

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS
APLICADAS**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA
EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA EN CONDICIONES
DE SOMBREADO PARCIAL DE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO AISLADO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE: MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD
ENERGÉTICA**

PRESENTADO POR:

Ing. Abel Márquez Primo

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Diego Seuret Jiménez

SINODALES:

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

Dr. Juan Carlos García Castrejón

Dr. José Antonio Marbán Salgado

Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA EN CONDICIONES DE SOMBREADO PARCIAL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO.

Resumen

En la actualidad, la creciente preocupación por la contaminación global derivada de la utilización de combustibles fósiles, como el carbón, petróleo y gas, para la generación de energía eléctrica ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. Entre estas alternativas, se destacan los sistemas de generación de energía renovable, como las celdas fotovoltaicas, campos eólicos, plantas hidroeléctricas y termoeléctricas, que ofrecen una forma más limpia de producir electricidad.

En este contexto, se identifica una oportunidad en los sistemas de paneles solares aislados, los cuales requieren de un sistema de control eficaz para maximizar la extracción de potencia, especialmente en condiciones de sombreado parcial. Esta necesidad ha impulsado la investigación y desarrollo de algoritmos de control específicos para optimizar el rendimiento de estos sistemas.

En esta tesis se aborda el tema de optimizar la extracción de energía eléctrica en sistemas de paneles solares en condiciones de sombreado parcial, para esto se desarrolló un algoritmo el cual realiza un barrido de ciclo de trabajo, con el cual se identifica la cresta donde se localiza el punto de máxima potencia (MPPT) para posteriormente aplicar el algoritmo de P&O y poder oscilar en el MPPT de forma eficiente para extraer de la energía eléctrica.

En el desarrollo de la tesis se busca la implementación del algoritmo para verificar el comportamiento que se tiene en diversas condiciones de sombreado parcial y poder garantizar que en las diversas condiciones el algoritmo sea capaz de localizar el MPPT.

DESIGN OF A CONTROL SYSTEM FOR THE EXTRACTION OF MAXIMUM POWER IN CONDITIONS OF PARTIAL SHADING OF AN ISOLATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM.

Summary

Currently, the growing concern about global pollution resulting from the use of fossil fuels, such as coal, oil, and gas, for electricity generation has driven the search for more sustainable alternatives. Among these alternatives, renewable energy generation systems stand out, such as photovoltaic cells, wind farms, hydroelectric, and thermoelectric plants, which offer a cleaner way to produce electricity.

In this context, an opportunity is identified in isolated solar panel systems, which require an effective control system to maximize power extraction, especially in partial shading conditions. This need has driven the research and development of specific control algorithms to optimize the performance of these systems.

This thesis addresses the topic of optimizing the extraction of electrical energy in solar panel systems under partial shading conditions. To achieve this, an algorithm was developed which performs a duty cycle scanning, through which the peak where the Maximum Power Point (MPPT) is located is identified. Subsequently, the Perturb and Observe (P&O) algorithm is applied to efficiently oscillate at the MPPT and extract electrical energy.

The thesis focuses on implementing the algorithm to assess its performance under various partial shading conditions, ensuring that the algorithm can locate the MPPT in diverse situations.

Agradecimientos

Mis agradecimientos principalmente a Dios por permitirme vivir y crecer, por permitirme experimentarme a mí mismo en cada instante de mi vida. A mi esposa, porque a pesar de todas las cosas están conmigo y me apoyan incondicionalmente. A mis pequeños por ser el motor de inspiración y trabajo. A mi madre, por estar siempre presente.

A mi director de tesis, Dr. Diego Seuret Jimenez por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación. Al comité revisor: Dr. J Jesús Escobedo Alatorre, Dr. Juan Carlos García Castrejón, Dr. José Antonio Marbán Salgado, Dr. Miguel Ángel Basurto Pensado, por todas las enseñanzas. A mis compañeros de Maestría.

Al Centro de Investigación en Ingenierías y ciencias aplicadas de la UAEM por haberme abierto las puertas y con ello, crecer profesionalmente. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico para el desarrollo de este trabajo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi pequeña Ana Sofía, qui es fuente constante de inspiración y apoyo a lo largo de esta travesía académica.

A mi esposa, agradezco por su paciencia, aliento incondicional y sabios consejos que han iluminado mi camino en los momentos desafiantes. Su presencia ha sido mi motivación y fortaleza, y este logro lleva la marca de su influencia positiva en mi vida.

Que este trabajo sea un modesto tributo a la dedicación y amor que mi pequeño Héctor y Ginger, así como a mi madre un profundo agradecimiento por ser mi fuente de inspiración constante.

Contenido

Resumen	I
Summary.....	II
Agradecimientos.....	III
Dedicatoria.....	IV
Contenido.....	V
Lista de figuras	VII
Lista de tabla.....	IX
Capítulo I.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Planeamiento del problema.	4
1.4. Análisis y revisión del estado del arte.	5
1.4.1. Perturbar y observar.....	5
1.4.2. Colonias de hormigas	6
1.4.3. Algoritmo de control de búsqueda de extremos	6
1.4.4. Lógica difusa	7
1.4.5. Sistema de control “Caza de lobos”	7
1.5. Objetivos.....	9
1.5.1. General.....	9
1.5.2. Específicos.....	10
1.6. Justificación	10
Alcances.....	11
1.7. Limitaciones	11
1.8. Metodología de solución	12
1.9. Contribución a la investigación	14
1.10. Organización de la Tesis.....	14
1.10.1. Capítulo I. Introducción.....	14
1.10.2. Capítulo II. Marco Teórico.....	15
1.10.3. Capítulo III. Desarrollo Teórico experimental	15
1.10.4. Capítulo IV. Resultados y difusión.....	15
1.10.5. Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	15

Capítulo II.....	16
2.1. Introducción.....	17
2.2. Caracterización de un panel solar.....	19
2.3. Afectaciones que tienen la energía fotovoltaica.....	22
2.4. Convertidor DC-DC Bosst.....	26
2.5. Diseño del convertidor DC-DC tipo Boost.....	26
Capítulo III.....	29
3.1. Introducción.....	30
3.2. Topologías de convertidores DC-DC.....	30
3.3. Diseño del Convertidor Boost.....	31
3.4. Simulación de convertidor Boost.....	32
3.5. Simulación de panel solar y convertidor Boost en simulink.....	33
3.6. Sensores de voltaje y corriente.....	35
3.7. Diseño del circuito impreso.....	38
3.8. Propuesta de algoritmo de control.....	40
Capítulo IV.....	44
4. Pruebas y resultados.....	44
4.1. Introducción.....	45
4.2. Simulación de algoritmo propuesto en simulink.....	45
4.3. Comparación con algoritmo con P&O simulación.....	49
4.4. Banco de Pruebas.....	52
4.5. Algoritmo en condiciones de sombreado parcial.....	57
4.6. Comparación del algoritmo que desarrolle y lógica difusa.....	59
4.7. Resultados.....	63
Capítulo V.....	64
5. Conclusiones y trabajos futuros.....	64
5.1. Conclusiones.....	65
5.2. Trabajos futuros.....	66
6. Bibliografía.....	67
7. Anexos.....	70

Lista de figuras

Figura. 1 Radiación solar recibida en México y Alemania.	3
Figura. 2 Curva característica Potencia-voltaje de panel solar en condiciones de sombreado parcial.	5
Figura. 3 Metodología.	12
Figura. 4 Composición de celda solar.	18
Figura. 5 Circuito eléctrico equivalente de un panel solar.	19
Figura. 6 Curvas características V-I y V-P.	21
Figura. 7 Efecto de sombreado parcial.	22
Figura. 8 Efecto Hostpot en panel solares.	23
Figura. 9 Arreglo de paneles solares con diodo de Bypass.	23
Figura. 10 Sistema de control P&O para localizar el MPPT.	25
Figura. 11 Curva P-V en condiciones de sombreado parcial.	25
Figura. 12 Sistema de MPPT.	26
Figura. 13 Circuito eléctrico de un convertidor Boost.	27
Figura. 14 Valores de salida del convertidor Boost.	33
Figura. 15 simulación panel solar y convertidor DC-DC.	33
Figura. 16 Simulación del convertidor DC-DC, en distintos ciclos de trabajo.	34
Figura. 17 Simulación de paneles solares en condiciones de sombreado parcial.	35
Figura. 18 Sensor de voltaje.	36
Figura. 19 Gráfica de tendencia en las lecturas voltaje de Salida-Entrada.	37
Figura. 20 Sensor de corriente.	37
Figura. 21 Diagrama eléctrico del PCB.	38
Figura. 22 Vinculación 3D del circuito impreso.	39
Figura. 23 Algoritmo de control P&O.	40
Figura. 24 Algoritmo de P&O en condiciones de sombreado parcial.	41
Figura. 25. Algoritmo de P&O con barrido de ciclo de trabajo.	42
Figura. 26 Diagrama de flujo de P&O con barrido de frecuencia.	43
Figura. 27. Panel solar integrado en simulink.	45
Figura. 28 Gráfica potencia-voltaje y corriente-voltaje del panel solar SE175-72	46
Figura. 29 Esquema completo de simulación.	47
Figura. 30 Comportamiento a la salida del Convertidor DC-DC.	48
Figura. 31 Comportamiento del algoritmo en condiciones de sombreado parcial.	48
Figura. 32 Comparativa de algoritmo propuesto y P&O.	50
Figura. 33 Comparativa del algoritmo propuesto y P&O en condiciones de sombreado parcial.	51
Figura. 34 Representación esquemática del banco de pruebas.	52
Figura. 35 Placa eléctrica del convertidor DC-DC, y los sensores de voltaje y corriente.	53
Figura. 36 Banco de pruebas.	54
Figura. 37 Etapa de lectura de puerto serial.	54
Figura. 38 Procesamiento de la información recibida.	55

Figura. 39 Etapa de visualización de información.	56
Figura. 40 Programa completo de procesamiento de datos para visualización.	57
Figura. 41 Gráfica del comportamiento de la potencia a la salida del convertidor DC-DC.	57
Figura. 42 Gráfica del comportamiento de la potencia a la salida del convertidor DC-DC en condiciones de sombreado parcial.	58
Figura. 43 Potencia a la salida del convertidor DC-DC.	59
Figura. 44 Control difuso para la localización del MPPT, basado en FPGA.	60
Figura. 45 Bloque de control del sistema difuso.	61

Lista de tabla

Tabla 1. Parámetros de diseño del convertidor DC-DC tipo Boost.....	31
Tabla 2. Dispositivos seleccionados para el diseño del convertidor Boost.	32
Tabla 3 Comparativa entre algoritmo de barrido de ciclo de trabajo con P&O y Lógica difusa.	62
Tabla 4 Comparativa entre el algoritmo propuesto y los repostados en literatura.	63

Capítulo I

Introducción

1.1. Introducción

La búsqueda de nuevos métodos de generación de energía eléctrica de manera limpia y sostenible se ha convertido en un tema crucial en las últimas décadas, como resultado de las preocupaciones ambientales relacionadas con el cambio climático, principalmente causado por las emisiones de CO₂ que las grandes industrias eléctricas liberan al medio ambiente.

Los sistemas de paneles fotovoltaicos se han posicionado como un vasto campo de oportunidades para impulsar el desarrollo de energía limpia y sostenible. Su alta disponibilidad a nivel global se debe a su dependencia de la energía solar para la generación de electricidad, lo que elimina la necesidad de infraestructuras complejas para su implementación. Sin embargo, para aprovechar al máximo esta fuente de energía, es necesario desarrollar la tecnología adecuada que permita extraer la mayor cantidad de energía posible del sol. Un problema actual que se enfrenta es la localización del punto de máxima potencia (MPPT) en los convertidores DC-DC. En este capítulo, se abordarán los antecedentes y la metodología que se empleará para presentar una posible solución.

1.2. Antecedentes

Actualmente se enfrenta un grave problema de contaminación a nivel mundial generada principalmente por el carbón, petróleo o gas, que es empleado para la generación de energía eléctrica. Para reducir la huella de carbono se ha buscado la generación de energía eléctrica por medio de sistemas renovables, tales como celdas fotovoltaicas, campos eólicos, plantas hidroeléctricas o termoeléctricas, que permite la generación de energía más limpia (Flores, 2012).

Una de las fuentes de generación eléctrica renovable que ha ganado notable popularidad en los últimos años es la energía fotovoltaica su funcionamiento primordial se basa en la captación de la radiación solar, la cual está ampliamente disponible en todo el planeta. Esta disponibilidad, junto con la facilidad de adquisición e implementación de paneles solares ha convertido a esta tecnología

en la opción preferida para la generación de energía eléctrica en áreas donde no existe una infraestructura de tendido eléctrico desarrollada.

Dada la situación geográfica de México, que se encuentra en la región conocida como el cinturón solar, el uso de sistemas fotovoltaicos se vuelve la mejor opción para la producción energía eléctrica. México cuenta con un potencial energético de 5kWh/m^2 al día (Álvarez, 2020) respaldando más esta opción como una solución eficiente y sostenible.

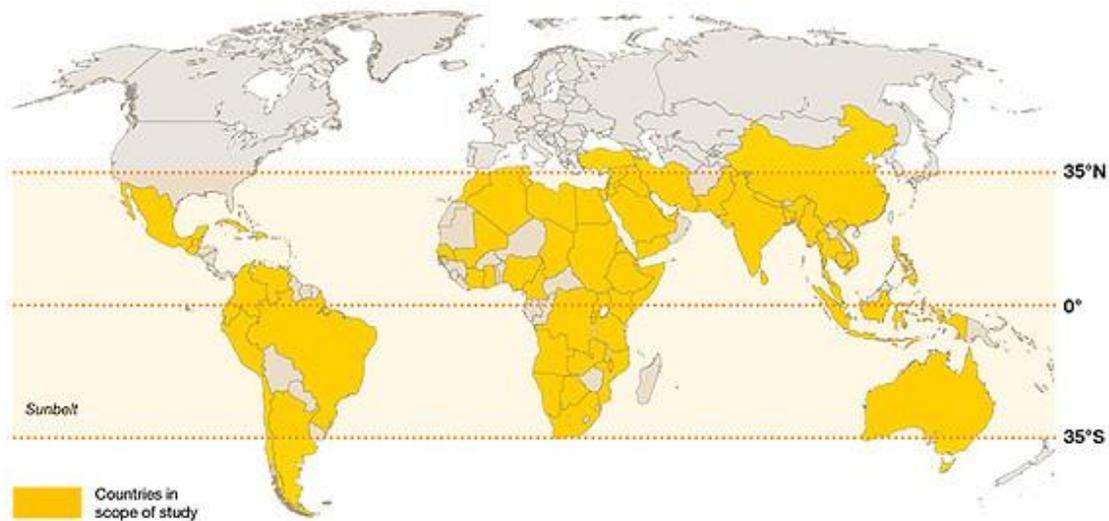


Figura. 1 Radiación solar recibida en México y Alemania (Portillo, 2017).

Como se observa en la Figura 1 la República México cuenta con mayor cantidad de radiación por metro cuadrado, en comparativa con Alemania la cual solo cuenta con un potencial energético de 1.1 kWh/m^2 . Pero a pesar de eso Alemania cosecha un 44.2 % más de energía del sol que México (Portillo, 2017).

Para que México pueda aprovechar plenamente este potencial energético, es fundamental establecer las condiciones técnicas adecuadas para una cosecha eficiente de energía eléctrica. Es por lo que se han desarrollado diversas líneas de investigación destinadas a mejorar la eficiencia en la extracción de energía eléctrica.

En la actualidad, se están llevando a cabo diversas investigaciones con el objetivo de desarrollar nuevas tecnologías de celdas solares que permitan incrementar la eficiencia en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, es importante

destacar que se ha presentado relativamente poca atención buscar mejorar la extracción de energía eléctrica en sistemas de paneles fotovoltaicos.

1.3. Planeamiento del problema.

Uno de los desafíos significativos en los sistemas fotovoltaicos es la presencia de sombreado parcial. Esta condición altera la curva característica de potencia-voltaje, generando múltiples máximos locales, lo que dificulta que los algoritmos de control simples y de bajo consumo de recursos converjan hacia el máximo global. Esta situación representa una pérdida significativa de energía eléctrica que podría haberse capturado.

Por otro lado, los algoritmos más sofisticados pueden abordar este problema de manera efectiva. Sin embargo, presentan la desventaja de requerir una mayor cantidad de recursos para un rendimiento óptimo, lo que se traduce en costos más elevados para su implementación. Este dilema plantea la necesidad de encontrar un equilibrio entre la eficiencia en la captura de energía y la eficiencia en el uso de recursos en el diseño y control de sistemas fotovoltaicos en condiciones de sombreado parcial.

Por lo tanto, en el desarrollo de esta investigación es proponer una solución que optimice el algoritmo de control para maximizar la extracción de energía eléctrica en paneles solares que experimentan sombreados parciales, minimizando al mismo tiempo el uso de recursos.

1.4. Análisis y revisión del estado del arte.

Una de las problemáticas actuales en la instalación de paneles solares es la presencia de sombreado parcial. Este fenómeno ocurre cuando uno o varios paneles solares se ven obstruidos por estructuras o condiciones ambientales. En tales situaciones, la curva de Potencia-Voltaje se ve alterada, generando múltiples máximos locales y un máximo global, ver Figura 2.

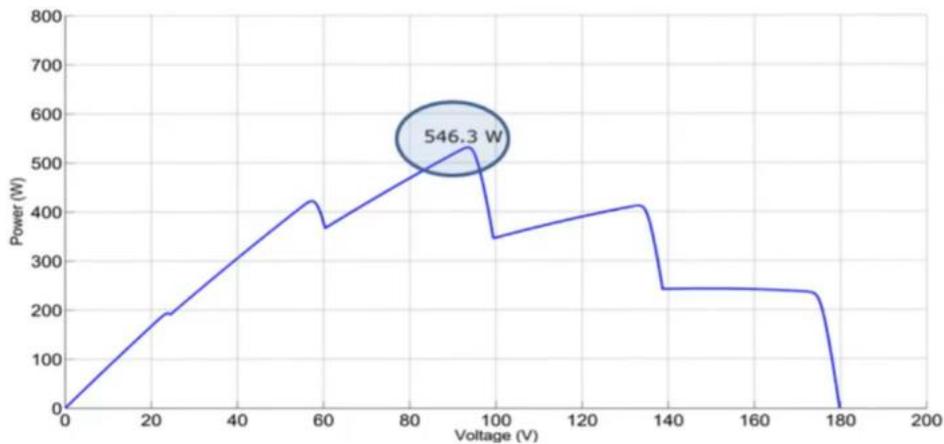


Figura. 2 Curva característica Potencia-voltaje de panel solar en condiciones de sombreado parcial.

El sombreado parcial puede ser causado por diversas obstrucciones, como nubes, cables de alta tensión, estructuras de edificios, árboles, excremento de animales y otros elementos. Incluso si solo un 10% de un panel solar se encuentra sombreado parcialmente, esto puede reducir significativamente su eficiencia, en algunos casos hasta en un 50%. Esto resalta la importancia de abordar de manera efectiva el problema del sombreado parcial en los sistemas fotovoltaicos para minimizar las pérdidas en la extracción de energía eléctrica. (Solarmagic, 2017).

1.4.1. Perturbar y observar

El algoritmo de perturbar y observar es uno de los más empleados en los convertidores DC-DC, este tipo de algoritmo consiste en modificar el ciclo de trabajo, el cual permite en los convertidor DC-DC modificar el voltaje a salida y con ello la potencia, de esta forma el algoritmo realiza una comparación entre la potencia resultante con la potencia que se tenía, si se presenta el caso de que la potencia

sea mayor que la que se tenía, se aumenta el ciclo de trabajo y se realiza nuevamente la comparación, cuando se presenta el caso de que la potencia obtenida es menor a la anterior se procede a reducir el ciclo de trabajo (Ishaque & Salam, 2013). Este algoritmo de control se caracteriza por su simplicidad y su capacidad para operar sin gastos computacionales altos. Sin embargo, su limitación se manifiesta cuando se enfrenta a la problemática de sombreado parcial, ya que tiende a detectar únicamente un máximo local en lugar del máximo global.

