



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

“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID
ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES
FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA”

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

AUTORES:

Alexander Vicente Amaguaña Guaman

Eric Israel Zapata Yopez

TUTOR:

Ing. MSc. Freire Martínez Luigi Orlando

LATACUNGA – ECUADOR

2024

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Nosotros, **ALEXANDER VICENTE AMAGUAÑA GUAMAN** con C.C: **1725471526** y **ERIC ISRAEL ZAPATA YEPEZ** con C.C: **1724770753**, declaramos ser los autores del presente proyecto de Investigación: “**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA**”, siendo el **Ing. MS.c. Freire Martínez Luigi Orlando** el tutor 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.

Atentamente,



.....
Alexander Vicente Amaguaña Guaman

C.C. 1725471526



.....
Eric Israel Zapata Yopez

C.C. 1724770753

AVAL DEL TUTOR

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA”, de los estudiantes **Alexander Vicente Amaguaña Guaman** y **Eric Israel Zapata Yopez**, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 21 de agosto de 2024


.....
Ing. MS.c. Luigi Orlando Freire Martínez

Tutor

C.C. 0502529589



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; por cuanto, los postulantes: **Alexander Vicente Amaguaña Guaman** con cedula de ciudadanía **C.C: 1725471526** y **Eric Israel Zapata Yopez** con cedula de ciudadanía **C.C: 1724770753**, con el título de Proyecto de titulación: **“EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Latacunga, 21 de agosto de 2024

Para constancia firman:

.....
Ing. MSc. Diego Leonardo Jimenez
Jimenez

CC:0503493702

LECTOR 1 (PRESIDENTE)

.....
Ing. MSc. Marco Anibal León Segovia

CC:0502305402

LECTOR 2 (MIEMBRO)

.....
Ing. MSc. Manuel Angel León Segovia

CC: 0502041353

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Blanca Guaman y Juan Amaguaña, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia, y por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino, hasta cuando Dios pudo brindarme la oportunidad de estar con él, a mi padre que fue mi amigo hoy cumplo mi promesa de ser ingeniero donde quiera que el este este logro es a tu nombre, a mi hermano David Amaguaña por apoyarme en cada momento por más complicado que él se encuentre, se daba la forma de protegerme, y decirme continua, no te rindas que tienes la fuerza de papi y el corazón noble de mami, por darme consejos y cuidar de mí. A mis tios Rosario Guaman y Marcelo Ocapana por ser esos angelitos que estuvieron ahí en todo momento para que nosotros salgamos adelante en estos tiempos duros, creyeron tanto en mi. A Daniela Gualoto, por ser mi compañera, mi apoyo constante, y mi fuente de inspiración. Gracias por cada momento compartido, por las palabras de aliento en los días difíciles, y por creer en mí cuando más lo necesitaba. Eres una motivación invaluable en mi vida, y esta meta alcanzada es también gracias a ti. Te dedico este logro con todo mi cariño y gratitud. A la familia de Daniela, por recibirme con los brazos abiertos y brindarme su apoyo incondicional. Sus palabras de ánimo y su calidez han sido un pilar fundamental en este camino. Gracias por todo.

A todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este sueño.

ALEXANDER AMAGUAÑA

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en este logro tan importante en mi vida.

En primer lugar, a mi querida esposa, Lucrecia Paz. Sin tu amor, paciencia y apoyo incondicional, este camino hubiera sido mucho más difícil, a mis padres, William y Pilar, quienes me han enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación desde muy pequeño. Ustedes son mi mayor ejemplo a seguir. Gracias por haberme dado las herramientas necesarias para enfrentar los retos con determinación y coraje. Su apoyo constante ha sido un pilar fundamental en mi vida, y no hay palabras suficientes para expresar cuánto les agradezco por todo lo que han hecho por mí, A los jóvenes IMEL, gracias por ser una fuente de energía y vitalidad, sus entusiasmos me han inspirado a seguir adelante en los momentos más difíciles Es un privilegio contar con ustedes en mi vida. A mi compañero de tesis, Alexander Amaguaña, gracias por tu dedicación y compañerismo trabajar a tu lado ha sido una experiencia enriquecedora, y tu compromiso con nuestro proyecto ha sido esencial para que podamos alcanzar nuestras metas. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi tutor, Luigi Freire. Gracias por tu guía, paciencia y sabiduría a lo largo de este proceso

ERIC ZAPATA

DEDICATORIA

Quiero expresar mi profunda gratitud a Dios y a la Virgencita del Cisne por su bendición y fortaleza. Agradezco a mis padres por sus valores y apoyo, especialmente a mi padre, quien, aunque ya no está, me dio la fuerza para seguir adelante. A mi madre, por su resiliencia, y a mi hermano David, por su constante respaldo. Agradezco también a mis tíos Charo y Marcelo por su apoyo incondicional, a mi tutor, Ing. Luigi Freire, a mi novia Daniela Gualoto y su familia, y a mi compañero de tesis, Eric Zapata, por ser parte fundamental de este logro.

ALEXANDER AMAGUAÑA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que han sido mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. A mi amada esposa, Lucrecia Paz, cuyo amor y apoyo incondicional han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante en cada etapa de este camino. A mis padres, William y Pilar Yépez, quienes me inculcaron los valores del esfuerzo, la perseverancia y el amor por el conocimiento. Este logro es tanto mío como de ustedes, y les agradezco por ser el fundamento sólido sobre el cual.

ERIC ZAPATA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA”.

Autores:

Alexander Vicente Amaguaña Guaman

Eric Israel Zapata Yopez

RESUMEN

El estudio compara el error relativo de dos sistemas de control en centrales fotovoltaicas: el MPPT basado en un PID adaptativo y el controlador PWM. El objetivo es evaluar cuál de estos sistemas optimiza mejor la conversión de energía solar en electricidad, especialmente en instalaciones que incluyen baterías como carga. Utilizando Matlab/Simulink, se modelaron y simularon ambos controladores para observar su comportamiento bajo distintas condiciones de irradiación solar y variabilidad climática. El análisis se centró en la eficiencia energética, el tiempo de respuesta, y la capacidad de cada controlador para seguir el punto de máxima potencia (MPP) del sistema fotovoltaico (FV). Los resultados indicaron que el controlador MPPT basado en PID adaptativo supera al PWM en términos de precisión en el seguimiento del MPP y eficiencia energética, adaptándose mejor a las fluctuaciones ambientales. Este estudio sugiere que el uso de controladores PID adaptativos puede prolongar la vida útil de las baterías y mejorar la estabilidad del sistema en condiciones cambiantes.

Palabras claves: Controlador, Adaptativo, Fluctuaciones.

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

THEME: “EVALUATION OF MPPT CONTROL SYSTEMS BASED ON ADAPTIVE PID VS. PWM CONTROLLER FOR BATTERY-LOADED PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Authors:

Alexander Vicente Amaguaña Guaman

Eric Israel Zapata Yopez

ABSTRACT

The study compares the relative error of two control systems in photovoltaic power plants: the MPPT based on an adaptive PID and the PWM controller. The objective is to evaluate which of these systems best optimizes solar energy conversion into electricity, especially in installations that include batteries as load. Using Matlab/Simulink, both controllers were modeled and simulated to observe their behavior under different solar irradiance and climate variability conditions. The analysis focused on energy efficiency, response time, and the ability of each controller to track the maximum power point (MPP) of the photovoltaic system (PV). The results indicated that the adaptive PID-based MPPT controller outperforms PWM regarding MPP tracking accuracy and energy efficiency, adapting better to environmental fluctuations. This study suggests that adaptive PID controllers can extend battery life and improve system stability under changing conditions.

Keywords: Controller, Adaptive, Fluctuations.

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

CARRERA DE ELECTRICIDAD

Nombre de los estudiantes:

ZAPATA YEPEZ ERIC ISRAEL

AMAGUAÑA GUAMAN ALEXANDER VICENTE

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

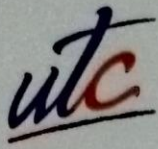
Malena Nataly Tapia Vargas con cédula de identidad número: 0550251185 Licenciada: **En Ciencias de la educación mención inglés**, con número de registro de la SENESCYT: 1020-2022-2461526; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“Evaluación de los sistemas de control MPPT basado en un PID adaptativo frente a un controlador PWM para centrales fotovoltaicas con batería como carga”** de Zapata Yépez Eric Israel y Amaguaña Guamán Alexander Vidente, egresados de la Carrera De Electricidad, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, 16 Agosto, 2024



.....
Lic.: Malena Nataly Tapia Vargas
CI: 0550251185



CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor del Informe de Investigación con el tema: "EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MPPT BASADO EN UN PID ADAPTATIVO FRENTE A UN CONTROLADOR PWM PARA CENTRALES FOTOVOLTAICAS CON BATERÍA COMO CARGA", de Amaguaña Guaman Alexander Vicente y Zapata Yopez Eric Israel, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencias del 5 %; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

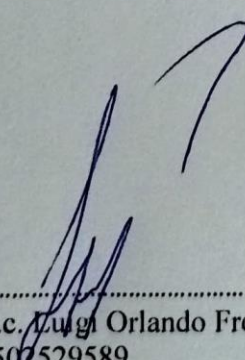
- Trabajos entregados

Fuentes principales

5%	🌐	Fuentes de Internet
1%	📄	Publicaciones
0%	👤	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Latacunga, 21 de agosto de 2024


