



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA**

PROYECTO DE TITULACIÓN PRESENTADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AUTOR:

Moreta Crespo Esteban Santiago

TUTORA:

Ing. Jessica Nataly Castillo, Ms.C

LATACUNGA, AGOSTO 2024

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Yo **MORETA CRESPO ESTEBAN SANTIAGO** declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **“MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA** siendo la Ing. Castillo Jessica Nataly la tutora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



.....
Moreta Crespo Esteban Santiago

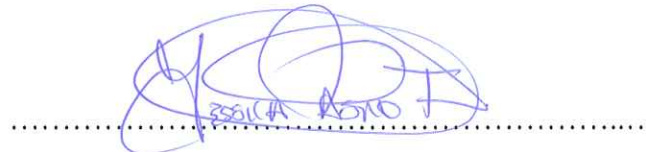
C.C. 1804387296

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “**MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA**” de **MORETA CRESPO ESTEBAN SANTIAGO**. De la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aporte científico-técnico suficiente para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2024

El Tutor



Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly, Ms.C

C.C. 06044590216

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la ingeniería y Aplicadas.; cuanto, al postulante Moreta Crespo Esteban Santiago, con cedula de ciudadanía N° 1804387296 con el título de Proyecto de titulación: **“MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

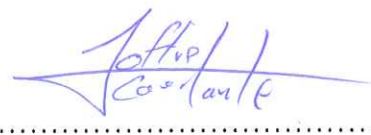
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2024

Para constancia firman:



.....
Ing. Jiménez Diego Leonardo, Ms.C
C.C. 0503493702



.....
Ing. Constante Joffre Remigio, Ms.C
C.C. 1721862579



.....
Ing. Rueda Walter Paul, Ms.C
C.C. 0503689895

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, por lo bueno y malo que me tocó vivir en esta travesía, por permitirme terminar un escalón más de la vida.

A mi padre David Moreta por su apoyo incondicional, por enseñarme a no rendirme nunca, siempre siguiendo la meta con esfuerzo y perseverancia; A mi madre Martha Crespo por su amor incondicional, por mostrarme que en la vida siempre habrá problemas, pero siempre debemos avanzar, así sea gateando, no existen palabras que puedan expresar el profundo amor y respeto que tengo por ustedes, gracias por ser mi sustento durante mí formación profesional, por apoyar mis sueños, por demostrarme que con dedicación se puede lograr grandes cosas sin importar los obstáculos.

A mi hermano Charles y hermanas Paola, Genesis y Eva por sus palabras de aliento para no darme por vencido durante el desarrollo de este trabajo de investigación, por mostrarme su apoyo con cada gesto y acción en nuestro hogar. A mi novia Patty Morillo quien formo parte de mi vida universitaria apoyándome en mis momentos más difíciles y alentándome a seguir sin importar los errores que cometa, gracias por formar parte de mí vida.

A mis amigos de la universidad por estar presentes, acompañándome a lo largo de mi vida universitaria, compartiendo momentos agradables y memorables que apreciare el resto de mi vida.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi que me acogió durante el periodo de estudio, permitiéndome formar como profesional de excelencia y calidad para la sociedad. Agradezco de todo corazón a la Ing. Castillo Jessica como tutora de mi proyecto, quien me ha guiado con su sabiduría y paciencia.

Moreta Crespo Esteban

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Moreta David y Crespo Martha por apoyarme incondicionalmente, guiándome de la mejor manera en mi etapa universitaria, aconsejándome a vivir con responsabilidad.

A mi hermano Charles y mis hermanas Paola, Genesis y Eva por acompañarme en el proceso educativo y brindarme su apoyo día tras día en el transcurso de los años de mi carrera universitaria.

A mi novia Patty Morillo por brindarme su amor y confianza para afrontar este duro camino.

A toda mi familia y amigos por confiar en mí dándome alientos y consejos.

Moreta Crespo Esteban

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1 EL PROBLEMA	2
2.1.1 Situación problemática	2
2.1.2 Formulación del problema.....	2
2.2 ANTECEDENTES	3
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	5
2.4 BENEFICIARIOS	6
2.4.1 Beneficiarios directos:	6
2.4.2 Beneficiarios indirectos:	6
2.5 JUSTIFICACIÓN	6
2.6 HIPÓTESIS	7
2.7 OBJETIVOS	7
2.7.1 Objetivo general	7
2.7.2 Objetivos específicos	7
2.8 SISTEMA DE TAREAS	8
3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO.....	9
3.1 ENERGIA SOLAR	9
3.1.1 Radiación solar	9
3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	10
3.2.1 Paneles solares	10
3.2.2 Inversores	11
3.2.3 Regulador de Carga	11
3.2.4 Baterías	12
3.2.5 Conversor de voltaje.....	12
3.3 SEGUIDORES DEL MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MPPT).....	13
3.3.1 Funcionamiento de un MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	14

3.3.2	Clasificación de los algoritmos MPPT	14
3.3.3	Algoritmo Perturbar y Observar (P&O)	15
3.3.4	Algoritmo de Conductancia Incremental (IC)	16
3.3.5	Algoritmo de Tensión Constante (CV).....	17
3.3.6	Algoritmos Metaheurísticos	17
3.3.7	Algoritmos con Inteligencia Artificial (IA).....	17
3.4	PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA	18
4.	MÉTODOS Y MATERIALES.....	19
4.1	MATERIALES E INSTRUMENTOS	19
4.1.1	NASA Power Data Access Viewer	19
4.1.2	MATLAB	20
4.1.3	SIMULINK.....	20
4.2	METODOLOGÍA.....	21
4.3	OBTENCIÓN DE LA BASE DE DATOS	22
4.3.1	Tratamiento de base de datos.....	23
4.4	DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	24
4.4.1	Modelado del sistema fotovoltaico.....	24
4.4.2	Frecuencia de conmutación	26
4.5	DISEÑO DEL ALGORITMO OBSERVADOR Y PERTURBADOR P&O	26
4.5.1	Simbología.....	27
4.5.2	Capacitor de entrada (CIN)	27
4.5.3	Inductancia.....	28
4.5.4	Capacitor de salida (COUT)	29
4.5.5	Relación de trabajo, conducción discontinua (CD)	29
4.5.6	Algoritmo Perturbar y observar (P&O).....	30
4.6	CONTROL DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO.....	31
4.6.1	Convertidor DC-DC Bluck-Boost	31
4.6.2	Análisis en conducción Continua:	32
4.6.3	Análisis Caso Critico	33
4.6.4	Análisis en conducción discontinua	33
4.6.5	Ajuste de superficies de datos	35

4.7	ALGORITMO P&O EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	38
4.8	ALGORITMO MILP EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO	38
4.9	COMPROBACIÓN DE ERROR	39
4.10	SISTEMA FINAL	39
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
5.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO	40
5.1.1	P&O.....	41
5.1.2	Algoritmo MILP.....	41
5.2	ALGORITMO P&O VS MILP	42
5.2.1	Voltaje	42
5.2.2	Corriente	43
5.2.3	Delta	43
5.3	CASOS DE ESTUDIO	44
5.3.1	Potencia generada.....	44
5.3.2	Potencia entregada a la carga DC.....	45
5.3.3	Potencia de entregada al inversor con carga AC.....	46
5.3.4	Error cuadrático medio normalizado (NRMSE).....	47
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
6.1	CONCLUSIONES.....	48
6.2	RECOMENDACIONES	48
7.	REFERENCIAS	49
8.	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Sistema fotovoltaico [19].	10
Figura 3.2: Paneles solares [21].	11
Figura 3.3: Inversor [23].	11
Figura 3.4: Regulador de carga [24].	12
Figura 3.5: Batería de gel [25].	12
Figura 3.6: Conversor de voltaje [26].	13
Figura 3.7: Punto de máxima potencia MPPT [27].	14
Figura 3.8: Diagrama de flujo del algoritmo Observador y Perturbador [29].	15
Figura 3.9: Flujograma de Conductancia Incremental [30].	16
Figura 3.10: Flujograma de control Fuzzy [28].	17
Figura 4.1: NASA Power [33].	19
Figura 4.2: MATLAB [34].	20
Figura 4.3: Simulink [35].	21
Figura 4.4. Diagrama de Flujos de la metodología.	22
Figura 4.5: Obtención de datos de irradiación [33].	23
Figura 4.6: Base de datos de irradiancia y temperatura [33].	23
Figura 4.7: Diagrama de bloques del sistema.	24
Figura 4.8: Comportamiento del arreglo fotovoltaico [36].	24
Figura 4.9: Comportamiento del Capacitor de entrada [37].	28
Figura 4.10: Convertidor DC-DC P&O.	30
Figura 4.11: Implementación de algoritmo P&O en Simulink.	30
Figura 4.12: Diagrama del convertidor DC-DC.	31
Figura 4.13: Funcionamiento del Convertidor DC-DC.	31
Figura 4.14: Convertidor DC-DC MILP.	35
Figura 4.15: Linealización de un parámetro [39].	35
Figura 4.16: Reajuste de voltaje.	36
Figura 4.17: Linealización de corriente.	37
Figura 4.18: Implementación de Algoritmo MILP en Simulink.	37
Figura 4.19: Algoritmo P&O en el sistema fotovoltaico en Simulink.	38
Figura 4.20: Algoritmo MILP en el sistema fotovoltaico en Simulink.	38
Figura 4.21: Implementación del ISE en Simulink.	39
Figura 4.22: Sistema P&O vs MILP.	39

Figura 5.1: Curvas características del arreglo fotovoltaico, para diferentes niveles de irradiancia.	40
Figura 5.2: Corriente media del Inductor del P&O.	41
Figura 5.3: Corriente media del inductor del MILP.	41
Figura 5.4: Voltaje P&O vs MILP.	42
Figura 5.5: Corriente P&O vs MILP.	43
Figura 5.6: Delta P&O vs MILP.....	43
Figura 5.7: Potencia generada, P&O vs MILP vs Ideal.	44
Figura 5.8: Análisis 1, P&O vs MILP vs Ideal.....	44
Figura 5.9: Potencia entregada, P&O vs MILP vs Ideal.	45
Figura 5.10: Análisis 2, P&O vs MILP vs Ideal.....	45
Figura 5.11: Potencia en el inversor con carga AC, P&O vs MILP vs Ideal.	46
Figura 5.12: Análisis 3, P&O vs MILP vs Ideal.....	46
Figura 5.13: Índice de error cuadrático medio normalizado (NRMSE).	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas.	8
Tabla 4.1: Simbología de un panel fotovoltaico.....	25
Tabla 4.2: Simbología para cálculo de corriente y voltaje.	26
Tabla 4.3: Simbología del modelado matemático.	27
Tabla 4.4: Valores del diseño del convertidor.....	29
Tabla 5.1: Porcentajes de Error de los algoritmos.....	47

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO D	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO E.....	¡Error! Marcador no definido.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA”

Autores:

Moreta Crespo Esteban Santiago

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo matemático basado en programación lineal entera mixta (MILP) para identificar el punto de máxima potencia (MPP) en sistemas fotovoltaicos. La necesidad de obtener el MPP mediante métodos más simples, como la programación lineal entera mixta, debido a la escasez de recursos hídricos en las hidroeléctricas y fallas por la falta de mantenimiento. Para este propósito, se utilizó el programa Matlab, específicamente la herramienta Simulink, para implementar el modelo matemático. Se obtuvo una base de datos del POWER DATA ACCESS VIEWER de la NASA, para recoger información sobre irradiancia y temperatura. Luego, se linealizaron los parámetros de voltaje y corriente del sistema fotovoltaico, se obtiene así la variable delta (relación de trabajo), que se optimizó para encontrar el MPP. El desempeño del algoritmo MILP fue evaluado mediante el índice de rendimiento ISE y se comparó con el algoritmo convencional de Perturbar y Observar (P&O). Los resultados demostraron que el algoritmo P&O presentó un mayor error, mientras que el algoritmo MILP resultó ser más eficiente. Se muestra que la programación lineal entera mixta puede ser una alternativa viable para encontrar el MPP en sistemas fotovoltaicos. Esta investigación evidenció que no se necesita un conocimiento profundo sobre MPPT para desarrollar métodos efectivos, ya que el modelo MILP propuesto logró mejores resultados que los algoritmos utilizados por la comunidad científica. Este enfoque simplificado no solo mejoró la eficiencia del sistema fotovoltaico, sino que también ofreció una solución práctica frente a la creciente demanda de energía renovable.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos, Programación lineal entera mixta (MILP), Algoritmo perturbador y observador (P&O), Máximo punto de potencia (MPP), Simulink.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED FACULTY

TITLE: “MATHEMATICAL MODEL A PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR SEARCHING MAXIMUM POWER POINT”

Author: Moreta Crespo Esteban Santiago

ABSTRACT

The aim this research was to develop a mathematical model based on mixed integer linear programming (MILP), for identifying the maximum power point (MPP) in photovoltaic systems. The need getting the MPP, through simpler methods, such as mixed integer linear programming, due to the water resources scarcity in hydroelectric plants and failures by maintenance lack. For this purpose, it was used the Matlab program, specifically the Simulink tool to implement the mathematical model. It was got a database from NASA's POWER DATA ACCESS VIEWER to collect information about irradiance and temperature. Then, it was linearized the photovoltaic system voltage and current parameters, thus getting the delta variable (work relation), which was optimized to find the MPP. The performance from MILP algorithm was assessed, through the ISE performance index and compared with the conventional Perturb and Observe (P&O) algorithm. The results demonstrated, what the P&O algorithm presented a higher error, while the MILP algorithm turned out to be more efficient, it is shown, which mixed integer linear programming can be a viable alternative to find the MPP in photovoltaic systems. This research evinced, what is not needed a nin-depth knowledge about MPPT to develop effective methods, since the proposed MILP model achieved better results than the algorithms used by the scientific community. This simplified approach not only improved the efficiency from photovoltaic system, but also offered a practical solution in front to the renewable energy growing demand.

Keywords: Photovoltaic systems, Mixed Integer Linear Integer Programming (MILP), Perturbing and Observer Algorithm (P&O), Maximum Power Point (MPP), Simulink.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BÚSQUEDA DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA”** presentado por: **Moreta Crespo Esteban Santiago** egresado de la Carrera de: **Ingeniería Eléctrica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Agosto del 2024.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CC: 0502666514



CENTRO
DE IDIOMAS

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Modelo matemático de un sistema fotovoltaico para búsqueda del punto de máxima potencia.

Fecha de inicio: Abril 2024

Fecha de finalización: Agosto 2024

Lugar de ejecución: Universidad Técnica de Cotopaxi.

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería en Electricidad.

Proyecto de investigación vinculado: Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y el uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo: Sistemas eléctricos de potencia.

Tutor de Titulación: Ing. Castillo Jessica Nataly

Estudiante: Moreta Crespo Esteban Santiago

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesionales Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Control y optimización en el uso de la energía eléctrica del sector industrial, comercial y residencial.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 EL PROBLEMA

2.1.1 Situación problemática

Las hidroeléctricas en Ecuador han enfrentado problemas que afectan su operación y generación de energía, especialmente en los últimos meses. La sequía severa ha reducido los niveles de agua en embalses clave como Paute, Sopladora y Mazar, lo que causa un déficit de 460 megavatios y resulta en apagones programados a nivel nacional. Además, centrales como Sopladora y Coca Codo Sinclair han sufrido diversas fallas técnicas. Por ejemplo, el eje de la turbina en Sopladora ha presentado problemas, lo cual requiere reparaciones costosas y prolongadas [1].

Otras condiciones que agravaron el déficit energético es la falta de lluvias, que ha disminuido los niveles de la represa que alimentan las plantas, llevando a niveles críticos en los embalses. Este año, los caudales han disminuido a cifras históricamente bajas, lo que complica aún más la situación energética del país. Además, las restricciones en la importación de electricidad desde Colombia han exacerbado la crisis, ya que Colombia ha tenido que priorizar su propio consumo debido a problemas similares en su red eléctrica [2].

En este escenario, es evidente la necesidad de desarrollar y aplicar un modelo matemático que permita una mayor eficiencia en la búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT) en sistemas fotovoltaicos, para reducir las pérdidas de potencia y maximizar la eficiencia. El equipo convencional tiene dificultades para encontrar el punto de máxima potencia (MPP) de los paneles solares en diferentes condiciones ambientales y de carga, a pesar de utilizar tecnología confiable, se debe a ajustes frecuentes, esta falta de precisión resulta en una producción de energía subóptima.

2.1.2 Formulación del problema

Los cortes de energía eléctrica exigen nuevas fuentes renovables como la fotovoltaica, cuyo rendimiento varía con las condiciones ambientales, reduciendo su eficiencia.

2.2 ANTECEDENTES

Los cambios climáticos, como las sequías, han aumentado el déficit energético en países como Ecuador, que dependen de la energía hidroeléctrica. Es fundamental diversificar las fuentes de generación eléctrica los sistemas fotovoltaicos son una opción clave debido a su rápida instalación y fuente inagotable de energía solar. La búsqueda del punto de máxima potencia (MPP) en los paneles fotovoltaicos es crucial, ya que mejora la eficacia y rendimiento de la energía solar. Optimizar el MPP permite que los equipos entreguen mayor potencia, incrementando su eficiencia [3].

Según Claudio A. Estrada G. [4], a nivel global existe una creciente preocupación por la disminución de los recursos fósiles y los efectos negativos de su uso desmedido en el medio ambiente. La demanda energética mundial crece a un ritmo anual del 2.47%, lo que hace indispensable la implementación de políticas adecuadas, la creación de marcos legales, la oferta de incentivos económicos y la asignación de fondos para apoyar la investigación científica y tecnológica. Estas acciones son fundamentales para impulsar el desarrollo masivo y eficiente de energías renovables, contribuyendo a la sostenibilidad y preservación del medio ambiente.

En Latinoamérica según Escobar Andrés, et al, en 2016 [5] la potencia generada por un sistema fotovoltaico está directamente relacionada con la cantidad de módulos necesarios, y se emplea un convertidor Boost para reducir las pérdidas y aumentar los niveles de voltaje. Factores climáticos, como la radiación solar y la temperatura ambiental, son determinantes en la alteración del punto de máxima potencia (MPP) de los paneles fotovoltaicos. Estas condiciones impactan las curvas características de voltaje y corriente de los paneles, afectando así la cantidad de energía producida.