1.4.2. Colonias de hormigas

El algoritmo de colonias de hormigas fue propuesto por Marco Dorigo (Soto et al., 2012), el cual se basa en el comportamiento que tienen las colonias de hormigas para encontrar alimento o cuando son perturbadas.

El algoritmo consiste en programar “hormigas” las cuales realizarán un barrido de señal PWM y a través de sus “feromonas”, guardan en registros su trayectoria, estableciendo los puntos donde se puede obtener la mayor cantidad de energía eléctrica, a partir de este punto las hormigas se centran solo en unos cuantos puntos y empiezan a realizar las interacciones hasta llegar al punto de máxima potencia. A pesar de que el algoritmo cumple con el objetivo, para poder extraer el MPPT en condiciones de sombreado parcial, este se limita en la cantidad de hormigas que se programen y la cantidad de registros de memoria que se dispongan, por lo cual es necesario contar con microprocesadores de alta gama y memorias de gran capacidad haciendo que la construcción de un convertidor DC-DC sea de costos elevados, es por lo que este tipo de algoritmo no es viable para la implementación en convertidores DC-DC de uso comercial.

1.4.3. Algoritmo de control de búsqueda de extremos

El R. Leyva presentó un estudio en 2006 para poder encontrar un algoritmo óptimo para localizar el MPPT de paneles solares en condiciones de sombreado parcial (Leyva et al., 2006). En ese estudio presentó el algoritmo de control de

búsqueda de extremos el cual consiste en realizar una serie de interacciones a lo largo de la curva, guardando los registros en una matriz de memoria, una vez cuente con toda la información necesaria, el algoritmo descarta los máximos locales hasta localizar el máximo global. A pesar de que el algoritmo cumple con el objetivo, es lento al localizar el punto óptimo de desempeño.

1.4.4. Lógica difusa

La lógica difusa es una técnica que se utiliza en la búsqueda del Punto de Máxima Potencia, se desarrolló una investigación en 2017 (Cesar et al., 2017), la cual consistió en desarrollar reglas difusas a partir de datos recopilados experimentalmente, se utiliza esta técnica para inferir el valor de la variable de salida (corriente o tensión del punto de máxima potencia) a partir de las reglas difusas y las mediciones de las variables de entrada. La inferencia considera la interacción de múltiples reglas y funciones de membresía difusas, es especialmente útil en aplicaciones de MPPT porque permite manejar la incertidumbre y la no linealidad inherente a los sistemas fotovoltaicos. Aunque la lógica difusa puede ser una herramienta poderosa para la búsqueda del MPPT, también presenta algunos desafíos y problemas potenciales como es la complejidad de diseño, se requiere de mayor capacidad de procesamiento y memoria en comparación con enfoques más simples, también se tiene dificultades para modelar con precisión todas las interacciones y no linealidades lo que resulta en un rendimiento subóptimo.

1.4.5. Sistema de control “Caza de lobos”

Este algoritmo se inspira en el comportamiento social de los lobos y su forma de caza en manada para maximizar la eficiencia de la búsqueda del MPP. Se realizó una investigación utilizando este método en 2020 (M. Kermadi et al., 2020). En el algoritmo de "Caza de Lobos", se representa una población de soluciones en este caso, configuraciones de operación del sistema fotovoltaico, como una manada de

lobos. Cada lobo tiene asociado un valor de aptitud que indica cuán buena es su solución en términos de generación de energía y se comparten información sobre la calidad de sus soluciones para identificar las soluciones de mayor calidad. El algoritmo continúa iterando y mejorando las soluciones hasta que converja hacia un punto en el que la generación de energía sea máxima, lo que representa el Punto de Máxima Potencia deseado.

En general, aunque el algoritmo de "Caza de Lobos" es una técnica interesante y efectiva en muchos casos, es importante abordar que no siempre se garantiza una convergencia rápida o que alcance el verdadero máximo global, esto depende de la calidad de la solución inicial y la distribución de los lobos en el espacio de búsqueda. Así como también se cuenta con costo de recursos computacionales altos, lo que puede ser problemático en sistemas con limitaciones de recursos.

Aparte de las investigaciones ya mencionadas sobre sistemas de control convencionales, se han realizado investigaciones combinando o modificando los sistemas de control ya existentes, tal es el caso de la investigación presentada en, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, donde se presentó el algoritmo de "Optimización determinística del enjambre de partículas" (Ishaque et al., 2012), el cual es basado en el algoritmo de enjambre de partículas, simplificando y eliminado de la ecuación de velocidad el factor de aceleración, haciendo el proceso más fluido, con esto se reduce el número de interacciones.

Otra de las investigaciones realizadas fue la (Ramaprabha et al., 2015), en la cual hacen el seguimiento de MPPT mediante trazadores de curvas basado en software, escaneando varias puntos de la curva hasta obtener el MPPT y colocando una resistencia de carga modulada.

También se tiene el artículo (González-Castaño et al., 2021), en el cual se presenta una modificación del sistema de control de Perturbar y observar (P&O) utilizando máquinas de soporte vectorial (SVM), esto para aumentar la velocidad del algoritmo de control y disminuir los osciladores que se presentan cerca del punto de máxima potencia.

En el artículo presentado en el IEEE Transactions on Energy Conversion (Mohanty et al., 2017) se realizó investigación combinando el algoritmo de caza de lobos y la técnica de P&O, aplicando en el inicio el algoritmo de P&O y en las etapas finales las miras de caza de lobo logrando una convergencia más rápida al punto de máxima potencia, en esta investigación se presentan los resultados obtenidos en simulaciones dejando para el futuro la implementación del mismo.

Otra de las investigaciones realizada es la presentada por (E. M. Kermadi & Mostefa, 2015), donde se presenta un algoritmo híbrido entre enjambre de partículas y el algoritmo Proporcional e Integral (PI), primero se utiliza el algoritmo de enjambre de partícula para localizar la curva del máximo global, una vez localizado se utiliza el PI para rastrear el punto de máxima potencia de una forma eficiente. Con esto se logró localizar rápido el punto de máxima potencia.

En la investigación de (Sundareswaran et al., 2015), se presenta un algoritmo que combina el algoritmo de Perturbación y Observación (P&O) con el enjambre de partículas. En esta propuesta, el enjambre de partículas se utiliza inicialmente para localizar el máximo global de manera eficiente. Luego, en la etapa final, se implementa el algoritmo P&O para lograr una conversión más rápida. Esta combinación de algoritmos ha demostrado reducir el tiempo necesario para alcanzar el punto de máxima potencia.

Estas investigaciones ofrecen enfoques interesantes para mejorar la eficiencia en la búsqueda del Punto de Máxima Potencia en sistemas fotovoltaicos mediante la combinación de algoritmos y la optimización de procesos.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Diseñar un sistema de control que mejore la eficiencia en la extracción de energía eléctrica de paneles solares en condiciones de sombreado parcial.

1.5.2. Específicos

- Investigar el comportamiento de los paneles solares en condiciones de sombreado parcial.
- Identificar los sistemas actuales de control MPPT más empleados en convertidores DC-DC comerciales.
- Analizar la información de los sistemas de control que se han desarrollado para el MPPT.
- Proponer un sistema de control propio para el seguimiento de punto de máxima potencia que permita extraer la mayor cantidad de energía eléctrica de las celdas fotovoltaicas.
- Validación del sistema de control mediante simulación.
- Construcción de un convertidor DC-DC que valide el sistema de control propuesto.
- Implementación del sistema de control propuesto, simulando las condiciones de sombreado parcial.
- Reportar los resultados obtenidos durante la investigación.

1.6. Justificación

Actualmente, los convertidores DC-DC comerciales emplean algoritmos de control básicos, como el método de perturbación y observación. Estos algoritmos son eficientes cuando el panel solar está operando sin condiciones de sombreado y solo se tiene un máximo global en la curva de potencia-voltaje. Sin embargo, cuando el panel solar experimenta sombreado parcial y la curva de potencia-voltaje se ve modificada, presentando varios máximos locales además del máximo global, el sistema de control tiende a converger hacia uno de los máximos locales, lo que resulta en una pérdida de eficiencia en la captura de energía eléctrica.

En la actualidad se la logrado en condiciones de laboratorio y utilizando celdas de silicio multicapas eficiencias de 36.1% celdas solares (Schygulla et al., 2023). Cuando se evalúa que los convertidores DC-DC no operan con un rendimiento

óptimo, se está desperdiciando una cantidad considerable de energía eléctrica. El propósito es que el convertidor DC-DC adquiera la capacidad de extraer la máxima cantidad de energía disponible, aprovechando al máximo las celdas fotovoltaicas. Esto no solo reduciría el tiempo de recuperación de la inversión, sino que también disminuiría la dependencia de fuentes contaminantes de energía eléctrica.

Para abordar este problema, se propone un nuevo algoritmo que consiste en modificación al sistema de control de 'perturbar y observar'. Esta modificación implica en primer lugar realizar un barrido que nos permita identificar donde se localiza la cresta con el máximo global. A partir de esta identificación, utiliza el algoritmo de 'perturbar y observar' para converger en el punto de máxima potencia, optimizando así la recolección de energía eléctrica.

Alcances

- La implementación de un algoritmo que he desarrollado, enfocado en la identificación del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en condiciones de sombreado parcial.
- Simulaciones del comportamiento de paneles solares en diferentes condiciones de sombreado parcial.
- Desarrollo de un convertidor DC-DC para la implementación del algoritmo propuesto.

1.7. Limitaciones

Las limitaciones del método pueden incluir:

- Sensibilidad a las condiciones ambientales: El algoritmo podría ser menos efectivo en entornos con cambios rápidos en la radiación solar o temperaturas variables.

- Dependencia de la topología del sistema: El rendimiento del algoritmo puede verse afectado por la configuración específica del sistema fotovoltaico y la eficiencia de los paneles solares utilizados.
- Tiempo de respuesta: El tiempo necesario para localizar el MPPT podría ser más largo en ciertas situaciones, lo que podría afectar la eficiencia del sistema en condiciones de sombreado parcial.
- Sensibilidad al ruido y la precisión de los sensores: La precisión de la identificación del MPPT puede verse comprometida por la calidad de los datos proporcionados por los sensores de corriente y voltaje, así como por posibles interferencias o fluctuaciones en las mediciones.

1.8. Metodología de solución

Para cumplir con el objetivo del proyecto se propone la metodología mostrada en la figura 3, la cual se explica en breve.

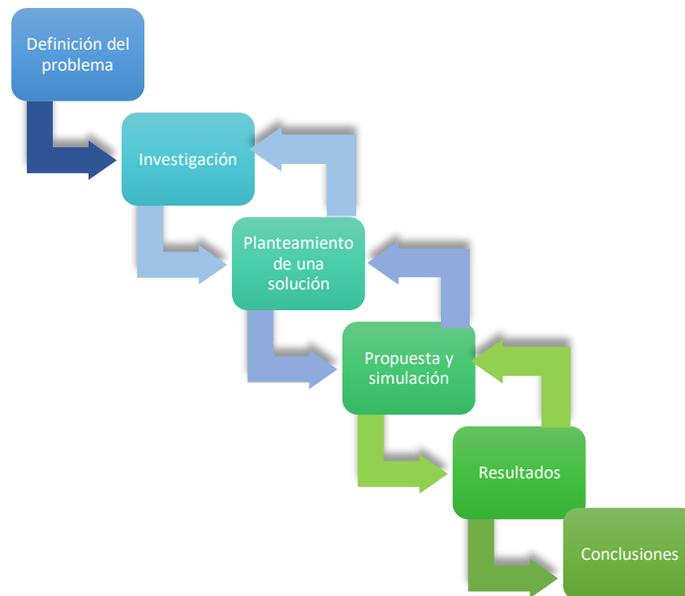


Figura. 3 Metodología.

- **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Se realiza un análisis para definir la problemática, los objetivos, el alcance y las limitaciones que se tendrán durante el proyecto.

- **INVESTIGACIÓN**

Se realizará una recopilación de información de trabajos desarrollados sobre sistemas de control propuestos para la optimización de MPPT.

- **PLANTEAMIENTO DE UNA SOLUCIÓN**

Se planteará una solución a partir de la hipótesis y de la recopilación de información.

- **PROPUESTA Y SIMULACIÓN**

Se realizará la validación de la propuesta mediante de simulación e implementación del algoritmo, que permita verificar que el sistema de control propuesto cumpla con el objetivo de la extracción de máxima energía eléctrica en condiciones de sombreado parcial, así como un diseño de un convertidor DC-DC Boost que permita validar lo realizado en simulación.

- **RESULTADOS**

Se verificará que los resultados sean los deseados y si no, se retrocederá a un punto estratégico, para lograr obtenerlos.

- **CONCLUSIONES**

Se dará a conocer los resultados obtenidos para verificar que se cumpla con el objetivo general de desarrollar un sistema de control más eficiente para la extracción de energía eléctrica en paneles solares con condiciones de sombreado parcial.

1.9. Contribución a la investigación

Esta investigación busca abordar el sombreado parcial en paneles fotovoltaicos, una problemática crítica en la generación de energía solar. A pesar de los avances en las investigaciones relacionadas a desarrollar nuevas celdas solares con mayor eficiencia, el sombreado parcial sigue siendo una preocupación significativa debido a las diversas fuentes de obstrucción como es construcciones, nubes, animales, aviones y otros factores ambientales impredecibles. Este problema reduce la eficiencia de los sistemas de energía solar y disminuye el retorno de inversión.

La contribución principal de esta investigación radica en el desarrollo de un algoritmo de control eficaz, diseñado específicamente para solucionar la problemática del sombreado parcial en paneles solares. A través de simulaciones y experimentos prácticos, se validará la capacidad del algoritmo para localizar el MPPT de un conjunto de paneles afectados por el sombreado parcial.

La aplicación exitosa de este algoritmo permitirá mejorar la eficiencia de la generación de energía, teniendo un impacto ambiental positivo al reducir la dependencia de fuentes de energía contaminantes. Además, al acortar el tiempo de retorno de inversión en sistemas solares, esta investigación contribuirá al fomento de la adopción de energía solar en una variedad de aplicaciones, desde instalaciones residenciales hasta proyectos de gran escala.

1.10. Organización de la Tesis

A continuación, se presentará los capítulos, así como una breve explicación de cada uno de los capítulos que la Tesis tendrá.

1.10.1. Capítulo I. Introducción

En este capítulo se lleva a cabo una revisión del estado del arte y se presenta la problemática que será abordada. Además, se describe la metodología que se utilizará para encontrar una solución, se definen los objetivos, se establecen los

alcances e identificando los límites que se enfrentarán durante el desarrollo de la investigación.

1.10.2. [Capítulo II. Marco Teórico](#)

En este capítulo se presentará toda la información que respalda la investigación, incluyendo el análisis de los paneles solares, su caracterización y los problemas que surgen debido al sombreado parcial. Además, se abordará el diseño de un convertidor DC-DC.

1.10.3. [Capítulo III. Desarrollo Teórico experimental](#)

En este capítulo se muestran las simulaciones desarrolladas con el algoritmo propuesto, así como el desarrollo del convertidor DC-DC y la implementación del algoritmo propuesto.

1.10.4. [Capítulo IV. Resultados y difusión](#)

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos del algoritmo propuesto para saber si este satisface con la problemática planteada.

1.10.5. [Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones](#)

En este capítulo se presentará la conclusión a la que se llegó una vez realizadas las pruebas, y se da conocer si el algoritmo propuesto satisface las necesidades.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Introducción

En la actualidad, uno de los métodos más utilizados para generar energía limpia y sostenible es mediante sistemas fotovoltaicos. Estos sistemas aprovechan la radiación solar para generar energía eléctrica, lo que les confiere notables ventajas. Debido a su dependencia de la energía solar, pueden implementarse de manera rentable en prácticamente todas las regiones del planeta, sin costos de instalación significativos. Además, tienen la capacidad de satisfacer eficazmente la demanda energética de los hogares.

Los paneles solares son dispositivos compuestos por una serie de celdas fotovoltaicas que pueden estar conectadas en paralelo y/o en serie. Estas celdas fotovoltaicas están fabricadas a partir de dos capas de silicio, un material semiconductor. La primera capa se dopa con impurezas, específicamente fósforo, que introduce una mayor densidad de electrones, generando así una carga negativa. Por otro lado, la segunda capa se dopa con elementos como el boro, indio o galio, lo que conlleva la ausencia de un electrón, creando huecos en su estructura y confiriéndole una carga positiva. Este proceso se basa en la técnica de dopaje para modificar las propiedades eléctricas de las capas, esencial en la construcción de dispositivos semiconductores como los paneles fotovoltaicos (Cesar et al., 2017).

Cuando estas dos capas se ponen en contacto, se forma una unión de tipo PN. Esta unión es crucial para el funcionamiento de los paneles solares, ya que permite el flujo de corriente eléctrica en un solo sentido. Sin embargo, cuando esta unión se expone a la luz solar, los fotones que componen la luz interactúan con los electrones libres del silicio. Esto provoca que los electrones se exciten y salgan de sus órbitas, provocando un desplazamiento en el material semiconductor.

La incorporación de un circuito eléctrico a las celdas fotovoltaicas genera electricidad. Este proceso, conocido como efecto fotovoltaico, es el principio fundamental detrás de la conversión de la energía solar en energía eléctrica en los paneles solares. Es a través de esta interacción entre la luz solar y el material semiconductor que los paneles solares generan una fuente de energía limpia y

sostenible que puede ser aprovechada para alimentar una variedad de aplicaciones eléctricas. Ver figura 4.

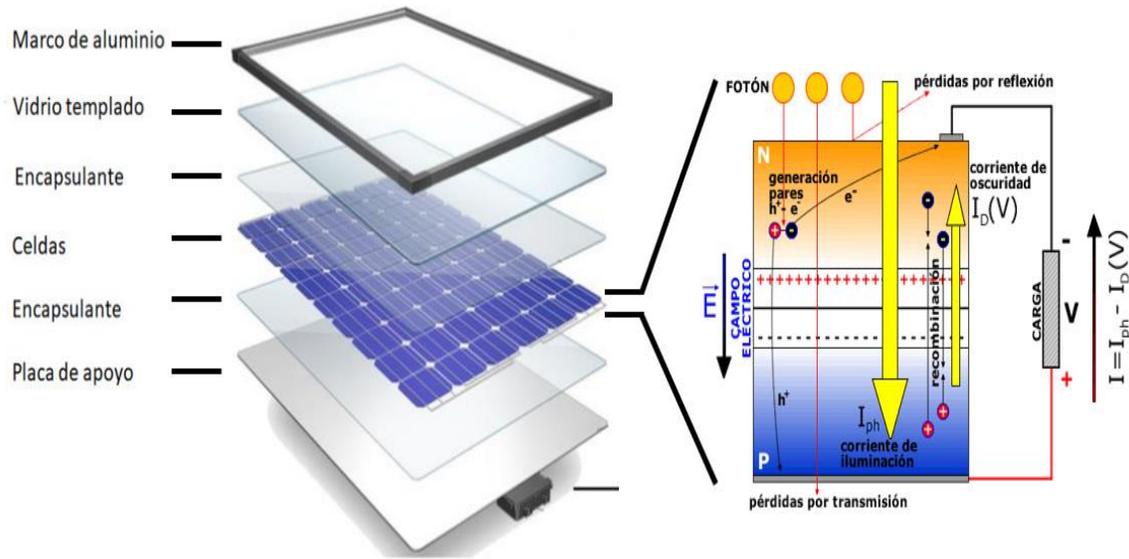


Figura. 4 Composición de celda solar (imagen obtenida de www.dsisolar.com).