.....
Ing. MS.c. Luigi Orlando Freire Martínez
C.C.: 0502529589
TUTOR

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1 Situación Problemática	2
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Objeto y campo de acción.....	3
1.3.1 Objeto de Investigación	3
1.3.2 Campo de Acción	3
1.4 BENEFICIARIOS	3
1.4.1 Beneficiarios Directos	3
1.4.2 Beneficiarios Indirectos	3
1.5 JUSTIFICACIÓN	3
1.6 OBJETIVOS	4
1.6.1 Objetivo General.....	4
1.6.2 Objetivos Específicos	4
1.7 HIPÓTESIS y sistema de tareas.	4
1.7.1 Hipótesis	4
1.8 Sistema de Tareas	5
2 Introducción.....	6
3 FUNDAMENTACIÓN Teórica	11
3.1 Energía solar fotovoltaica	11
3.2 Baterías	12
3.3 Características del sistemas solar fotovoltaico.	14
3.4 Inversor	17
3.5 Radiación Solar.....	18
3.6 Reguladores o Controladores.....	19
3.6.1 Controladores de carga en sistema FV	20
3.6.2 Controlador MPPT	20
3.6.3 Controlador PWM	21
3.6.4 Algoritmo de control Perturbación y Observación (P&O).....	22
3.7 Diseño del sistema Fotovoltaico	23
3.7.1 Panel solar	24

3.8	Variables a considerar	27
3.8.1	Irradiancia Solar	27
3.8.2	Temperatura.....	28
3.8.3	Control PID	28
3.9	Diseño del sistema	29
3.9.1	Implementación computacional en Simulink	29
4	METODos y Procedimientos	31
4.1	Descripción del Proyecto	32
4.1.1	Datos de entrada de iradiancia Solar.	32
4.2	Contextualización de variables	33
4.2.1	Variables dependiente.....	33
4.2.2	Variables independientes	33
4.3	Diagrama Y ELEMENTOS	33
4.3.1	Modelado y elementos del sistema fotovoltaico.....	33
4.3.2	Datos de entrada de panel.	35
4.3.3	Modelación matemática del panel solar:	36
4.4	Diseño de Controlador MPPT.....	40
4.4.1	Descripción general del modelo	40
4.5	Algoritmo MPPT con PID adaptativo	43
4.5.1	Proceso matemático del modelo fotovoltaico luego de obtener tensión y corriente como salida del panel.	43
4.5.2	Controlador PID Adaptativo.....	45
4.5.3	Descripción General del modelo MPPT+PID	49
4.6	Diseño de Controlador PWM	52
4.6.1	Controlador PWM	52
4.6.2	Componentes y Funcionamiento del Diagrama (PWM)	53
4.7	Diseño de controlador Perturbar y Observador P&O	58
4.8	Señal de referencia.....	61
4.8.1	Funcionamiento General.....	62
4.9	Escenarios de operación de la iradiancia frente a condiciones meteorológicas. ..	62
4.9.1	Simulación de las Condiciones de Operación	64
4.9.2	Detalles de los cálculos.....	65
5	Análisis y discusión de resultados.....	66

5.1.1	Discusión de resultados	68
6	Conclusiones y recomendaciones	70
6.1	Conclusiones	70
6.2	Recomendaciones	70
7	Bibliografía.....	71
8	Anexos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Modelo solar Fotovoltaico [22].....	11
Figura 3.2 Clasificación y aplicación fotovoltaica [7].	12
Figura 3.3 Modelo de batería de ciclo profundo 12V [25].....	14
Figura 3.4 Curvas características I-V [27].....	15
Figura 3.5 Punto de máxima potencia de un módulo FV[22].	16
Figura 3.6 Curva característica de un módulo FV [22].	16
Figura 3.7 Tipos de Radiación Solar [28].....	19
Figura 3.8 Sistema de regular de carga con MPPT.	21
Figura 3.9 Diagrama básico de control PWM por corriente [22].....	21
Figura 3.10 Control lineal de corriente.....	22
Figura 3.11 Diagrama de flujo para algoritmo P&O [22].	23
Figura 3.12 Panel L-G4.2 340W	24
Figura 3.13 Radiación solar Difusa [32].	27
Figura 3.14 Datos radiación solar directa[32].	27
Figura 3.15 Radiación Solar Global [32].....	28
Figura 3.16 Diagrama en bloque de un control PID.....	29
Figura 3.17 Sistema fotovoltaico de controlador MPPT.	30
Figura 3.18 Sistema Fotovoltaico con controlador PWM.	30
Figura 3.19 Módulo fotovoltaico con un controlador P&O.	31
Figura 3.20 Módulo fotovoltaico con controlador MPPT + PID Adaptativo.....	31
Figura 4.1 Radiación solar de Latacunga de los años 2014 al 2024.....	32
Figura 4.2 Modelo Unifilar del panel fotovoltaico.....	34
Figura 4.3 Panel solar sacado de la librería Simulink.	34
Figura 4.4 Modelo implementado en simulink de sistema FV.....	35
Figura 4.5 Modelo de controlador MPPT.....	40
Figura 4.6 Modelo completo del Sistema FV y controlador.	41
Figura 4.7 Bloque de monitoreo.....	41
Figura 4.8 (a) Sistema de lazo cerrado Nichols, (b) Sistema lazo cerrado Simulink.	46
Figura 4.9 Oscilaciones sostenida con periodo P_{cr} [38].	47
Figura 4.10 Modelo de bloques del MPPT.....	49
Figura 4.11 Modelo de seguimiento del Punto de Máxima Potencia Simulink.	49
Figura 4.12 Modelo de controlador MPP con PID adaptativo	51
Figura 4.13 Modelo completo del sistema FV con controlador PWM.....	52
Figura 4.14 Modelo de controlador PWM.	54
Figura 4.15 Modelo de bloques del PWM.....	58
Figura 4.16 Modelo del controlador Perturbar y Observar (P&O).	59
Figura 4.17 Modelo de señal de referencia en Simulink.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	1
Tabla 2 Sistema de Tareas Plan de titulación	5
Tabla 3 Partes fundamentales del inversor.	17
Tabla 4 Especificaciones mecánicas del PV [30].....	25
Tabla 5 Características eléctricas del PV [30].....	26
Tabla 6 Rendimiento mínimo y funcionamiento [30].	26
Tabla 7. Radiación promedio en W/m^2	33
Tabla 8 Valores característicos del panel Jinko Solar [35].	35
Tabla 9 Valores de parámetros constantes K_p , T_i , T_d [38].....	45
Tabla 10 Valores para diseño del PID.	47
Tabla 11 Escenario de operación para evaluar los controladores.....	65
Tabla 12 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.	66
Tabla 13 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.	66
Tabla 14 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.	67
Tabla 15 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.	67
Tabla 16 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.	68

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Evaluación de los sistemas de control MPPT basado en un PID adaptativo frente a un controlador PWM para centrales fotovoltaicas con batería como carga.

Tipo de Proyecto: Propuesta de Investigación

Fecha de inicio: 20 de abril del 2024

Fecha de finalización:

Lugar de ejecución: Latacunga

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

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería en Electricidad.

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

Equipo de Trabajo de Titulación:

Alexander Vicente Amaguaña Guaman

Erik Israel Zapata Yopez

Tutor de Titulación: Ing. MSc. Freire Martínez Luigi Orlando

Área de conocimiento:

Tabla 1 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

07 Ingeniería, Industria y Construcción	071 Ingeniería y Profesiones 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 del sector Industrial, comercial y residencial

Grupos Temáticos: Eficiencia energética y desarrollo sostenible.

1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Las centrales fotovoltaicas han conmemorado un auge de energía limpia o renovable, el correcto funcionamiento de las centrales solares depende significativamente de la capacidad de control de los sistemas con el fin de maximizar el uso y extracción de la energía del sol por medio de los paneles solares (PV). Por medio del uso de nuevas tecnologías existen dos tecnologías de control mayormente utilizados en el seguimiento del punto de máxima potencia ya mencionados en el título de esta investigación que es el (MPPT) que se encuentra basado en un PID adaptativo y el controlador (PWM) siendo el más usado dado a su costo, dado que, la energía solar fotovoltaica tiene como ventaja un mantenimiento de menor costo, la ausencia de piezas móviles que suelen tener que realizarse mantenimientos más periódicos, considerando que una mayor explotación de sus ventajas depende mayormente del punto de operación, en conjunto de la curva característica del PV y la información proporcionada por el fabricante [1].

En países desarrollado y subdesarrollados buscan que su producción de energía llegue a parecerse a países europeos. En el Ecuador actualmente cuenta con una capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos dado los datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IERENA), como país se alcanzó un valor de 38,50 GW hasta el año 2022, dentro de dichos valores es un aumento considerable, se es previsto que para el año 2030 se llegue a una capacidad de generación fotovoltaica de 1500 MW [2].