Un estudio de Edesa en 2011 [6] habla sobre la incertidumbre en la intensidad luminosa, la temperatura del sistema fotovoltaico, las variaciones en la carga y la no linealidad de las células fotovoltaicas provocan un cambio constante en el punto de máxima potencia (MPP) del sistema. Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar nuevas estrategias para la búsqueda del MPP. Entre las más investigadas, debido a su relevancia científica, destacan los algoritmos metaheurísticos, las redes neuronales y el machine learning.

En 2020 se presenta un trabajo titulado “Seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos basado en control adaptativo y control de modo deslizante”, Indica que en ese momento, los sistemas fotovoltaicos suelen ser controlados mediante estructuras PI o PID, las cuales no aseguran una estabilidad global ni un tiempo de estabilización constante.

Además, los algoritmos de optimización Perturbar y Observar (P&O) se diseñan con un tiempo de establecimiento elevado dentro del rango operativo, lo que provoca un seguimiento lento del punto de máxima potencia (MPP) en la mayor parte de dicho rango, generando así pérdidas de potencia en el sistema [7].

Según Miranda [8], optimizar el funcionamiento de un conjunto fotovoltaico a su máxima potencia, influenciada por la temperatura solar y ambiental, mejora de manera considerable la eficiencia en la generación de energía. En este estudio, se desarrolla y valida un modelo matemático de células fotovoltaicas utilizando Matlab/Simulink. Dada las limitaciones del algoritmo tradicional de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), como la baja velocidad y precisión, se propone un algoritmo mejorado que combina el método de incremento de conductancia con un algoritmo PID incremental. Primero, el incremento de conductancia realiza un seguimiento rápido cerca del MPP, y luego el PID incremental completa el proceso de seguimiento. La simulación en Matlab/Simulink demuestra que el algoritmo logra un rastreo rápido del MPP con mínimas oscilaciones.

Los autores Henao, Márquez, et al. en 2016 [3] proponen un algoritmo optimizado que integra el método de incremento de conductancia con un algoritmo PID incremental. Inicialmente, el incremento de conductancia se emplea para realizar un seguimiento rápido del punto de máxima potencia (MPP). Posteriormente, el PID incremental lleva a cabo un ajuste preciso del MPP, finalizando el proceso de seguimiento. Los resultados de las simulaciones demuestran que el control PID difuso ofrece una respuesta más ágil, mayor estabilidad y un menor sobre impulsó.

El Autor Checa, Fares y Sandoval en 2023 [9] hacen el estudio que revisa los modelos matemáticos desarrollados en los últimos cinco años para predecir la energía eléctrica disponible en sistemas fotovoltaicos. Se analizaron 15 investigaciones seleccionadas por su relevancia y recientes publicaciones, utilizando fuentes confiables como Latindex, SciELO, y Scopus. Los modelos predictivos, basados en variables climáticas y eléctricas, ayudan a mejorar la eficiencia del sistema al evaluar la energía generada en diversas condiciones, como días nublados. La recopilación de datos meteorológicos permite comparar la eficiencia del sistema fotovoltaico y predecir el error porcentual en las estimaciones de potencia eléctrica.

El Ing. Jairo Cuéllar en 2019 [10] esta investigación se centra en un análisis de los convertidores conmutados CC/CC utilizados en sistemas fotovoltaicos, revisando el estado actual de estos dispositivos y los algoritmos MPPT. Se evaluó el recurso solar y se recopilaron datos sobre el potencial energético en Villavicencio y Bogotá. Además, se examinaron modelos

matemáticos de paneles solares y su simulación en software especializado. Las simulaciones realizadas en PSIM y Simulink permitieron evaluar tres algoritmos de control: Perturbar y Observar (P&O), Incremento de Conductancia y el control en modos deslizantes. Lo que concluye que las señales simuladas no muestran diferencias significativas ante perturbaciones de radiación solar o temperatura, indicando que ninguno de los algoritmos presenta un comportamiento claramente superior frente al origen de la perturbación.

En el artículo propuesto por Mejia A., Cuartas J. y Aurelio H [11], se propone un enfoque para estimar los parámetros del modelo matemático de una celda fotovoltaica de un solo diodo utilizando el algoritmo Pattern Search Method (PSM). Este método permite determinar la corriente del diodo, la corriente de saturación, y las resistencias en serie y paralelo. Los resultados indican que el modelo obtenido es preciso en comparación con los datos de un emulador de celdas fotovoltaicas bajo condiciones controladas. El algoritmo PSM demostró ser eficaz para aplicaciones de control MPPT, ajustándose al modelo real con un error absoluto inferior a 0.02 y un error de 0.0082 en el punto de máxima potencia, lo que confirma su capacidad para optimizar la extracción de energía.

Este artículo "Modelo matemático de sistemas fotovoltaicos para búsqueda distribuida del punto de máxima potencia" de los autores Vilorio D, Montoya D, et al. [12] propone un modelo para sistemas de generación fotovoltaica que analiza la efectividad de algoritmos distribuidos para la búsqueda del punto de máxima potencia. Este modelo, que abarca la conexión en serie de módulos y convertidores, incorpora ecuaciones que permiten estimar la relación entre voltaje y corriente del módulo fotovoltaico, así como el funcionamiento del convertidor elevador considerando pérdidas. Esta aproximación realista ayuda a mitigar problemas como el sombreado parcial o el "mismatching" entre módulos. El modelo genera matrices que pueden ser resueltas con métodos numéricos, eliminando la necesidad de simuladores electrónicos costosos y simplificando el diseño al evitar la conexión discreta de componentes eléctricos.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Objeto: Paneles fotovoltaicos.

Campo de Acción: El campo de acción para el proyecto: 330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.01 Utilización de la Corriente Continua

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Beneficiarios directos:

Comunidad universitaria carrera de ingeniería eléctrica.

2.4.2 Beneficiarios indirectos:

Comunidad universitaria CIYA.

Empresas de energía renovable privadas y públicas.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación se realiza previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica de Cotopaxi, alineándose con los objetivos de los proyectos macro formativos de la carrera de Electricidad en “Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, asociado a la sublínea Control y optimización en el uso de la energía eléctrica del sector industrial, comercial y residencial.”

La crisis climática mundial, impulsada por el calentamiento global, provoca fenómenos meteorológicos extremos que afectan diversas regiones: inundaciones en desiertos, incendios forestales en Estados Unidos y nevadas sin precedentes en Canadá y Rusia. En América Latina, las sequías generan estiajes, especialmente en Colombia y Ecuador. Este último tiene una alta dependencia a la energía hidroeléctrica, se ve particularmente afectado. Esta situación ha aumentado el interés en nuevas fuentes de energía, destacando las opciones rápidas, pero costosas. La eficiencia y el rendimiento óptimo de estos sistemas son esenciales para su sostenibilidad ambiental a largo plazo [13].

La adopción de sistemas fotovoltaicos más eficientes y rentables tiene el potencial de ampliar el acceso a una energía limpia y asequible en comunidades rurales y urbanas, también tiene un impacto social significativo, especialmente en aquellas no conectadas al Sistema Nacional Interconectado (SNI). Este avance contribuiría a mejorar la calidad de vida de los habitantes y a eliminar la dependencia de fuentes de energía contaminantes y costosas [13].

En este contexto, la investigación sobre la optimización de sistemas fotovoltaicos cobra aún más relevancia. Cuando estos sistemas están bien optimizados, tienen un papel crucial en la mitigación de los efectos de los estiajes al proporcionar una fuente de energía confiable y resistente durante períodos de escasez de agua. La aplicación de un modelo matemático para optimizar la búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos se justifica por

su capacidad para aumentar significativamente la eficiencia operativa y la rentabilidad de estos sistemas. Al lograr una configuración óptima de los paneles solares en diversas condiciones climáticas y de carga, se puede maximizar la producción de energía, lo que resulta en una mayor rentabilidad para los propietarios y una mayor aportación a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero [3].

Para este propósito, se empleará el software de Matlab y Simulink, el cual cuenta con diferentes herramientas que ayudarán al desarrollo de este proyecto de titulación.

2.6 HIPÓTESIS

¿Un algoritmo matemático puede mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos al encontrar su punto de máxima potencia?

2.7 OBJETIVOS

2.7.1 Objetivo general

Aplicar un algoritmo matemático mediante el uso de programación lineal entera mixta para la obteniendo el punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos.

2.7.2 Objetivos específicos

- Revisar información bibliográfica relacionada con los sistemas fotovoltaicos y algoritmos de búsqueda de punto de máxima potencia.
- Diseñar un algoritmo matemático para el sistema fotovoltaico que permita la búsqueda del punto de máxima potencia.
- Validar el algoritmo matemático propuesto por medio del error cuadrático medio normalizado.

2.8 SISTEMA DE TAREAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Revisar información bibliográfica relacionada con los sistemas fotovoltaicos y algoritmos de búsqueda de punto de máxima potencia.	Revisión de las fuentes bibliográficas especializadas en las temáticas, tales como libros, artículos de revistas científicas, y tesis.	Información para la construcción del marco teórico	Investigación relacionada al tema basada en artículos científicos, libros y tesis de pregrado y posgrado.
Diseñar un algoritmo matemático para el sistema fotovoltaico que permita la búsqueda del punto de máxima potencia.	Tratamiento de la base de datos Identificación de las variables del modelo matemático. Simulación del sistema fotovoltaico. Implementación del algoritmo matemático en el software MATLAB.	Sistema fotovoltaico con todas sus características simuladas en el software, con el algoritmo empleado.	Software MATLAB Simulink Word Excel
Validar el algoritmo matemático propuesto por medio del error cuadrático medio normalizado.	validación del algoritmo matemático	Porcentaje de error del algoritmo matemático	MATLAB Simulink

3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO

3.1 ENERGIA SOLAR

La energía solar es una fuente inagotable, el cual convierte la radiación solar en electricidad mediante sistemas fotovoltaicos. Esta tecnología se ha vuelto cada vez más relevante, especialmente en países como Ecuador, que cuenta con un alto potencial fotovoltaico debido a su ubicación geográfica y niveles de radiación solar.

Las células solares fotovoltaicas son semiconductores que generan electricidad cuando reciben luz solar, esta energía se almacena en baterías recargables. De este modo, los paneles solares convierten la radiación solar en electricidad, la cual puede ser almacenada para su uso futuro o utilizada directamente para suministrar redes eléctricas tradicionales [14].

3.1.1 Radiación solar

La radiación solar sirve para la generación de energía en sistemas fotovoltaicos, con un clima favorable y alta disponibilidad de luz solar, Ecuador tiene el potencial de aprovechar esta fuente renovable para diversificar su matriz energética y reducir la dependencia a fuentes de energía de combustibles fósiles o de energía hidroeléctrica, A continuación, se presentan los beneficios que posee el Ecuador [15]:

1. **Radiación Promedio:** Ecuador tiene un potencial solar elevado convirtiendolo en uno de los países con mayor irradiación solar en el mundo, con un promedio de radiación solar global que puede alcanzar hasta 4.2 kWh/m²/día, y en algunas regiones, como Imbabura, se reportan valores superiores a 5 kWh/m²/día [15].
2. **Variación Diaria:** Los niveles de radiación solar son más altos entre las 10:00 y las 15:00 horas, donde el sol están en su máximo apogeo. Durante este período, se registran índices de radiación ultravioleta (UV) que pueden ser muy altos, lo que requiere precauciones para evitar la exposición prolongada [16].
3. **Radiación Directa y Difusa:** La radiación solar se compone de radiación directa que llega directamente del sol y radiación difusa que es la que se dispersa en la atmósfera. En días nublados, los paneles solares aún pueden generar energía, aunque en menor cantidad debido a la reducción de la radiación directa [17].

3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La tecnología fotovoltaica se originó con el descubrimiento del efecto fotovoltaico por el físico francés Alexandre Edmond Becquerel en 1839. No obstante, no fue sino hasta la década de 1950 que se desarrollaron las primeras celdas solares de silicio, capaces de convertir de manera eficiente la luz solar en electricidad, desde entonces, esta tecnología ha avanzado notablemente, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos de producción [18].

Los sistemas fotovoltaicos operan utilizando celdas solares que transforman la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Al incidir la luz sobre las celdas, los electrones en el material semiconductor (usualmente silicio) se excitan, generando una corriente eléctrica. Esta corriente continua (DC) puede ser convertida en corriente alterna (AC) mediante un inversor, facilitando su utilización en aplicaciones tanto domésticas como industriales [18].

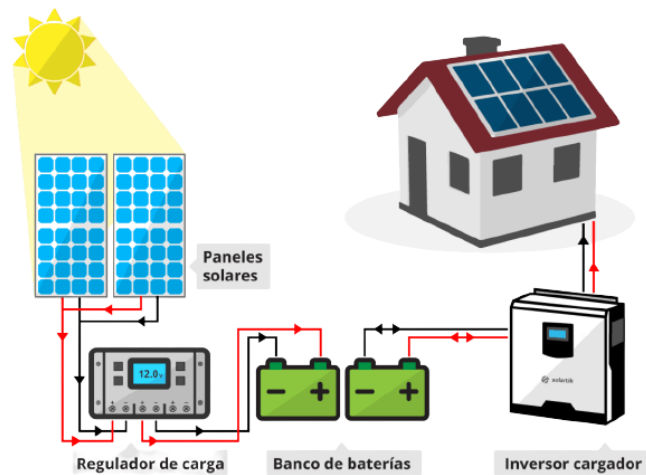


Figura 3.1: Sistema fotovoltaico [19].

A continuación, se presentan todas las partes que componen un sistema fotovoltaico [20]:

3.2.1 Paneles solares

Los paneles fotovoltaicos son esenciales en un sistema fotovoltaico, ya que reciben la irradiación solar y la convierten en energía eléctrica. Según su conexión (serie, paralelo o mixta), generan diferentes niveles de voltaje y corriente [14].



Figura 3.2: Paneles solares [21].

3.2.2 Inversores

Se trata de un dispositivo electrónico que transforma la corriente continua (CC) generada por los paneles solares, en corriente alterna (CA) monofásica o trifásica. Los inversores de potencia se clasifican en dos categorías principales [22]:

- Inversores bidireccionales, se conectados a la red eléctrica.
- Inversores para sistemas de red asilados.



Figura 3.3: Inversor [23].

3.2.3 Regulador de Carga

Los optimizadores de potencia, colocados entre los paneles fotovoltaicos y el inversor en una instalación, maximizan el rendimiento de cada panel individualmente. Estos dispositivos son especialmente valiosos cuando los paneles conectados en serie enfrentan problemas de rendimiento, ya que evitan que toda la instalación se vea afectado por el panel con problemas. Así, el dispositivo asegura que cada panel opere de manera óptima, sin reducir el rendimiento global del sistema fotovoltaico [24].

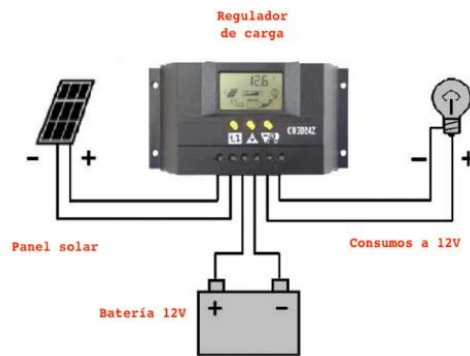


Figura 3.4: Regulador de carga [24].

3.2.4 Baterías

Su función principal es almacenar la electricidad generada por los paneles solares para su uso futuro. Este componente es esencial, ya que garantiza el suministro continuo de energía durante períodos de baja luminosidad o falta de luz solar, asegurando que la energía esté disponible cuando se requiera [25].



Figura 3.5: Batería de gel [25].

3.2.5 Conversor de voltaje

Un es un dispositivo que ajusta el nivel de voltaje de una señal eléctrica, ya sea aumentando (step-up) o reduciendo (step-down) el voltaje. Este ajuste puede realizarse tanto en corriente continua como en corriente alterna. La regulación de tensión optimiza la salida del panel fotovoltaico para asegurar que opere en su punto de máxima potencia, sin importar las variaciones en la luz o la temperatura. Esto es fundamental para mejorar la eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica [26].



Figura 3.6: Conversor de voltaje [26].

3.3 SEGUIDORES DEL MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MPPT)

Los seguidores del máximo punto de potencia (MPPT por sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos empleados en sistemas fotovoltaicos para optimizar la potencia de salida de los paneles solares mediante la búsqueda constante del punto de máxima potencia (MPP). Este punto varía según factores como la temperatura de las celdas solares y las condiciones de irradiancia [27].

Existen diversas técnicas MPPT, las cuales se pueden clasificar en:

Técnicas convencionales

- Perturbar y Observar (P&O).
- Conductancia incremental.
- Voltaje constante.
- Corriente constante.

Técnicas inteligentes

- Lógica difusa (fuzzy logic).
- Redes neuronales.

Técnicas de optimización

- Algoritmo de optimización de mariposa modificado.
- Algoritmo de optimización inspirado en ballenas.
- Algoritmo genético y optimización por enjambre de partículas.

Estas diferentes técnicas tienen su complejidad. A continuación, profundizaremos en algunas de ellas.

3.3.1 Funcionamiento de un MPPT (Maximum Power Point Tracking)

El algoritmo de seguimiento regula la tensión aplicada a los módulos fotovoltaicos, asegurando que funcionen en el punto de máxima potencia disponible. [27].

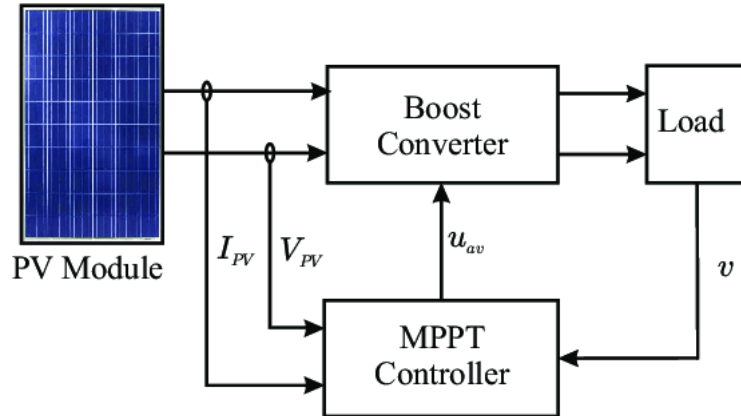


Figura 3.7: Punto de máxima potencia MPPT [27].