Actualmente, los paneles solares de silicio dominan el mercado, con una eficiencia máxima alcanzada en laboratorio del 31.6% (Schygulla et al., 2023). Sin embargo, la investigación reciente ha explorado alternativas para mejorar la eficiencia de las células fotovoltaicas. Un ejemplo destacado son las células fotovoltaicas de perovskita, que han logrado hasta un 25% de eficiencia en condiciones controladas de laboratorio. La perovskita, con su fórmula química ABX_3 , donde A es un catión metálico grande (como plomo o cesio), B es un catión metálico más pequeño (como titanio o estaño), y X es un anión (generalmente un halógeno como yodo, bromo o cloro), ha surgido como una prometedora alternativa. Además, tecnologías emergentes como las células orgánicas también han mostrado mejoras en la eficiencia en el laboratorio, lo que podría eventualmente reducir los costos de producción.

2.2. Caracterización de un panel solar

La composición de un panel solar se puede representar mediante un circuito eléctrico, lo que facilita una comprensión más clara de su comportamiento, como se muestra en la figura 5. En esta representación, I_{ph} representa la corriente generada por la luz solar que incide sobre el panel solar, que depende de la radiación solar incidente. Por otro lado, I_d representa una corriente parásita que se forma debido a la unión PN en el panel solar. La resistencia R_{sh} es una resistencia parásita que disipa parte de la energía eléctrica, mientras que R_s se considera una resistencia que limita la cantidad de energía que el panel puede entregar.

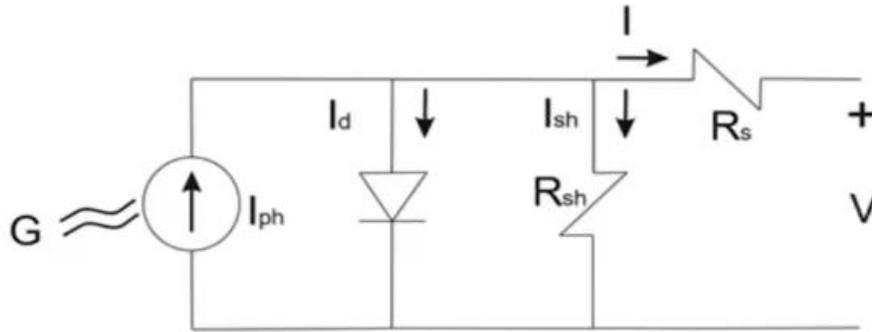


Figura. 5 Circuito eléctrico equivalente de un panel solar.

Este circuito presentado anteriormente ayuda a poder obtener ecuaciones que describan el comportamiento del panel solar. Utilizando las leyes de corriente de Kirchhoff se puede obtener la siguiente ecuación.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{Ecuación 1}$$

Que describe que la corriente total que entregará el panel solar será la fotocorriente I_{ph} que depende de la radiación que recibe el panel, menos la corriente que se pierde por la unión PN (I_d) y la corriente de la resistencia parasita (I_{sh}).

Con la ecuación 1. se puede obtener la corriente que entrega la celda solar, pero para poder tener más claro se debe de conocer que la corriente de un diodo se

obtiene de la siguiente ecuación presentada por William Shocley en 1949, (Iverson & Dervan, n.d.).

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_d}{nV_t}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

I_d : se define como la corriente que circula por la unión PN.

I_s : es la corriente de saturación que depende de la temperatura de la unión PN.

V_d : es la diferencial de potencial entre las terminales del diodo.

n : es el coeficiente de idealidad, este valor depende del proceso de recombinación del diodo. Este término se utiliza para describir cuán cerca se comporta un dispositivo semiconductor de un comportamiento ideal o teórico en términos de su corriente y voltaje

V_t : Por último, el valor V_t es una tensión térmica que depende de la ecuación 3.

$$V_t = \frac{K_b * T}{q} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

T : es la temperatura absoluta de la unión PN.

K_b : es la constante de Boltzmann es igual a $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J / K}$.

q : Es la magnitud de la carga de un electrón denominada como carga elemental.

Todo lo presentado es para conocer la cantidad de corriente entregada por la celda solar, para poder obtener el voltaje de entrega de un panel solar se emplea la ley de voltaje de Kirchhoff donde se obtiene la siguiente ecuación.

$$V_p = V_d - R_{sh} * I_{sh} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

V_p : es la tensión de salida de la celda solar.

V_d : el voltaje del diodo.

R_{sh} y I_{sh} son dos parámetros fundamentales en el análisis y diseño de circuitos fotovoltaicos:

R_{sh} (Resistencia shunt o en paralelo): Esta resistencia se coloca en paralelo a la salida del panel solar. Su función es desviar una parte de la corriente eléctrica generada por el panel. Esto puede tener varios propósitos, como medir la corriente que fluye a través del panel o protegerlo contra corrientes excesivas. Idealmente, R_{sh} debería ser alto para minimizar las pérdidas de corriente y maximizar la eficiencia del panel.

I_{sh} (Corriente de saturación o de fuga): Esta corriente representa la corriente que pasa a través de la resistencia shunt. I_{sh} es una medida de la corriente de fuga que fluye a través de la unión PN del panel solar cuando está expuesto a la luz. Cuanto menor sea I_{sh} , menor será la corriente de fuga y mejor será el rendimiento del panel.

Esto ayuda a representar el voltaje entregado por una celda solar, pero se sabe que un panel solar puede contener N cantidad de celdas solares, para conocer la cantidad de voltaje entregado por el panel solar solo es necesario multiplicar V_p por la cantidad de celdas solares conectadas en serie.

Con esta información podemos obtener curvas características de Voltaje-Corriente(V-I) y Potencia-Voltaje(P-V) de los paneles solares como la que se muestra en la figura 6.

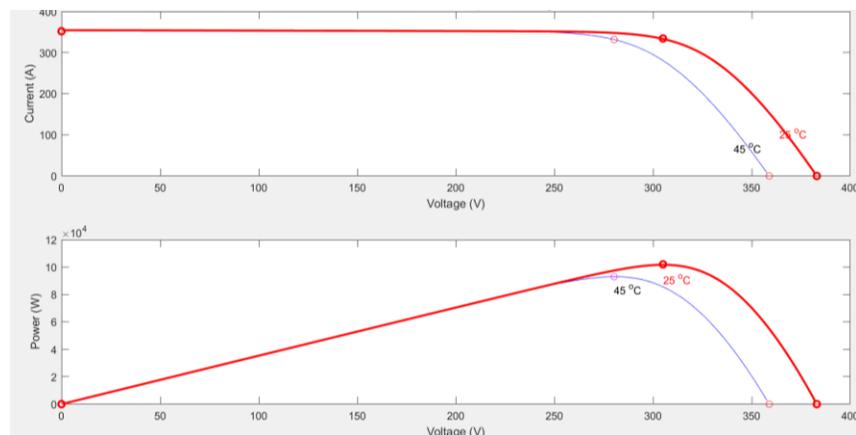


Figura. 6 Curvas características V-I y P-V.

Las gráficas antes mencionadas ilustran como la corriente y voltaje tienden a tener una relación y dan como resultado una potencia entregada por el panel, esta potencia está directamente relacionada al voltaje entregado por el panel, siempre se busca que se pueda extraer la mayor cantidad de potencia posible y para eso se emplean métodos de seguimiento de máxima potencia o MPPT.

2.3. Afectaciones que tienen la energía fotovoltaica

La caracterización del panel solar revela una relación directa entre la corriente y la cantidad de radiación recibida por el panel. Como consecuencia, las curvas V-I (voltaje-corriente) y P-V (potencia-voltaje) experimentan modificaciones. En problema habitual que sucede cuando se tiene una cantidad N de paneles solares en un arreglo en serie es el denominado evento conocido como “Sombreado Parcial”.

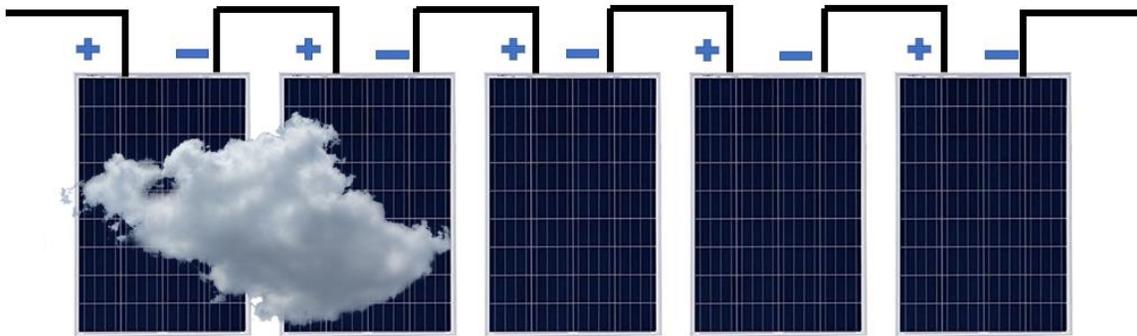


Figura. 7 Condición de sombreado parcial generado por la obturación de una nieve en dos paneles solares.

El sombreado parcial es un efecto que sucede cuando uno o más paneles solares de un arreglo serial se ve parcial o totalmente cubierto por una sombra haciendo que la potencia entregada disminuya considerablemente, afectando las curvas tanto de V-I y P-V. Ver Figura 7. Cuando este tipo de fenómeno sucede se pueden producir que la corriente fluya a través de las celdas solares de menor resistencia, lo que puede resultar en un sobrecalentamiento localizado en esas áreas. Este sobrecalentamiento puede causar daños permanentes en las celdas, reduciendo la

eficiencia del panel y, en casos extremos, provocando un fallo total del módulo a este tipo de fenómeno se le denominado hotspot.



Figura. 8 Efecto Hostpot en panel solares.

El primer efecto sucede cuando un sistema de arreglo de paneles sufre sombreado parcial, al suceder este evento los paneles sombreados actúan como consumidores de corriente por ende se producen puntos calientes que terminan por dañar el panel solar irreversiblemente, Ver figura 8.

Una forma para solucionar esta problemática es utilizar un diodo de Bypass, el cual consiste en colar en paralelo al panel solar un diodo. Ver figura 9.

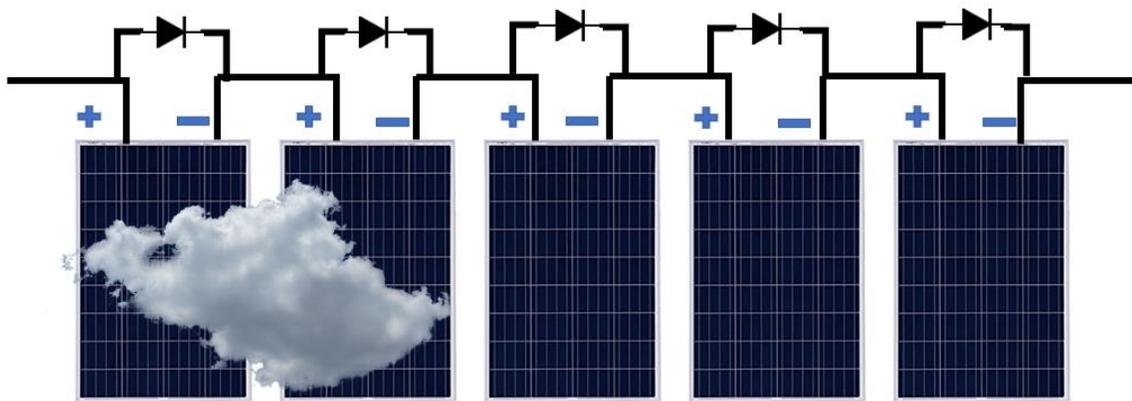


Figura. 9 Arreglo de paneles solares con diodo de Bypass.

El diodo de bypass se coloca en paralelo a cada sección de celdas solares. Cuando una sección no está generando electricidad o está generando una corriente muy baja debido a sombras u otras razones, el diodo se activa y bloquea la corriente inversa, evitando que la corriente fluya desde la sección sombreada hacia las secciones generadoras de electricidad del panel.

El segundo punto que se aborda es la búsqueda del MPPT, lo cual plantea un desafío complejo y es sobre el que se sostiene el desarrollo de la investigación.

Localizar el MPPT de un panel solar es relativamente sencillo cuando no existe ninguna condición de sombreado parcial. Sin embargo, en la realidad, esto se vuelve prácticamente imposible debido a que los paneles pueden verse afectados por la sombra de un árbol, una construcción, el excremento de animales o incluso nubes.

Actualmente los convertidores DC-AC y los reguladores de carga de baterías para sistemas fotovoltaicos contienen embebidos el método de control de perturbar y observar (P&O) para localización del MPPT. El algoritmo comienza con una perturbación inicial en la corriente o el voltaje de carga del panel solar. Esto significa que se cambia deliberadamente la corriente o el voltaje de carga de manera incremental para observar cómo cambia la potencia generada como resultado de la perturbación. Si la potencia aumenta, el sistema continúa en la misma dirección de perturbación, ya que esto indica que se está moviendo hacia el MPPT. Si la potencia disminuye, el sistema cambia la dirección de perturbación, a medida que el sistema continúa ajustando, eventualmente alcanza el punto de máxima potencia, donde la potencia generada es la máxima posible para las condiciones de iluminación y temperatura actuales. Ver figura 10.

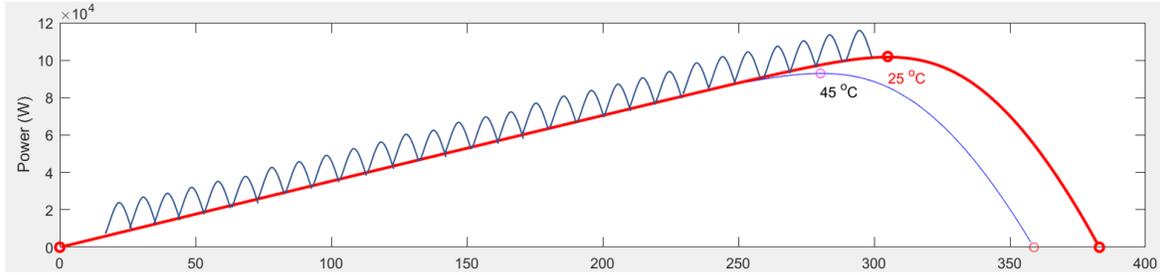


Figura. 10 Sistema de control P&O para localizar el MPPT.

Este método de control tiene algunas limitaciones y problemas específicos cuando se enfrenta a condiciones de sombreado parcial, a menudo puede tener dificultades para converger rápidamente al MPPT encontrándose con máximos locales en la curva de potencia-voltaje en lugar de alcanzar el MPPT global. Esto se debe a que las perturbaciones y observaciones pueden llevar al algoritmo hacia uno de estos máximos locales en lugar de al máximo global, lo que reduce la eficiencia en la extracción de energía. Ver figura 11.

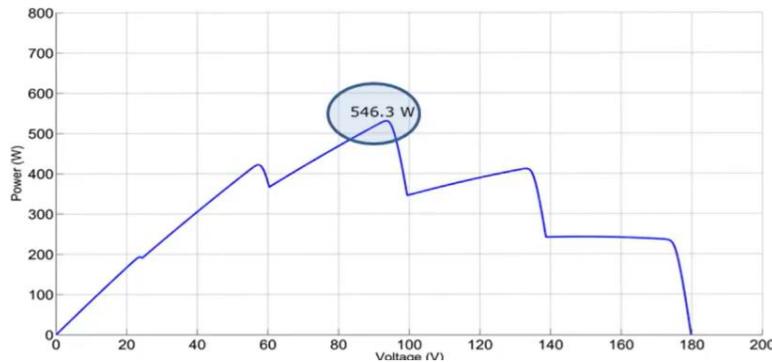


Figura. 11 Curva P-V en condiciones de sombreado parcial.

Como se puede observar, la curva característica presenta varios máximos locales que dificultan que el método de control P&O pueda localizar el MPPT. Por esta razón, en el desarrollo de este trabajo se realizó la implementación de un sistema de control desarrollado por el autor método de control capaz de encontrar el MPPT en cualquier condición.

2.4. Convertidor DC-DC Bosst

Una parte fundamental de los sistemas fotovoltaicos son los convertidores DC-AC o inversor de corriente, que tienen la responsabilidad de regular la tensión generada por los paneles solares y distribuirla al banco de baterías o la carga correspondiente. Dentro de los inversores, se encuentra un convertidor DC-DC, que puede ser del tipo Boost (para aumentar el voltaje de entrada) o Buck (para disminuir el voltaje de entrada). En este trabajo de investigación, se utilizará el convertidor Boost, uno de los convertidores más comunes tanto en investigaciones como en dispositivos comerciales. Esto se debe a su fácil implementación y al hecho de que, al contar con un inductor en la entrada, actúa como un filtro que evita picos de corriente que podrían dañar los paneles solares.

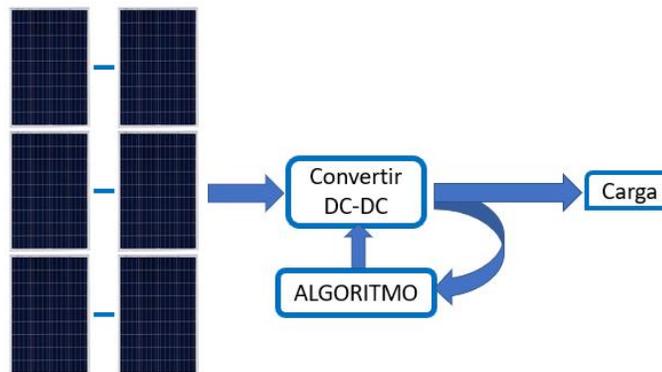


Figura. 12 Sistema de MPPT.

Como se puede observar en la figura 12, el convertidor DC-DC es controlado por un algoritmo encargado de variar el ancho de pulso del tren de pulsos. El algoritmo ajusta el ancho de pulso con el fin de obtener la máxima potencia en la salida del panel solar. Para lograr esto, el algoritmo realiza mediciones del voltaje y la corriente en la salida del convertidor DC-DC.

2.5. Diseño del convertidor DC-DC tipo Boost

Un convertidor DC-DC de tipo Boost se compone de varios elementos, que incluyen un inductor en serie con el voltaje de entrada, un MOSFET que permite la

conmutación de la corriente, una señal PWM que ayuda a controlar el voltaje de salida, un diodo que permite el flujo unidireccional de la corriente, un condensador en paralelo con el voltaje de salida y una carga que dependerá de lo que se desee alimentar con el convertidor DC-DC. (Ver figura 13).

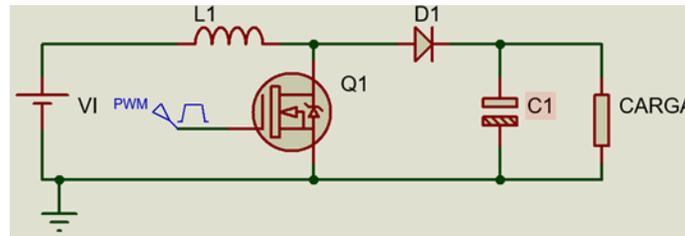


Figura. 13 Circuito eléctrico de un convertidor Boost.

La ganancia que es tipo de convertidores DC-DC se expresa con la siguiente ecuación.

$$\frac{V_S}{V_{int}} = \frac{1}{1 - D} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

V_S : es el voltaje de salida.

V_i : es el voltaje de entrada.

D : representa el Ciclo de trabajo de la señal PWM, esta señal se recomienda que tenga una frecuencia igual o superior a los 20KHz.

Para el valor del inductor se utiliza la siguiente ecuación.

$$L = \frac{I_{int} D}{\Delta I_s f} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

I_{int} : es la corriente de entrada.

ΔI_s : es la corriente de salida multiplicada por el rizo de trabajo deseado.

f y D : es la frecuencia y el ciclo de trabajo respectivamente.

Para obtener el valor del capacitor se utiliza la siguiente ecuación.

$$C = \frac{V_{int}D}{\Delta V_s f} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

V_{int} : es el voltaje de entrada.

ΔV_s : es el voltaje de salida multiplicado por el rizo deseado.

f y D : es la frecuencia y ciclo de trabajo respectivamente.

Para seleccionar el MOSFET, es necesario asegurarse de que sea un dispositivo de conmutación de alta frecuencia y que sea capaz de manejar la corriente que circulará por el circuito eléctrico. En cuanto al diodo, se deben tener en cuenta las mismas consideraciones, es decir, que sea un dispositivo de transiciones rápida y adecuado para la corriente que se espera que circule por el circuito.