Uno de los principales problemas al momento de instalar una central fotovoltaica es encontrar la ubicación correcta en que la exposición a la radiación solar alcancé tanto como el mínimo de generación o su máximo, con el fin de que los PV aprovecharan su máximo potencial, por ello depende del tipo de controlador a aplicarse para maximizar la recolección de energía solar, con ello va de la mano la estabilidad del sistema, dado que se evalúan en base a su robustez ante perturbaciones [3].

Existen varios criterios a considerar, como el tiempo de respuesta de cada tipo de controlador, que busca ajustar la operación del sistema para hacer el sistema FV más eficiente. Otro aspecto crucial, es el tipo de batería a utilizar y cómo la vida útil de esta puede verse afectada por el tipo de controlador empleado.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el error relativo del controlador MPPT basado en un PID adaptativo de un sistema fotovoltaico que utiliza una batería como carga frente a un sistema de control PWM?

1.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

1.3.1 Objeto de Investigación

Eficiencia energética y desarrollo sostenible.

1.3.2 Campo de Acción

3322.05 Fuentes no convencionales de energía.

1.4 BENEFICIARIOS

1.4.1 Beneficiarios Directos

Los beneficiarios directos son los postulantes al título de pregrado, la Carrera de Ingeniería en Electricidad de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la universidad Técnica de Cotopaxi, por la razón que el trabajo de titulación contribuirá al desarrollo y optimización de sistemas de energía renovable dentro del ámbito académico y práctico.

1.4.2 Beneficiarios Indirectos

Los beneficiarios indirectos son los estudiantes de ingeniería eléctrica, docentes, directivos de las empresas privadas y públicas que servirá como base para próximos trabajos.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La selección entre un controlador MPPT desarrollado en un PID adaptativo y un controlador PWM para centrales fotovoltaicas con batería como carga es crucial para maximizar el rendimiento y prolongar la vida útil del sistema, siendo influenciadas por los cambios climáticos con errores mínimos, realizada por Bidyadhar Subudhi ha demostrado que los controladores MPPT basados en PID adaptativo pueden mejorar significativamente el rendimiento de la transformación de energía solar a electricidad en asimilación con los controladores PWM convencionales [4]. Además, estudios de controladores PWM sugieren

que puede ser utilizados para sistemas fotovoltaicos autónomos que mantengan su eficiencia y un bajo costo, esta investigación se propone contribuir al conocimiento sobre la selección de sistemas de control más adecuados para renovar el rendimiento y la vida útil de las centrales fotovoltaicas con batería como carga [5].

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de un sistema de control MPPT (Maximum Power Point Tracking) implementado con un algoritmo PID adaptativo frente a un sistema de control PWM (Modulación por ancho de Pulso) mediante modelación del sistema para un análisis del error relativo de los controladores de carga en centrales fotovoltaicas.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Investigar el estado del arte de la implementación de algoritmos MPPT y PWM acerca de su funcionamiento en el contexto de la optimización del punto de máxima potencia y la gestión de la carga de las baterías para centrales de generación solar.
- Diseñar modelo del sistema fotovoltaico que contemple la interacción detallada de todos sus componentes incluyendo variables de radiación solar y carga de la batería.
- Simular los controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) basado en un PID adaptativo y el controlador PMW (Modulación por Ancho de Pulso) aplicados a una central fotovoltaica mediante la guía de controladores ya planteados.
- Comparar el error relativo de un controlador MPPT desarrollado para un PID adaptativo frente a un controlador PWM mediante la observación de sus respuestas ante variaciones en la irradiación solar y temperatura.

1.7 HIPÓTESIS Y SISTEMA DE TAREAS.

1.7.1 Hipótesis

Mediante la evaluación comparativa de los controladores MPPT basados en un PID frente a un controlador PWM, se podrán identificar las ventajas, el error relativo y la precisión en el aprovechamiento de la energía solar en centrales fotovoltaicas.

1.8 SISTEMA DE TAREAS

Sistema de tareas del Plan de Titulación.

Tabla 2 Sistema de Tareas Plan de titulación

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<ul style="list-style-type: none"> Investigar el estado del arte de la implementación de algoritmos MPPT y PWM acerca de su funcionamiento en el contexto de la optimización del punto de máxima potencia y la gestión de la carga de las baterías para centrales de generación solar. 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión bibliográfica de los controladores MPPT y PWM sobre su funcionamiento. Búsqueda de información en medio digitales de los distintos controladores usados en PV. Búsqueda de la estructura de un sistema fotovoltaico y sus partes características 	<ul style="list-style-type: none"> Información clara referente a sistemas de control de centrales fotovoltaicas. 	Artículos publicados de la IEEE, tesis de pregrado y posgrado.
<ul style="list-style-type: none"> Diseñar un modelo del sistema fotovoltaico que contemple la interacción detallada de todos sus componentes incluyendo variables de radiación solar, temperatura y carga de la batería. 	<ul style="list-style-type: none"> Implementar el modelo del sistema fotovoltaico con cada una de sus características para su posterior uso. Modelar los controladores basado en datos de la irradiancia solar, datos de los paneles y baterías. 	<ul style="list-style-type: none"> Un modelo de central de sistema fotovoltaico, formado por indistintos componentes dado su funcionamiento. 	Software para programación y diseño
<ul style="list-style-type: none"> Simular los controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) basado en un PID adaptativo y el controlador PMW (Modulación por Ancho de Pulso) aplicados a una central fotovoltaica mediante la guía de controladores ya planteados. 	<ul style="list-style-type: none"> Investiga los conceptos de MPPT (Maximum Power Point Tracking) y PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y comprende cómo afecta la irradiancia en una central fotovoltaica para encontrar el error relativo de los controladores. Estudia los principios de funcionamiento de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y cómo se puede aplicar al control de sistemas fotovoltaicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Investiga los conceptos de MPPT (Maximum Power Point Tracking) y PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y comprende cómo afectan la irradiancia en una central fotovoltaica para obteniendo el error relativo de los controladores. Estudia los principios de funcionamiento de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y cómo se puede aplicar al control de sistemas fotovoltaicos. 	Software para programación y diseño

<p>•Evaluar el error relativo del controlador MPPT desarrollado para un PID adaptativo frente a un controlador PWM mediante la observación de sus respuestas ante variaciones en la irradiación solar y temperatura para maximizar la conversión de energía.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Recrear varios escenarios para comprobar el error relativo de cada controlador de los sistemas fotovoltaicos. • Realizar una comparativa entre el error relativo calculado con trabajos previos. • Plantear un escenario con carga para visualizar el comportamiento del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un sistema 100% funcional • Estudio de reducción del desgaste de las baterías en condiciones de carga variable. 	<p>Software para programación y diseño</p>
--	---	--	--

2 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía, especialmente limpia y sostenible, ha provocado un renovado interés por fuentes alternativas a las tradicionales como la biomasa, carbón, gas natural y el petróleo, todas ellas generadoras de emisiones de CO₂. Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la capacidad instalada de energía solar en 2022 fue del 6,22%, porcentaje aún bajo en comparación con las hidroeléctricas, que representaron el 41,50%. Sin embargo, es importante considerar que el recurso hídrico varía según las estaciones del año, se enfatiza la importancia de diferenciar las fuentes de energía. En este contexto, las fuentes fotovoltaicas están ganando protagonismo por ser sostenibles y limpias para el ecosistema [6].

Claudio A. Estrada Gasca señala que la preocupación global en torno a la escasez de recursos fósiles y el impacto ambiental de su uso excesivo es cada vez mayor. Con un incremento anual de la demanda mundial de energía del 2.47%, es esencial adoptar políticas adecuadas, establecer marcos regulatorios, ofrecer incentivos económicos, y asignar fondos para apoyar la investigación tecnológica y científica. Estas medidas facilitarán la expansión de las energías renovables (ER) y fomentarán un uso más eficaz de estas, promoviendo la sostenibilidad y la protección del medio ambiente [7].

Andrés [8] menciona que la potencia deseada de un sistema FV está directamente relacionada con el número de módulos necesarios, y que para reducir pérdidas mientras se incrementan los niveles de voltaje, se emplea un convertidor *Boost*. Además, las condiciones ambientales como la temperatura y radiación solar juegan un papel clave, ya que influyen

significativamente en el MPP que puede alcanzar el PV. Estas variaciones generan que las curvas de voltaje y corriente de los PV no sean lineales respecto a la temperatura ambiente, afectando así tanto la corriente como el voltaje junto con la potencia [9]. En un estudio de 2017 se destacó que debido a la variabilidad en la intensidad de la luz, la temperatura de los paneles y las fluctuaciones de la corriente y el voltaje en las células fotovoltaicas, el MPP de un sistema FV está en continuo cambio [10].

Según los autores del libro ER mencionan que la capacidad de generación eléctrica de una sola celda no es suficiente para alimentar cargas convencionales. Por lo tanto, es necesario conectar varias celdas en serie y paralelo para suministrar el voltaje y la corriente adecuados a las cargas eléctricas. Un módulo fotovoltaico consiste en un conjunto de celdas que están protegidas de las condiciones ambientales y aisladas eléctricamente del entorno, lo que proporciona al conjunto una mayor resistencia mecánica y durabilidad [11].