3.3.2 Clasificación de los algoritmos MPPT

La autora Doaa Mohamed [28], plantea que un algoritmo MPPT ideal debería poseer ciertas características esenciales para optimizar la generación de energía en un sistema fotovoltaico, incluso cuando las condiciones cambian:

- **Localización precisa:** Identificar el punto de máxima potencia a pesar del sombreado parcial, que puede generar varios máximos locales en la curva de potencia del módulo.
- **Adaptabilidad rápida:** Responder de manera ágil a las variaciones en la intensidad de la luz solar y la temperatura, que influyen en la eficiencia y producción de energía.
- **Configuración:** Funcionar óptimamente sin importar cómo estén conectados los módulos fotovoltaicos.
- **Robustez:** Mantener un rendimiento estable y fiable a pesar de las variaciones meteorológicas y de los parámetros del módulo.
- **Simplicidad:** Ser fácil de implementar, con baja complejidad computacional y costos reducidos.

Aunque no existe un algoritmo que reúna todas estas características simultáneamente, los más avanzados consiguen un equilibrio adecuado entre eficacia, velocidad de respuesta, robustez, versatilidad y eficiencia en costos.

3.3.3 Algoritmo Perturbar y Observar (P&O)

Uno de los algoritmos más simples y que más es comúnmente utilizados, por sistemas que regulan el voltaje o inversores. Su funcionamiento consiste en variar ligeramente la tensión de carga del panel fotovoltaico (PV) y observar cómo esta variación afecta la potencia generada. Si la potencia aumenta, el algoritmo continúa ajustando en esa dirección; si disminuye, invierte el ajuste. El algoritmo utiliza mediciones de voltaje y corriente del sistema fotovoltaico para calcular la potencia generada y la compara con la medida anterior [29].

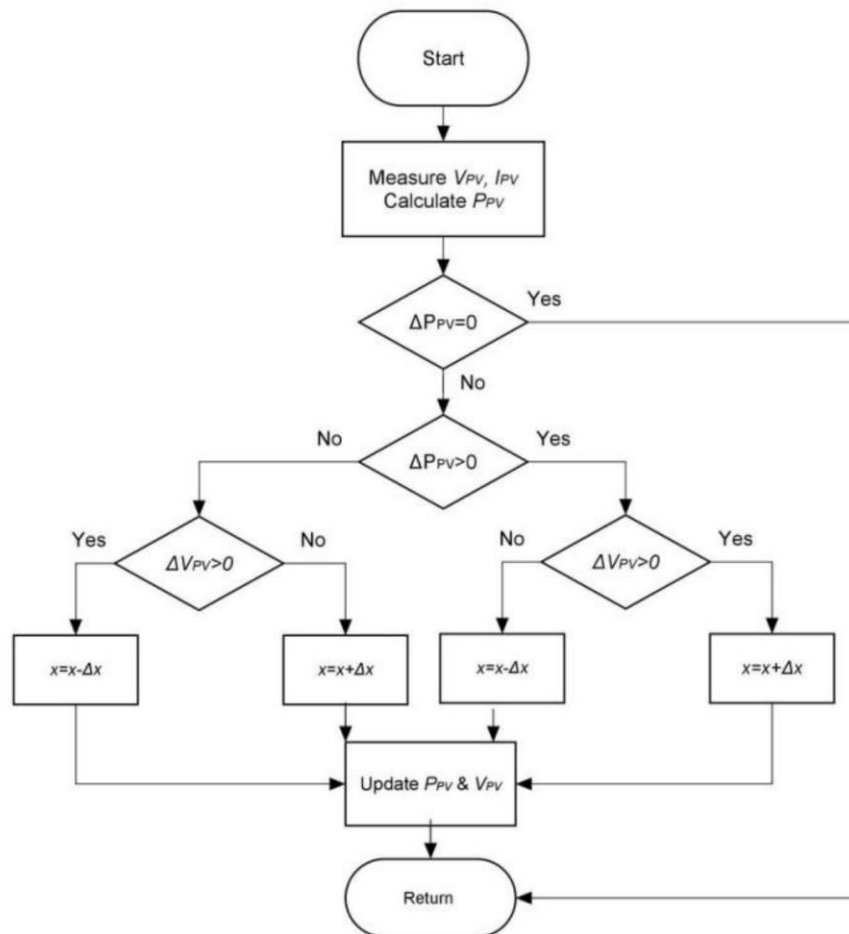


Figura 3.8: Diagrama de flujo del algoritmo Observador y Perturbador [29].

Donde:

- V_{PV} = el voltaje en el PV.
- I_{PV} = la corriente en el PV
- P_{PV} = la potencia obtenida del $V_{PV} * I_{PV}$
- ΔP_{PV} = diferencial de potencia
- ΔV_{PV} = diferencial de voltaje
- x = relación de trabajo
- Δx es el incremento o decremento de x

3.3.4 Algoritmo de Conductancia Incremental (IC)

Más avanzado que el P&O, este algoritmo calcula la derivada de la potencia con respecto a la tensión (dP/dV) y la derivada de la corriente con respecto a la tensión (dI/dV), con estos cálculos, determina si el sistema se encuentra a la izquierda o derecha del punto de máxima potencia y ajusta la tensión en consecuencia. En la Figura 3.9 se presenta el flujograma del algoritmo de conductancia incremental (CI) [30].

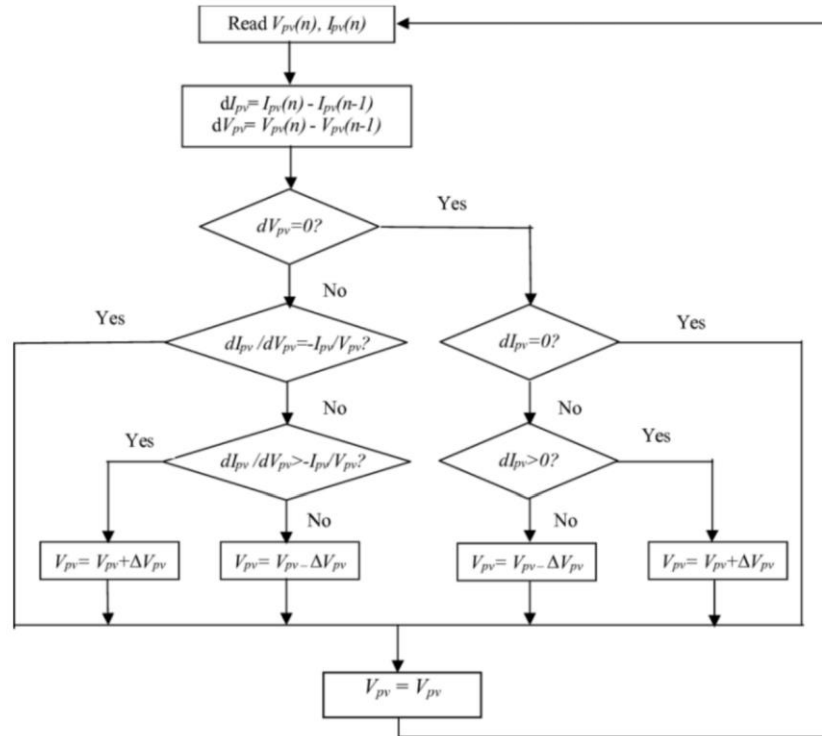


Figura 3.9: Flujograma de Conductancia Incremental [30].

Donde:

- $V_{pv}(n)$ = voltaje del panel.
- $V_{pv}(n - 1)$ = muestreo del voltaje del panel.
- $I_{pv}(n)$ = corriente del panel.
- $I_{pv}(n - 1)$ = muestreo de la corriente del panel
- dI_{pv} = corriente del panel.
- dV_{pv} = voltaje del panel
- V_{pv} = voltaje de referencia para alcanzar el MPP
- ΔV_{pv} = variación del voltaje de referencia.

3.3.5 Algoritmo de Tensión Constante (CV)

Este método supone una relación constante entre la tensión de máxima potencia del panel y su tensión en circuito abierto. Aunque puede ser menos eficiente en ciertas condiciones, su simplicidad lo convierte en una opción atractiva para algunas aplicaciones. [28].

3.3.6 Algoritmos Metaheurísticos

Son técnicas de optimización desarrolladas para abordar problemas complejos que los métodos convencionales no pueden resolver eficazmente. Estos algoritmos son efectivos en encontrar soluciones "suficientemente buenas" en tiempos cortos, incluso en escenarios de alta complejidad o con espacios de búsqueda extensos y desordenados. Estos se aseguran de la obtención de la solución óptima mediante enfoques flexibles y creativos [28].

3.3.7 Algoritmos con Inteligencia Artificial (IA)

Control Fuzzy (FC)

Este enfoque se compone de tres etapas principales: fuzzificación, inferencia basada en reglas definidas, y defuzzificación. Emplea lógica difusa para potenciar la efectividad de otros algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Las variables críticas incluyen la temperatura de la celda y el nivel de irradiación del sistema fotovoltaico. Este método ofrece una respuesta más rápida en condiciones de irradiación constante y es eficaz en el seguimiento del MPPT, incluso bajo condiciones de sombreado parcial [28].

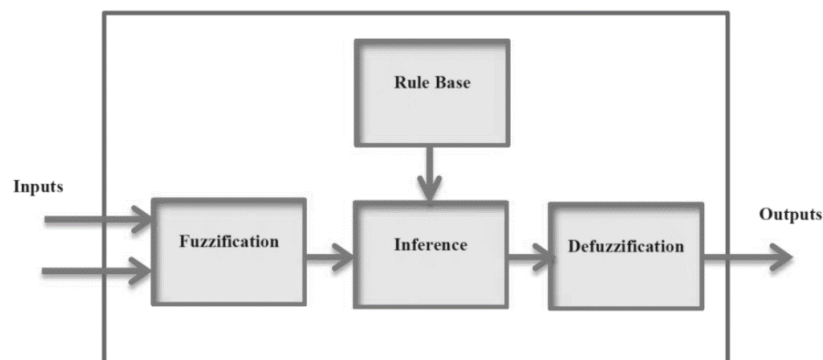


Figura 3.10: Flujograma de control Fuzzy [28].

3.4 PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

La programación lineal entera mixta (Mixed Integer Linear Programming, MILP) es una técnica de optimización que integra elementos de la programación lineal y la programación entera. En MILP, el objetivo es maximizar o minimizar una función lineal sujeta a restricciones lineales. A diferencia de la programación lineal clásica, que permite variables continuas, MILP incluye variables que deben ser enteras, mientras que otras pueden ser continuas. [31].

Componentes [32]:

- **Función objetivo:** Es una función que se desea maximizar o minimizar.
- **Restricciones:** Son ecuaciones lineales que limitan los valores que las variables pueden tomar.
 - **Variables:** Pueden ser continuas (tomando cualquier valor dentro de un rango) o enteras (limitadas a valores enteros específicos).

Beneficios

- **Flexibilidad:** Permite modelar problemas complejos con condiciones prácticas que requieren decisiones binarias o enteras (por ejemplo, sí/no decisiones).
- **Aplicaciones diversas:** Se usa en múltiples campos como la logística, la planificación de producción en fábricas, la asignación de recursos logísticos, gestionar la cadena de suministro, la energía y muchos otros.
- **Capacidad para manejar problemas reales:** Ideal para problemas donde algunas decisiones son discretas (enteras) y otras continuas, como la selección de proyectos más rentables, la ubicación de sistemas, y la optimización de redes.

4. MÉTODOS Y MATERIALES

Para la ejecución de este proyecto, se realizó un análisis comparativo entre el algoritmo MPPT más comúnmente usado, Perturbación y Observación (P&O), y un algoritmo MPPT propuesto basado en Programación Lineal Entera Mixta (MILP). En primer lugar, se detallarán los materiales e instrumentos empleados en el estudio. Posteriormente, se explicará la metodología aplicada para el desarrollo de esta investigación.

4.1 MATERIALES E INSTRUMENTOS

4.1.1 NASA Power Data Access Viewer

El NASA POWER Data Access Viewer (DAV) es una aplicación web que permite acceder a datos meteorológicos, solares y relacionados con la energía renovable. Esta herramienta es especialmente útil para investigadores, ingenieros y profesionales que requieren datos precisos para el planteamiento y estimación de sistemas de energía renovable [33].

Características:

- **Acceso a Datos Geoespaciales:** El DAV proporciona datos globales que pueden ser descargados en formatos de texto, tablas y archivos geoespaciales. Esto incluye información sobre parámetros meteorológicos y de radiación solar, crucial para planificación de proyectos de energía renovable.
- **Herramientas de Análisis:** Incluye herramientas para la creación de gráficos, informes personalizados, y proyecciones climáticas, facilitando un análisis más profundo de los datos disponibles.
- **Generación de Informes:** Los usuarios pueden crear informes climatológicos personalizados basados en los datos obtenidos para un punto específico.



Figura 4.1: NASA Power [33].

4.1.2 MATLAB

Es un entorno de programación y cálculo numérico de uso extendido entre ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Su nombre, abreviado de "MATrix LABoratory", subraya su especialización en la manipulación de matrices y arreglos, que son esenciales en diversas aplicaciones técnicas y científicas[34].

Características Principales

Lenguaje de Programación: Usa un lenguaje de alto nivel que permite expresar conceptos matemáticos de forma directa. Esta característica simplifica el desarrollo de algoritmos y la implementación de soluciones para problemas complejos.

Entorno de Desarrollo Integrado (IDE): Ofrece un entorno de escritorio optimizado para el análisis y diseño iterativo, incluyendo herramientas como el Live Editor. Esta funcionalidad permite crear scripts que integran código, resultados y texto formateado en un único documento ejecutable.

Toolboxes: MATLAB ofrece una variedad de toolboxes especializadas que extienden sus capacidades en áreas como procesamiento de señales, control de sistemas, finanzas, robótica y aprendizaje automático. Estas herramientas son desarrolladas profesionalmente y están bien documentadas.



Figura 4.2: MATLAB [34].

4.1.3 SIMULINK

Es un entorno de simulación y diseño basado en modelos que forma parte de la suite de MATLAB, desarrollado por MathWorks. Se utiliza principalmente para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos en diversas aplicaciones, incluyendo ingeniería, control de sistemas, procesamiento de señales y más [35], en este proyecto su utilización es fundamental debido a que en su gran mayoría nos desempeñaremos en su interfaz, para el modelado del sistema fotovoltaico, así como la implementación de los diferentes algoritmos.

Características Principales

Entorno de Diagramas de Bloques: Simulink permite a los usuarios crear modelos visuales mediante un editor gráfico que utiliza bloques para representar diferentes componentes y sus interacciones. Esto facilita la comprensión y el diseño de sistemas complejos.

Integración con MATLAB: Los modelos de Simulink pueden utilizar algoritmos de MATLAB, lo que permite a los usuarios realizar análisis avanzados y visualizaciones de datos tras las simulaciones.

Herramientas de Prueba y Verificación: Incluye herramientas para la prueba y verificación continua de sistemas embebidos, asegurando que los modelos cumplan con los requisitos especificados.

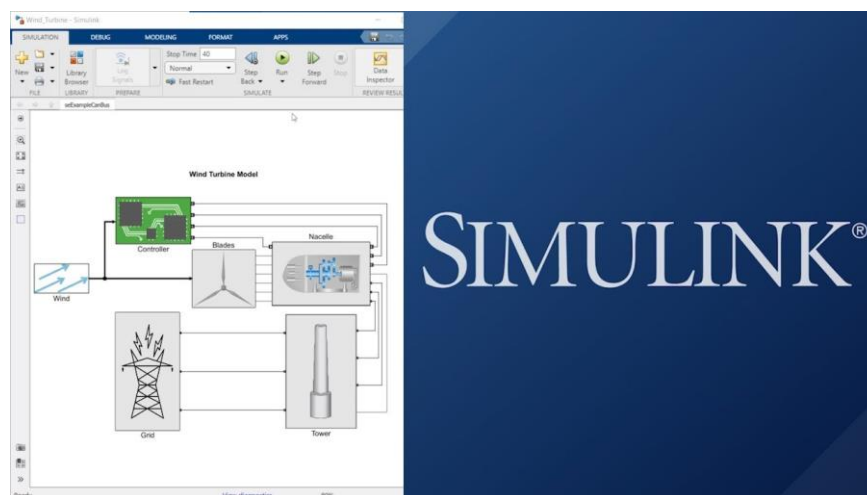


Figura 4.3: Simulink [35].

4.2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para alcanzar los objetivos del trabajo de investigación se detalla, a continuación, en la Figura 4.4. se precia el flujograma.

