pmax))*100
31   figure;
32   plot(xD, TempPyO, 'LineWidth', 1.5);
33   xlabel('Tiempo (s)');
34   ylabel('Potencia (W)');
35   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON PyO');
36   grid on;
37   figure;
38   plot(xD, TempIncCond, 'LineWidth', 1.5);
39   xlabel('Tiempo (s)');
40   ylabel('Potencia (W)');
41   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON IncCond');
42   grid on;
43   figure;
44   plot(xD, Tempfuzzylargo, 'LineWidth', 1.5);
45   xlabel('Tiempo (s)');
46   ylabel('Potencia (W)');
47   title('POTENCIA DE SALIDA DEL PANEL BIFACIAL CON Fuzzy Logic');
48   grid on;

```

Fig. 7.13 Código Matlab para calcular eficiencia de los algoritmos.

Abreviaciones

Mayúsculas

MPP	: Maximum Power Point (Punto de Maxima Potencia)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking (Seguimiento del Punto Máxima de Potencia)
FLC	: Fuzzy Logic (Lógica Difusa)
IncCond	: Incremental Conductance (Conductancia Incremental)
P&O	: Perturb and Observe (Perturbar y Observar)
GMPP	: Global Maximum Power Point (Punto de Máxima Potencia Global)



Referencias

- [1] Durusoy, B., Ozden, T. & Akinoglu, B.G. "Solar irradiation on the rear surface of bifacial solar modules: a modeling approach". *Sci Rep* **10**, 13300 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70235-3>.
- [2] N. Siddiqui and M. S. Ghole, "Comparative Analysis of P&O and Fuzzy logic based MPPT methods for Bi-facial Photovoltaic module," *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, pp. 1-6, 2024.
- [3] Nur Atharah Kamarzaman, Chee Wei Tan. "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 585-598, Junio. 2014.
- [4] Jose, K., Sheik Mohammed, S., Mohammed Mansoor, O. "Performance Study of Solar PV System with Bifacial PV Modules". In: Namrata, K., Priyadarshi, N., Bansal, R.C., Kumar, J. (eds) "Smart Energy and Advancement in Power Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering", vol 926, pp. 659-670. Springer, Singapore. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4971-5_48
- [5] Apuntes profesor Leonardo Palma. "Fuentes de Energía Alternativa, Sistemas Fotovoltaicos". 2024.
- [6] N. Siddiqui, A. Verma and D. Shrivastava, "Fuzzy Logic-based MPPT Control for Bifacial Photovoltaic Module," *2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*, Tuticorin, India, pp. 1-6, 2023.
- [7] F.R. Galluzzo, L. Zumbo, G. Acciari, G. Adamo, G. Ala, A. Busacca, M. Caruso, C. Gerardi, S. Lombardo, R. Miceli, A. Parisi, G. Schettino, F. Viola, "Experimental investigation and characterization of innovative bifacial silicon solar cells", *International Journal of Renewable Energy Research*, 2019.
- [8] S. A. Pelaez, C. Deline, S. M. MacAlpine, B. Marion, J. S. Stein and R. K. Kostuk, "Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 1, pp. 82-88, Jan. 2019.
- [9] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. Luigi, G. A. e Melo and C. A. Canesin, "Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications," *2011 International Conference on Clean*

Electrical Power (ICCEP), Ischia, Italy, pp. 99-104, 201.

- [10] Eric W. Weisstein "Albedo- <https://scienceworld.wolfram.com/physics/Albedo.html>" 2007.
- [11] Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). "MPPT techniques for photovoltaic applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 793-813.
- [12] Bidram, A., Davoudi, A., & Balog, R. S. (2023). Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(2), 545-560.
- [13] Sun, X., Khan, M. R., Deline, C., & Alam, M. A. (2018). Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied Energy*, 220, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>
- [14] Ben Salah, C., & Ouali, M. (2011). Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. *Electric Power Systems Research*, 81(1), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.07.005>



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera	: Ingeniería Civil Electrónica
Nombre del memorista	: Nombre completo según registro de UDARAE
Título de la memoria	: Título de la memoria
Fecha de la presentación oral	: Día/mes/año
Profesor(es) guía	: Nombres
Profesor(es) revisor(es)	: Nombres
Concepto	: Aprobado/Bueno/Muy bueno/Sobresaliente
Calificación	: Nota

Resumen (máximo 200 palabras)