Capítulo III

Desarrollo teórico experimental.



3.1. Introducción

En el presente capítulo se abordará el desarrollo teórico y experimental para comprobar el comportamiento del algoritmo propuesto de barrido de ciclo de trabajo con perturbar y observar. Se presentará el diseño y la propuesta del convertidor DC-DC, la comprobación mediante simulaciones, así como el desarrollo físico del mismo. También se abordará el desarrollo del algoritmo y las simulaciones en Matlab para verificar su comportamiento.

3.2. Topologías de convertidores DC-DC

Los convertidores DC-DC son componentes fundamentales en los esquemas de seguimiento para obtener energía en sistemas fotovoltaicos. En la literatura, destacan los convertidores DC-DC de tipo Buck, que reducen el voltaje de entrada a un nivel de salida menor, y los convertidores de tipo Boost, utilizados principalmente para elevar la tensión de entrada, como en sistemas de carga de baterías. Además, está el convertidor Buck-Boost, que se emplea cuando la tensión de salida puede ser mayor o menor que la de entrada. También se mencionan los convertidores SEPIC, Cuk y Zeta. Cada tipo tiene aplicaciones específicas y permite adaptar la energía según las necesidades del sistema.

Para la correcta selección del convertidor, es fundamental tener en cuenta varios parámetros de diseño, como la impedancia y los armónicos de entrada y salida. En esta investigación, se optó por el convertidor DC-DC de tipo Boost. Este tipo de convertidor tiene una característica especial: incorpora un inductor en la entrada, lo que actúa como un filtro atenuando los armónicos de entrada. Esto es crucial para evitar afectar el sistema y evitar la contaminación del ruido en la salida. Además, al aumentar el voltaje de salida, facilita su integración en buses de corriente continua para cargar bancos de baterías o la incorporación de convertidores DC-AC. Por último, cabe destacar la presencia de un inductor en la salida, lo que proporciona estabilidad al voltaje y reduce picos que podrían afectar el sistema. Estas

características hacen que el convertidor Boost sea una elección adecuada para la investigación.

3.3. Diseño del Convertidor Boost.

Para el diseño de este convertidor de tipo Boost se emplean las ecuaciones 5, 6 y 7 mostradas en el capítulo II, estas ecuaciones permiten la correcta selección del valor del inductor y capacitor, los cuales son parte fundamental en el funcionamiento del sistema. Para la selección correcta de los componentes que integran el circuito se tomaron en consideración los siguientes parámetros de diseño, ver tabla 1.

Tabla 1. parámetros de diseño del convertidor DC-DC tipo Boost.

Parámetros de diseño	
Ciclo de trabajo	50%
Frecuencia	20KHz
Rizo	10%
Voltaje de Entrada	114 V
Corriente de Entrada	23.2 A
Voltaje de Salida	419 V
Corriente de Salida	5.8 A

El ciclo de trabajo se ajusta para operar normalmente al 50%, evitando así situaciones cercanas al 0% o 100%, donde el convertidor estaría completamente abierto o en cortocircuito respectivamente. Además, para lograr un rendimiento óptimo en los tiempos de carga y descarga tanto del inductor como del capacitor, óptimo es necesario que utilizar frecuencias superiores a los 10 kHz. En esta investigación, se logró un funcionamiento correcto de los equipos a una frecuencia de 20 kHz. Se propuso un rizado máximo del 10% en el diseño para garantizar un funcionamiento estable del sistema.

De acuerdo con los parámetros mostrados en la tabla 1 se puede obtener los valores del capacitor e inductor. Para la selección correcta del diodo y MOSFET, solo es necesario tomar en consideración que soporte la corriente pico y puedan trabajar de forma óptima a frecuencias mayores 20Khz. Con estos datos se llevó a cabo

búsqueda de componentes comerciales que se encuentre cercano a los valores calculados. En la tabla 2 se muestra los componentes seleccionados.

Tabla 2. Dispositivos seleccionados para el diseño del convertidor Boost.

Dispositivo	Especificaciones	Matricula
Inductor	1mH	
Capacitor	68uF	380LX680M400H012
Mosfet	Canal N 400V a 15 20A	IRFP460A
Diodo	15A	HFA15TB60

3.4. Simulación de convertidor Boost

Para verificar el comportamiento del convertidor, se procede a simularlo y evaluar su rendimiento antes de avanzar a la etapa de experimentación.

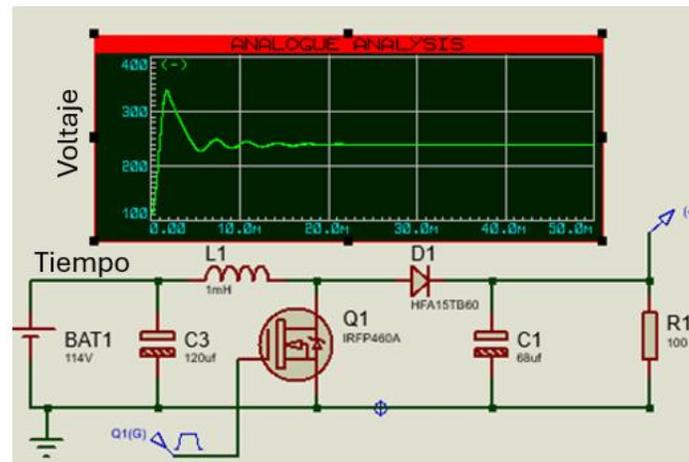


Ilustración 18. simulación del convertidor DC-DC.

Dentro de la simulación, se observó un funcionamiento correcto del convertidor. Teniendo en cuenta un rango de voltaje de entrada de 10-120VDC, se obtuvieron valores de salida de 30-442VDC respectivamente tomando en consideración un ciclo de trabajo del 70%.

Posterior a esto se procedió a mantener un voltaje de entrada de 114VAC y realizar incrementos de ciclo de trabajo tomando en consideración valores desde los 10%-

90% realizando incrementos de cada 5% obtenido como resultado los siguientes valores.

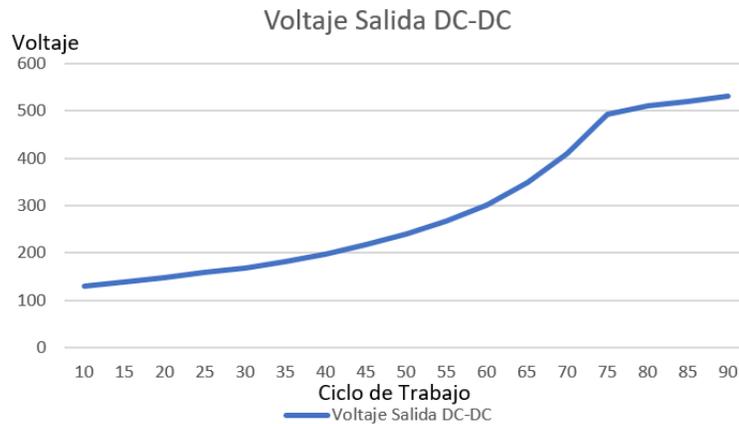


Figura. 14 Valores de salida del convertidor Boost.

En la simulación, se pudo verificar el funcionamiento adecuado del convertidor DC-DC. Los resultados demostraron un rendimiento satisfactorio del dispositivo, confirmando su capacidad para operar de manera eficiente de acuerdo con lo diseñado.

3.5. Simulación de panel solar y convertidor Boost en simulink.

Se simuló el convertidor con la ayuda del panel integrado en el entorno de Simulink, donde fue posible seleccionar las características específicas del panel solar a utilizar. Además, se empleó la biblioteca eléctrica incorporada en el entorno de trabajo. Esto permitió realizar un barrido del ciclo de trabajo y analizar el comportamiento previsto del panel, como se ilustra en la Figura 15.

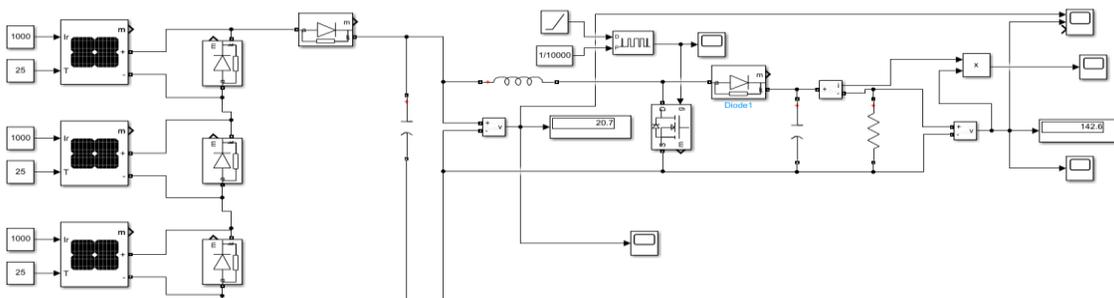


Figura. 15 Simulación panel solar y convertidor DC-DC.

Esta simulación permitió observar el comportamiento del convertidor DC-DC en varios ciclos de trabajo y determinar el ciclo de trabajo óptimo para maximizar la cosecha de potencia. Es importante tener en cuenta que se consideró una radiación constante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y una temperatura de 25°C para todos los paneles solares en el análisis, como se muestra en la Figura 16.

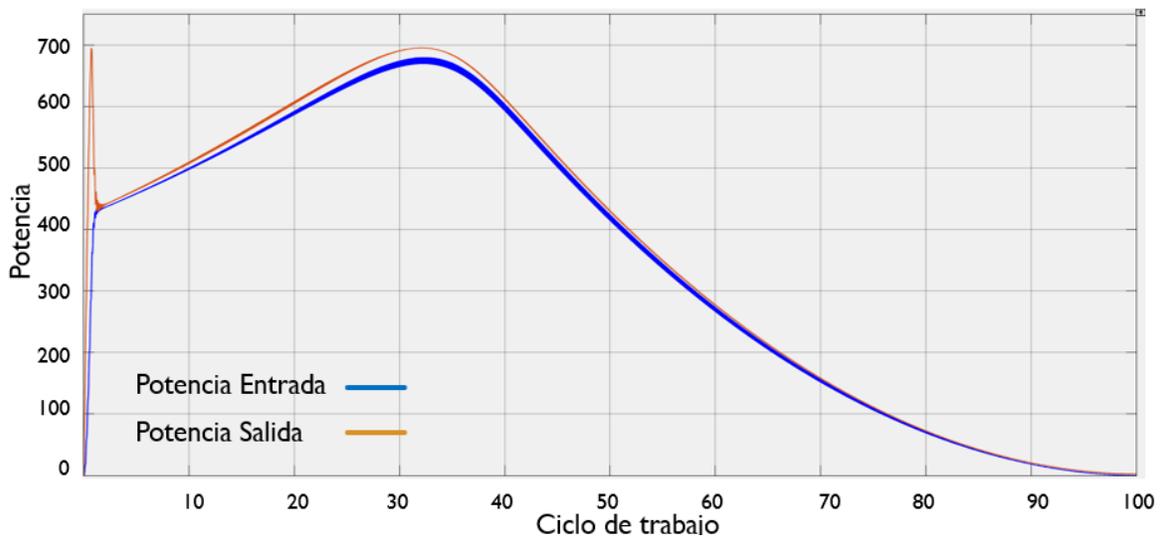


Figura. 16 Simulación del convertidor DC-DC, en distintos ciclos de trabajo.

En la Figura 16, se puede observar el comportamiento de la potencia de entrada y salida. Se nota una ligera atenuación en la salida debido a la resistencia que se colocó como carga. A pesar de esta atenuación, el convertidor muestra un funcionamiento adecuado, considerando que la potencia de salida es similar a la de entrada.

Para evaluar el rendimiento del convertidor en condiciones de sombreado parcial, se realizaron variaciones en los parámetros de radiación de los diferentes paneles solares. En particular, se consideraron niveles de radiación de $300\text{W}/\text{m}^2$, $500\text{W}/\text{m}^2$ y $1000\text{W}/\text{m}^2$ respectivamente para cada panel. Al analizar los resultados, se observó que la curva de potencia, en los diferentes ciclos de trabajo del convertidor DC-DC, exhibe varios máximos locales y un máximo global, como se muestra en la Figura 17. Estos resultados resaltan la importancia de adaptar el ciclo de trabajo para maximizar la eficiencia del sistema en condiciones variables de radiación solar.

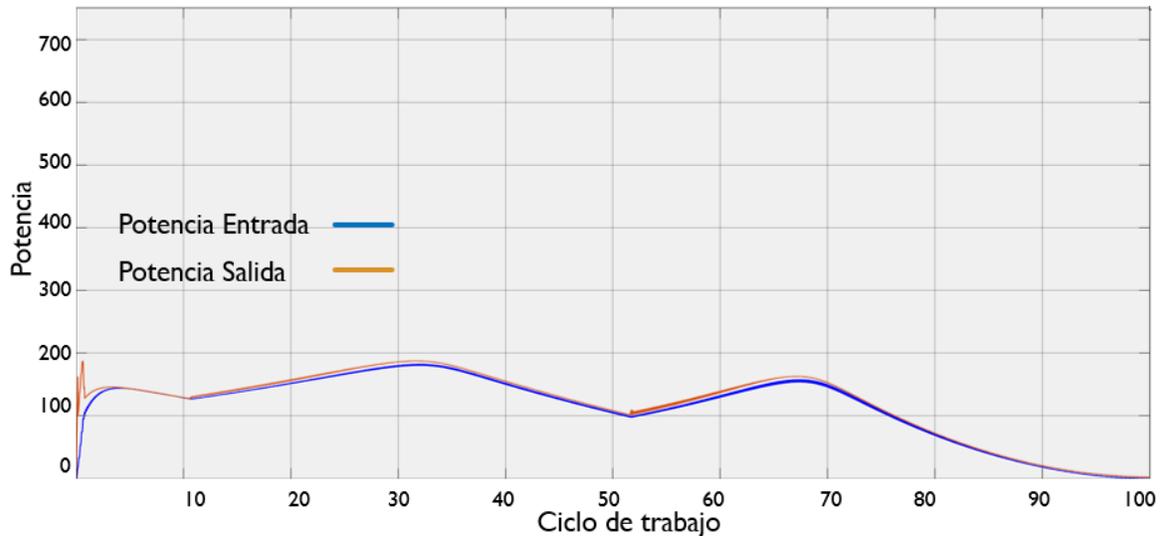


Figura. 17 Simulación de paneles solares en condiciones de sombreado parcial.

Las simulaciones realizadas, tanto del convertidor de forma independiente como en conjunto con los paneles solares, han demostrado un comportamiento adecuado y congruente con las especificaciones establecidas. Estos resultados nos brindan confianza en la efectividad del diseño propuesto. Al considerar estos resultados en la práctica, a través del diseño del circuito impreso, podemos afirmar que el diseño será adecuado para su implementación en conjunto con el algoritmo propuesto.

3.6. Sensores de voltaje y corriente

Un aspecto crucial en el diseño del circuito de control es la lectura exacta de la corriente y el voltaje. Estos dispositivos deben ser capaces de medir con precisión las variaciones que ocurran durante los barridos de los ciclos de trabajo.

Para medir el voltaje, se decidió utilizar un doble divisor de voltaje. Esta configuración garantiza que la salida del divisor esté en el rango de 0-5VDC, valores ideales que no causarán daños al microcontrolador encargado de ejecutar el algoritmo propuesto. En la implementación del divisor de voltaje se emplearon cuatro resistencias, dos de 100kΩ, una de 10kΩ y otra de 1kΩ de una potencia de 100W con un error de +/- 5 % como se puede observar en la Figura 18. Este diseño

aseguro una lectura precisa y segura del voltaje para su posterior procesamiento en el sistema de control.

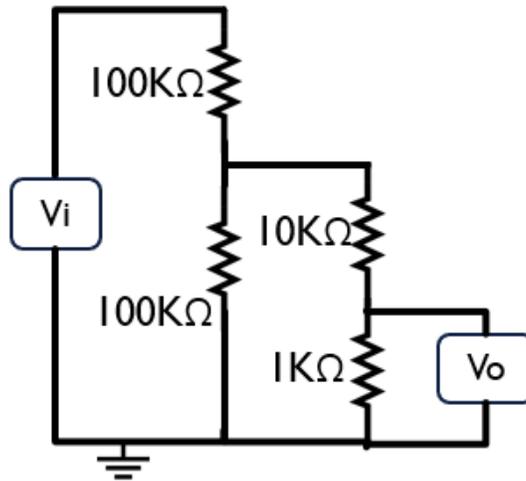


Figura. 18 Sensor de voltaje.

La precisión y exactitud de este circuito dependen directamente del valor de la resistencia, que permanece invariable en el tiempo. Para garantizar una lectura óptima, se llevó a cabo una caracterización del sistema, obteniendo valores constantes de resistencia: $R=101.2k\Omega$, $R=100.8k\Omega$, $R=9.97k\Omega$ y $1001k\Omega$. Analizando estos valores y tras realizar la caracterización del circuito, se observó una tendencia clara, como se muestra en la Figura 19. Posteriormente, se aplicó una regresión lineal para obtener la ecuación característica. Esta ecuación será incorporada en el programa para la lectura del voltaje, asegurando así una medición precisa y confiable.

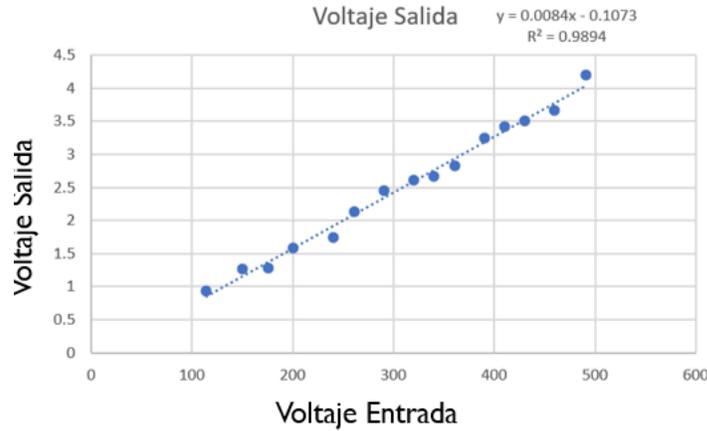


Figura. 19 Gráfica de tendencia en las lecturas voltaje de Salida-Entrada.

Para medir la corriente, se decidió utilizar una resistencia en serie con la carga. El valor de esta resistencia debe asegurarse de no disipar más del 5% de la carga total en salida. Este arreglo de resistencia permite medir el voltaje a través de la resistencia, aplicando la ley de Ohm ($V=I \cdot R$) dentro del microcontrolador para calcular la corriente. Esta corriente es la misma que fluye a través de la carga de salida. Ver figura 20

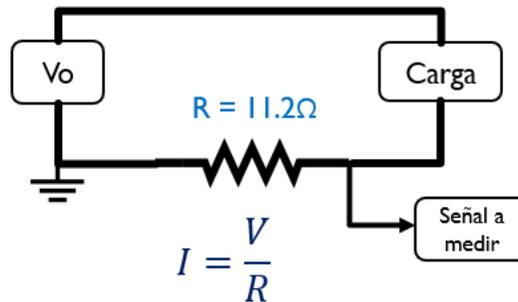


Figura. 20 Sensor de corriente.

Para el sensor de corriente, se eligió una resistencia cerámica de 10Ω con la capacidad de disipar 10W de potencia. Esta selección se hizo para poder medir corrientes inferiores a 1 Amperio de manera precisa. Para asegurar una lectura

precisa, se midió la resistencia con un multímetro, y se utilizó el promedio de los valores obtenidos en la ecuación para calcular con precisión la corriente.

3.7. Diseño del circuito impreso.

El diseño del circuito impreso se llevó a cabo utilizando el software de desarrollo Proteus. En este programa, se implementaron tanto el circuito electrónico del convertidor DC-DC como el del microcontrolador, además de una fuente reguladora de voltaje para proporcionar 5VCC, el driver para el MOSFET y la implementación del sensor de voltaje y corriente. Este enfoque permitió crear un circuito compacto, optimizando así el sistema en su totalidad. Ver figura 21.