En 2016 se publicó un trabajo titulado “Seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos utilizando control adaptativo y control por modo deslizante”, donde se explica que, en ese momento, los sistemas FV eran generalmente controlados con estructuras PI o PID. Sin embargo, estos enfoques no lograban asegurar una estabilidad global ni un tiempo de estabilización constante. Además, los algoritmos de optimización basados en la técnica de Perturbar y Observar (P&O) se diseñaron considerando tiempos de establecimiento más prolongados dentro del rango operativo, lo que resultaba en un seguimiento más lento del punto de máxima potencia (MPP) a lo largo de gran parte del rango operativo, provocando así pérdidas de potencia en el sistema [12].

Al optimizar el funcionamiento del conjunto fotovoltaico para que opere a su máxima potencia, influenciada por las condiciones solares y ambientales, las técnicas de MPPT pueden incrementar de manera notable la eficiencia en la generación de energía fotovoltaica. En este estudio, se desarrolló un modelo matemático de las células fotovoltaicas en un entorno arbitrario, que fue simulado y verificado utilizando Matlab/Simulink. Para abordar las limitaciones de los algoritmos tradicionales de MPPT, como la lentitud en la respuesta y la baja precisión, se propuso un algoritmo mejorado que combina el incremento de conductancia con un controlador PID incremental. Inicialmente, el incremento de conductancia se emplea para un seguimiento rápido cercano al MPP, seguido del controlador

PID incremental que finaliza el proceso de seguimiento. Posteriormente, se implementó y analizó el sistema FV en Matlab/Simulink. Los resultados indicaron que el algoritmo es capaz de rastrear el MPP de manera rápida, con una oscilación mínima [6].

En un artículo publicado en 2017, se propone un algoritmo mejorado que integra el algoritmo de incremento de conductancia con un controlador PID incremental. Inicialmente, se emplea el incremento de conductancia para rastrear rápidamente el punto de máxima potencia (MPP) [7]. Luego, se utiliza el controlador PID incremental para perfeccionar el seguimiento del MPP y completar todo el proceso de seguimiento. Los resultados de las simulaciones indican que este enfoque proporciona una respuesta más rápida, mayor estabilidad y un sobre impulso reducido en comparación con otros métodos [13].

En 2018, se llevó a cabo un estudio para abordar cómo las variaciones en el entorno y las cargas externas afectan la potencia de salida de las células fotovoltaicas, proponiendo un controlador PID difuso diseñado para optimizar el seguimiento de la potencia máxima de las células fotovoltaicas. Se desarrollaron modelos de simulación basados en la técnica de perturbación y observación, combinados con el control PID difuso. Los resultados de estas simulaciones demostraron que el controlador PID difuso proporciona una respuesta más rápida, una mayor estabilidad y un menor sobre impulso [14].

Ese mismo año, se desarrolló un estudio centrado en los cargadores de baterías para sistemas fotovoltaicos, donde se destacó la importancia de que estos cargadores realicen un seguimiento eficaz del punto de máxima potencia (MPPT) y limiten la corriente de carga para prolongar la vida útil de las baterías. Como parte de este trabajo, se propuso un sistema de carga de baterías que incorpora un convertidor Buck, control en cascada de la corriente de las baterías y la tensión del PV, utilizando la técnica P&O del MPPT [15].

La generación de energía en un sistema FV puede experimentar variaciones notables debido a cambios en la irradiación solar y la temperatura. Estas condiciones influyen en el MPP de los PV, que se ajusta conforme a las fluctuaciones en dichos factores. Esto resalta la necesidad de desarrollar controladores MPPT más avanzados que mejoren tanto el rendimiento como la eficiencia en el uso de los PV [4].

Rene Alfonso y demás autores mencionan que el controlador de carga puede operar en modo PWM o MPPT, dependiendo las condiciones de carga que presente la batería o de una

selección previa mediante un dip-switch. Se evaluaron tres algoritmos MPPT: P&O, conductancia incremental, y el basado en temperatura. La técnica de conductancia incremental resultó ser la más adecuada para esta aplicación, ya que no depende de las características específicas del panel, superando así al método basado en temperatura. Además, puede implementarse con incrementos variables, ofreciendo mayor precisión que el método de perturbación y observación, especialmente ante cambios rápidos en la radiación solar [16].

Según el autor Jyotirmaya expresa que hay dos métodos principales para implementar el algoritmo P&O: el control directo de la relación de trabajo y el control basado en la referencia de tensión. En el caso del control directo de la relación de trabajo, el algoritmo P&O ajusta directamente la relación de trabajo requerida para que el convertor DC-DC alcance el MPP. Este ajuste puede realizarse con un tamaño de paso que sea fijo o que se adapte de manera variable [1].

El desarrollo e implementación de estos sistemas no solo ofrece una solución crucial para comprimir el impacto ambiental procedente de la explotación de recursos fósiles, sino que también se presenta como una de las opciones más efectivas para energizar zonas no interconectadas. A través del uso de tecnologías como los controladores de modulación por ancho de pulso (PWM) y los MPPT, se busca la optimización y la eficiencia en la producción de energía solar, lo que incrementa el rendimiento de los PV y maximiza el aprovechamiento de las fuentes renovables [17].

Según Caceres señala que el regulador de carga es un componente esencial en un sistema FV, y diseñar uno más económico puede no solo reducir los costos del sistema, sino también mejorar su rendimiento y alargar la vida útil del conjunto fotovoltaico. En particular, un regulador PWM asegura que la energía producida por el PV se transfiera eficientemente a la batería o al sistema de almacenamiento, manteniéndola completamente cargada y protegiéndola de descargas profundas y sobrecargas, lo que contribuye significativamente a alargar la durabilidad de la batería [18].

Parrales y Ortegan mencionan que el análisis de los datos de los equipos, el controlador MPPT 75/15, gracias a su tecnología avanzada que amplía el rango de captación solar y maximiza el aprovechamiento de la potencia disponible, demuestra una eficiencia del 5,94%

al recibir, controlar y entregar energía al sistema durante un periodo más prolongado en comparación con el controlador PWM, que presenta una eficiencia del 3,71%. Además, la tecnología del controlador PWM, considerada más antigua, tiene la desventaja de ser menos eficaz en situaciones donde la radiación solar es limitada o cuando el índice de horas solares pico es bajo, lo que reduce su capacidad para optimizar el rendimiento del sistema. Además, el controlador MPPT se adapta mejor a condiciones variables de radiación solar, ofreciendo una mayor estabilidad en la producción de energía [19].

Paula Ortiz presenta una idea central sobre el uso de controladores y cómo la combinación de diferentes tipos podría reducir las perturbaciones y acelerar el MPPT en diversas condiciones meteorológicas. Para abordar este desafío, se propone un diseño de un controlador de modo deslizante (SMC). Este diseño está orientado a regular la corriente del inductor en un convertidor *Boost* asociado a un módulo fotovoltaico e incorpora tres controladores en cascada: un algoritmo P&O, otro de voltaje PI y un SMC que activa la puerta (*gate*) del MOSFET. Esta estrategia logró atenuar las perturbaciones del sistema y asegurar la estabilidad local. No obstante, se observan pérdidas dinámicas de potencia, ya que el controlador PI está optimizado para las condiciones más exigentes, lo que ralentiza la búsqueda del MPP en la mayoría del rango operativo [20].

Gualotuña concluye que, entre los diferentes controladores evaluados, el MPPT basado en Perturbación y Observación (P&O) tradicional es el que muestra el rendimiento más bajo en todas las simulaciones. En contraste, los controladores que ofrecen un mejor desempeño son el MPPT basado en conductancia incremental (Inc. Cond.) y el MPPT con PID adaptativo, siendo este último el que destaca por su desempeño general superior. El controlador con PID adaptativo no solo proporciona una mayor precisión en el MPPT, sino que también mejora la respuesta del sistema ante variaciones en las condiciones meteorológicas, lo que optimiza la eficiencia energética del sistema FV. Esta mayor eficiencia puede traducirse en una generación de energía más alta a lo largo del tiempo, convirtiendo a este controlador en la opción preferida para aplicaciones donde la estabilidad y la maximización de la energía son fundamentales [21].

Dado los autores del libro control neuronal difuso para sistemas FV señalan que este modelo computacional toma como parámetros de entrada diferentes señales de radiación solar y

temperatura, las cuales son generadas manualmente a través de un bloque de señales llamado "Signal Builder" en Simulink. Estas señales, que incluyen tanto valores constantes como variables a lo largo del tiempo, simulan diversas condiciones ambientales hipotéticas para permitir la observación de la respuesta del bloque fotovoltaico (FV) y evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios [22].

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo, se plantean los compendios teóricos que sustentan la investigación, desarrollando un soporte sólido con la finalidad de presentar un análisis basado en la realización de datos y gráficas simuladas.

3.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El sistema FV está formado por un conjunto de componentes encargados de producir energía eléctrica cuya finalidad es cubrir la demanda energética dada por una carga, es un sistema fuera de la red se encuentra los diferentes equipos como el PV, una batería, el inversor y la unidad de control hasta poder llegar al usuario final [22].