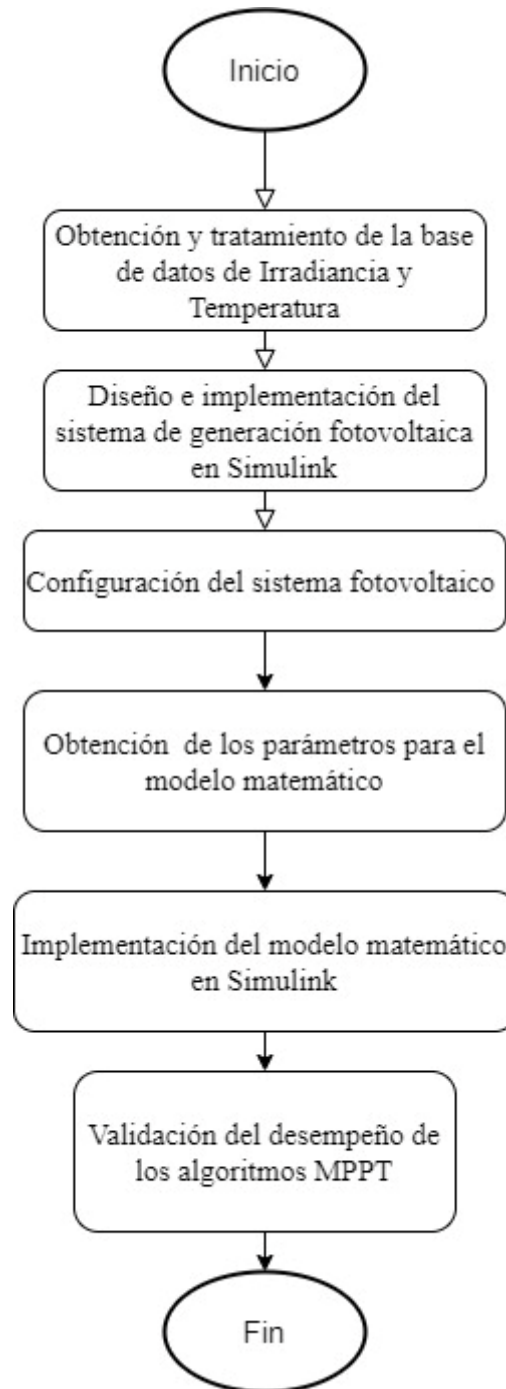


Figura 4.4. Diagrama de Flujos de la metodología.

4.3 OBTENCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para desarrollar el algoritmo MPPT y construir su base de datos, es crucial identificar correctamente las entradas y salidas de la red. Un algoritmo MPPT típico mide corriente y voltaje para determinar el punto de máxima potencia (MPP) del sistema fotovoltaico, ajustando el convertidor DC-DC para alcanzar dicho punto mediante un nivel de voltaje o una relación de trabajo. En este caso, se define como salida un voltaje de referencia que representa el voltaje en

el cual el sistema optimiza la transferencia de energía. Para ello se necesita datos como la temperatura y la irradiancia que afectan a los paneles solares. Estos datos fueron obtenidos de Nasa Power Daver, como se indica en la Figura 4.5.

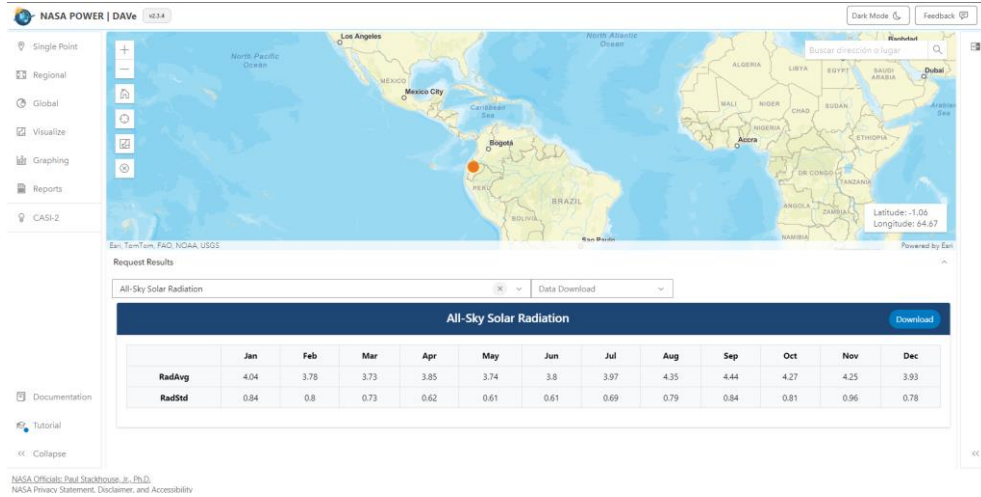


Figura 4.5: Obtención de datos de irradiancia [33].

4.3.1 Tratamiento de base de datos

A partir de la información proporcionada por NASA Power, solo se requieren los datos de irradiancia y temperatura, como se muestra en la Figura 4.6. Estos datos deben ser depurados, ya que durante ciertas horas del día la irradiancia puede ser nula o muy baja. Por lo tanto, se consideran válidos únicamente los datos con irradiancia superior a 500 W/m², con el fin de generar una base de datos con una irradiancia alta y representativa.

Datos de irradiancia solar							
AÑO	MES	DIA	HORA	IRRADIANCIA UTIL	IRRADIANCIA NO UTIL	TEMPERATURA	
2020	12	31	19	0	0	15.93	
2020	12	31	20	0	0	15.67	
2020	12	31	21	0	0	15.33	
2020	12	31	22	0	0	15.01	
2020	12	31	23	0	0	14.8	
2021	1	1	0	0	0	14.66	
2021	1	1	1	0	0	14.46	
2021	1	1	2	0	0	14.23	
2021	1	1	3	0	0	14.01	
2021	1	1	4	0	0	13.81	
2021	1	1	5	0	0	13.7	
2021	1	1	6	28.4	23.06	13.92	
2021	1	1	7	232.75	146.54	15.39	
2021	1	1	8	488.5	318.85	16.97	

Figura 4.6: Base de datos de irradiancia y temperatura [33].

Para filtrar los datos, se realiza lo siguiente:

- Importar datos de Excel a MATLAB.
- Seleccionar irradiancia y temperatura.
- Datos mayores o iguales a 500 W/m².

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta una gráfica de la tendencia de los datos de irradiancia.

4.4 DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

El sistema fotovoltaico está compuesto por cuatro conjuntos paralelos de diez paneles en serie cada uno. Los paneles son del modelo American Solar Wholesale ASW-250P, con una potencia nominal de 249.92 W por panel. Con esta configuración, el sistema alcanza una capacidad total de 10 kW bajo una irradiancia nominal de 1000 W/m² y una temperatura de 25 °C. Al arreglo fotovoltaico se conecta un convertidor DC-DC Buck-Boost el cual extrae la máxima potencia de los paneles a partir de la utilización de un algoritmo MPPT. En la Figura 4.7 se muestra el diagrama de bloques del sistema.

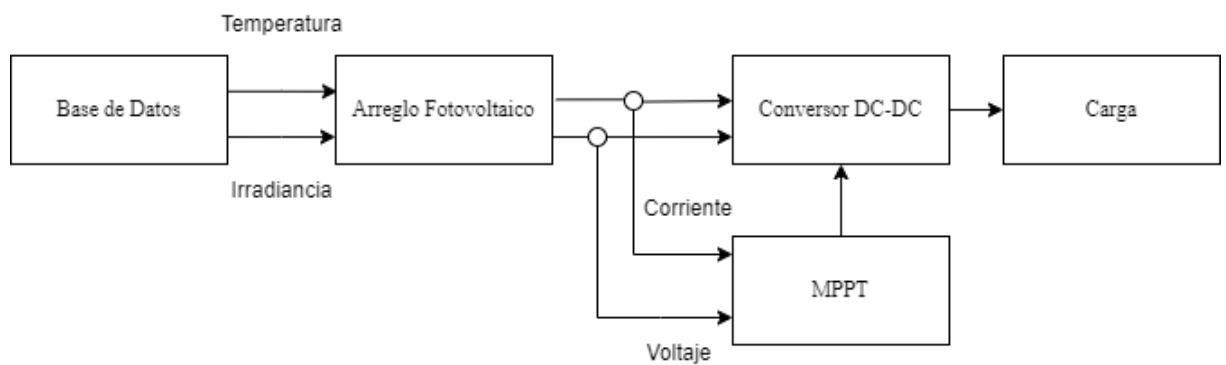


Figura 4.7: Diagrama de bloques del sistema.

4.4.1 Modelado del sistema fotovoltaico

Para emplear el arreglo fotovoltaico, se requieren los datos de irradiación y temperatura, los cuales ya han sido obtenidos de la base de datos depurada. Es esencial entender cómo Simulink procesa estos valores para calcular el voltaje y la corriente, la Figura 4.8 refleja el comportamiento del panel solar y permite determinar las incógnitas del modelo.

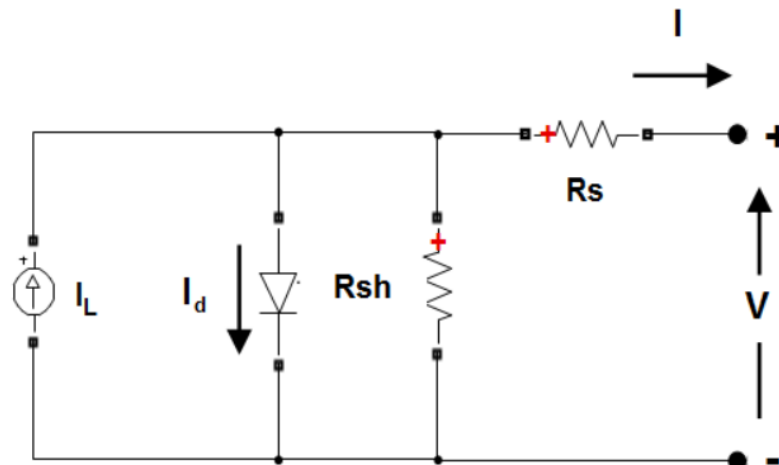


Figura 4.8: Comportamiento del arreglo fotovoltaico [36].

A continuación, modelaremos un panel fotovoltaico, la Tabla 4.1 muestra la simbología para el modelado de un panel fotovoltaico:

Tabla 4.1: Simbología de un panel fotovoltaico.

Simbología	Significado	Valor
I_{ph}	Fotocorriente (A)	-
I_{sc}	Corriente de cortocircuito (A)	8.42
k_i	Corriente de cortocircuito de una celda a 25°C y 1000 W/m ²	0.0032
T	Temperatura de operación (K)	-
T_n	Temperatura nominal (K)	298
G	Irradiación solar (W/m ²)	-
q	Carga de electrón (C)	1.6e-19
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto (V)	36.6
n	Factor de diodo	1.3
K	Constante de Boltzmann (J/K)	1.38e-23
E_{go}	Gráfico de banda de energía del semiconductor (eV)	1.1
N_s	Numero de celdas conectadas en serie	58
N_p	Numero de células conectadas en paralelo	-
R_s	Resistencia serie (Ω)	0.221
R_{sh}	Resistencia shunt (Ω)	415.405

En la ecuación (4.1 se obtiene la fotocorriente

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (4.1)$$

En la ecuación (4.2 se obtiene la corriente de saturación

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_{go} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n K} \right] \quad (4.2)$$

En la ecuación (4.3 se obtiene la corriente de saturación reversa

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q V_{oc}}{n N_s K T} \right)} - 1} \quad (4.3)$$

En la ecuación (4.4 se obtiene la corriente de Shunt

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (4.4)$$

Con la ecuación (4.1, (4.2, (4.3 y (4.4 obtenemos la corriente fotovoltaica del panel

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{n K N_s T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (4.5)$$

Posterior se obtiene el voltaje y corriente del arreglo fotovoltaico, como se muestra en las ecuaciones (4.6 y ecuación (4.7, respectivamente:

Corriente

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V_d}{V_T} \right) - 1 \right] \quad (4.6)$$

Voltaje

$$V_T = \frac{kT}{q} \times nl \times N_{cell} \quad (4.7)$$

Donde sus componentes son:

Tabla 4.2: Simbología para cálculo de corriente y voltaje.

Símbolo	Significado
I_d	Corriente de Diodo (A)
V_d	Tensión de diodo (V)
I_0	Corriente de saturación de diodo (A)
nl	Factor de idealidad del diodo, un numero cercano a 1.0
k	Const. de Boltzman = 1.3806e-23 J.K-1
q	Carga de electrones = 1.6022e-19 C
T	Temperatura de la celda (K)
N_{cell}	Numero de celdas conectadas en serie en un modulo

4.4.2 Frecuencia de conmutación

Para el diseño del arreglo fotovoltaico será de 20 [KHz]

La relación de trabajo del MPP para fase inicial será de 0.5.

El voltaje de salida será 352V a 1000 [W/ m²] y 25 [°C].

4.5 DISEÑO DEL ALGORITMO OBSERVADOR Y PERTURBADOR P&O

A continuación, se presenta el desarrollo del algoritmo perturbador-observador, cuya eficacia ha sido comprobada por diversos estudios. Dado que es uno de los algoritmos más utilizados en la búsqueda de MPP, al ser simple y efectivo, se ha elegido su aplicación para esta investigación.

4.5.1 Simbología

Antes de comenzar con el modelado del sistema debemos establecer todos los componentes que lo conforman. En la Tabla 4.3 se estable el índice que tomarán en las futuras ecuaciones y su significado.

Tabla 4.3: Simbología del modelado matemático.

Símbolo	Significado
V_{in}	Voltaje de Entrada
i_E	Corriente de entrada
v_L	Voltaje del inductor
i_L	Corriente del inductor
i_D	Corriente del diodo
i_C	Corriente del capacitor
V_o	Voltaje de Salida
i_o	Corriente de salida
R	Resistencia
i_{max}	Corriente máxima del inductor
i_{min}	Corriente mínima del inductor
δ	Relación de trabajo [0 – 1]
Δi	Variación de corriente
Δt	Variación de tiempo
P_E	Potencia de entrada
P_o	Potencia de salida
L_{cri}	Inductancia critica
L	Inductor
f	Frecuencia
T	Periodo
C_{in}	Capacitor de Entrada
C_{out}	Capacitor de Salida
MPP	Máximo Punto de Potencia
$MPPT$	Seguidor del Máximo Punto de Potencia
S	Interruptor de Potencia
E	Voltaje de entrada
D	Diodo
a	Tiempo, el interruptor de potencia está cerrado
b	Tiempo, el interruptor de potencia está abierto

4.5.2 Capacitor de entrada (CIN)

Se utiliza principalmente para filtrar y gestionar señales. Su función principal es permitir el paso de señales de corriente alterna (AC) mientras bloquea las señales de corriente continua (DC), además de ayudar a estabilización de voltaje [37]. En la Figura 4.9 se muestra su comportamiento.

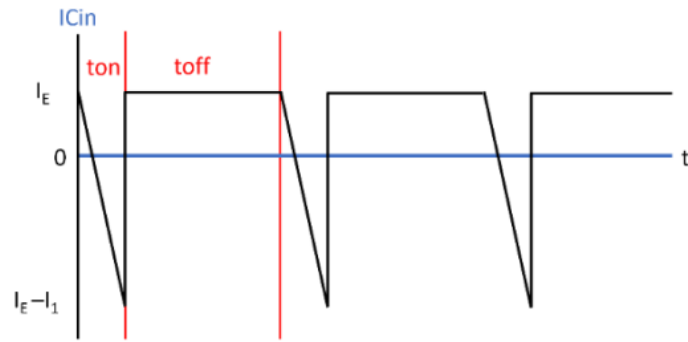


Figura 4.9: Comportamiento del Capacitor de entrada [37].

Rizado de voltaje en el capacitor de entrada

$$\Delta V_{C_{in}} = \frac{I_E(1 - \delta)}{f C_{in}} \quad (4.8)$$

$$C_{in} = \frac{I_E(1 - \delta)}{f \Delta V_{C_{in}}} \quad (4.9)$$

El voltaje de entrada en el máximo punto de potencia es 352 [V] y la corriente en el máximo punto de potencia es 28.4 [A], entonces se tiene:

$$I_E = 28.4[A]$$

$$\Delta V_{C_{in}} = 1[V] \quad (4.10)$$

$$C_{in} > \frac{28.4(1 - 0.5)}{20000(1)} > 0.710[mF] \rightarrow C_{in} = 1[mF] \quad (4.11)$$

4.5.3 Inductancia

Realizamos los cálculos para la inductancia, a través de las siguientes formulas:

$$L = \frac{(1 - \delta)^2 R}{2f} \quad (4.12)$$

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{352^2}{9996.8} = 12.394[\Omega] \quad (4.13)$$

$$L = \frac{(1 - 0.5)^2 6.2402}{2(20000)} = 77.46[\mu H] \quad (4.14)$$

Para garantizar que el convertidor opere en modo de conducción discontinua, la inductancia debe ser inferior al valor calculado. Por lo tanto:

$$L \leq 77.46(0.6) \rightarrow L = 47[\mu H]$$

4.5.4 Capacitor de salida (COUT)

$$C_{out} \geq \frac{V_o \delta}{2\Delta V_o R f} \quad (4.15)$$

Al igual que la para la entrada elijo un valor de variación de voltaje de 1 [V], entonces:

$$C_{out} \geq \frac{352(0.5)}{2(1)12.394(20000)} \geq 0.355[mF] \rightarrow C_{out} = 1[mF] \quad (4.16)$$

4.5.5 Relación de trabajo, conducción discontinua (CD)

Procedemos a obtener la relación de trabajo del circuito en conducción continúa con la ecuación (4.17).

$$\delta = \frac{V_o}{V_{in} \sqrt{\frac{R}{2fL}}} = \frac{352}{352 \sqrt{\frac{12.394}{2(20000)47(10^{-6})}}} = 0.3895 \quad (4.17)$$

Para expresarlo de forma clara en Tabla 4.4 se presenta un resumen de los valores obtenidos en este análisis matemático.

Tabla 4.4: Valores del diseño del convertidor.

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia de entrada	P_E	9996.8 [W]
Voltaje de entrada	V_{in}	352 [V]
Corriente de entrada	i_E	28.4 [A]
Voltaje de salida	V_o	352 [V]
Frecuencia de conmutación	f	20 [kHz]
Relación de trabajo	δ	0.5
Variación de voltaje de entrada	ΔV_{in}	1 [V]
Variación de voltaje de salida	ΔV_o	1 [V]

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama del convertidor DC-DC al implementar en Simulink el cual tiene el algoritmo P&O:

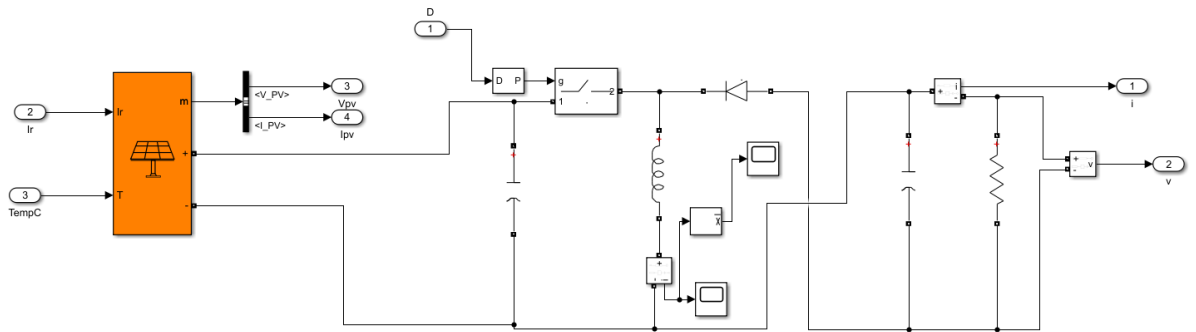


Figura 4.10: Convertidor DC-DC P&O.