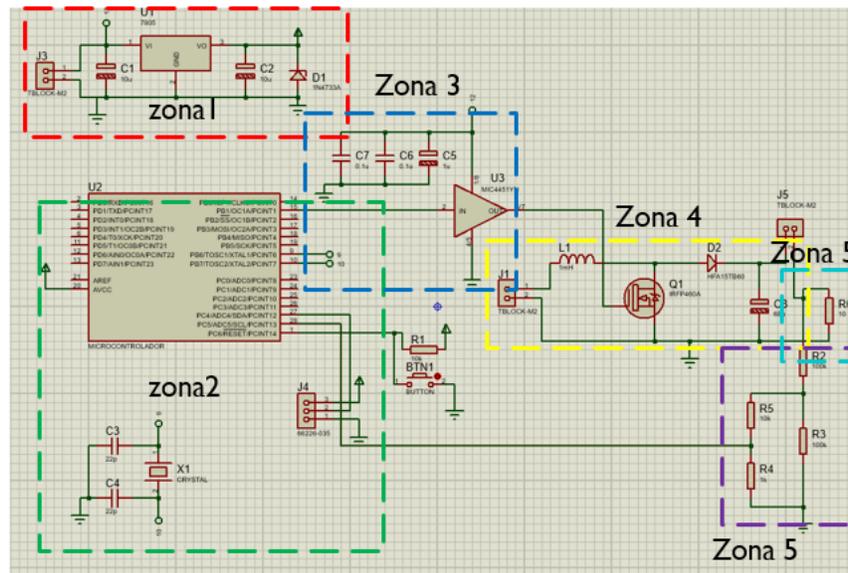


Figura. 21 Diagrama eléctrico del PCB.

En la primera sección, encontramos el regulador de voltaje que convierte 12VDC a 5VDC. Esta transformación asegura un suministro seguro al sistema desde el panel solar y proporciona los 5VDC necesarios para el funcionamiento del microcontrolador. En la segunda sección se encuentra el microcontrolador, donde

se ha programado el algoritmo propuesto. La tercera sección alberga el driver de activación del MOSFET, que permite controlar el MOSFET utilizando una salida del microcontrolador. La cuarta sección está ocupada por el convertidor DC-DC de tipo boost. Por último, en las secciones 4 y 5, se encuentran el sensor de voltaje y el sensor de corriente, respectivamente.

Después de validar el circuito electrónico, se procedió a diseñar el PCB utilizando el mismo software de Proteus. Durante este proceso, se validó el grosor de las pistas teniendo en cuenta la corriente pico que circularía por ellas y siguiendo la norma de diseño de PCB IPC-2221. El software incorpora esta norma de diseño, lo que permitió una validación efectiva durante el proceso de diseño del PCB.

En la figura 22, se muestra el diseño tridimensional del circuito en la placa fenólica. Esta visualización en 3D permite asegurar que los componentes estén colocados de manera adecuada, permitiendo la circulación del aire entre ellos. Esto no solo mejora la temperatura general del circuito, sino que también abre la posibilidad de añadir disipadores en componentes críticos, como el MOSFET.

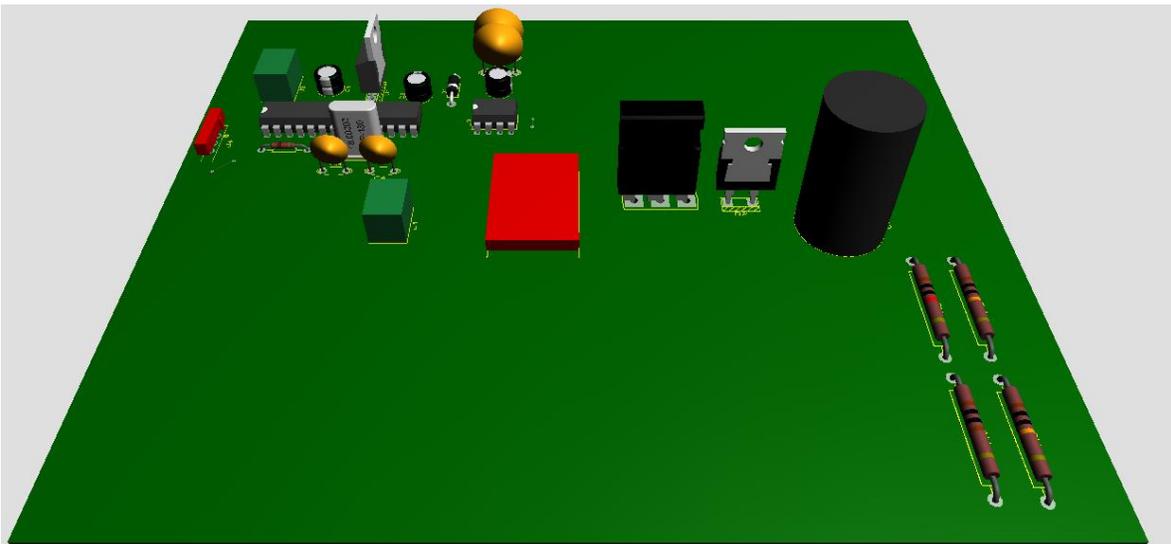


Figura. 22 Vinculación 3D del circuito impreso.

A pesar de que en la visualización 3D se nota un gran espacio sin componentes, este espacio está reservado para las pistas que necesitan tener un tamaño

adecuado para manejar las corrientes pico previstas (8 amperios). Estas pistas son lo suficientemente anchas para evitar el sobrecalentamiento y asegurar un flujo de corriente estable a través del circuito.

3.8. Propuesta de algoritmo de control

La parte fundamental de esta investigación se enfoca en el desarrollo de un algoritmo que permita localizar el punto de máxima potencia (MPPT) para extraer la mayor cantidad de energía eléctrica, tanto en condiciones normales como en presencia de sombreado parcial.

El algoritmo de "perturba y observa" es ampliamente utilizado en sistemas fotovoltaicos debido a su simplicidad de ejecución. Consiste en modificar el ancho de pulso de frecuencia y comparar la potencia actual con la anterior. De esta manera, el algoritmo realiza incrementos o decrementos en el ancho de pulso de frecuencia para determinar el punto de operación óptimo del sistema fotovoltaico. Esta técnica se utiliza para optimizar la eficiencia del sistema y garantizar la máxima extracción de energía.

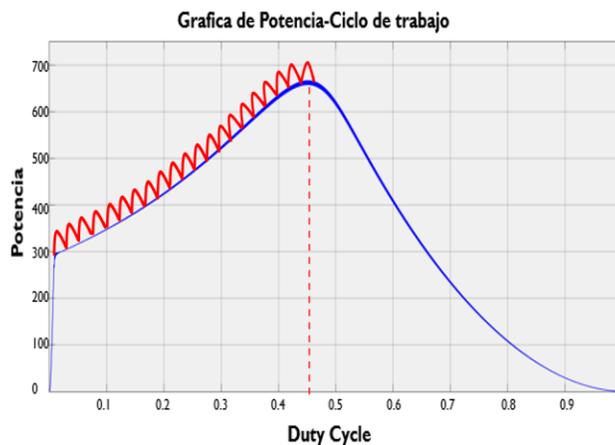


Figura. 23 Algoritmo de control P&O.

En la Figura 23, se puede observar el comportamiento del algoritmo de control P&O. Inicia con un ciclo de trabajo del 1% para posteriormente incrementa gradualmente este valor. Durante este proceso, el algoritmo compara la potencia actual con la

anterior. Si la potencia actual es mayor, el ciclo de trabajo se incrementa nuevamente. Este ciclo continúa hasta que el algoritmo detecta que la potencia actual es menor que la anterior. En este punto, se reduce el ciclo de trabajo, creando una oscilación alrededor del punto máximo de potencia (MPPT) detectado. Este algoritmo es eficiente para encontrar el MPPT, pero en situaciones de sombreado parcial, solo puede identificar una cresta y oscilar alrededor de ella sin determinar si es el verdadero MPPT, como se muestra en la Figura 24.

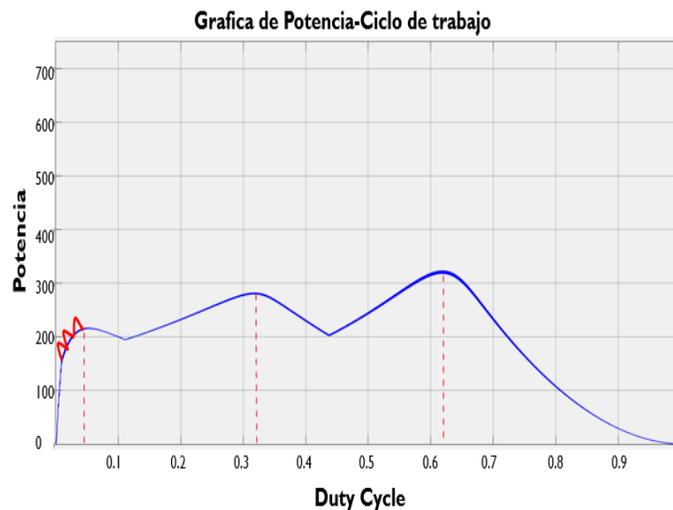


Figura. 24 Algoritmo de P&O en condiciones de sombreado parcial.

Este comportamiento del algoritmo ilustra su limitación en condiciones de sombreado parcial. Aunque es efectivo en situaciones de irradiación solar uniforme, su rendimiento se ve comprometido cuando se enfrenta a cambios en la intensidad de la luz, como ocurre durante el sombreado parcial. Esta limitación llevo a la necesidad de explorar un algoritmo más sofisticados y adaptativos para optimizar la extracción de energía en condiciones variables.

Para lograr esto, se propuso una modificación al algoritmo P&O. En primer lugar, se lleva a cabo un barrido inicial del ciclo de trabajo. Durante esta fase, se localizan los valores del ciclo de trabajo para identificar la cresta donde se encuentra el Punto de Máxima Potencia (MPPT). Una vez identificada esta cresta durante el barrido inicial,

se activa el algoritmo de Perturbar y Observar (P&O) para estabilizar la operación en el punto óptimo de máxima potencia.

Este enfoque híbrido permite una exploración más amplia del espacio de búsqueda antes de aplicar el algoritmo P&O. Al realizar el barrido inicial, se obtiene una comprensión más profunda del comportamiento de la curva de potencia-voltaje del panel solar. Esto facilita una transición más suave hacia el algoritmo P&O, asegurando que se alcance el verdadero MPPT y se mantenga la extracción óptima de energía.

Esta estrategia mejorada se optimiza el proceso de búsqueda del MPPT, especialmente en situaciones dinámicas como el sombreado parcial. La combinación de un barrido inicial y el algoritmo P&O proporciona una solución más precisa y adaptable para la optimización del MPPT, lo que se traduce en un rendimiento mejorado y una mayor producción de energía eléctrica a partir de los paneles solares.

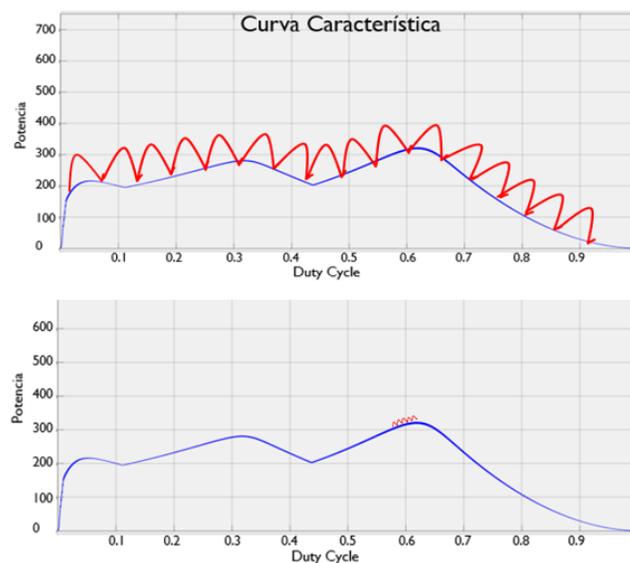


Figura. 25. Algoritmo de P&O con barrido de ciclo de trabajo.

En la Figura 25 se muestra el comportamiento del algoritmo propuesto. En este diagrama, el algoritmo inicia realizando un barrido del ciclo de trabajo, almacenando

la información de la potencia en cada punto en una matriz. Una vez que se completa el barrido, se lleva a cabo una comparativa para identificar la cresta donde se encuentra el Punto de Máxima Potencia (MPPT). Luego, se emplea el algoritmo de Perturbar y Observar (P&O) para estabilizar el sistema y extraer la mayor cantidad de energía eléctrica posible.

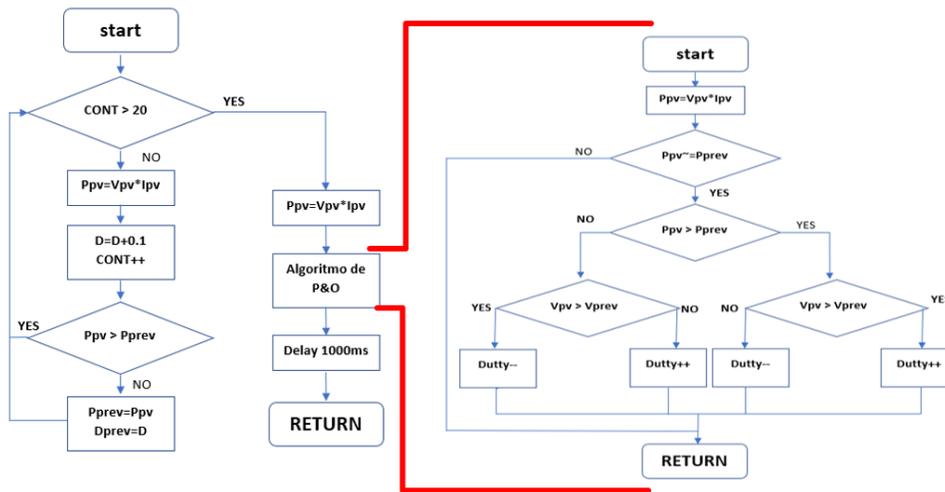


Figura. 26 Diagrama de flujo de P&O con barrido de frecuencia.

En la figura 26, a la izquierda se aprecia el algoritmo propuesto, encargado de realizar el barrido de ciclo de trabajo y la comparativa de la potencia en los distintos puntos para localizar la cresta donde se sitúa el MPPT. Posteriormente, en el lado derecho de la figura 26, se muestra el algoritmo de P&O en acción. Este último se ejecuta una vez que se ha identificado la ubicación del MPPT mediante el barrido previo.

Capítulo IV

Pruebas y resultados

4.1. Introducción

En esta sección del desarrollo de la tesis, se llevó a cabo una comparación en simulación entre el algoritmo propuesto y el método P&O. Durante este proceso, se realizaron simulaciones de condiciones de sombreado parcial utilizando los modelos de paneles solares definidos en Simulink. Después de validar la información obtenida, se procedió a implementar el algoritmo propuesto para llevar a cabo la comparación con un algoritmo de lógica difusa. Durante el proceso, se simularon condiciones de sombreado parcial utilizando paneles solares monocristalinos de 1.25 Watts de potencia.

4.2. Simulación de algoritmo propuesto en simulink

En la versión 2020 y posteriores del entorno de desarrollo de Simulink, se ha incorporado una librería dedicada a las energías renovables. En esta carpeta, se encuentran procesos de generación eléctrica limpia, como generadores hidráulicos, eólicos y sistemas fotovoltaicos. Al elegir el componente que simula el panel solar en esta librería, se pueden seleccionar las características específicas del panel o incluso utilizar números de identificación de paneles solares comerciales. Esto proporciona una gran flexibilidad para simular diferentes tipos de paneles solares en condiciones variadas. Esta funcionalidad se muestra en la Figura 27.

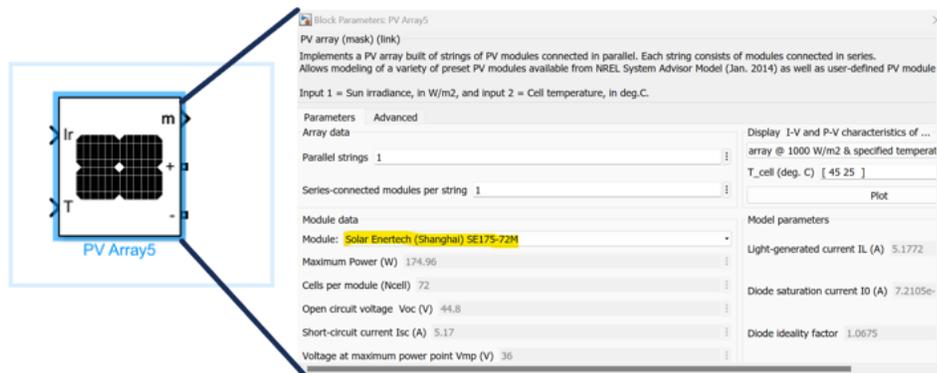


Figura. 27. Panel solar integrado en simulink.

Como se muestra en la Figura 27, Simulink en sus versiones más recientes incluye diversas configuraciones para simular de manera precisa el comportamiento de los paneles solares en situaciones reales. Para esta investigación, se seleccionó un arreglo de panel individual de la marca Solar Enertech con el número de identificación SE175-72. Este panel tiene una curva característica Potencia-Voltaje, que se muestra en la Figura 28.

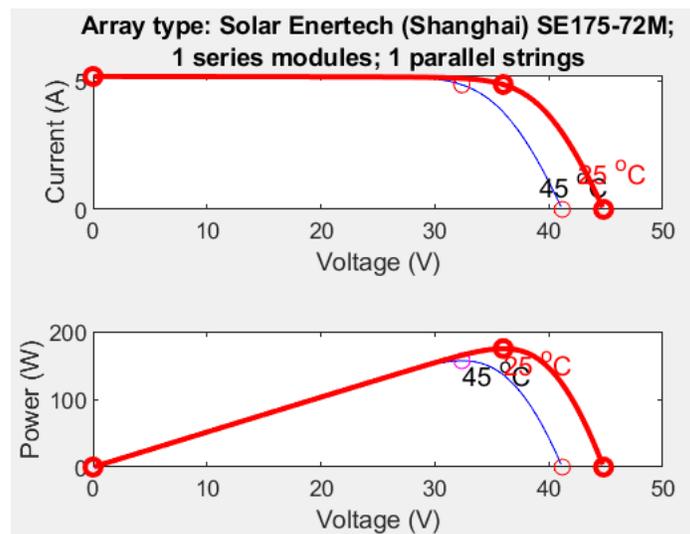


Figura. 28 Gráfica potencia-voltaje y corriente-voltaje del panel solar SE175-72

La gráfica presentada en la Figura 28 es de suma importancia, ya que representa el comportamiento esperado del panel solar considerando una radiación uniforme de $1000\text{W}/\text{m}^2$ a una temperatura de 25°C . Para el proceso de simulación se emplearon 4 paneles solares con las mismas características, pero se modifica la cantidad de radiación que recibe cada panel solar para simular las condiciones de sombreado parcial y validar el comportamiento que tiene el algoritmo en estas condiciones.