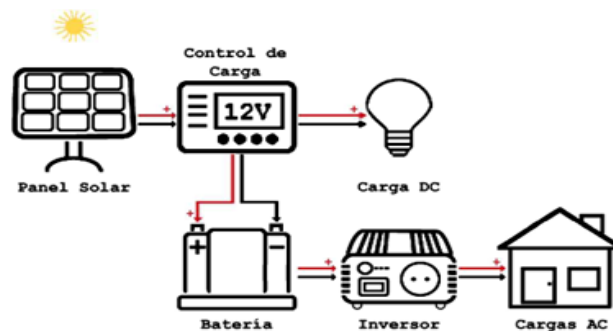


Figura 3.1 Modelo solar Fotovoltaico [22].

Esta tecnología utilizada influye significativamente en las tipologías físicas de los módulos fotovoltaicos. La tecnología más comúnmente empleada es la del silicio cristalino.

Los sistemas solares fotovoltaicos son conjuntos de equipos eléctricos y electrónicos diseñados para obtener energía eléctrica a partir de la radiación solar. Estos sistemas se utilizan tanto en instalaciones autónomas como en grandes centrales de generación que suministran energía directamente a la red eléctrica. Un componente clave de estos sistemas

son las células solares, cuya función principal es transformar la energía luminosa incidente en electricidad de corriente continua (DC) [23], se considera que el resto de componente va a depender de la aplicación a la que se encuentre destinada.

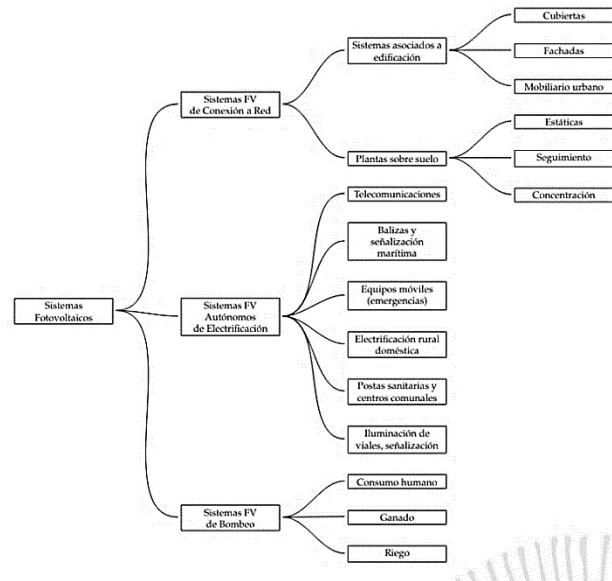


Figura 3.2 Clasificación y aplicación fotovoltaica [7].

3.2 BATERÍAS

Dentro de los componentes importantes está la batería, dependiendo de la aplicación fotovoltaica se suele usar:

- Baterías monoblock.- Las baterías de plomo ácido de tipo abierto, que suelen ser usadas ampliamente en las industrias automotriz, son capaces de suministrar altas corrientes en periodos cortos. Sin embargo, no suelen ser adecuados para descargas profundas por debajo del 90% de su capacidad total, lo que las hace poco eficientes para sistemas fotovoltaicos [24].
- Batería tipo AGM o VRLA.- son baterías que tienen el electrolítico absorbido separados por paredes de fibra de vidrio, es por ello, que no es necesario un sistema de refrigeración ni un mantenimiento concurredido, considerando que su principal función es el trabajo a altas corrientes de descarga, tendiendo un tiempo de trabajo amplio siendo perfecta para sectores fotovoltaicos [24].

- Baterías de Gel. - se compone de un electrolito gelificado sellados en su totalidad con el fin de evitar algún tipo de derrame de líquido, las tensiones a la que se trabaja son 6V, 12V, 24V Y 48V, su costo puede ser elevado debido a la eficiencia y garantía que esta posee [24].
- Batería estacionaria OPzS.- fabricadas de plomo-ácido de tipo abierto con una tensión nominal de dos voltios y placas de plomo tubulares. Su elevado contenido en plomo contribuye a su costo más alto, pero también le otorga una ventaja significativa en términos de durabilidad, especialmente en ciclos de descarga. Estas baterías tienen una vida útil prolongada y se benefician de un proceso de carga eficiente. Además, las baterías de litio, que son conocidas por su alta capacidad de almacenamiento de energía, están emergiendo como competidoras fuertes en el campo de las ER debido a su eficiencia y capacidad [24].
- Baterías de Ciclo profundo. - La energía generada por los PV puede almacenarse químicamente en baterías, las cuales varían en tecnología. En sistemas solares fotovoltaicos autónomos, se suelen utilizar baterías de electrolito líquido, gel o AGM de ciclo profundo de plomo-ácido. Estas baterías están diseñadas para almacenar la energía producida por los PV, permitiendo su uso en cualquier momento según sea necesario [24].
- La batería de la serie RA de Ritar Power es una batería sellada y de ciclo profundo que utiliza tecnología AGM VRLA, lo que la hace libre de mantenimiento. Está provista con un sistema de ventilación de baja presión y ha sido diseñada concretamente para el acumulación y respaldo de energía. Es especialmente adecuada para aplicaciones en sistemas de energía solar, sistemas UPS, centrales telefónicas, sistemas de seguridad, alarmas contra incendios, equipos de resguardo y control de tableros, e iluminación de emergencia en áreas públicos. [25].



Figura 3.3 Modelo de batería de ciclo profundo 12V [25].

- Las baterías de ion litio están compuestas por un electrodo negativo y un electrodo positivo de carbono, junto con un electrolito que facilita la conducción de electrones. Estas baterías se destacan por su alta capacidad de almacenamiento de energía, lo que las convierte en una opción confiable y competitiva en el ámbito de las ER [24].

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMAS SOLAR FOTOVOLTAICO.

Al dimensionar un sistema FV, es fundamental comprender la terminología relacionada para asegurar una mejor comprensión de la investigación a realizar.

- Punto de máxima potencia (MPP): Se establece al producto entre el valor de la tensión máxima y la intensidad máxima.

$$V_{Max} * I_{Max} = MPP \quad (3.1)$$

- Factor de forma (FF): Se determina como la razón de la potencia máxima que se entrega a una carga y el producto del voltaje en circuito abierto y la corriente de cortocircuito generalmente oscila entre 0.7 y 0.8 [26].

$$FF = \frac{I_{Max} * V_{Max}}{V_0 * I_{CC}} \quad (3.2)$$

- Es fundamental tener en cuenta los efectos de la temperatura, ya que esta afecta todos los parámetros del PV. A medida que la temperatura se incrementa, se ven alterados varios aspectos clave del rendimiento de la célula.
 - Incremento de la I_{CC} .
 - Se disminuye el V_0 .
 - Se reduce el FF.
 - Disminuye la eficiencia.

Todo esto se debe importantemente por el calentamiento de las células fotovoltaicas dada la continua exposición al sol, es por ello que este factor puede determinar el diseño de sistema a considerar [26].

- Intensidad de irradiación: Dado que la corriente aumenta con la radiación mientras que el voltaje se mantiene casi constante, es crucial tener en cuenta la variabilidad de la irradiación a lo largo del día, que depende de la ubicación del sol. Por esta razón, es fundamental asegurar un correcto posicionamiento de los PV para maximizar su eficiencia [26].

Existen parámetros en las curvas I-V que permiten obtener el modelo del punto de máxima potencia (PMP). Por ello, Linda Hassaine enseña el diseño de diversas curvas relacionadas con la potencia [27].

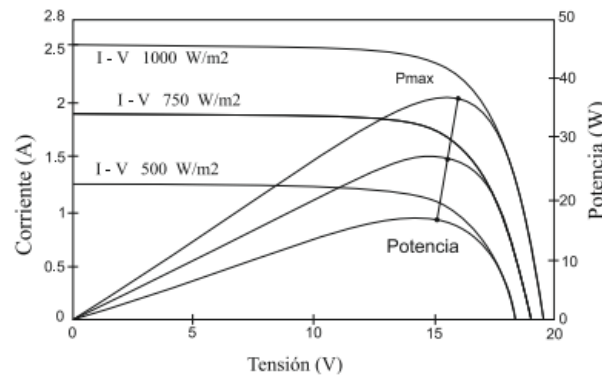


Figura 3.4 Curvas características I-V [27].

Hay ciertas condiciones fundamentales que deben tenerse en cuenta. La importancia del parámetro eléctrico mencionado en la Figura 3.4 no radica en el valor numérico, sino en las circunstancias físicas y eléctricas que deben cumplirse continuamente para alcanzarlo; esto nos lleva al concepto del MPPT. Existen varios métodos para lograr el MPP, que se clasifican principalmente en dos bloques utilizables.

En el primer bloque, se considera la generación de energía mediante el seguimiento mecánico de la irradiación solar. Generalmente, los PV se colocan en partes altas o en grandes extensiones de terreno de manera perpendicular al sol. El segundo bloque se centra en la conversión, utilizando técnicas como MPPT, MPPT + PID, o PWM. Los controladores PWM y MPPT son los más acreditados en el mercado y varían dependiendo del costo y complejidad de fabricación. Estos controladores incorporan inversores cuya

finalidad es entregar la máxima potencia en diferentes escenarios de carga que pueden presentarse en cualquier momento del día.