4.5.6 Algoritmo Perturbar y observar (P&O)

Su simplicidad y efectividad lo convierten en una opción muy prometedora para nuestra investigación, para controlar convertidores DC-DC en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos.

El comportamiento del algoritmo [29], es incrementar o disminuir periódicamente la tensión en el convertidor DC-DC, midiendo la potencia antes y después de la perturbación, estos datos se comparan, si la potencia aumenta se continúa perturbando en la misma dirección y si la potencia disminuye el algoritmo invierte la perturbación, este proceso se repite continuamente para encontrar el punto de máxima potencia (MPP), como se aprecia en el diagrama de flujos de la Figura 3.8. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la implementación en pseudo código y posterior mente su implementación en Simulink.

En la Figura 4.11 se muestra la implementación en Simulink, con los arreglos del algoritmo P&O y como estos interactúan con el voltaje y corriente.

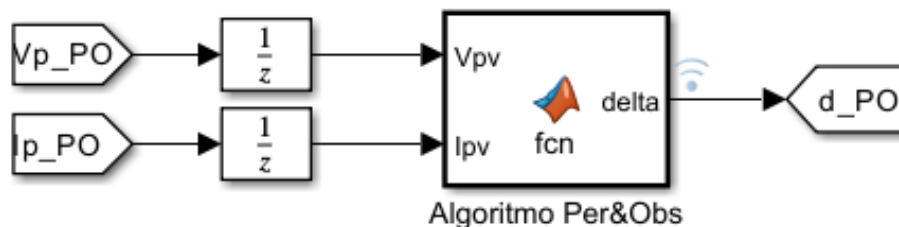


Figura 4.11: Implementación de algoritmo P&O en Simulink.

4.6 CONTROL DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO

4.6.1 Convertidor DC-DC Buck-Boost

Es un dispositivo electrónico que convierte un voltaje de entrada en un voltaje de salida que puede ser ajustado para ser mayor o menor, según las demandas del sistema. Este tipo de convertidor resulta especialmente útil en aplicaciones donde el voltaje de entrada es variable y se necesita mantener un voltaje de salida constante [38]. En la Figura 4.12, se representa el diagrama del conversor DC-DC Buck-Boost, con su funcionamiento al entrar en accionamiento.

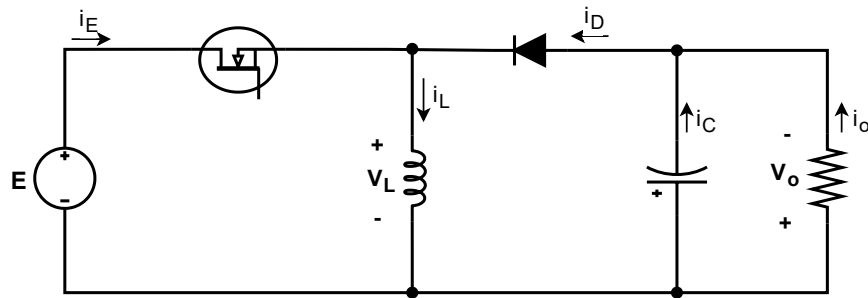


Figura 4.12: Diagrama del convertidor DC-DC.

El comportamiento del convertidor se comprende mejor en la Figura 4.13, que explica el comportamiento, en los dos tipos que tiene el convertidor DC-DC y uno adicional que es el crítico.

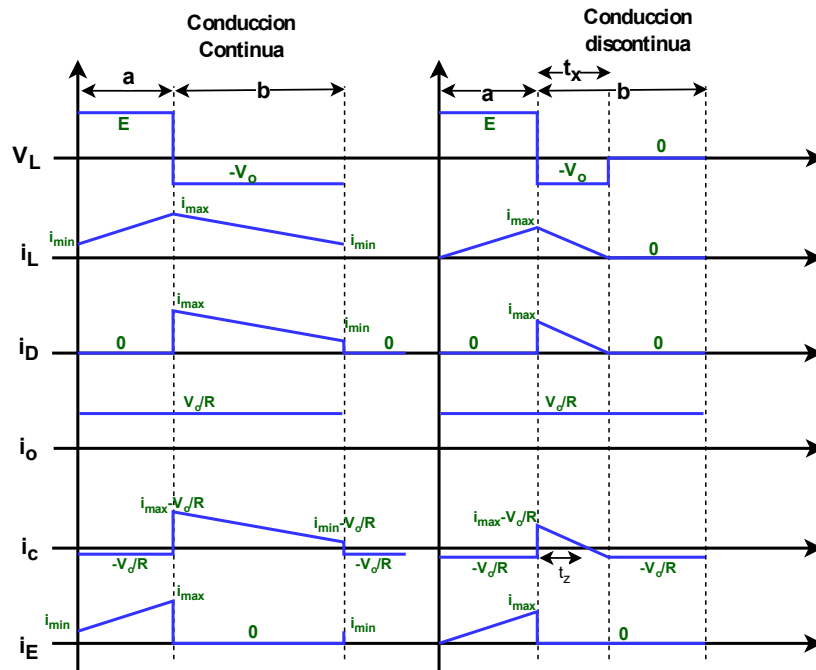


Figura 4.13: Funcionamiento del Convertidor DC-DC.

4.6.2 Análisis en conducción Continua:

Voltaje promedio en un inductor con alimentación DC

$$V_L = \frac{1}{T} \left[\int_0^a E dt - \int_a^b V_o dt \right] = 0 \quad (4.18)$$

Salida del convertidor en conducción continua (δ es la relación del ciclo de trabajo (0 a 1))

$$V_o = \frac{E\delta}{1-\delta} \rightarrow \begin{cases} \delta > 0.5 \rightarrow V_o > E \\ \delta = 0.5 \rightarrow V_o = E \\ \delta < 0.5 \rightarrow V_o < E \end{cases} \quad (4.19)$$

Para $0 < t < a$ (análisis cuando el interruptor de potencia está cerrado)

$$V_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = E \rightarrow \Delta i = \frac{E\Delta t}{L} \quad (4.20)$$

Alteración de la corriente en el inductor cuando el interruptor de potencia está cerrado.

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{E\delta T}{L} \quad (4.21)$$

Para $a < t < b$ (análisis cuando el interruptor de potencia está abierto)

$$\begin{aligned} V_L &= -V_o \\ \Delta i &= -\frac{V_o}{L} \Delta t \end{aligned} \quad (4.22)$$

Cambio de la corriente en el inductor cuando el interruptor se encuentra en estado abierto.

$$I_{min} - I_{max} = -\frac{V_o}{L} (1-\delta)T \quad (4.23)$$

Relación de potencias, se utiliza para obtener el nivel mínimo y máximo de la variación de la corriente del inductor en conducción continua

$$P_E = P_o$$

$$\frac{1}{T} \left[E \left(\frac{I_{max} + I_{min}}{2} \right) \delta T \right] = \frac{V_o^2}{R} \quad (4.24)$$

$$I_{max} + I_{min} = \frac{2E\delta}{R(1-\delta)^2} \quad (4.25)$$

Sumando Ecuación (4.25) y Ecuación (4.21)

$$I_{max} = \frac{E\delta}{R(1-\delta)^2} + \frac{E\delta}{2fL} \quad (4.26)$$

Reemplazando ecuación (4.26) en ecuación (4.21) se obtiene:

$$I_{min} = \frac{E\delta}{R(1-\delta)^2} - \frac{E\delta}{2fL} \quad (4.27)$$

$$P_o = \frac{E^2\delta^2}{R(1-\delta)^2} \quad (4.28)$$

4.6.3 Análisis Caso Crítico

Para determinar el valor de inductancia que le permite trabajar en conducción continua o conducción discontinua, usamos ($I_{min} = 0$).

$$I_{min} = \frac{E\delta}{R(1-\delta)^2} - \frac{E\delta}{2fL} = 0 \quad (4.29)$$

Procedemos a despejar:

$$\begin{aligned} \frac{E\delta}{R(1-\delta)^2} &= \frac{E\delta}{2fL} \\ \delta &= 1 - \sqrt{\frac{2fL}{R}} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Obteniendo:

$$\frac{t_x}{I_{max}} = \frac{t_z}{I_{max} - \frac{V_o}{R}} \quad (4.31)$$

Inductancia critica

$$L_{cri} = \frac{(1-\delta)^2 R}{2f} \quad (4.32)$$

$$\begin{cases} L > L_{cri} \rightarrow \text{conduccion continua} \\ L = L_{cri} \rightarrow \text{conduccion critica} \\ L < L_{cri} \rightarrow \text{conduccion discontinua} \end{cases}$$

4.6.4 Análisis en conducción discontinua

Su interpretación se distingue, ya que en conducción discontinua llega a 0.

$$V_L = 0 = \frac{1}{T} \left[\int_0^a E dt - \int_a^{t_x} V_o dt \right] \quad (4.33)$$

$$E\delta T - V_o t_x = 0$$

$$t_x = \frac{E\delta T}{V_o}$$

Analizando de $0 < t < a$

$$E = V_L$$

$$\Delta i = I_{max} = \frac{E\delta}{fL} \quad (4.34)$$

Analizando de $a < t < t_x$

$$V_L = -V_o$$

$$I_{max} = \frac{V_o}{fL} (1 - \delta) \quad (4.35)$$

Relacionando Potencias

$$P_E = P_o$$

$$\frac{E}{T} \left(\frac{I_{max}}{2} \delta T \right) = \frac{V_o^2}{R}$$

Obteniendo:

$$V_o = E\delta \sqrt{\frac{R}{2fL}} \quad (4.36)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{E^2 \delta^2}{2fL} \quad (4.37)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2P_o fL}{E^2}} \quad (4.38)$$

En la Figura 4.14 se muestra el diagrama del convertidor DC-DC con el arreglo de MILP y su implementación en Simulink:

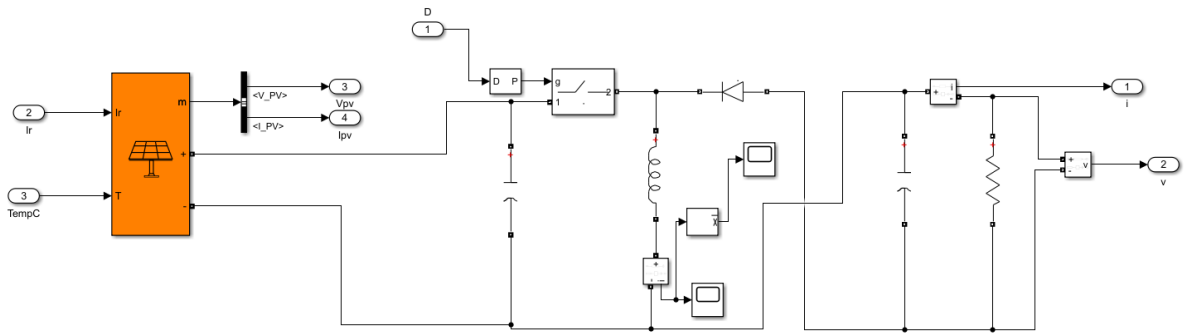


Figura 4.14: Convertidor DC-DC MILP.

4.6.5 Ajuste de superficies de datos

Matlab posee una función “fitlm” la cual se utiliza para ajustar curvas o superficies a datos, lo que es fundamental en el análisis de regresión y la modelización de sistemas [39].

Características

- Utiliza el método de mínimos cuadrados para hallar los coeficientes del modelo que mejor se ajustan a la base de datos.
- Admite una variedad de tipos de modelos, tanto lineales como no lineales.

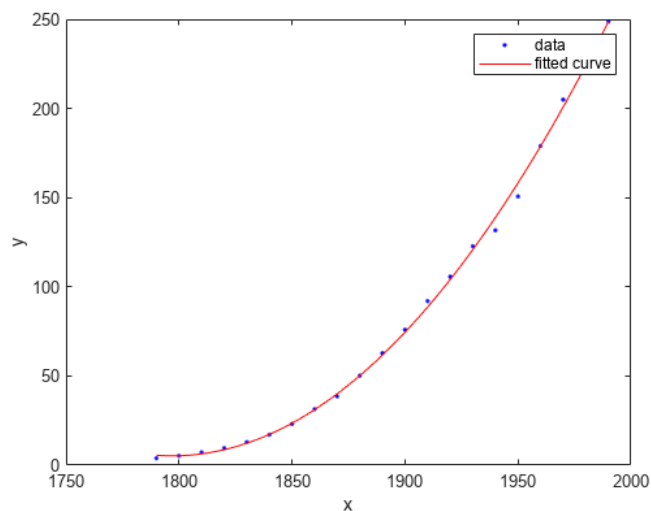


Figura 4.15: Linealización de un parámetro [39].

Para linealizar un sistema no lineal, se aproxima su comportamiento alrededor de un punto de equilibrio mediante un sistema lineal más sencillo de analizar. En este caso se linealiza el voltaje y la corriente para que los datos obtenidos puedan ser utilizados como parámetros en la función.

Primero debemos usar la biblioteca de fitlm, para poder linealizar los parámetros de voltaje y corriente, como se muestra a continuación, en el pseudo código:

```
modeloV=fitlm([IR, Temp],V,'poly14')
```

Donde:

Fitlm = biblioteca de linealización de Matlab

IR = Datos de irradiancia.

Temp = Datos de temperatura

Poly1 = polinomio de grado 14 para linealizar.

Este Linear modelo Poly14, utiliza la siguiente fórmula para linealizar:

$$\text{modelo}(x, y) = p00 + p10x + p01y \quad (4.39)$$

Donde:

x = Irradiancia de la base de datos (IR)

y = Temperatura de la base de datos (Temp)

Con esto se encuentra la linealización de los parámetros de voltaje y corriente, debido que el Poly14 nos entrega coeficientes (con límites de confianza del 95%). A continuación, se muestran los coeficientes que encuentra maltab y que posterior se utiliza para que el algoritmo funcione de pendiendo del cambio de irradiancia y temperatura.

Coefficiente de voltaje:

p00 = 446;

p10 = 0.3283;

p01 = -23.44;

Coefficientes de corriente:

p00 = 0.5822;

p10 = 0.03375;

p01 = -0.2875;

En la Figura 4.16 se presenta la gráfica de cómo se comporta nuestra linealización de voltaje con respecto a los datos de temperatura e irradiancia.

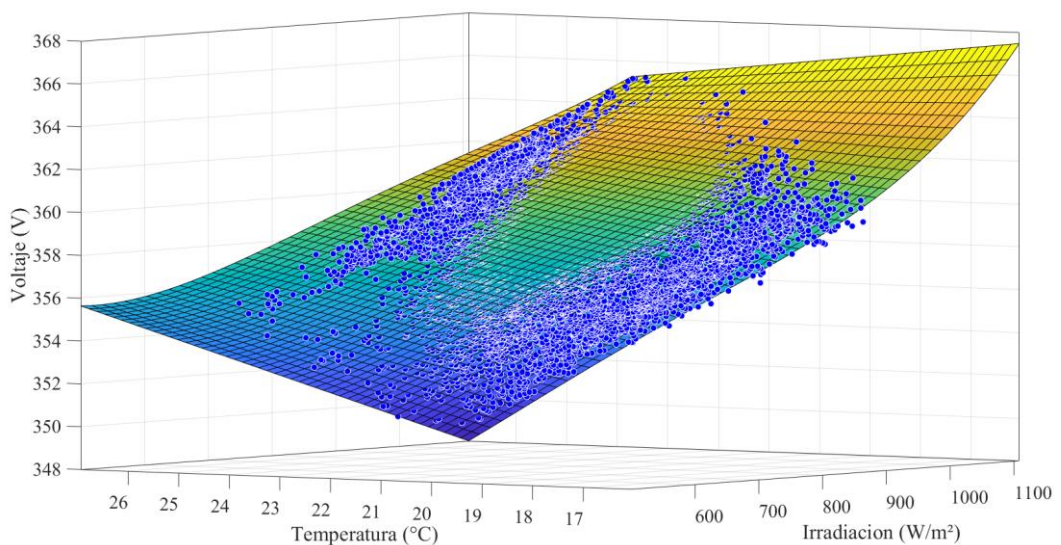


Figura 4.16: Reajuste de voltaje.

En la Figura 4.17 se presenta la gráfica de cómo se comporta nuestra linealización de corriente con respecto a los datos de temperatura e irradiancia.

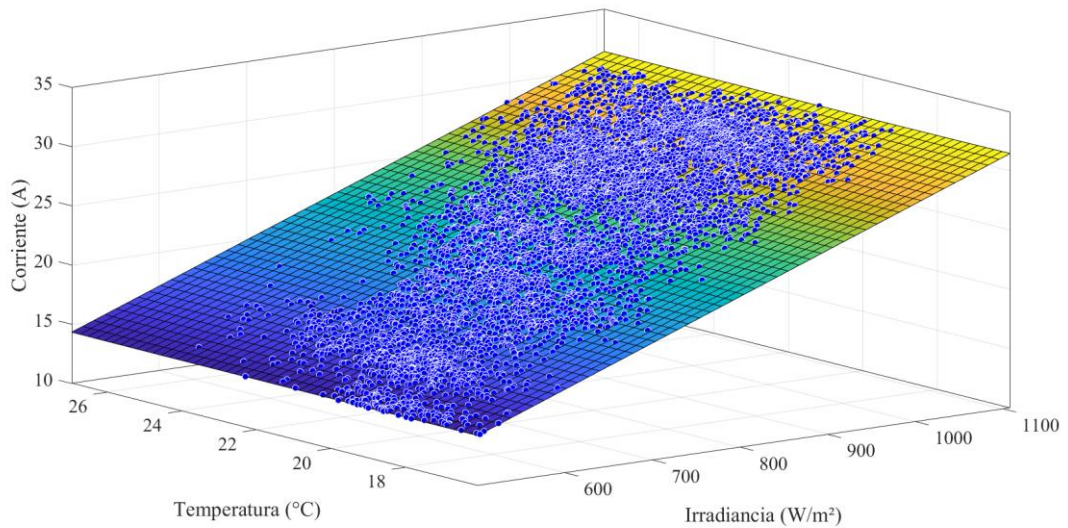


Figura 4.17: Linealización de corriente.