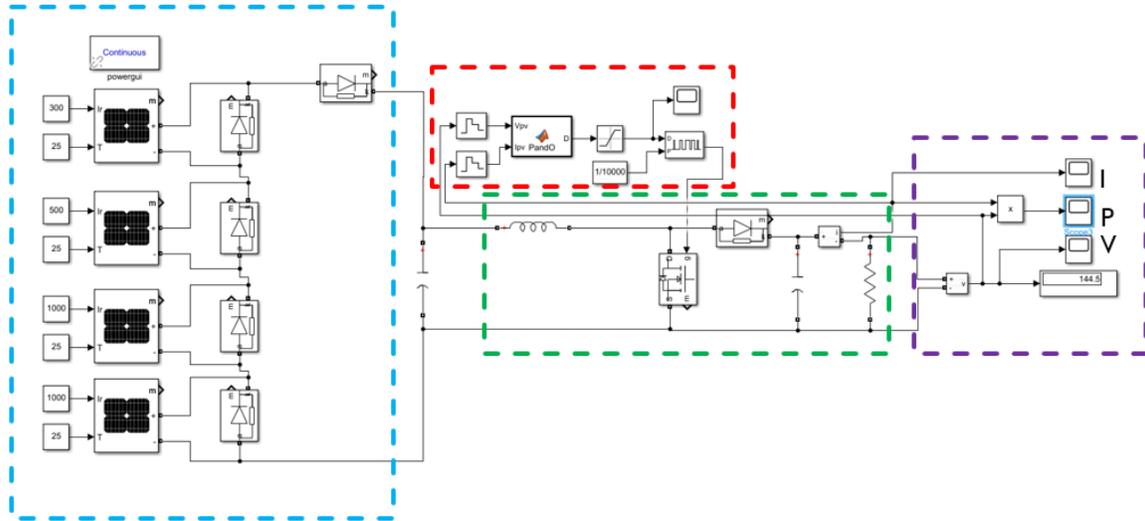


Figura. 29 Esquema completo de simulación.

En la Figura 29 se presenta el diagrama completo en Simulink. En la zona azul, se pueden observar los 4 paneles solares conectados en serie. A la izquierda de cada panel se especifica la temperatura de trabajo (T) de 25°C y la radiación captada por cada panel solar (IR), que varía entre valores de 100 a 1000W/M2 para simular las condiciones de sombreado parcial. En la zona verde se encuentra el convertidor DC-DC, cuyos valores están detallados en el Capítulo 3 y se muestran en la Tabla 2 del mismo capítulo. En la zona roja se encuentra el bloque de programación que aloja el algoritmo propuesto. Finalmente, en la zona morada se ubican los componentes de visualización que permiten observar el comportamiento a la salida del convertidor DC-DC, incluyendo voltaje (V), corriente (I) y potencia (P).

Con el circuito armado, es posible llevar a cabo las simulaciones necesarias para evaluar el comportamiento del sistema en condiciones de sombreado parcial.

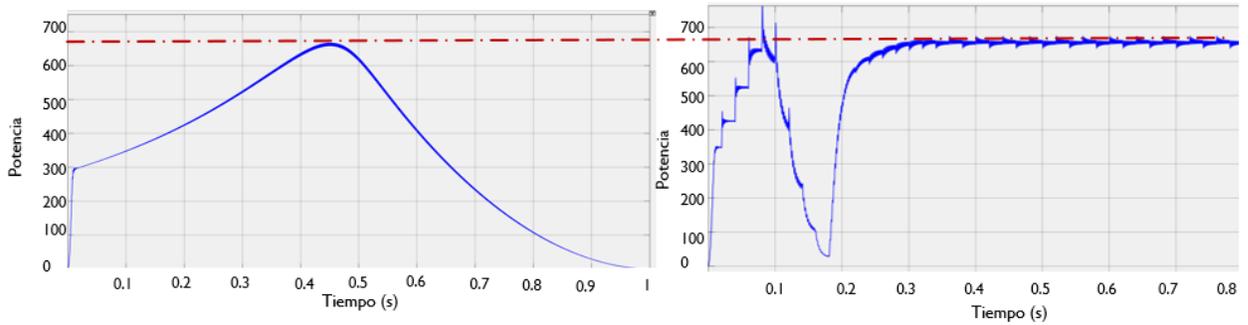


Figura. 30 Comportamiento a la salida del Convertidor DC-DC.

En la Figura 30, se presenta el comportamiento del convertidor DC-DC. En el lado izquierdo de la gráfica, se realizó un barrido del ciclo de trabajo para mostrar la curva característica del conjunto de paneles solares. Se observa que la potencia máxima que los paneles solares pueden proporcionar es de 699 Watts. Es importante mencionar que cada panel, en condiciones ideales, está configurado para suministrar 174.96 Watts en condiciones de radiación de 1000W/M². Al multiplicar esta potencia individual por el número de paneles (4 en este caso), se verifica que la potencia total que se puede extraer en condiciones ideales es de 699.84 Watts.

En la gráfica de la derecha, se muestra el comportamiento a la salida del convertidor DC-DC, que integra el algoritmo propuesto. En los primeros 0-0.2 segundos, se realiza el barrido del ciclo de trabajo, lo que muestra una similitud con la gráfica de la izquierda. Posteriormente, se ejecuta el algoritmo de P&O para extraer la máxima potencia posible, que corresponde a 699 Watts, verificando que tiene un comportamiento ideal

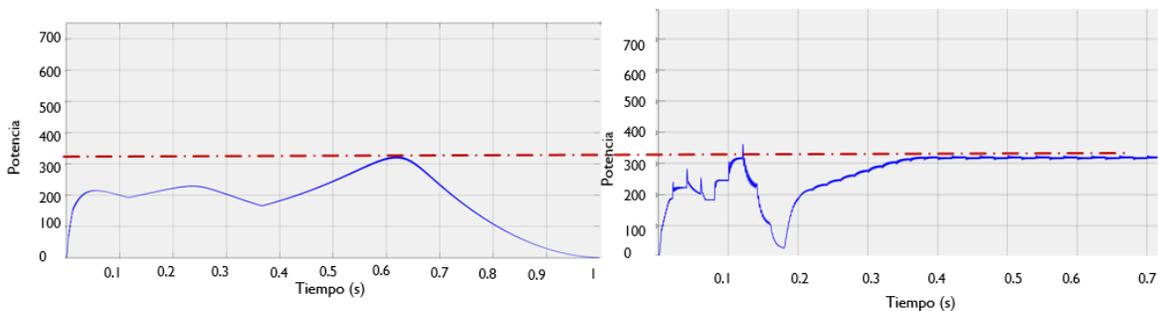


Figura. 31 Comportamiento del algoritmo en condiciones de sombreado parcial.

En la Figura 31, se muestra el comportamiento a la salida del convertidor DC-DC en condiciones de sombreado parcial. En esta simulación, se establecieron condiciones donde dos paneles solares reciben una radiación de 1000W/M², un panel recibe 300 W/M² y otro panel recibe 400 W/M².

En la gráfica de la derecha de la Figura 31, se llevó a cabo un barrido de ciclo de trabajo para observar el comportamiento del conjunto de paneles solares. Es importante destacar que se identifican 2 máximos locales y 1 máximo global, lo que indica el área donde se puede operar de forma óptima para extraer la máxima energía.

En el lado derecho de la figura, se muestra el comportamiento del algoritmo de control propuesto. Desde el segundo 0 hasta el 0.18, el algoritmo realiza un barrido de ciclo de trabajo para localizar el máximo global. Posteriormente, ejecuta el algoritmo P&O para converger en el Punto de Máxima Potencia (MPPT). Como se puede observar, el algoritmo es capaz de localizar el MPPT de manera eficiente incluso en condiciones de sombreado parcial. Esta capacidad demuestra la eficacia y precisión del algoritmo propuesto incluso en condiciones adversas.

Es importante señalar que, durante las diferentes simulaciones realizadas, se observó que en los primeros segundos de ejecución del algoritmo se crea una gráfica similar a la curva característica de potencia. Esta similitud facilita la identificación óptima del MPPT en diversas condiciones. Esta característica demuestra la eficacia del algoritmo al generar una representación gráfica que se asemeja a la curva de potencia, lo que simplifica la tarea de converger en el MPPT de manera precisa y eficiente, incluso en situaciones de sombreado parcial.

4.3. Comparación con algoritmo con P&O simulación.

Siguiendo el proceso de validación del algoritmo, se llevó a cabo una comparación entre el algoritmo propuesto y el de P&O. La elección de compararlo con el algoritmo P&O se basa en su amplia utilización en convertidores y centros de carga de sistemas fotovoltaicos y también cabe señalar que el algoritmo propuesto

es una modificación de P&O, lo que permite una comparación directa y precisa entre ambos métodos.

Esta comparativa se realizó para evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto en diferentes condiciones, incluyendo situaciones de sombreado parcial. El objetivo era determinar cómo se desempeña el algoritmo frente a uno de los enfoques tradicionales y bien establecidos en el campo de los sistemas fotovoltaicos. Este análisis proporciona una comprensión clara de la eficacia y la precisión del algoritmo propuesto en la identificación del MPPT en diversas condiciones operativas.

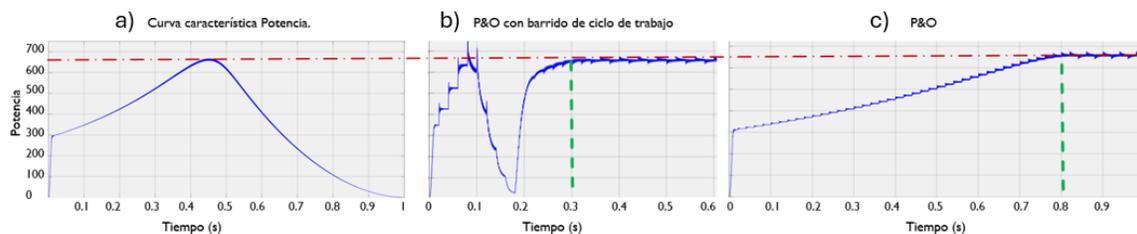


Figura. 32 Comparativa de algoritmo propuesto y P&O.

En la figura 32 se muestra el comportamiento del convertidor DC-DC en la salida. Se ha graficado la curva característica de potencia de los 4 paneles, figura 32 a, solares los cuales reciben una radiación homogénea de $1000\text{W}/\text{M}^2$, lo que nos permite observar que la potencia máxima que se puede obtener es de 699 Watts. En el algoritmo propuesto, figura 32 b, como se ha observado en ocasiones anteriores, se demuestra la capacidad del algoritmo para localizar el MPPT. Además, se nota que el algoritmo de P&O, figura 32, también logra encontrar el MPPT, pero de manera menos eficiente, ya que tarda aproximadamente 0.8 segundos en localizar el punto óptimo, mientras que el algoritmo propuesto puede converger en tan solo 0.3 segundos.

Esta diferencia en el tiempo de convergencia es significativa, ya que demuestra la eficacia del algoritmo propuesto para adaptarse rápidamente a las variaciones en las condiciones de operación y encontrar el MPPT de manera más rápida y precisa en comparación con el algoritmo de P&O. Esta mejora en la eficiencia del algoritmo puede traducirse en un rendimiento superior del sistema fotovoltaico en situaciones

del mundo real, especialmente en condiciones variables como el sombreado parcial, las cuales se mostrarán continuación.

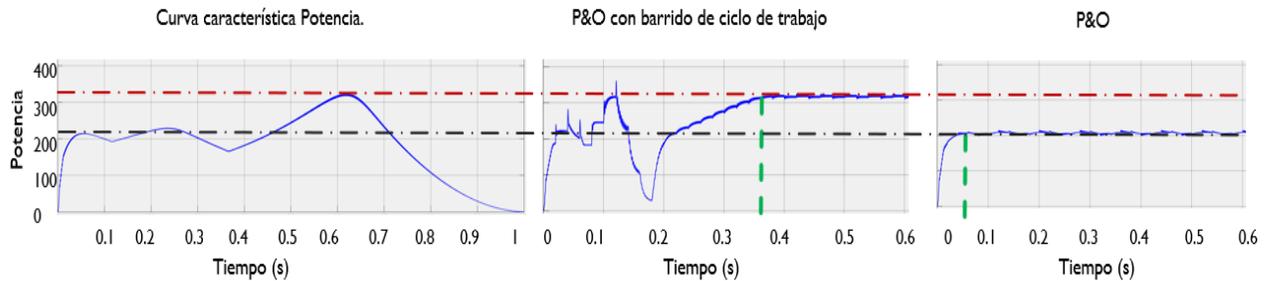


Figura. 33 Comparativa del algoritmo propuesto y P&O en condiciones de sombreado parcial.

En la figura 33 se presenta el comportamiento de los diferentes algoritmos en condiciones de sombreado parcial. Para esta simulación, se han considerado dos paneles solares con una radiación de 1000W/m^2 , uno de 300W/m^2 y otro de 400W/m^2 , con el objetivo de simular condiciones de sombreado parcial.

En la curva característica de potencia, observamos que en condiciones de sombreado parcial se forman tres crestas, pero solo en una de ellas se localiza el Punto de Máxima Potencia (MPPT). El algoritmo de P&O con barrido de ciclo de trabajo, logra identificar este punto, extrayendo una cantidad de potencia de 330 Watts. Por otro lado, el algoritmo de P&O solo es capaz de localizar la primera cresta, en la cual solo se logra extraer 210 Watts, desperdiciando aproximadamente 120 Watts. Aunque en esta ocasión el algoritmo de P&O muestra una respuesta más rápida que en las simulaciones anteriores, aún no logra converger en el MPPT de manera eficaz.

Estos resultados subrayan la capacidad superior del algoritmo propuesto por el autor de esta tesis para adaptarse a condiciones de sombreado parcial y encontrar el MPPT de manera más precisa y eficiente en comparación con el algoritmo de P&O. La diferencia en la cantidad de potencia extraída demuestra la eficacia del nuevo algoritmo, así como la velocidad de convergencia hace que el algoritmo sea óptimo para la implementación en sistemas fotovoltaicos.

4.4. Banco de Pruebas

En las simulaciones, se pudo observar un rendimiento óptimo del algoritmo propuesto, tanto en la localización del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en condiciones de sombreado parcial, como en una velocidad de respuesta superior en comparación con algoritmos tradicionales como el de Perturbación y Observación (P&O). En esta sección, se abordará la implementación del convertidor DC-DC y del algoritmo propuesto para verificar que la información mostrada en las simulaciones corresponda a los resultados obtenidos en la implementación práctica.

Para llevar a cabo esta implementación, se creó un banco de pruebas que permite la conexión a un sistema de 4 paneles solares de 1.25 Watts. En este banco de pruebas, se simularán condiciones de sombreado parcial para verificar el comportamiento de los paneles solares en dichas condiciones y, especialmente, para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto.

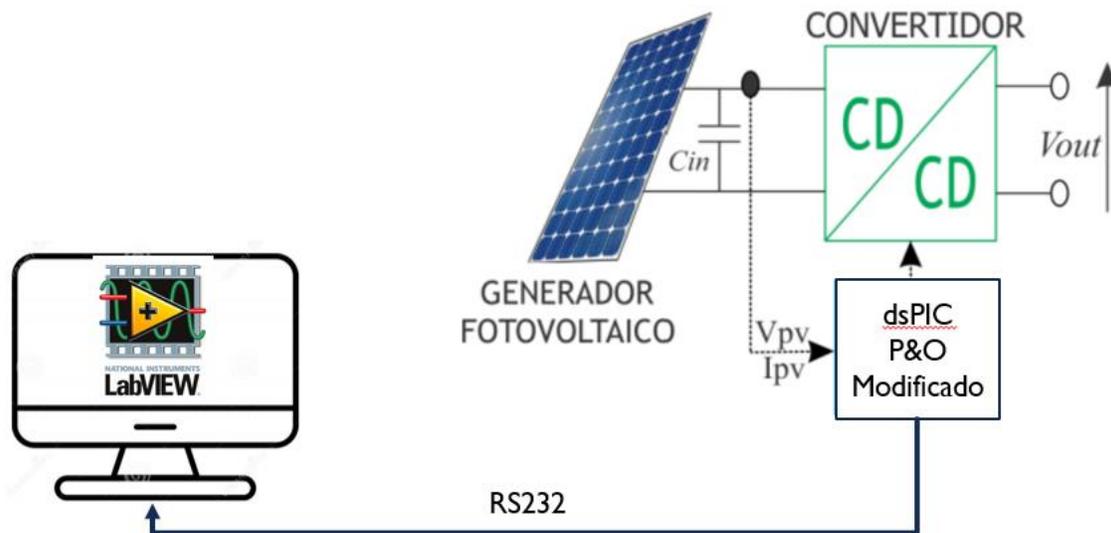


Figura. 34 Representación esquemática del banco de pruebas.

En la Figura 34 se presenta un esquema del banco de pruebas, que incluye cuatro paneles solares policristalinos con una potencia de 1.25 Watts cada uno. También se ha integrado el convertidor DC-DC diseñado y un dsPic, en el cual se implementará el algoritmo propuesto. Este dsPic se comunicará mediante un protocolo de comunicación RS232 con un ordenador, donde transmitirá en tiempo

real el valor de potencia y el ciclo de trabajo. Esto permitirá procesar la información en LabVIEW y visualizar de manera gráfica el comportamiento del sistema, lo que facilitará la evaluación de su desempeño.

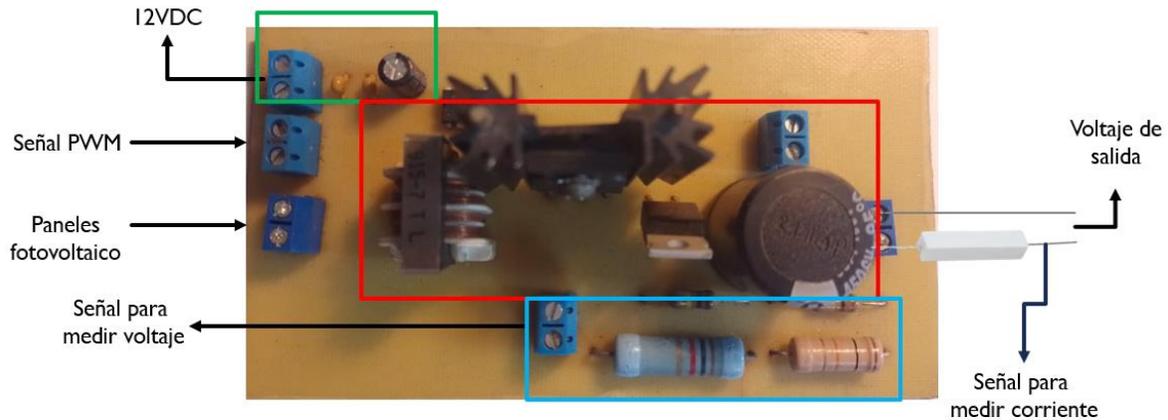


Figura. 35 Placa eléctrica del convertidor DC-DC, y los sensores de voltaje y corriente.

En la Figura 35, se muestra el diseño de la placa electrónica. En la zona verde, se encuentra la alimentación del driver del MOSFET, que opera en un rango de voltajes de 9 a 18 VDC. La zona roja indica la ubicación del convertidor DC-DC. En la figura, se han señalado las entradas de alimentación, la señal de control PWM, el acoplamiento con los paneles solares y las señales provenientes de los sensores de voltaje y corriente. Esto permite una clara visualización de la disposición y conexión de los componentes en la placa electrónica.

Las señales de los sensores de corriente y voltaje son enviadas a un dsPIC. Estos valores son utilizados para realizar los ajustes necesarios en el ciclo de trabajo, según el algoritmo programado, con el objetivo de localizar el MPPT.

Esta interfaz RS323 se utiliza para enviar la información sobre la potencia y el ciclo de trabajo a un equipo de computadora, lo que permite analizar el comportamiento de estos componentes durante la ejecución del algoritmo.

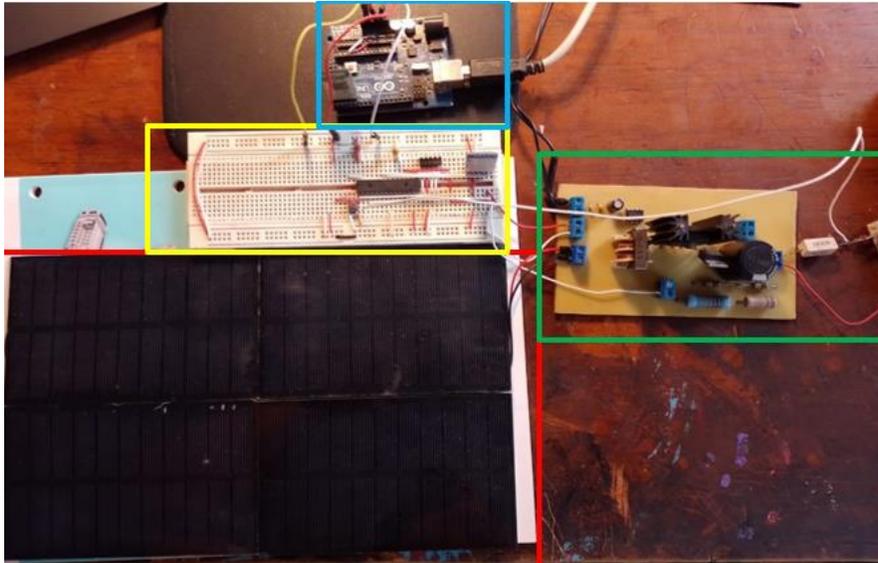


Figura. 36 Banco de pruebas.