Los fabricantes proporcionan todos los parámetros clave en las fichas técnicas de los PV. Estos parámetros no son invariables, ya que operan bajo condiciones estándar de funcionamiento, conocidas como Condiciones Estándar de Medida (CEM). Estos escenarios incluyen una irradiancia de 1000 W/m², nivel del mar y una temperatura de célula de 25°C [26].

Un aspecto crucial en los sistemas fotovoltaicos es la adopción de métodos para seguir el punto de máxima potencia (MPP) con el propósito de optimizar la salida de energía. En este sentido, se han desarrollado controladores dedicados al seguimiento del MPP, conocidos como MPPT, que pueden ser implementados utilizando enfoques tanto pasivos como activos. Los métodos pasivos son de fácil integración mediante el uso de fuentes de voltaje constante o una resistencia en serie con la carga, aunque suelen experimentar una disminución en la eficiencia en ciertas condiciones [22].

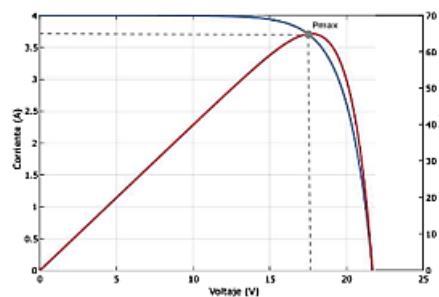


Figura 3.5 Punto de máxima potencia de un módulo FV[22].

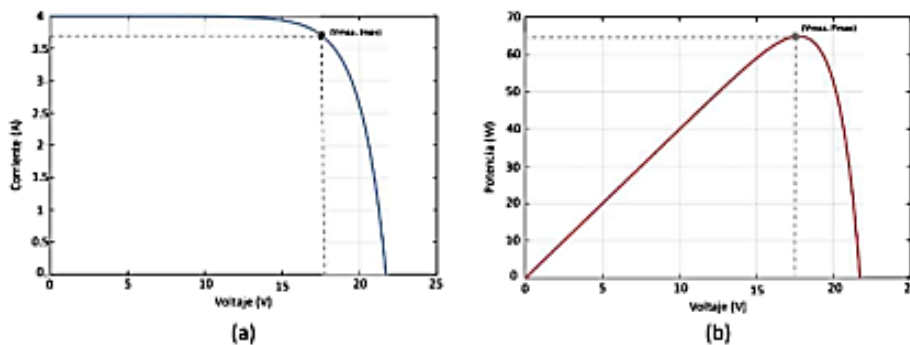


Figura 3.6 Curva característica de un módulo FV [22].

3.4 INVERSOR

En los sistemas fotovoltaicos, los PV realizan la conversión a energía eléctrica durante períodos prolongados. Esta energía generada es en DC, y tanto la tensión como la corriente obtenidas dependen de la configuración de los paneles.

El inversor es un dispositivo electrónico crucial que permite integrar la energía generada por los PV a la red eléctrica. Su función radica en la conversión DC a corriente alterna (AC), cumpliendo con los estándares de la red, es decir, 220V de tensión eficaz a una frecuencia de 60 Hz. Además, el inversor debe garantizar una sincronización adecuada con la red y optimizar la eficiencia de la conversión [26].

La Tabla 3 detalla las partes fundamentales de un inversor, describiendo cada componente esencial y su función específica, destacando cómo cada uno contribuye a la conversión eficiente y segura de la energía.

Tabla 3 Partes fundamentales del inversor.

<i>Parte fundamental</i>	Descripción
<i>Bloque de control principal</i>	Son los componentes del control general, los sistemas de generación de señales basados en PWM, así como parte del sistema de protecciones [26].
<i>Bloque de potencia</i>	Puede ser diseñada como una unidad única o modular, dependiendo de la potencia requerida. Emplea tecnología de baja frecuencia debido a su alta confiabilidad y costo reducido. Además, incluye un filtro de salida inductor capacitor (LC) para minimizar el rizado de voltaje [26].
<i>Bloque de control de red</i>	Funciona como la interfaz entre la red eléctrica y el sistema de control principal. Su tarea es garantizar que el sistema opere correctamente al sincronizar la forma de onda generada con la red eléctrica, ajustando la tensión, la fase y el sincronismo [26].

Punto de máxima potencia (PMP)

Optimiza la energía disponible al ajustar la entrada del inversor en respuesta a las fluctuaciones de potencia del generador, asegurando así la máxima extracción de energía en todo momento.

Bloque de Protecciones

Protege contra sobre tensiones, frecuencia fuera de márgenes, temperaturas elevadas, tensiones bajas del generador, intensidad insuficiente, fallos de red.

Bloque de Monitorización de Datos

Equipado con microprocesadores para recolectar y analizar datos de parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia), externos (radiación, temperatura ambiente) e internos (temperaturas de trabajo) [26].

Dado el alto costo asociado con las instalaciones solares FV, es crucial que los inversores mantengan un alto nivel de eficiencia y confiabilidad durante su operación. La eficiencia del inversor está directamente vinculada a las diferenciaciones de potencia en la instalación, por lo que es fundamental que funcione cerca de su capacidad nominal. Las fluctuaciones en la potencia y entrada provenientes de los PV pueden afectar negativamente el rendimiento del inversor. Por lo tanto, un ajuste adecuado del sistema es clave para minimizar las pérdidas de eficiencia y asegurar un funcionamiento estable y rentable a lo largo del tiempo [26].

3.5 RADIACIÓN SOLAR

Los elementos claves de la energía solar que componen dentro del uso de PV se rigen en la potencia de la radiación y la temperatura que las células captan para ser transformadas en energía eléctrica.

Hay tres maneras en que la radiación solar que llegan a la superficie terrestre, las cuales son:

Radiación Directa: Llega al planeta tierra de forma directa sin verse afectado su dirección.

Radiación Difusa: Alcanza la superficie terrestre después de atravesar diversos elementos de la atmósfera.

Radiación Reflejada: Se ve reflejada por cualquier obstáculo de la superficie terrestre.

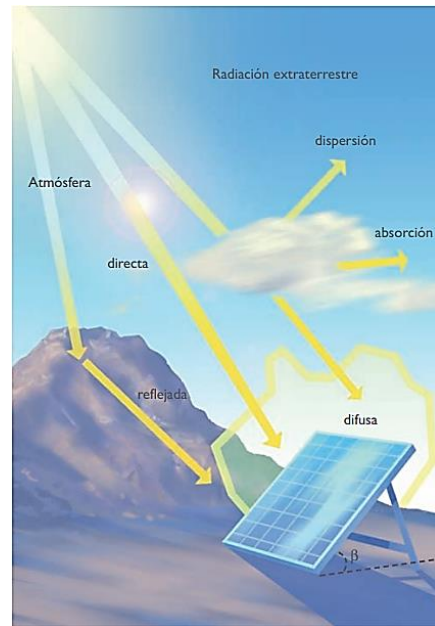


Figura 3.7 Tipos de Radiación Solar [28].

En la terminología y las unidades de la energía solar, se encuentran los conceptos de irradiancia y radiación, los cuales suelen generar gran confusión. Por esta razón, en la Figura 3.7 se indica una semejanza que destaca las diferencias entre estos dos términos.

- La irradiancia solar (G) se describe a la cantidad de energía solar que llega a una superficie específica, y se expresa como potencia por unidad de área, es decir, vatios por metro cuadrado (W/m^2); y en algunos casos se utiliza el kilovatio por metro cuadrado (kW/m^2) para representar estos valores [29].
- La irradiación solar (H) se refiere a la cantidad total de energía solar que una superficie recibe en un periodo de tiempo específico. Esta cantidad se mide en Wh/m^2 o también en J/m^2 , dependiendo de la unidad utilizada para expresar la energía acumulada [29].

3.6 REGULADORES O CONTROLADORES

Para evaluar los parámetros del regulador, se opera en tiempo continuo, lo cual puede implementarse mediante controladores analógicos o digitales. En un sistema FV conectado a la red, el objetivo principal es gestionar la potencia generada, controlando la corriente que el

inversor introduce en la red desde los PV. Para lograrlo, el convertidor está equipado con un sistema de control que asegura que la corriente inyectada siga con precisión la señal de referencia establecida por el algoritmo de máxima potencia (MPPT).

3.6.1 Controladores de carga en sistema FV

Dado un sistema FV, es esencial optimizar el proceso de carga del sistema de acumulación de energía, generalmente realizado mediante un banco de baterías. El regulador o controlador de carga es el mecanismo encargado de esta tarea, cuya función principal es proteger las baterías de sobrecargas y descargas excesivas, respetando los límites establecidos por el fabricante. Este dispositivo se coloca entre el PV y el sistema de almacenamiento. La protección que ofrece es vital para extender la vida útil del grupo de baterías. Además, el controlador de carga monitoriza el voltaje de las baterías y, en algunos escenarios, incorpora microcontroladores que permiten estimar la temperatura, activar alarmas y desconectar la carga cuando el acumulador está a punto de agotarse, y calcular la potencia suministrada [11].

3.6.2 Controlador MPPT

Un controlador MPPT es capaz de llevar el sistema al punto de operación óptimo para maximizar la captación de energía, gracias a un circuito electrónico especializado. Este controlador debe colocarse entre el PV y el banco de baterías para recopilar datos de ambos y tomar medidas sobre el control del ciclo de labor de los semiconductores a causa del convertidores DC/DC, ajustándose a las distintas condiciones meteorológicas [4].