Voltaje

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra la implementación del algoritmo de linealización de voltaje al sistema fotovoltaico en Simulink.

Corriente

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra la implementación del algoritmo de linealización de corriente al sistema fotovoltaico en Simulink.

Delta

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra la implementación del algoritmo Delta al sistema fotovoltaico en Simulink.

En la Figura 4.18 se muestra la linealización del Voltaje y Corriente, así como se observa que estos dos parámetros alimentan a la función, de donde obtenemos el valor de nuestra variable Delta, esta es la implementación del algoritmo MILP a Simulink.

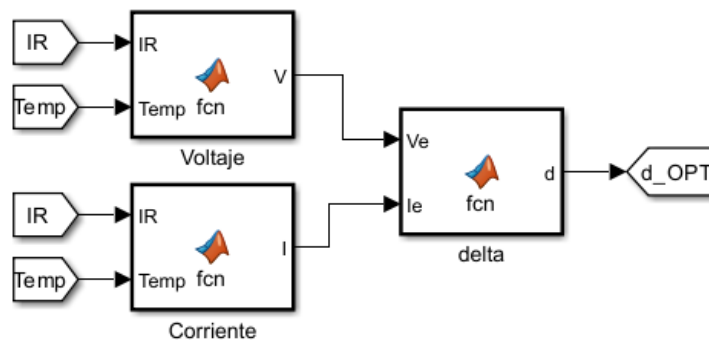


Figura 4.18: Implementación de Algoritmo MILP en Simulink.

4.7 ALGORITMO P&O EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para llevar a cabo la implementación del algoritmo P&O en el sistema fotovoltaico, es necesario integrar los bloques de Simulink mostrados en la Figura 4.11 dentro del sistema fotovoltaico. La Figura 4.19 ilustra el sistema fotovoltaico completo con el algoritmo P&O aplicado.

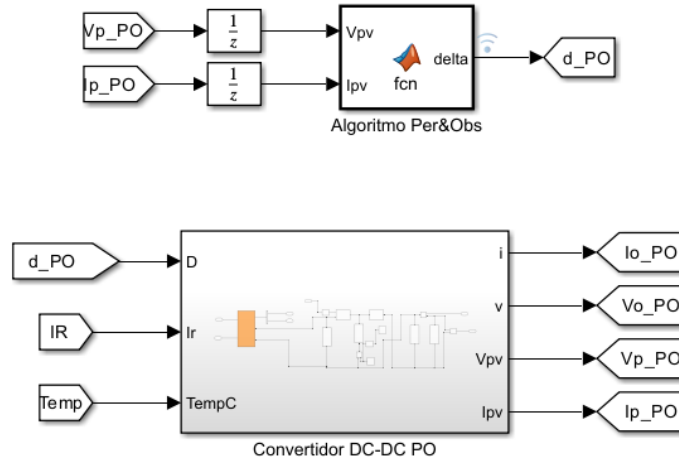


Figura 4.19: Algoritmo P&O en el sistema fotovoltaico en Simulink.

4.8 ALGORITMO MILP EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para implementar el algoritmo MILP en el sistema fotovoltaico, es necesario integrarlo con el convertidor DC-DC, como se muestra en la Figura 4.18 dentro de Simulink. La Figura 4.20 presenta el sistema fotovoltaico completo con el algoritmo MILP aplicado.

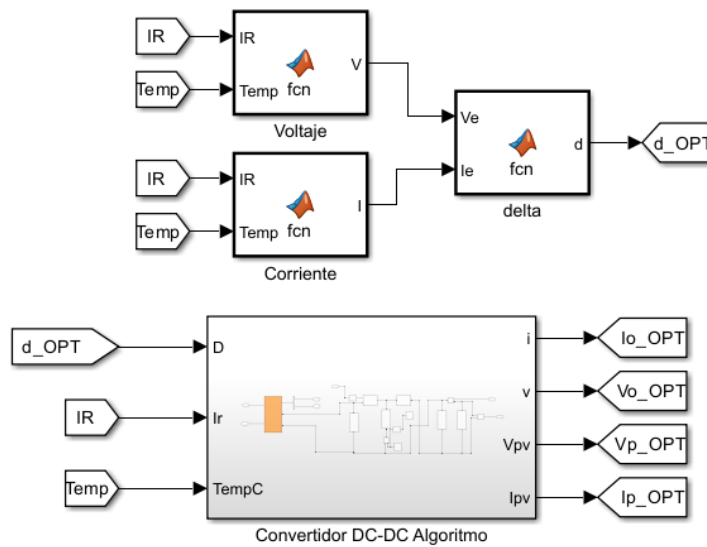


Figura 4.20: Algoritmo MILP en el sistema fotovoltaico en Simulink.

4.9 COMPROBACIÓN DE ERROR

Para realizar el análisis de resultados debemos integrar un proceso adicional, Se utilizará el error cuadrático medio normalizado, del algoritmo MILP y el P&O, con referencia a un modelo ideal, el cual permite obtener el porcentaje de la aproximación de nuestros modelos. Con esta comprobación entre el porcentaje sea cercano a cero, más eficiente en nuestro algoritmo MILP, caso contrario entre más se acerca a 1, es menos eficiente. En la Figura 4.21 se implementa el Error porcentual a Simulink.

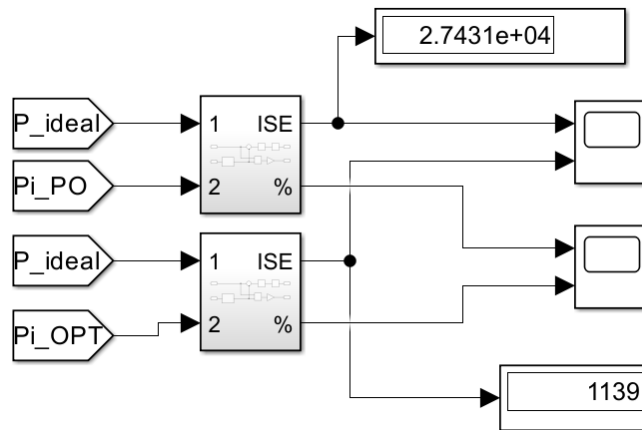


Figura 4.21: Implementación del ISE en Simulink.

4.10 SISTEMA FINAL

Se obtiene los dos sistemas, el P&O y el MILP, como se muestra en la Figura 4.22, Se procede a juntarlos dentro de Simulink, ahora se ejecutan los dos algoritmos, que interactuarán con la base de datos, para posteriormente hacer un análisis de los resultados que se obtuvieron.

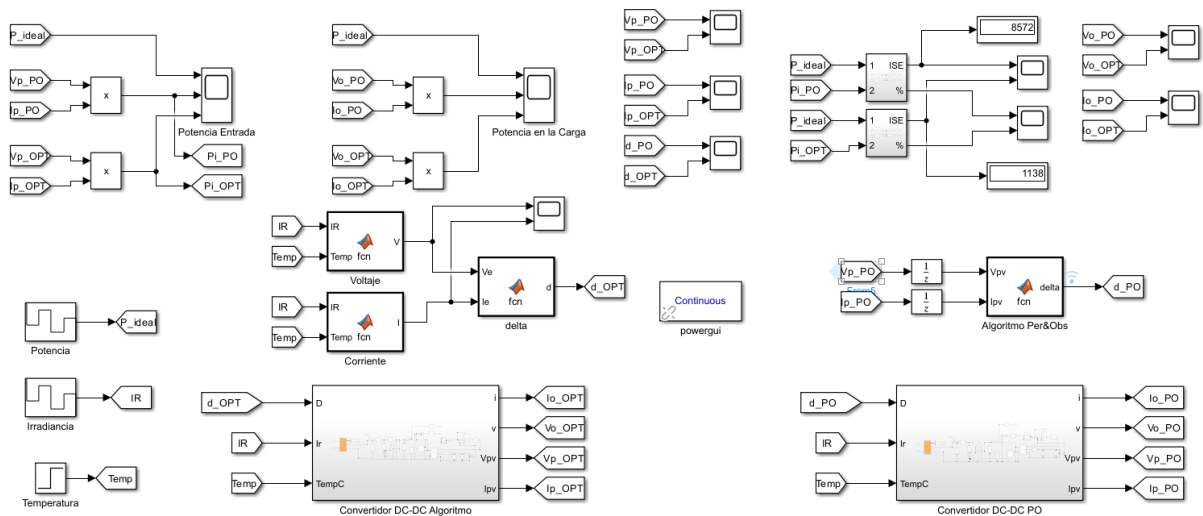


Figura 4.22: Sistema P&O vs MILP.

5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados derivados de la implementación de los algoritmos en el sistema fotovoltaico. Se realiza una comparación de la eficiencia entre los algoritmos MILP y P&O en la búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT), utilizando el error cuadrático medio normalizado como métrica. Este error se calcula comparando la potencia ideal que el arreglo fotovoltaico debería generar con la potencia real obtenida al emplear cada uno de los algoritmos.

5.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para analizar el rendimiento de los algoritmos MPPT, se evaluará su desempeño aplicando cambios en los niveles de irradiancia recibidos por el arreglo fotovoltaico. La Figura 5.1 muestra las curvas características del arreglo bajo diferentes condiciones de irradiancia, manteniendo una temperatura constante de 25 °C.

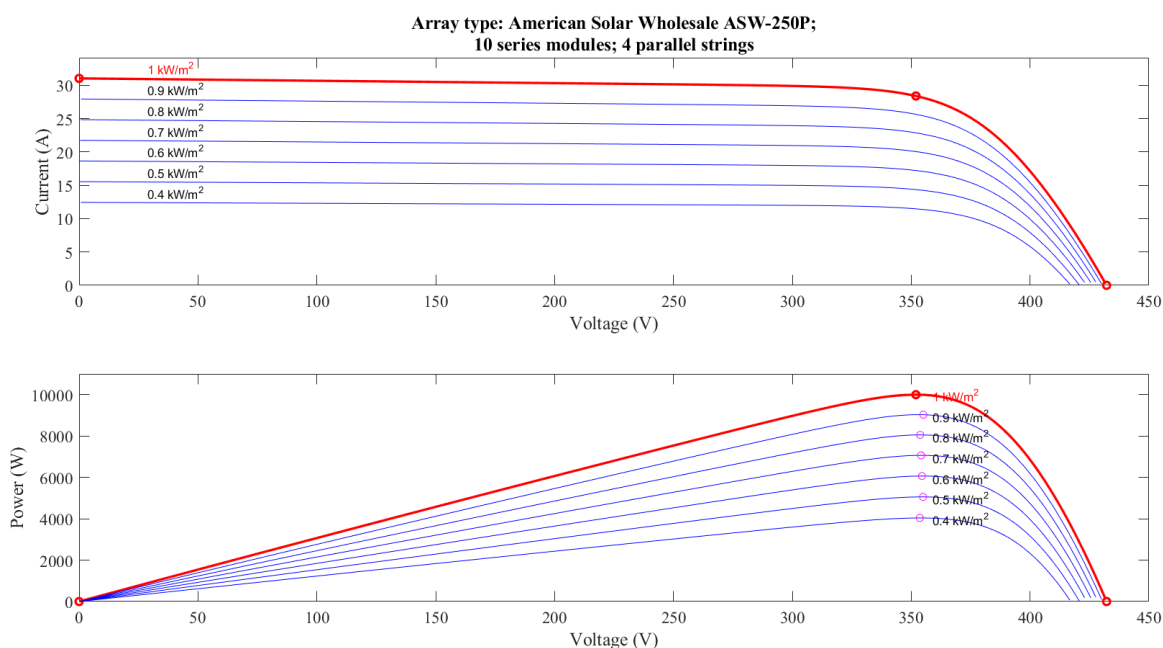


Figura 5.1: Curvas características del arreglo fotovoltaico, para diferentes niveles de irradiancia.

A partir de la Figura 5.1 la irradiancia tiene valores de 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 [W/m²], correspondientes a potencias de salida ideales de 4038.93, 5055.91, 6064.98, 7064.3, 8053.24, 9027.53 y 9996.8 [W], respectivamente. Con estos datos de irradiancia y sus potencias ideales, se evalúa el desempeño de los algoritmos MPPT.

5.1.1 P&O

En la Figura 5.2 se muestra el comportamiento corriente media en el inductor del convertidor con el algoritmo P&O, después de interactuar con el arreglo fotovoltaico, se puede evidenciar que su comportamiento es errático y con varios picos de corriente.

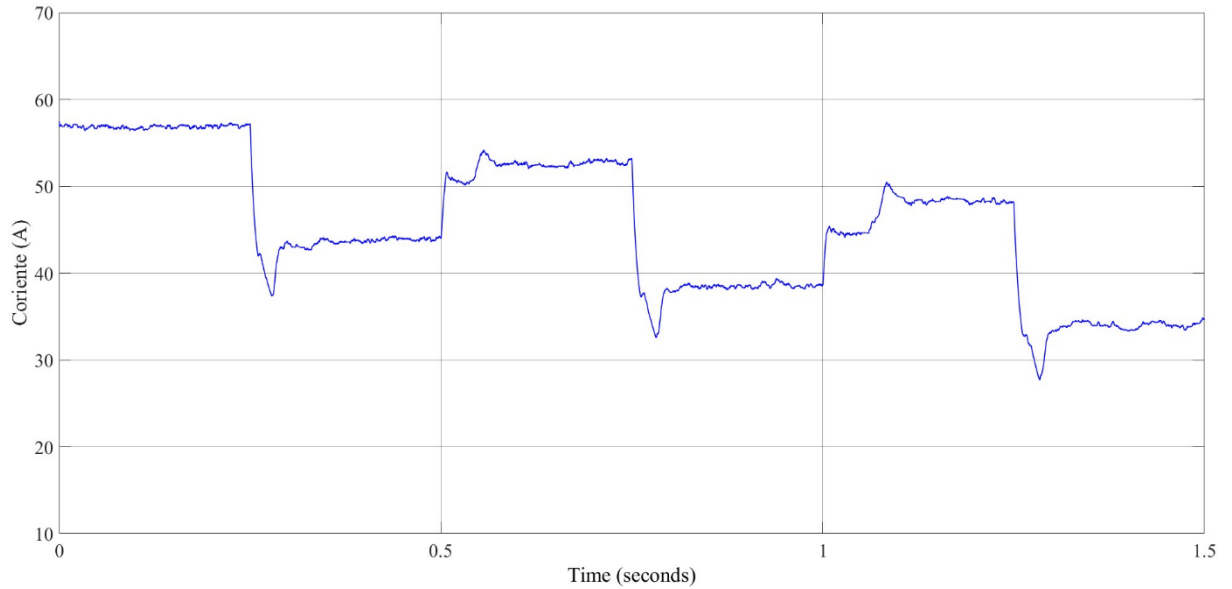


Figura 5.2: Corriente media del Inductor del P&O.

5.1.2 Algoritmo MILP

En la Figura 5.3 se muestra la corriente media en el inductor del convertidor con el algoritmo propuesto MILP, Claramente se observa un rendimiento superior al algoritmo P&O, dado que comportamiento se acerca modelo ideal planteado.

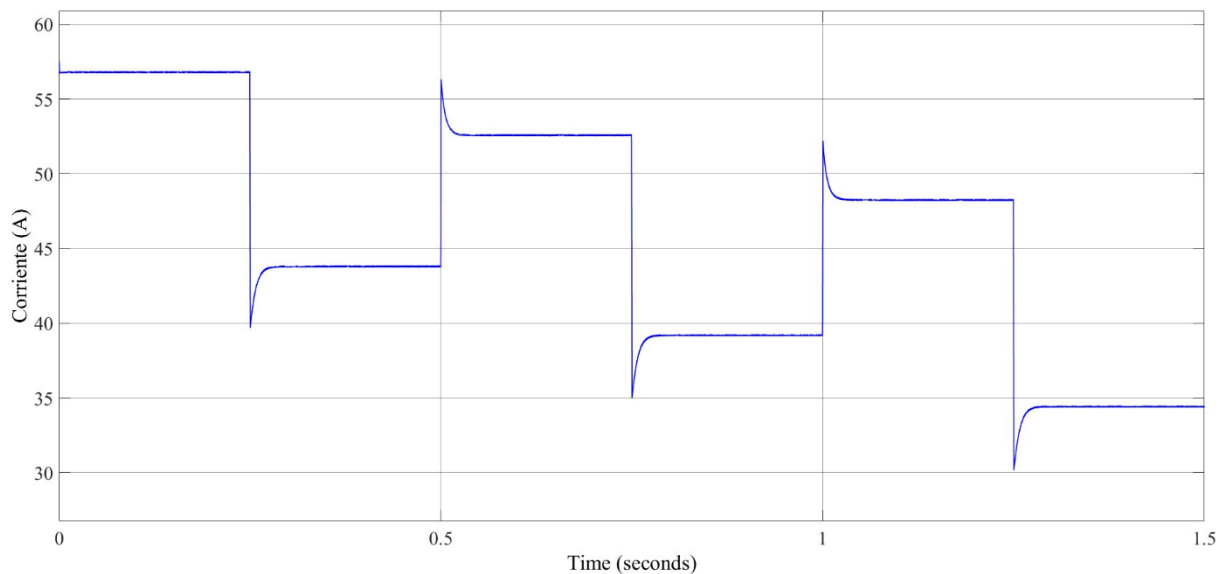


Figura 5.3: Corriente media del inductor del MILP.