En la figura 36 se observa el banco de pruebas implementado. En la zona roja se encuentran los 4 paneles solares, mientras que en la zona verde está implementado el convertidor DC-DC, el cual está conectado a dsPIC (marcado en amarillo) para el control del ciclo de trabajo y poder localizar el MPPT. Por último, en la zona azul se encuentra la interfaz utilizada para la conversión de señal RS323 empleada por dsPIC a un protocolo USB para la interacción con la interfaz de LABVIEW.

La información enviada por el dsPIC, a través de su puerto RS232 es recibida por el equipo de cómputo, de esta forma se procesa con LABVIEW. Para lograr hacer esto la primera es seleccionar el puerto de comunicación y la velocidad de transferencia, ver figura 37.

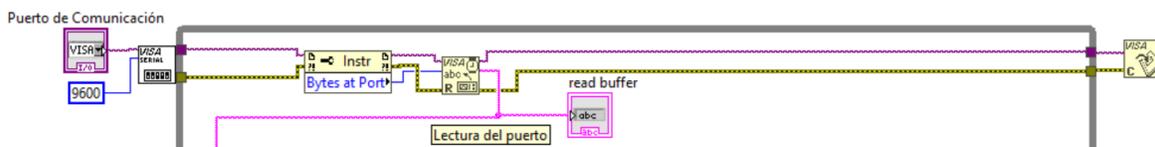


Figura. 37 Etapa de lectura de puerto serial.

En esta sección de adquisición de información, se utiliza un bloque con el cual se puede escanear y seleccionar el puerto de adquisición de información desde la interfaz principal, la velocidad de transferencia se mantiene fija a 9600 baudios.

Luego, se emplea un bloque para leer la información del puerto serial. A la salida de este bloque se obtiene una cadena de caracteres, identificada en color rosa, esta cadena de caracteres es mostrada en un display en la interfaz del usuario. Esto permite visualizar que la información se está recibiendo correctamente.

Posterior a la etapa de recopilación de información, se procesan los datos. Es importante destacar que el microcontrolador decodifica la información siguiendo el formato WXX, PXX. Aquí, 'W' representa el ciclo de trabajo y 'P' indica el valor de la potencia. Las XX indican valores hexadecimales. Para procesar esta información, se comienza separando el primer dato para determinar si corresponde al ciclo de trabajo o a la potencia. Luego, se realiza una conversión de datos hexadecimales a valores numéricos. Esto se realiza para preparar los datos para su visualización y análisis posterior. Este proceso está detalladamente representado en la figura 38.

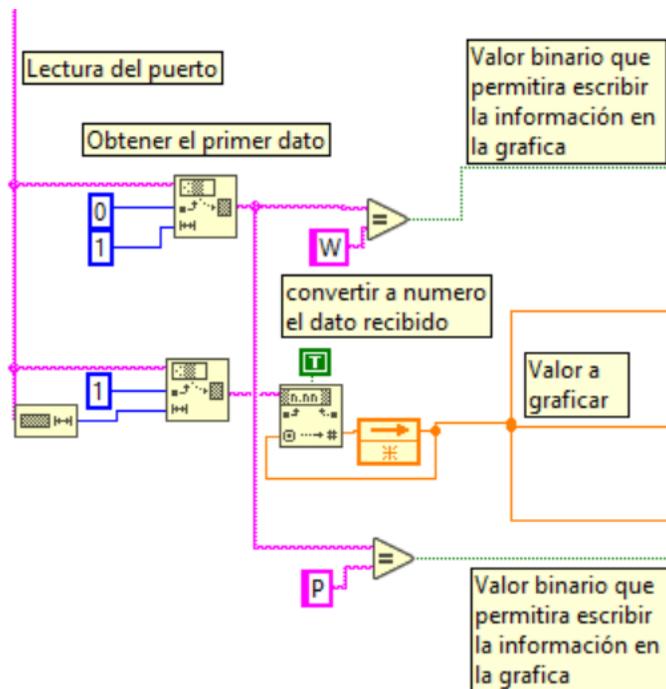


Figura. 38 Procesamiento de la información recibida.

Determinar si el valor recibido corresponde al ciclo de trabajo o a la potencia es crucial para visualizar la información de manera efectiva. Este proceso se realiza mediante un ciclo condicional IF, que permite mostrar los datos en el gráfico correspondiente, solo si el tipo de dato concuerda con la gráfica seleccionada.

Después de esta verificación, se lleva a cabo un acondicionamiento de señales para presentar la información de forma clara y comprensible en las gráficas correspondientes. Este paso asegura que los datos se representen de manera precisa y significativa para su análisis posterior. Ver figura 39.

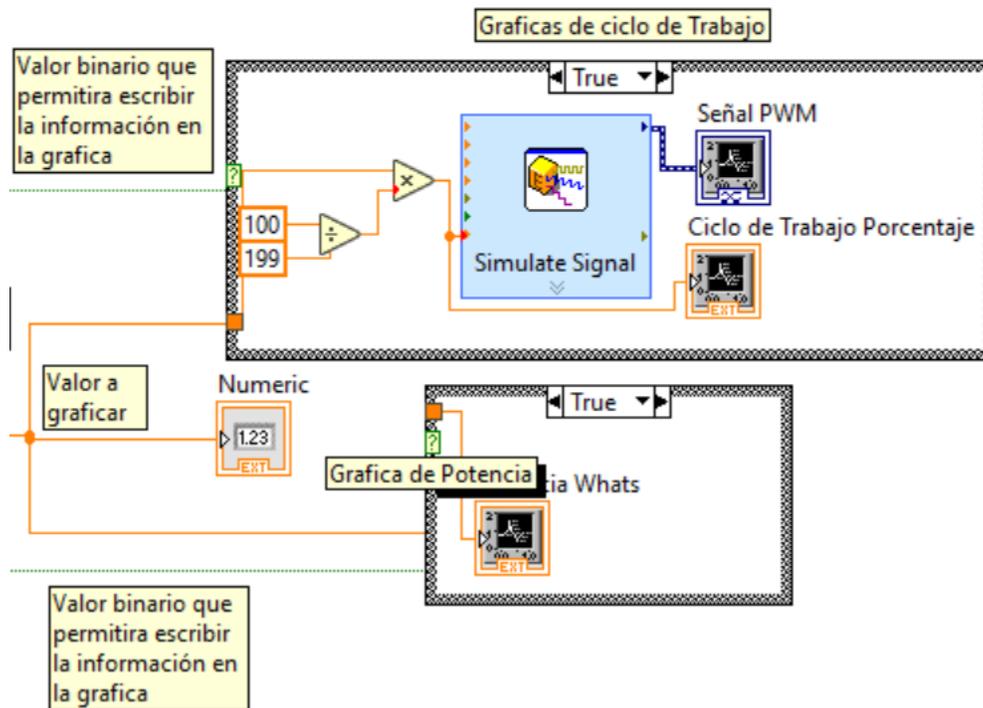


Figura. 39 Etapa de visualización de información.

El programa completo se presenta en la Figura 40, donde se puede observar que está contenido dentro de un ciclo while con un temporizador de 10 ms. Esta estructura permite que el algoritmo se ejecute continuamente hasta que se oprima manualmente el botón de paro. Además, el temporizador de 10 ms garantiza que los datos se recopilen del puerto serial en intervalos regulares, evitando la saturación del bus y asegurando la recepción precisa de información sin errores.

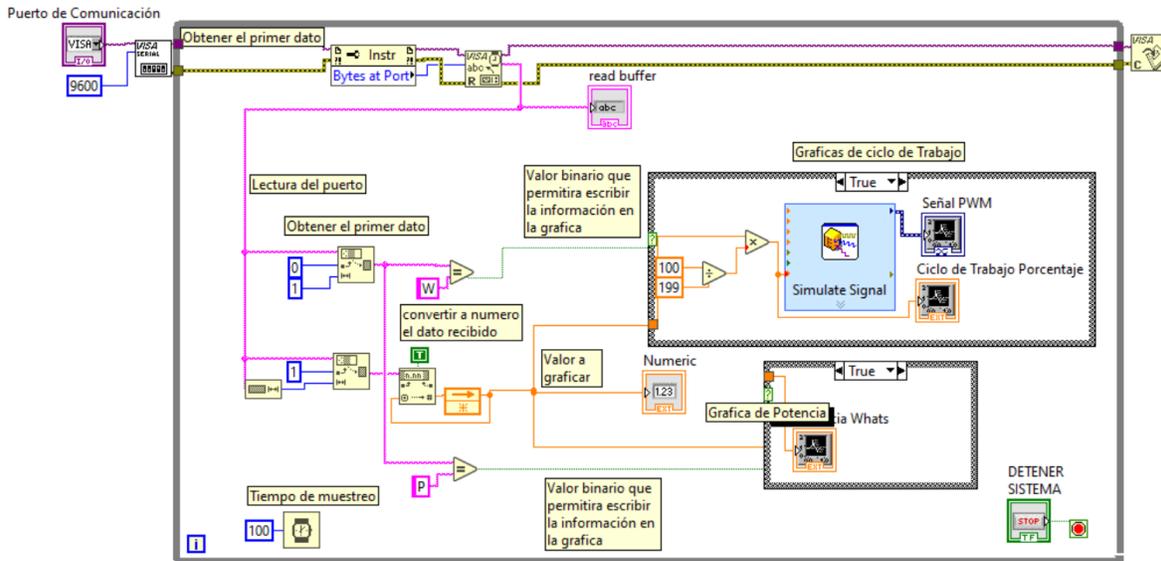


Figura. 40 Programa completo de procesamiento de datos para visualización.

4.5. Algoritmo en condiciones de sombreado parcial

La implementación del algoritmo se realiza para validar la información obtenida en simulaciones, para realizar esto se simularán condiciones de sombreado parcial obstruyendo los paneles solares en diferentes posiciones logrando hacer que se creen distintas crestas, dificultado la localización del MPPT.

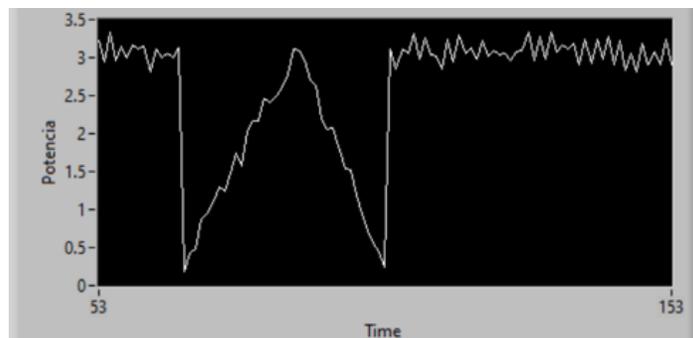


Figura. 41 Gráfica del comportamiento de la potencia a la salida del convertidor DC-DC.

En la Figura 41, se presenta el comportamiento de la potencia a la salida del convertidor DC-DC, en la cual los paneles solares se encuentran sin operación alguna. Es evidente que, durante los primeros segundos, el sistema realiza un barrido del ciclo de trabajo, como se puede apreciar en la Figura 41, se despliega la

curva característica. El punto máximo de esta curva se encuentra en los 3.25 Watts. Posteriormente, el algoritmo se ajusta para interceptar el Punto de Máxima Potencia (MPPT) y oscilar alrededor de este punto. Es notable que este comportamiento es coherente con las simulaciones realizadas. Es importante destacar que el barrido del ciclo de trabajo permite generar una curva característica que facilita la identificación visual del MPPT, asegurando así una correcta operación del sistema.

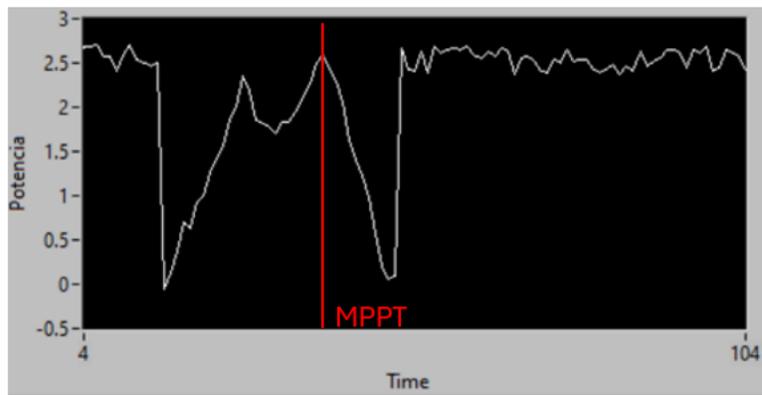


Figura. 42 Gráfica del comportamiento de la potencia a la salida del convertidor DC-DC en condiciones de sombreado parcial.

En las condiciones de sombreado parcial, se realizaron obstrucciones parciales en los paneles solares, de modo que cada panel recibiera una radiación diferente, generando así distintas crestas en la curva característica. En la Figura 42, se observa que bajo estas condiciones de sombreado se forman dos crestas de valores similares sin embargo el MPPT se sitúa en la segunda cresta, como se indica en la gráfica. Es importante notar cómo el algoritmo primero crea la curva característica, esto por el barrido de ciclo de trabajo para luego posicionarse sobre el MPPT con ayuda del algoritmo de P&O y oscilar alrededor de este punto óptimo.

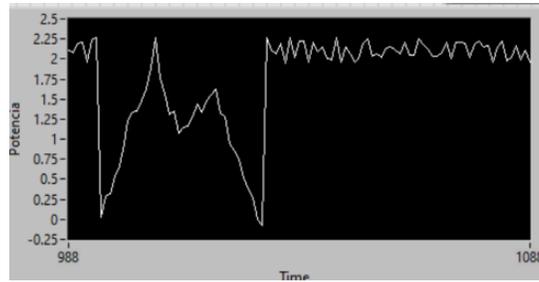


Figura. 43 Potencia a la salida del convertidor DC-DC.

Se realizó una segunda prueba con una obstrucción parcial en otra zona de los paneles solares, lo que generó una curva de potencia diferente. Como se muestra en la Figura 43, se forman dos crestas, pero en esta ocasión el MPPT se encuentra en la primera cresta, con un valor de 2.25 Watts. Como se ha observado en múltiples ocasiones, en los primeros segundos de ejecución se Gráfica una curva característica de potencia. Luego, el algoritmo de P&O se activa para oscilar sobre el MPPT y extraer la mayor cantidad de energía.

Es importante destacar que este comportamiento observado en la implementación coincide con los resultados obtenidos en las simulaciones. Durante los primeros segundos de ejecución, cuando se realiza el barrido de ciclos de trabajo, se crea una curva característica que proporciona información sobre en qué cresta se encuentra el MPPT. Posteriormente, el algoritmo de P&O se ejecuta eficientemente para ubicar el valor real del MPPT. Esta condición garantiza que el algoritmo sea capaz de extraer la máxima potencia incluso en condiciones de sombreado parcial.

4.6. Comparación del algoritmo que desarrolle y lógica difusa

Para asegurar la óptima localización del Punto de Máxima Potencia (MPPT), se llevó a cabo una comparación con un algoritmo de lógica difusa desarrollado por el Ing. Israel Adrián Pérez Ávila bajo la supervisión del Dr. Diego Seuret Jiménez. Este algoritmo se basa en lógica difusa y fue implementado en un FPGA. Sin embargo, no se había realizado la implementación con un convertidor DC-DC. Para la comparación, se utilizó el convertidor DC-DC diseñado en esta investigación, así como también los sensores propuestos.

La implementación de ambos algoritmos se realizó en condiciones idénticas, lo que permitió una comparación justa y precisa del rendimiento de cada uno. Este proceso garantizó una evaluación adecuada de la capacidad del algoritmo propuesto para localizar con precisión el MPPT, incluso en situaciones complejas como el sombreado parcial.

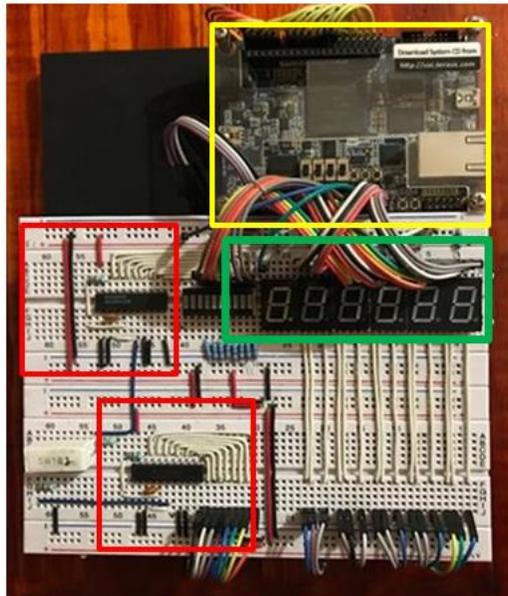


Figura. 44 Control difuso para la localización del MPPT, basado en FPGA.

El sistema de control difuso, representado en la figura 44, está compuesto por dos convertidores analógico-digital de 8 bits, señalizados en la zona roja, utilizados para leer los sensores de corriente y voltaje. Para procesar la información mediante las reglas difusas diseñadas, se emplea un FPGA, señalado en por el color amarillo. Para la visualización, se utilizaron 6 displays de 7 segmentos que muestran la información de la potencia obtenida y el error. Estos datos son fundamentales para realizar la comparación con el algoritmo diseñado.

El sistema se compone principalmente de cuatro bloques funcionales fundamentales, los cuales están desarrollados en el software Quartus II y programados en la tarjeta FPGA. La arquitectura lógica del sistema, representada en la Figura 45, se basa en los siguientes bloques:

Bloque 1 - Cálculos:

En este bloque, se adquiere la información del sensor de corriente y voltaje para procesarla previamente y prepararla para su posterior análisis.

Bloque 2 - Sistema Lógico Difuso:

La información procesada se somete a las reglas difusas programadas en este bloque para tomar decisiones basadas en lógica difusa. Aquí se establecen las pautas para regular el ciclo de trabajo del convertidor DC-DC y localizar el MPPT.

Bloque 3 - PWM (Modulación por Ancho de Pulso):

El sistema utiliza la información procesada y las decisiones del bloque difuso para generar la señal PWM necesaria para controlar el convertidor DC-DC de manera efectiva y encontrar el punto de máxima potencia.

Bloque 4 - Visualizador de 7 Segmentos:

En este bloque, la información del sistema se presenta visualmente utilizando display de 7 segmentos. Esto permite visualizar la potencia obtenida, lo que facilita la monitorización y evaluación del rendimiento del sistema en tiempo real.