Este algoritmo MPPT emplea un tamaño de paso considerablemente grande para permitir que la dinámica del convertidor se estabilice adecuadamente. Al utilizar un paso amplio, el sistema puede ajustarse de manera más eficiente a las variaciones en las condiciones de irradiación y temperatura. Con el fin de asegurar una respuesta rápida y precisa en la búsqueda del MPP, optimizando así el rendimiento general del sistema FV. Además, la implementación de este enfoque puede contribuir a reducir las pérdidas energéticas y mejorar la fiabilidad del convertidor a largo plazo [4].

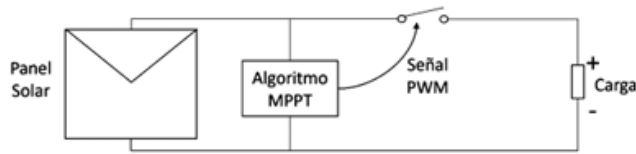


Figura 3.8 Sistema de regular de carga con MPPT.

3.6.3 Controlador PWM

El controlador, siendo uno de los más fáciles de implementar, opera como un interruptor. En consecuencia, la frecuencia de conmutación en el convertidor DC/DC está directamente relacionada con el nivel de voltaje del conjunto de baterías. Tanto el inversor como el controlador de corriente convienen funcionar como una fuente lineal, permitiendo una inyección continua de la corriente generada al sistema FV a la red eléctrica. La Figura 3.9 ilustra un típico sistema de control lineal para la corriente inyectada a la red. Esta configuración asegura una transferencia de energía estable y eficiente, adaptándose a las variaciones en la generación fotovoltaica para optimizar el rendimiento del sistema. Además, este diseño simplificado mejora la fiabilidad del sistema y reduce los costos tanto de implementación como de mantenimiento [22].

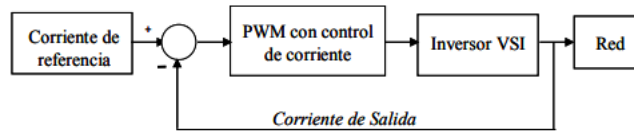


Figura 3.9 Diagrama básico de control PWM por corriente [22].

Existen numerosos controladores disponibles en el mercado. En general, el control lineal de corriente utiliza modulación PWM, en la cual la señal moduladora se contrasta con una señal portadora triangular generada por un regulador lineal, comúnmente un controlador proporcional-integral (PI). Este enfoque es valorado por su inmunidad al ruido. El ancho de banda está limitado por la pendiente máxima de la señal moduladora, la cual no debe superar en ningún momento la pendiente de la señal portadora [22].

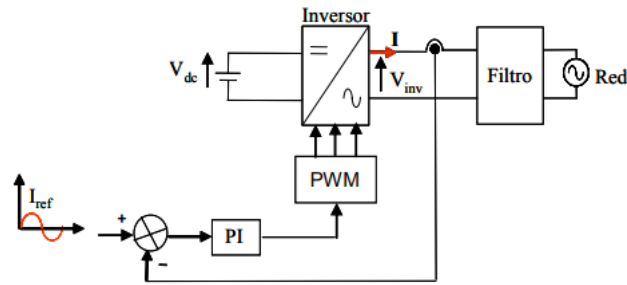


Figura 3.10 Control lineal de corriente.

3.6.4 Algoritmo de control Perturbación y Observación (P&O)

El método de control P&O es un algoritmo iterativo diseñado para localizar el MPP en sistemas FV. Este método ajusta continuamente el punto de operación del módulo fotovoltaico para determinar la dirección del cambio en la potencia, midiendo el rendimiento en el nuevo punto de operación. Se consideran tanto los datos de potencia como los de voltaje después de cada ajuste, lo que permite identificar el punto óptimo en la curva P-V. En esencia, este método utiliza condiciones establecidas por ecuaciones condicionales para optimizar la eficiencia del sistema [22].

$$Curva P - V: \left. \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} > 0; \quad 0 < V < V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} = 0; \quad V = V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} < 0; \quad V_{mpp} < V < V_{OC} \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

Cuando se observa un aumento en la potencia, se debe aplicar una nueva perturbación en la misma dirección, mientras que, si se detecta una disminución, la perturbación debe ser en sentido opuesto. Si no se registra ninguna diferencia en las potencias obtenidas ($dP = 0$) o se alcanza el valor esperado durante las iteraciones, el proceso se detiene, ya que se ha logrado encontrar al menos un valor cercano al Punto de Máxima Potencia (MPP). Esto se logra ajustando el porcentaje de ciclo útil (duty) del convertidor DC-DC, que también está influenciado por el valor de potencia de carga dP [22].

Diagrama de Flujos P&O

En la aplicación del controlador perturbar y observar, este se ajusta a través de la variación de del voltaje y la incidencia que tiene respecto a la potencia [22].

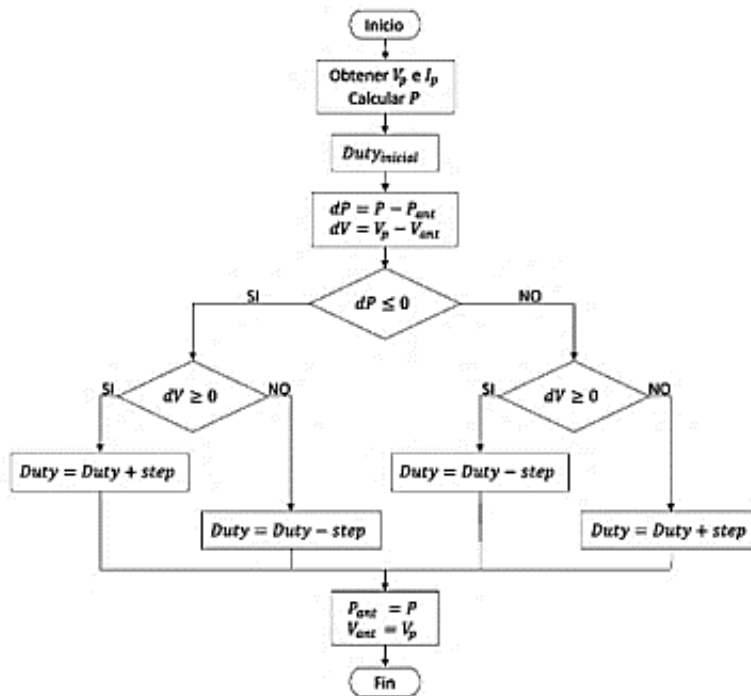


Figura 3.11 Diagrama de flujo para algoritmo P&O [22].

El funcionamiento del sistema comienza con la recopilación de datos de los sensores de corriente y voltaje, los cuales se colocan entre el módulo fotovoltaico y la carga. Basándose en el nivel de carga, se establece un valor inicial para el ciclo útil, el cual puede ajustarse según el criterio del investigador, ya que este tiene la libertad de fijarlo en 0, 1 o 0,5 (0%, 100%, 50%). Luego de realizar una modificación (perturbación), se calculan las derivadas de potencia y voltaje para determinar la dirección del cambio, comparando los valores actuales con los anteriores y monitoreando el sistema. El objetivo es identificar el punto O, que corresponde al punto de máxima potencia (MPP) [22].

3.7 DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Como es bien sabido, los sistemas fotovoltaicos se componen de varias partes esenciales: PV, baterías, controlador de carga, inversor y sensores, tal como se ha mencionado en esta investigación. Cada uno de estos componentes es fundamental para asegurar un uso óptimo del recurso solar.

¿Cómo se mide la energía Solar fotovoltaica?

Para su caracterización, los módulos se evalúan bajo condiciones específicas conocidas como condiciones estándar: 1000 W/m² (1 kW/m²) de radiación solar y una temperatura de 25 °C para las células fotovoltaicas. La potencia máxima que cada módulo fotovoltaico genera en estas condiciones se mide en vatios pico (Wp) y se denomina potencia nominal del módulo [28].

3.7.1 Panel solar

Por medio del uso del software simulink el PV tomado a consideración es el Jinko Solar de 340 W 72v, y los datos del panel son el Q.PLUS L-G4.2 340 de la empresa QANTUNG Solar Module como se ilustra en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Panel L-G4.2 340W

Especificaciones Mecánicas

En la siguiente tabla se detalla cada uno de los aspectos del PV aplicado.

Tabla 4 Especificaciones mecánicas del PV [30].

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS

DIMENSIONES (INCLUIDO EL MARCO)	Alto	Ancho	Profundidad
	1994 mm	1000 mm	35 mm
CUBIERTA FRONTAL	50.7 lbs (23 kg)		
CONTRAPORTADA	3.2 mm, cristal térmicamente pretensado con tecnología antirreflejos		
MARCO	Fil compuesto		
CELDA	Aluminio anodizado		
CAJA DE CONEXIONES	Alto	Ancho	Profundidad
	85-115 mm	60-80 mm	15-19 mm
	Protección	IP 67, con diodos de protección	
CABLE	4 mm ² Solar cable; (+) ≥ 1200 mm (-) ≥ 1200 mm		
CONECTOR	Multi-Contact MC4-EVO2, JMTHY PV-JM601A or Amphenol UTX; IP68		

Tabla 5 Características eléctricas del PV [30].