5.2 ALGORITMO P&O VS MILP

Una vez analizada la interacción de cada algoritmo con el arreglo fotovoltaico, se procede a comparar el modelo P&O con el algoritmo propuesto MILP. El algoritmo MILP genera un voltaje de referencia basado en las lecturas de irradiancia y temperatura, que el controlador PI utiliza para ajustar el voltaje del MPP. En contraste, el algoritmo P&O no utiliza un control específico, el ajusta la relación de trabajo del sistema mediante variaciones en potencia, voltaje y corriente para alcanzar el MPP.

5.2.1 Voltaje

En la Figura 5.4 se observan las respuestas de los algoritmos MILP y P&O. Se compara el voltaje generado por el arreglo fotovoltaico, representado en azul para el algoritmo P&O y en rojo para el algoritmo MILP propuesto. La gráfica muestra que el sistema con el algoritmo MILP logra una respuesta de voltaje más rápida y estable, mientras que el voltaje del arreglo bajo el algoritmo P&O es notablemente errático. Esto se debe a que P&O perturba continuamente el sistema para ajustar la relación de trabajo y alcanzar el punto de máxima potencia (MPP). En cambio, el modelo MILP genera un valor de voltaje de referencia estable, permitiendo que el controlador PI ajuste el convertidor DC-DC para que el sistema funcione de manera óptima en el MPP, resultando en respuestas de voltaje y corriente más rápidas y consistentes.

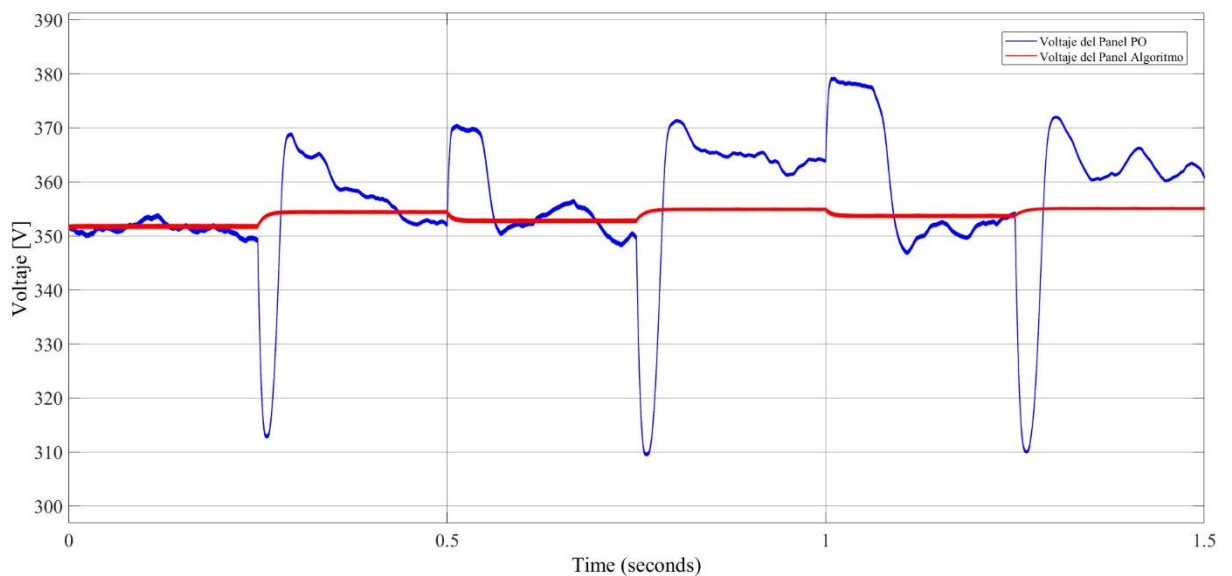


Figura 5.4: Voltaje P&O vs MILP.

5.2.2 Corriente

En la Figura 5.5 se hace una comparación de la corriente generada por el arreglo fotovoltaico del algoritmo P&O (Azul) y con el algoritmo propuesto MILP (Rojo). Se muestra que el sistema propuesto tiene una respuesta más rápida que el algoritmo P&O.

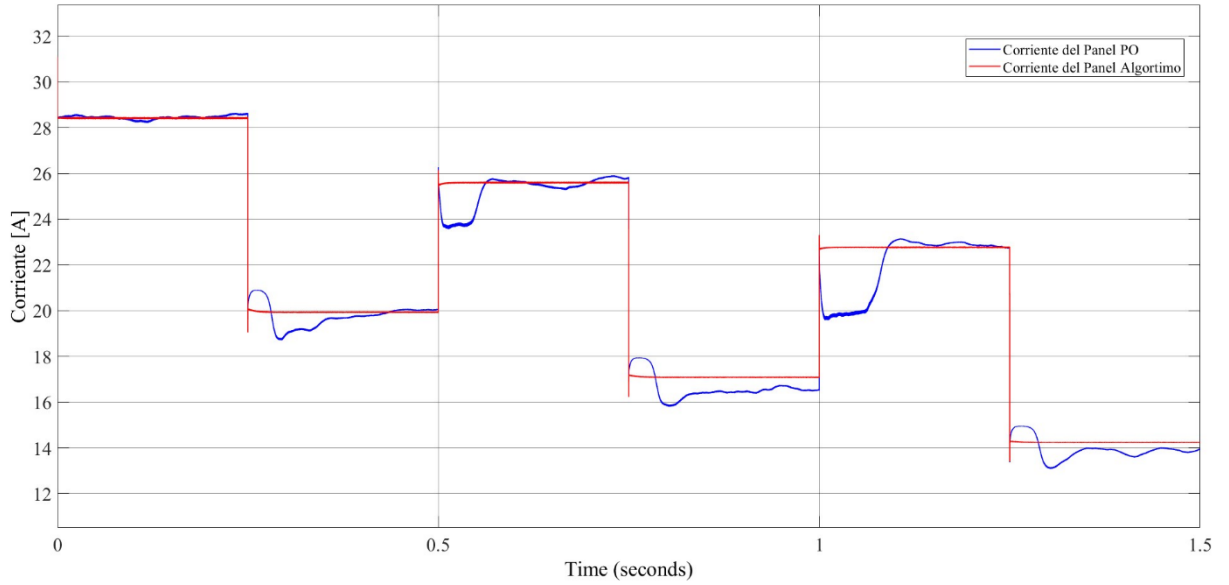


Figura 5.5: Corriente P&O vs MILP.

5.2.3 Delta

En la Figura 5.6 se hace una comparación de la salida del algoritmo PO (Azul) con la salida del algoritmo propuesto (Rojo). La relación de trabajo del sistema se evidencia que el algoritmo MILP tiene un mejor desempeño con respecto al P&O.

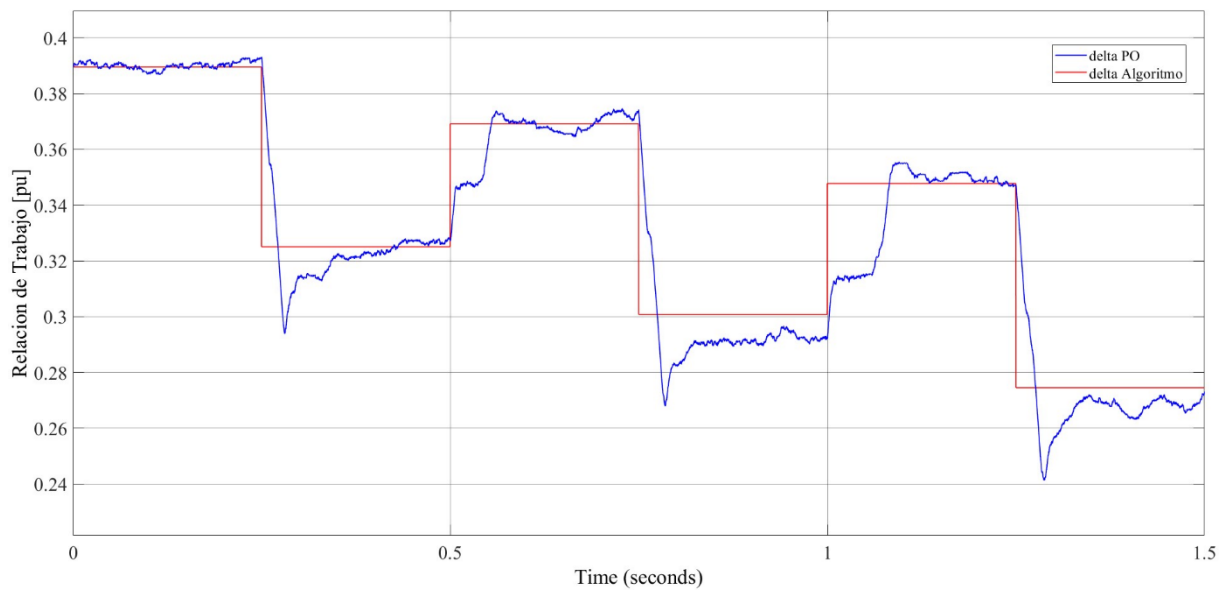


Figura 5.6: Delta P&O vs MILP.

5.3 CASOS DE ESTUDIO

5.3.1 Potencia generada

La Figura 5.7 muestra la potencia generada por el arreglo fotovoltaico al utilizar los algoritmos P&O y MILP, así como el modelo ideal, que obtenemos de las irradiancias propuestas anteriormente. Se presenta la respuesta del sistema en la búsqueda del punto de máxima potencia, se compara las potencias encontradas por los diferentes algoritmos MPPT. La potencia ideal se representa en una línea entre cortada de color verde, la potencia con el algoritmo P&O en azul y la potencia con el algoritmo MILP en rojo.

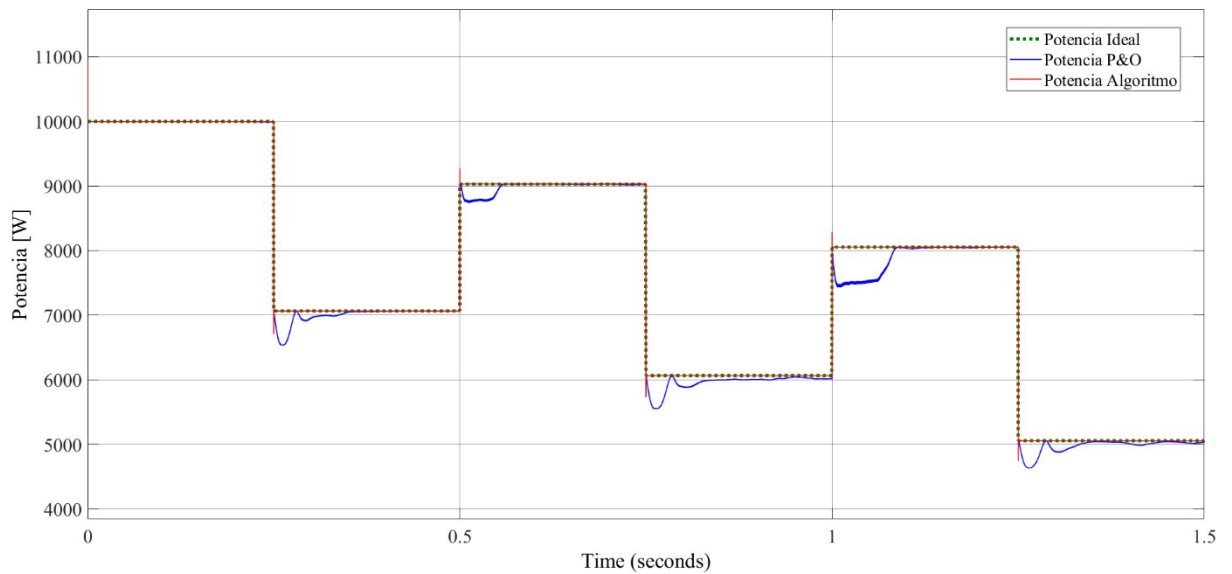


Figura 5.7: Potencia generada, P&O vs MILP vs Ideal.

Analizando los resultados con NRMSE, en la Figura 5.8 se puede ver que la respuesta del sistema MILP es un 6.87% más cercano al sistema ideal, a diferencia que P&O es un 29.87%.

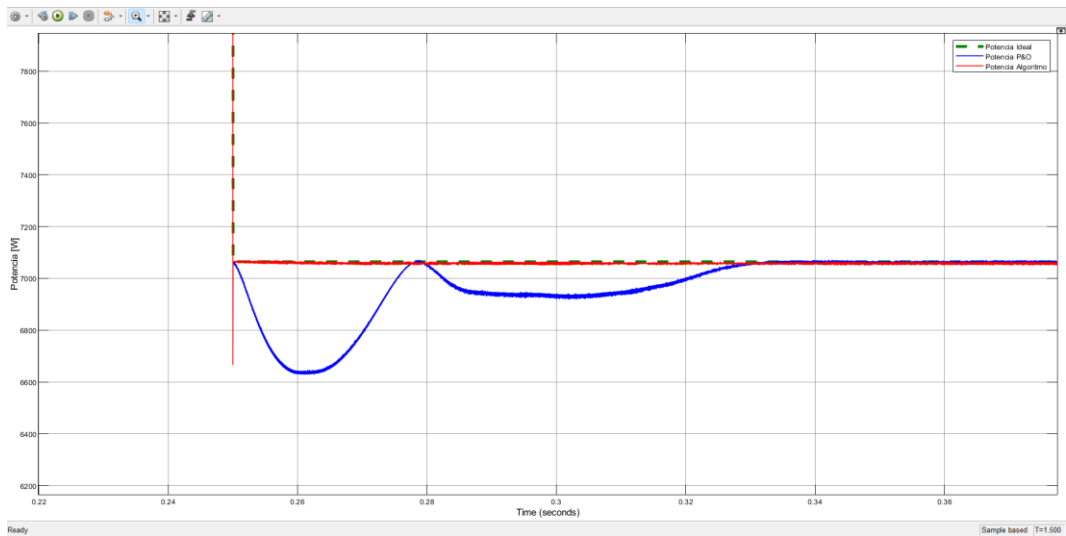


Figura 5.8: Análisis 1, P&O vs MILP vs Ideal.

5.3.2 Potencia entregada a la carga DC

En la Figura 5.9 se hace una comparación de las potencias entregadas a la carga (salida del convertidor DC-DC) con los diferentes algoritmos MPPT con respecto a la potencia ideal de generación (Verde = Potencia Ideal, Azul = Potencia con el algoritmo PO, Roja = Potencia con el algoritmo propuesto).

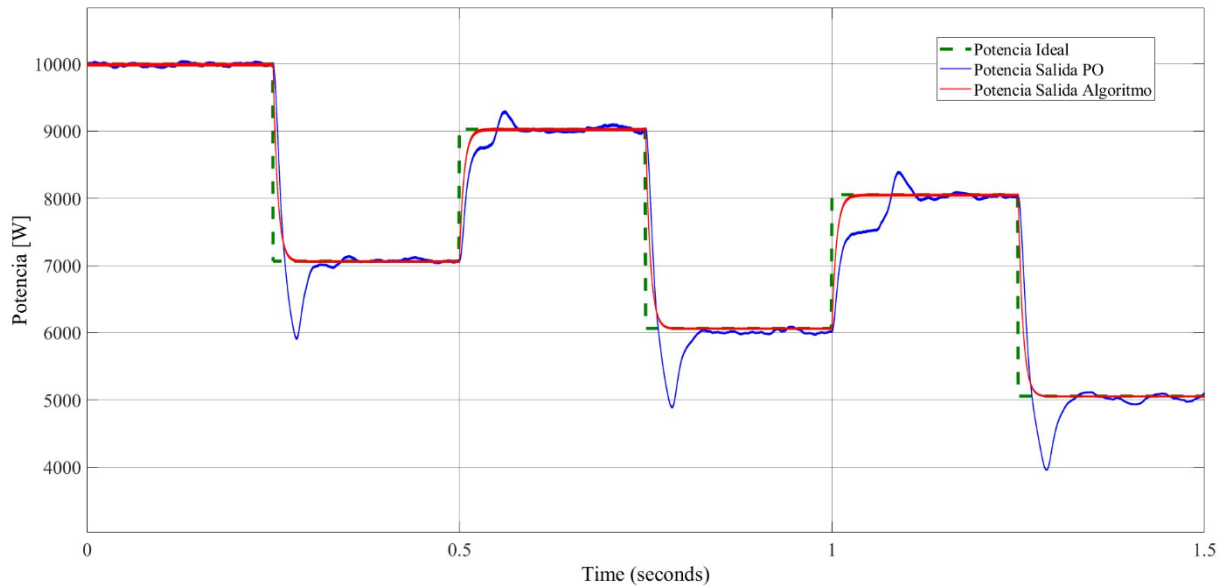


Figura 5.9: Potencia entregada, P&O vs MILP vs Ideal.

Analizando en la Figura 5.10, donde se aprecia que cuando se produce la variación de irradiancia el algoritmo MILP se adapta rápidamente al cambio con un 7.58%, mientras que el algoritmo P&O se demora en acercarse al modelo ideal, con un 57.46%.

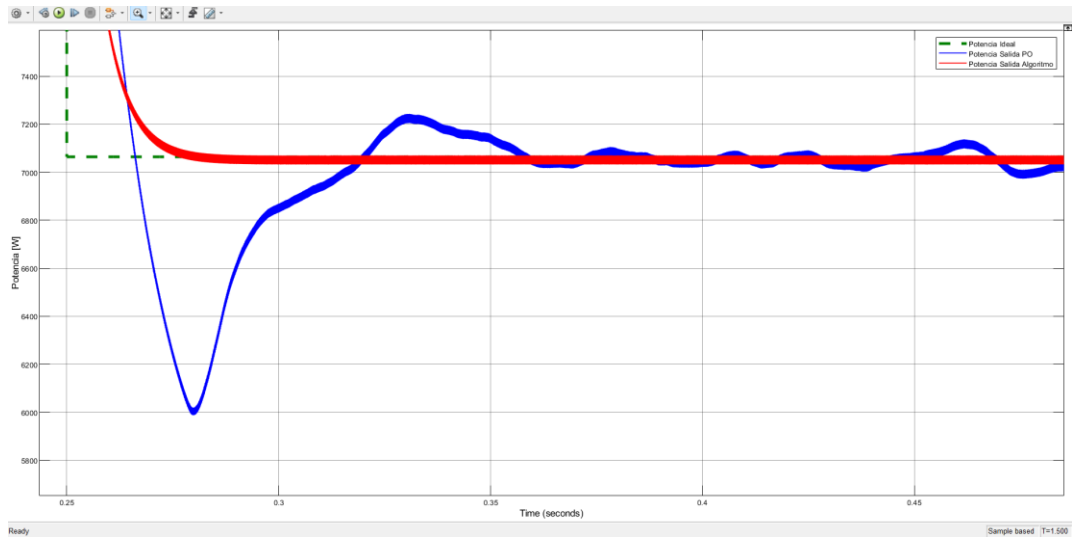


Figura 5.10: Análisis 2, P&O vs MILP vs Ideal.