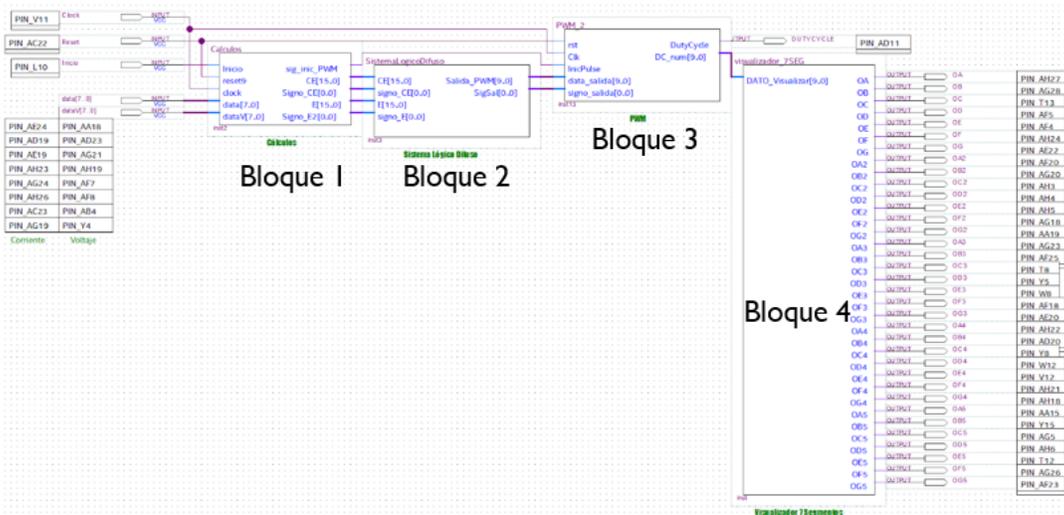


Figura. 45 Bloque de control del sistema difuso.

Para la comparativa realizada entre el algoritmo propuesto de barrido de ciclo de trabajo con P&O y el sistema difuso, se buscó realizar las pruebas bajo las mismas condiciones de radiación. Se optó por utilizar los mismos paneles solares en el mismo día, obstruyendo las mismas zonas, para poder verificar que las pruebas fueran homogéneas y pudieran desplegar información relevante en la comparativa de estos dos algoritmos. Esto aseguró que las condiciones fueran consistentes y permitió una evaluación precisa de su rendimiento en situaciones similares.

Tabla 3 Comparativa entre algoritmo de barrido de ciclo de trabajo con P&O y Lógica difusa.

Condiciones de radiación	Algoritmo	Potencia Obtenida
G1	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	3.5 Watts
	Lógica difusa	3.5 Watts
G2	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	2.3 Watts
	Lógica difusa	2.2 Watts
G3	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	1.2 Watts
	Lógica difusa	1.0 Watts
G4	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	0.8 Watts
	Lógica difusa	0.5 Watts
G5	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	1.4 Watts
	Lógica difusa	1.4 Watts
G6	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	0.5 Watts
	Lógica difusa	0.5 Watts
G7	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	2.5 Watts
	Lógica difusa	2.3 Watts
G8	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	3.1 Watts
	Lógica difusa	3.1 Watts
G9	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	0.9 Watts
	Lógica difusa	0.6 Watts
G10	Barrido de ciclo de trabajo con P&O	3.3 Watts
	Lógica difusa	3.2 Watts

En la Tabla 3 se muestra la comparación de la potencia obtenida utilizando el algoritmo de control propuesto y el algoritmo de control que emplea la lógica difusa. Se realizaron una serie de pruebas donde se obstruyeron diferentes zonas de los paneles para generar condiciones de sombreado parcial y evaluar los algoritmos. Como se observa en el algoritmo de barrido de ciclo de trabajo con P&O, se obtiene en todo momento una mayor potencia en comparación con el algoritmo de lógica difusa. Esto se debe a que la lógica difusa depende de las reglas difusas establecidas que se basan en información recolectada de forma experimental en diversas condiciones de sombreado parcial. A pesar de que la lógica difusa es un

algoritmo que mejora la extracción de energía, el algoritmo propuesto en esta investigación mejora significativamente la localización del MPPT.

4.7. Resultados

Se llevó a cabo una comparación entre varios algoritmos reportados en la literatura, incluyendo algoritmos como caza de lobos, lógica difusa, control PID, entre otros. Se revisaron varios aspectos para la comparación, como la eficiencia en condiciones de sombreado parcial, el gasto computacional, la complejidad en el desarrollo y las variables (sensores) que se implementan. Como se puede observar en la Tabla 4 la comparación realizada entre los diferentes algoritmos.

Tabla 4 Comparativa entre el algoritmo propuesto y los repostados en literatura.

Algoritmo	complejidad de implementación	Sensores implementados		condiciones de sombreado parcial	Gasto computacional
		Voltaje	Corriente		
P&O	Bajo	X	X	Eficiencia Baja	Bajo
lógica difusa	Alto	X	X	Eficiencia Media	Alto
Caza de lobos	Alto	X	X	Eficiencia Alta	Alto
Barrido de ciclo de trabajo con P&O	Bajo	X	X	Eficiencia Alta	Bajo
Colonia de hormigas	Alto	X	X	Eficiencia Media	Alto
Seguimiento de Voltaje	Bajo	X		Eficiencia Baja	Bajo
Seguimiento de Corriente	Bajo		X	Eficiencia Baja	Bajo
Control PID	Alto	X	X	Eficiencia Alta	Alto

Recordando el objetivo de la investigación, que consiste en la implementación de un algoritmo que permita la localización del MPPT en condiciones de sombreado, se observa en la tabla anterior que este objetivo se cumple. Además, podemos ver en la tabla que el gasto computacional es bajo y al ser un algoritmo basado en P&O, que es un algoritmo ampliamente utilizado en sistemas fotovoltaicos comerciales, no se requieren modificaciones en el hardware, sino solo en el software. No solo eso, sino que, tanto en las simulaciones como en la implementación, pudimos observar que el algoritmo crea una curva característica que permite identificar visualmente el MPPT. Estas características señaladas hacen que el algoritmo propuesto sea viable para implementarlo en sistemas comerciales.

Capítulo V

Conclusiones y trabajos futuros



5.1. Conclusiones

La investigación realizada surge como una necesidad de localizar el MPPT en condiciones de sombreado parcial, esto para poder extraer la mayor cantidad de energía posible en diversas condiciones de radiación.

Derivado a las pruebas realizadas tanto en simulaciones como en la implementación se ha demostrado que el método propuesto de barrido de ciclo de trabajo con P&O supera significativamente a otras técnicas, incluida la lógica difusa y el control PID, tanto en eficiencia como en simplicidad de implementación.

El algoritmo propuesto no solo logra la optimización del punto de máxima potencia de manera eficiente, sino que también presenta una implementación simple, lo que lo hace práctico para aplicaciones del mundo real. Además, su capacidad para generar una curva característica visualmente identificable simplifica la implementación y el monitoreo en condiciones de sombreado, los aspectos significativos a destacar son:

- El algoritmo propuesto cumple con el objetivo de la investigación de localizar el MPPT en condiciones de sombreado parcial.
- La velocidad de respuesta para interceptar el MPPT es mayor en comparación al algoritmo tradicional de P&O.
- Al ser un algoritmo basado en P&O no se requiere de modificar el hardware actual de los sistemas fotovoltaicos, si no solo la actualización del software.
- El algoritmo permite una representación visual de la curva característica de la potencia lo que permite garantizar la localización del MPPT.

En resumen, esta investigación no solo ha avanzado en la comprensión de los desafíos de la extracción de energía en condiciones de sombreado parcial, sino que también ha proporcionado una solución práctica y efectiva para mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, lo cual lo hace viable para su implementación en aplicaciones comerciales y contribuyendo significativamente al campo de las energías renovables.

5.2. Trabajos futuros

En cuanto a los trabajos de esta investigación futuros, se tiene:

- **Implementación en Parques Solares:** Se buscará implementar el algoritmo en parques solares para evaluar su desempeño en condiciones adversas en tiempo real. Esta aplicación práctica proporcionará información valiosa sobre cómo el algoritmo se comporta en entornos del mundo real para realizar los ajustes necesarios.
- **Integración con Sistemas de Almacenamiento:** Se explorará la integración del algoritmo con sistemas de almacenamiento, como bancos de baterías. Esta integración permitirá gestionar de manera más eficiente la energía almacenada, mejorando así la estabilidad y la confiabilidad del sistema en condiciones de sombreado parcial.
- **Optimización del Convertidor DC-DC:** Se llevará a cabo una optimización del convertidor DC-DC para asegurar su compatibilidad con diversos sistemas fotovoltaicos. Esta optimización se centrará en mejorar la eficiencia y la capacidad de adaptación del convertidor a diferentes condiciones de carga y radiación solar.
- **Pruebas en Sistemas Fotovoltaicos Interconectados:** Se realizarán pruebas en sistemas fotovoltaicos interconectados con la red eléctrica. Esta prueba ayudará a entender cómo el algoritmo se comporta en entornos de energía compartida, lo que es fundamental para su implementación en aplicaciones de energía distribuida y redes inteligentes.

Estas áreas de enfoque futuro son esenciales para continuar mejorando la eficiencia y la aplicabilidad del algoritmo en el contexto de sistemas fotovoltaicos y energías renovables. La implementación exitosa de estas mejoras abrirá nuevas posibilidades para la adopción a energía limpias como son los sistemas fotovoltaicos.

Bibliografía

- [1] (Flores, 2012) Ahmad, R., Murtaza, A. F., Ahmed Sher, H., Tabrez Shami, U., & Olalekan, S. (2017). An analytical approach to study partial shading effects on PV array supported by literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74.
- [2] Álvarez, O. R. (2020). *Energías renovables en México*. ICEX España Exportación e Inversiones.
- [3] Cesar, J., Aguirre, P., Agundis, A. R., Segura, E. J. J. R., José, J., & Nolasco, M. (2017). Control Difuso Para Un Convertidor Cd-Cd Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos En Los Modos Mppt Y Cv. *Tecnológico Nacional de México En Celaya Pistas Educativas*, 39(128), 1252–1269.
- [4] Cornejo, H. (2013). *Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el centro materno Infantil de la universidad de piura*. 114.
- [5] Cort, R., Editor, A. G., & Editor, A. G. (n.d.). Robótica. Control de Robots Manipuladores - Fernando Reyes Cortés - 1ra Edición. *AlfaOmega*, 1–592.
- [6] Flores, J. H. H. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energias_Renovables_2012-2026.pdf
- [7] González-Castaño, C., Marulanda, J., Restrepo, C., Kouro, S., Alzate, A., & Rodriguez, J. (2021). Hardware-in-the-loop to test an mppt technique of solar photovoltaic system: A support vector machine approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13063000>
- [8] HUERTA, G. B. (2018). *Caracterografo para sistemas fotovoltaicos*.
- [9] Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 475–488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.032>
- [10] Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., & Mekhilef, S. (2012). An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3627–3638. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185713>
- [11] Jiang, L. L., & Maskell, D. L. (2015). A uniform implementation scheme for evolutionary optimization algorithms and the experimental implementation of an ACO based MPPT for PV systems under partial shading. *CIASG*.

- [12] Karachi Institute of Economics and Technology, Karachi 75190, P. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. ..*Sciencedirect*, 19.
- [13] Kermadi, E. M., & Mostefa, B. (2015). A Hybrid PSO-PI Based Maximum Power Point Tracking Algorithm using Adaptive Sampling Time Strategy. *Conf. Electr. Eng. (ICEE)*, 1–6.
- [14] Kermadi, M., Salam, Z., Eltamaly, A. M., Ahmed, J., Mekhilef, S., Larbes, C., & Berkouk, E. M. (2020). Recent developments of mppt techniques for pv systems under partial shading conditions: A critical review and performance evaluation. *IET Renewable Power Generation*, 14(17), 3401–3417. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0454>
- [15] Leyva, R., Alonso, C., Queinnec, I., Cid-Pastor, A., Lagrange, D., & Martínez-Salamero, L. (2006). MPPT of photovoltaic systems using extremum - Seeking control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42(1), 249–258. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603420>
- [16] Liqun Liu (Department of Electronic And Information, Taiyuan University of Science & Technology, 030024 Taiyuan, Shanxi Province, C. (2016). A review of maximum power point tracking methods of PV power system at uniform and partial shading. *Sciencedirect*, 53.
- [17] Marei, M. I., & University, A. S. (2017). A Hybrid Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays. *IEEE Access PP*, 30.
- [18] MegaCorp. (2008). Manual Del Operador. *M*, 1–540.
- [19] Mohanty, S., Subudhi, B., & Ray, P. K. (2017). A Grey Wolf-Assisted Perturb & Observe MPPT Algorithm for a PV System. *IEEE IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(340–347).
- [20] Mohapatra, A. (2017). A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80.
- [21] Portillo, A. L. (2017). Energía solar en México: Potencial y aprovechamiento, *A. Limon Portillo*, 4–6.
- [22] Ramaprabha, R., Jubair, S. H., Suhas, K., & Lokesh, A. (2015). Design and implementation of efficient curve tracer for photovoltaic system under partial shaded conditions. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 7(1), 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijeinfo.2015.07.001>
- Ramos Flores, C. (2017). Analisis de un convertidor DC/DC destinado al almacenamiento hibrido de energia. *Industriales ETSH UPM*, 1–98.

- [22] Salam, Zainal; Ahmed, Jubaer; Merugu, B. S. (2013). The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review. *Http://Researchrepository.Napier.Ac.Uk/Output/2823256, 107.*
- [23] Solarmagic. (2017). *Optimizadores de potencia SolarMagic*. Solarmagic. www.technosun.com/es/descargas/SOLARMAGIC-12V%0224V-MC3-MC4-ficha-ES.pdf.
- [24] Soto, D., Soto, W., & Pinzón, Y. (2012). *Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas Multiobjetivo Aplicado al Problema de la Mochila Multidimensional*. 3(2), 47–58.
- [25] Subudhi, B., Bidyadhar, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, I. (2013). A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4.
- [26] Sundareswaran, K., Kumar, V. V., & Palani, S. (2015). Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions. *Renew. Energy*, 75, 308–317.
- [27] Schygulla, P., Müller, R., Höhn, O., Schachtner, M., Chojniak, D., Cordaro, A., Bläsi, B., Polman, A., Siefer, G., Lackner, D., & Dimroth, F. (2023). *Current [mA] Voltage [V]. September*, 18–22.

Anexos

Participación en congreso



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS



DIRECCIÓN

Cuernavaca, Morelos, México, 3 de julio de 2023

A QUIEN PUEDA INTERESAR

Como oportunamente consta en el diploma emitido, en el pasado *Décimo Séptimo Taller de Física de la Materia Condensada y Molecular (Seventeenth Workshop on Physics of Condensed and Molecular Matter)* se presentó el trabajo “**Diseño de un sistema de control para la extracción de máxima potencia en condiciones de sombreado parcial de un sistema fotovoltaico aislado**”, cuyos autores fueron Abel Márquez Primo y Diego Seuret Jiménez.

Cabe aclarar que este evento es un congreso científico, en la plena extensión de la palabra. En las colectividades de ciencias exactas es común usar la palabra Taller (Workshop) para denominar congresos donde no solo se presentan, sino también se discuten resultados científicos.

Con saludos cordiales,



Dr. Rolando Pérez Álvarez Presidente
del Comité Organizador

XVII Taller de Física de la Materia Condensada y Molecular

26-28 de junio de 2023

Centro de Investigación en Ciencias

Universidad Autónoma del Estado de Morelos



UAEM

Cuerpo Académico de Física del Estado Sólido

El Comité Organizador agradece a

Abel Márquez Primo y Diego Seuret Jiménez

Por la presentación de la Conferencia en la sesión de energías renovables:

“Diseño de un sistema de control para la extracción de máxima potencia en condiciones de sombreado parcial de un sistema fotovoltaico aislado”

En el Décimo Séptimo Taller de Física de la Materia Condensada y Molecular, llevado a cabo en el Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Dr. Rolando Pérez Álvarez |
Presidente Comité Organizador



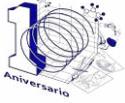
Cuernavaca Morelos C.P. 62209, México.

“Ciudad de la eterna primavera”





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Maestría en Sustentabilidad Energética.

Cuernavaca, Morelos, a 25 de abril de 2024.

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
COORDINADOR DEL POSGRADO EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA EN CONDICIONES DE SOMBREADO PARCIAL DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO", que presenta el alumno **Abel Márquez Primo**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**:

Atentamente

Por una humanidad culta

NOMBRE
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

JAMS*MLGE/nmc.



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 6212 / mse_ciicap@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2024-05-14 10:55:52 | FIRMANTE

J7vXWzmXqy0wLgYq7A0ITID6UUcmJVMHronQwywRM6jwyXV47Fm9INarmaGqElvyoTKk4sr49K1jMKA5KviAoNT35Cc2KfRsgHcoFrV/IY3TJrJnsiqT8QHoE7YoLaTBxwgME9elfiKnEKb1xfuGDbP6DIEo6DAmBabW5pxdBCJoYkYVLqZxKT0hk84u2frlGXiZYfuOauQk9XPKp8WQDM3XYXKaUNpxKoYCGw+0EMap0VMrwlj9XNKb2eJnTpOSrEtOJOb5xReONZVuYuChf3rPaRFJqXu+ViWwEMcJzGSp2UbH/ah8VjxCMIN39KxWR63zNA8vhVl88hWCNw==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2024-05-15 14:07:49 | FIRMANTE

wkR7SHlc0au9w+NQqXFyAVXo3rVovra9Gtt+J5u1M2IE1Qg3AjZDbUu/J6EjSAzI5eGgWGPvJBjz1fhxFOI6/EXUocAkSmAqiARnP64P7FwHDFP4OVvstqIBvwl7gH6KHG5nsGrVAg+/NmSC/m/SjC55pFPSPdt0PvnPMt+n71qq0NtbPI6CMV6xV4tBci4IYTQkjHOnk36Rjmbvsa0UMt9ZIKuHXy0I0MwHEzEvm9ZnAgbjmoLaqrGpkKAbLn/ta29myo8JMgVlOjVqyp0t+x94K8JXe65oyWSq0Bf6/W4aMkcmJqQy/Sk7b8nKhfhemP83nw+AUZffdK/pjp3g==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2024-05-16 15:08:15 | FIRMANTE

Ycto15a2tq+BqFol1v6rDceJGc7E7Lk6LUpUkUs6R6C3Q5wtvaVshWc3bhFjl6o2CEUU6KLscbjVBK+b/CBI3au9GCDNjb++msuJ+RCsB/BDzOOdgJsjXY+VlzOeVt4JC8d6mbzFiBhbzQsnwAWpcWu9F49ZrifiNhat/HwQK7Kk9ky4e069HSm0VOFJgiSMAGbNWdf2OARkeE8aI2MPNqw5OzeUElfx00tMbFtyAa27pxuWWVfqtX/GOGDx6gttEi4599Z4NrBtVo52knOEEY5tLhdwFrVnN12JZxd0Hpthp9zLHBapqZ7e9eyowcCk8h/rbdDtLYU4qcEg==

MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2024-05-20 15:03:20 | FIRMANTE

HYVnBlbnV8/KZFMhyblhJs+mpgrNXxFZ0RL+MnZPMwssY4H+qpH3tolj/a6GTtoju+k+wGPOtoX2jU9gkqXQ/5Lq5DT8vypuVEFZWS7pkU0TasSIXe5A7IolnhykaYnBbUxYq4wpiK0DYGH5zHe3P8q+4Z/947sVRtndC1zoVRgz1mWer2YpsDASmHzbQfjkkQlVldbMm+KcZLn+A1nhd85dhRxiJozWevD5IO7rc1OV1rqiP1Q+K+3TWunV4qBcbDEvgK6KpdP4wQPko1Z2FnuZmjFPwctinRGEYctsZ/lbAHX1FELVjzu+qzHpJSpe04SKUeWB7edXCqZwstt72w==

DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2024-05-24 08:24:45 | FIRMANTE

RjkRLIi3saJI5BUhtAHXa9h3IQMwL+2kRv4NP5KLFthJjg3LocY605a6GmrTga+8dlw2MdqoIHJW6plWuGESUTFjqHzsUYVilu0DBaq9urcjKYyNwrwxYSnZnYSEo5ybNadzsdIzqIY1te+0d2PeTU7PatbmDAYK8EPX7EFNa773Ejts1YXcAHghPnKH/0oN/QBr9A0N9PQC6ssq7CiAFERCu5ADccmV4AKJMBSpGror38daiORRXPVaRwS/ZBEMpRUUJfZ/Au7J4OHbaJAwD90Vg2TdX5/Zvr4pcMsPfqudRpDr1Kh3QsnOy9O1NXAE6FVxog6O5OHfPdpFKAduUw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



tuJplv5YT

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/veikeDNRHTboBYzuqKSTujmjVPQMqCtp>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029