5.3.3 Potencia de entregada al inversor con carga AC

En la Figura 5.9 se hace una comparación de las potencias entregadas a la carga AC con los diferentes algoritmos MPPT con respecto a la potencia ideal de generación (Verde = Potencia Ideal, Azul = Potencia con el algoritmo PO, Roja = Potencia con el algoritmo propuesto).

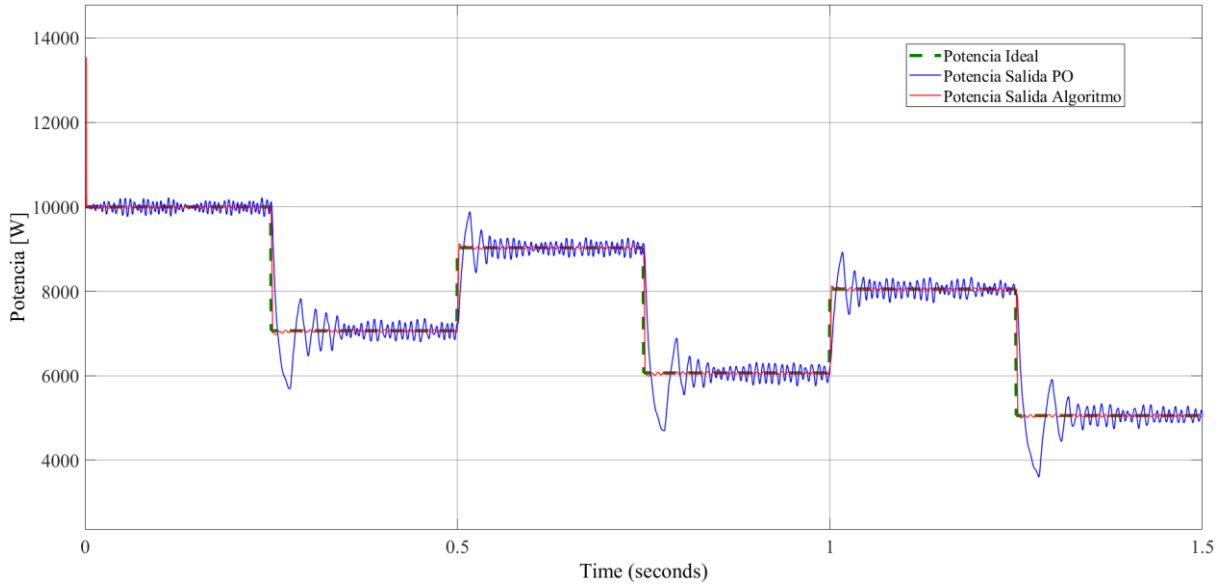


Figura 5.11: Potencia en el inversor con carga AC, P&O vs MILP vs Ideal.

Al analizar la Figura 5.10, se aprecia que cuando se produce la variación de irradiancia el algoritmo MILP se adapta rápidamente al cambio, con un 7.6%, mientras que el algoritmo P&O se demora en acercarse al modelo ideal oscilando constantemente para encontrar el MPP, con un 67%, de cercanía al modelo ideal.

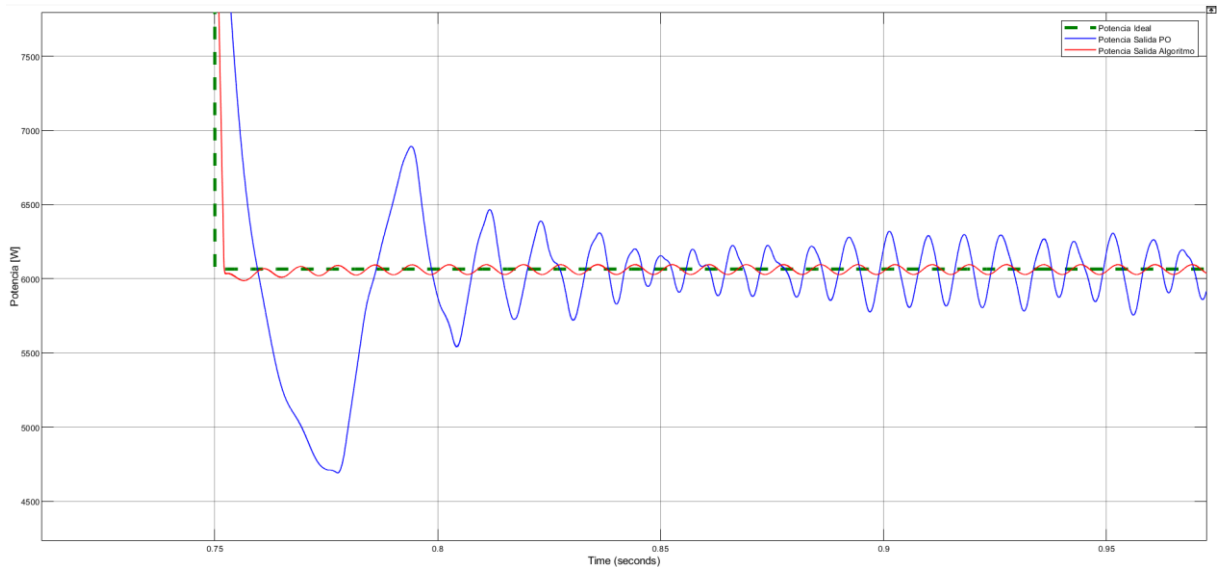


Figura 5.12: Análisis 3, P&O vs MILP vs Ideal.

5.3.4 Error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

Finalmente, al medir el error cuadrático medio normalizado, como se muestra en la Figura 5.13, en la sección 4.9 se menciona que entre mayor es porcentaje de NRMSE, peor es su cercanía a los valores del sistema ideal, mientras que si su porcentaje es menor más se acerca al modelo ideal, con esta aclaración se procede al análisis del sistema con el algoritmo MILP y el algoritmo P&O.

Esta comparación entre ambos algoritmos para alcanzar el MPP, demuestra claramente que el sistema MILP ofrece un rendimiento significativamente superior al del algoritmo convencional P&O.

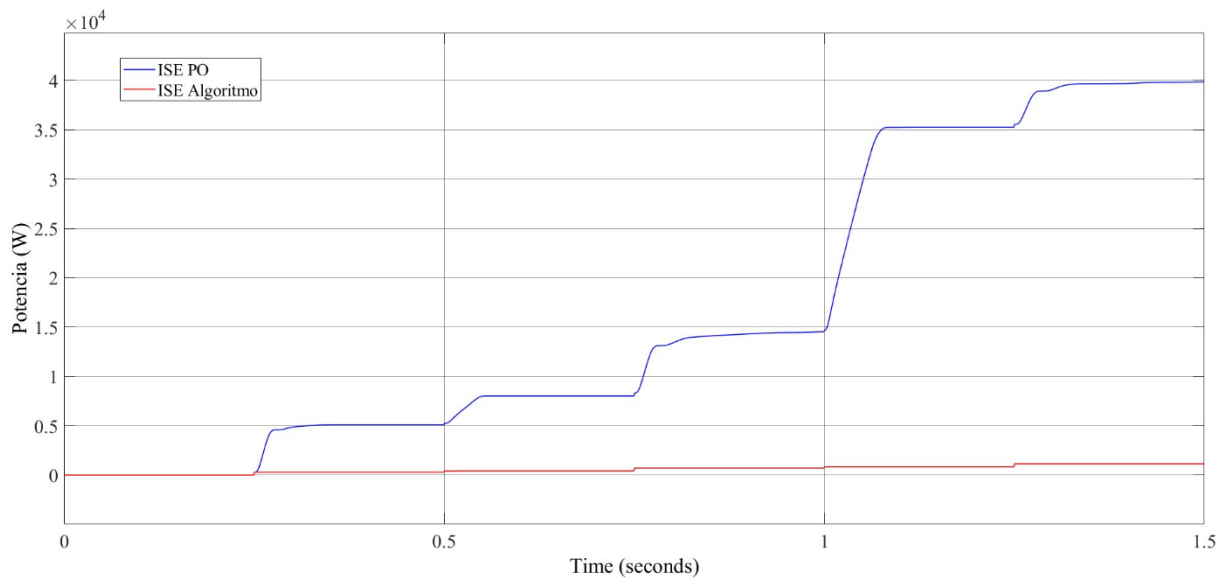


Figura 5.13: Índice de error cuadrático medio normalizado (NRMSE).

A continuación, en la Tabla 5.1 se hace una comparación en todos los casos de estudios, para el error de los distintos algoritmos propuestos en comparación con el modelo ideal.

Tabla 5.1: Porcentajes de Error de los algoritmos.

Casos de Estudio	Algoritmos	Porcentaje
Sistema fotovoltaico Sin carga	P&O	29.87%
	MILP	6.87%
Sistema fotovoltaico Con carga DC	P&O	57.46%
	MILP	7.58%
Sistema fotovoltaico Con inversor y carga AC	P&O	67%
	MILP	7.6%

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir que la creación y aplicación del algoritmo de programación lineal entera mixta (MILP) permite reemplazar el algoritmo de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT) convencional Perturbar y Observar (P&O) por uno basado en programación lineal entera mixta. Esto se demuestra mediante la comparación de las respuestas de voltaje, corriente, potencia y relación de trabajo generadas por el algoritmo P&O y el MPPT basado en MILP dentro del sistema fotovoltaico.

Se desarrolló una metodología para obtener los parámetros de voltaje y corriente linealizados de un arreglo fotovoltaico a partir de la base de datos de irradiancia y temperatura; De esta manera se obtiene la variable delta (relación de trabajo) que optimiza la búsqueda del MPP.

Mediante la utilización del error cuadrático medio normalizado (*NRMSE*), como se observa en Tabla 5.1, se comprobó que el algoritmo MILP implementado en el sistema fotovoltaico tiene un menor porcentaje de error en la búsqueda del punto máximo de potencia (MPP), caso muy diferente cuando se usa el algoritmo P&O que tiene un error mayor.

6.2 RECOMENDACIONES

En este trabajo de investigación se utilizó las curvas características del arreglo fotovoltaico, lo que ayudo a la validación del algoritmo propuesto. Es recomendable utilizar este método para determinar el punto de máxima potencia de un arreglo fotovoltaico.

Se recomienda el uso de MILP para el análisis científico, pero no el práctico, debido a que varios autores evitan utilizar la MILP en sus investigaciones de MPPT se necesita un paso adicional, el linealizar los parámetros de voltaje y corriente. Aunque este paso no crea una gran diferencia en la obtención de resultados deseados, añade complejidad al convertir modelos no lineales en modelos lineales.

7. REFERENCIAS

- [1] EFE comunica, “Ecuador: Gobierno anuncia apagones por sequía en hidroeléctricas,” EFE. Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://efe.com/economia/2023-10-26/el-gobierno-de-ecuador-anuncia-nuevos-apagones-por-sequia-en-las-centrales-hidroelectricas/>
- [2] “¿Por qué se genera la actual crisis energética en Ecuador? - El Comercio.” Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/actualidad/un-agresivo-cambio-climatico-afecta-el-caudal-que-abastece-a-hidroelectricas.html>
- [3] E. E. Henao-Bravo, D. A. Márquez-Viloria, J. P. Villegas-Ceballos, S. I. Serna-Garcés, C. A. Ramos-Paja, and D. González-Montoya, “Modelo matemático de sistemas fotovoltaicos para búsqueda distribuida del punto de máxima potencia,” 2016.
- [4] S. Mexicana De Física, A. C. México, and E. Gasca, “Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia,” 2013. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971010>
- [5] A. ESCOBAR MEJIA Ingeniero Electricista, M. Sc Profesor Asistente, C. Andres Torres, R. A. HINCAPIE ISAZA Ingeniero Electricista, and M. Sc Profesor Auxiliar Tiempo Completo, “CONEXIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A LA RED ELÉCTRICA,” *Scientia et Technica Año XVI*, vol. 44, 2010.
- [6] EDESA, “Los tres factores que más afectan a la producción de las placas solares | Endesa.” Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/factores-afectan-placas-solares>
- [7] P. A. Ortiz Valencia and C. A. Ramos-Paja, “Sliding-mode controller for maximum power point tracking in grid-connected photovoltaic systems,” *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 11, pp. 12363–12387, Nov. 2015, doi: 10.3390/en81112318.
- [8] E. Miranda, “Modelo matemático de un Panel FV,” 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/323345737>
- [9] J. G. Checa Burgos, F. J. Fares Vargas, A. R. Delgado Revilla, C. H. Lozada Cabrera, and L. A. Sandoval Almeida, “Una revisión del desarrollo de los modelos matemáticos para la estimación de la potencia eléctrica generada en un sistema fotovoltaico,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 3, pp. 8002–8013, Jul. 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i3.6784.

- [10] Jairo Alberto Cuéllar Guarnizo, “DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT) EN PANELES SOLARES,” *Universidad Santo Tomas*, pp. 21–75, 2019.
- [11] T. Mejía Andrés Felipe, H. Cuartas Jorge Aurelio, and P. Restrepo Julián, “ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF A PHOTOVOLTAIC CELL MODEL USING A PATTERN SEARCH METHOD ALGORITHM,” 2014.
- [12] E. E. Henao-Bravo, D. A. Márquez-Viloria, J. P. Villegas-Ceballos, S. I. Serna-Garcés, C. A. Ramos-Paja, and D. González-Montoya, “MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA BUSQUEDA DISTRIBUIDA DEL PUNTO DE MAXIMA POTENCIA,” 2016.
- [13] Comision Europea, “Consecuencias del cambio climático.” Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_es
- [14] GENERA, “Paneles solares en Ecuador - Genera Renovables.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://generarenovables.com/paneles-solares/>
- [15] CONELEC, “ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA,” 2020.
- [16] Primicias, “Ocho provincias de Ecuador tendrán radiación solar muy alta este miércoles 22 de mayo del 2024.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/pronostico-clima-radiacion-solar-miercoles-22mayo/>
- [17] Ener City, “Radiación solar en Ecuador y cómo funciona.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://energitysa.com/blog/radiacion-solar-en-ecuador/>
- [18] Hogarsense, “Historia de la energia fotovoltaica.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.hogarsense.es/energia-solar/historia-energia-solar-fotovoltaica>
- [19] IITAAC, “Sistema fotovoltaico - IITAAC.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.iitaac.org.mx/sistema-fotovoltaico/>
- [20] Hi Power, “Componentes y equipos necesarios en una instalación de paneles solares.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://blog.hipowercr.com/equipos-para-instalacion-de-paneles-solares>
- [21] Factorenergia, “¿Por qué instalar placas solares en empresas? | factorenergia.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/por-que-instalar-placas-solares-en-empresas/>

- [22] AutoSolar, “Qué es un inversor | AutoSolar Blog.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-inversor>
- [23] AVTEK, “INVERSORES PORTATILES PARA EQUIPOS ELECTRONICOS - Grupo Marriott.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.grupomarriott.com/productos/avtek/inversores-portatiles/inversores-portatiles-para-equipos-electronicos-3/>
- [24] AutoSolar, “¿Qué es un regulador de carga? | Blog AutoSolar.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga>
- [25] ProViento, “Bateria Solar de GEL vida útil prolongada 150Ah/12VDC.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://proviento.com.ec/baterias-solares/200-bateria-solar-de-gel-vida-util-prolongada-150ah12vdc.html>
- [26] HIMELCO, “¿Que es un Conversor de voltaje? - Himelco Ingenieria y Servicios.” Accessed: Jul. 20, 2024. [Online]. Available: <https://himelco.cl/conversores-de-voltaje/que-es-un-conversor-de-voltaje/>
- [27] M. L. Katche, A. B. Makokha, S. O. Zachary, and M. S. Adaramola, “A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems,” Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16052206.
- [28] D. M. Atia, “Global maximum power point tracking-based computational intelligence techniques,” in *Green Energy and Technology*, Springer Verlag, 2020, pp. 131–163. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_5.
- [29] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.
- [30] Gerson Fabián Cote Flórez, “Algoritmo MPPT descentralizado de conductancia incremental en una red fotovoltaica,” 2021.
- [31] S. E. Ortiz Gaitán and C. R. Ruiz Cruz, “Mixed integer lineal programming model to schedule flexible job-shop systems in make to order environments,” *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 28–34, Jul. 2017, doi: 10.17981/ingecuc.13.2.2017.03.
- [32] M. A. Osorio Lama and J. N. Hooker, “Programación lineal mixta-lógica,” *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 1, no. 1, pp. 01–07, Jan. 1998, doi: 10.22201/fi.25940732e.1998.01.001.

- [33] Jr. Paul Stackhouse, “NASA POWER | Docs | Tutorials | DAV - NASA POWER | Docs.” Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/docs/tutorials/data-access-viewer/user-guide/>
- [34] MathWorks, “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.” Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [35] MathWorks, “Simulación y diseño basado en modelos con Simulink - MATLAB.” Accessed: Jul. 22, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- [36] MathWorks, “Modelado - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina.” Accessed: Aug. 13, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/simulink/modeling.html>
- [37] M. H. (Muhammad H. Rashid, *Power electronics handbook*. Academic Press, 2001.
- [38] F. Torres Ángel David, E. Carreón Jaime, J. Díaz Téllez, R. Senén García Ramírez, and J. Pérez Pérez, “Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost,” 2019. [Online]. Available: www.mecamex.net/revistas/LMEM
- [39] Mathworks, “Ajustar curvas o superficies a datos - MATLAB fit - MathWorks América Latina.” Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/fit.html>