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

RENDIMIENTO MÍNIMO EN CONDICIONES DE PRUEBA ESTÁNDAR, STC1 (TOLERANCIA DE POTENCIA +5W /-0W)				
MÍNIMO	Potencia en MPP1:	P_{MPP}	[W]	340
	Corriente de Cortocircuito1	I_{cc}	[A]	9,54
	Voltaje de circuito abierto	V_o	[V]	46,34
	Corriente en MPP	I_{MPP}	[A]	9,03
	Voltaje en MPP	V_{MPP}	[V]	37,65
	Eficiencia	n	[%]	$\geq 17,6$

Tabla 6 Rendimiento mínimo y funcionamiento [30].

RENDIMIENTO MÍNIMO A TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO NORMAL NMOT

MÍNIMO	Potencia en MPP1:	P_{MPP}	[W]	253,4
	Corriente de Cortocircuito1	I_{cc}	[A]	7,69
	Voltaje de circuito abierto	V_o	[V]	43,51
	Corriente en MPP	I_{MPP}	[A]	7,10
	Voltaje en MPP	V_{MPP}	[V]	35,71

3.8 VARIABLES A CONSIDERAR

3.8.1 Irradiancia Solar

La constante solar tiene un promedio de 1367 W/m^2 , con una variación de $\pm 7 \text{ W/m}^2$. Sin embargo, puede aumentar hasta 1395 W/m^2 durante el perihelio y disminuir a 1308 W/m^2 en el afelio [31].

- Insolación Difusa

En la Figura 3.13 se observa el resultado de la propagación de la radiación solar por la atmósfera, lo que significa que es la radiación solar que ha sido difundida por los componentes atmosféricos.

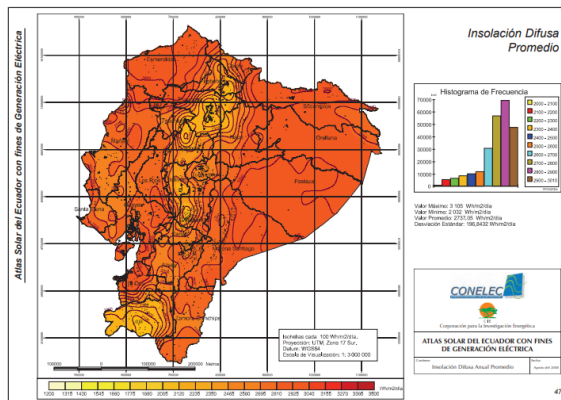


Figura 3.13 Radiación solar Difusa [32].

- Insolación Directa

En otras palabras, es la radiación que proviene del sol en forma directa, siendo el resultado cuando los rayos del sol no logran difundirse mostrados en la Figura 3.14.

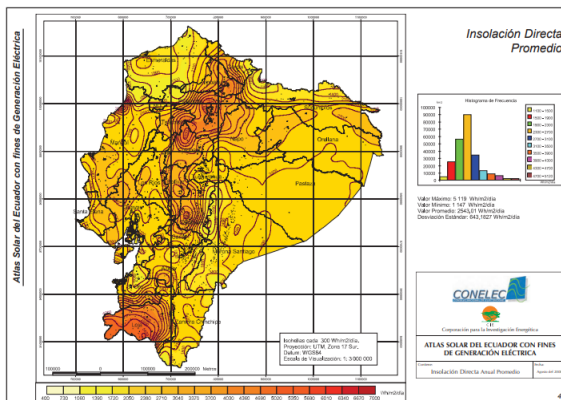


Figura 3.14 Datos radiación solar directa[32].

- **Insolación Global**

Se refiere a la combinación de las dos radiaciones antes mencionadas y mostrada en la Figura 3.15.

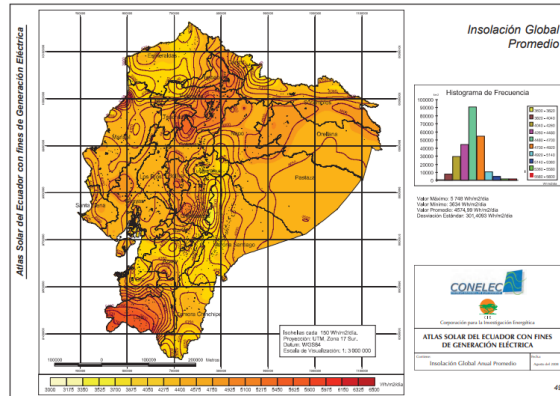


Figura 3.15 Radiación Solar Global [32].

Para implementar tecnologías que utilicen energía solar de media y alta temperatura, se requiere al menos 3 horas diarias de radiación directa y valores de irradiancia entre 500 y 1000 W/m² [33].

3.8.2 Temperatura

La temperatura mínima se espera que aumente debido a la emisividad de las nubes, mientras que la temperatura máxima disminuirá con una transmisividad reducida. En un cielo despejado, la temperatura máxima sube debido a una mayor radiación de onda corta, y la temperatura mínima baja por la mayor transmisibilidad. Por lo tanto, la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima puede usarse como un indicador de la nubosidad [31].

3.8.3 Control PID

Normalmente, los controladores PID se aplican en la industria debido a su robustez. Aunque su diseño es sencillo, presentan limitaciones cuando se trata de controlar de manera eficiente una amplia gama de sistemas [21].

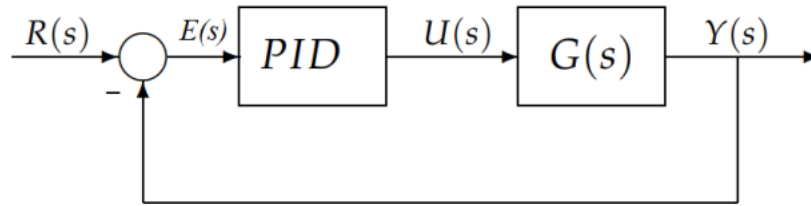


Figura 3.16 Diagrama en bloque de un control PID.

Dada la Figura 3.16 se tiene la entrada $R(s)$ o consigna, $E(s)$ llega a ser el error en el que calcula restando la salida real del sistema a $Y(s)$ de la señal de referencia, El bloque PID procesa la señal de error $E(s)$ y genera una señal de control $U(s)$. El controlador PID ajusta esta señal de control basándose en tres acciones:

- **Proporcional (P):** Reacciona al tamaño del error actual.
- **Integral (I):** Reacciona a la suma acumulada de errores pasados, corrigiendo errores persistentes.
- **Derivativa (D):** Reacciona a la tasa de cambio del error, anticipando futuros errores.

El controlador PID tiene como objetivo reducir el error ajustando la señal de control, de manera que la salida del sistema se alinee lo más cerca posible con la referencia establecida.

3.9 DISEÑO DEL SISTEMA

3.9.1 Implementación computacional en Simulink

Al momento del desarrollo de los sistemas se usó el Software Matlab2021a por lo que cuenta con las librerías necesarias en la utilización de los componentes para sistemas fotovoltaicos. Se recuerda que los controladores que se mencionan para el desarrollo del mismo son elementos de potencia considerados de la librería power electronics, el uso de elementos

habituales siendo los medidores, constantes, sumadores entre otros básicos de uso común como se puede evidenciar en la Figura 3.17.

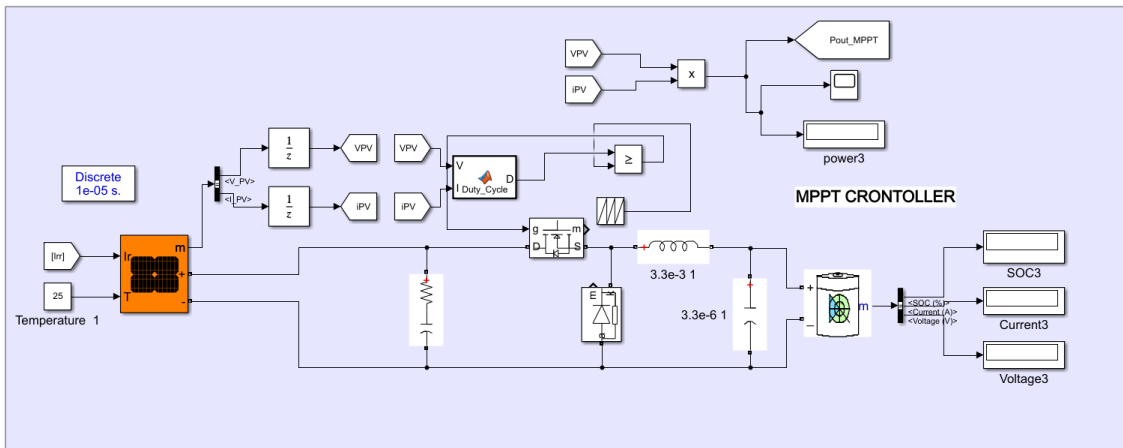


Figura 3.17 Sistema fotovoltaico de controlador MPPT.

En la Figura 3.18 se unas el mismo módulo fotovoltaico, con los mismo datos, paneles y baterías para realizar una óptima comparativa es este modelo cambia el tipo de controlador.

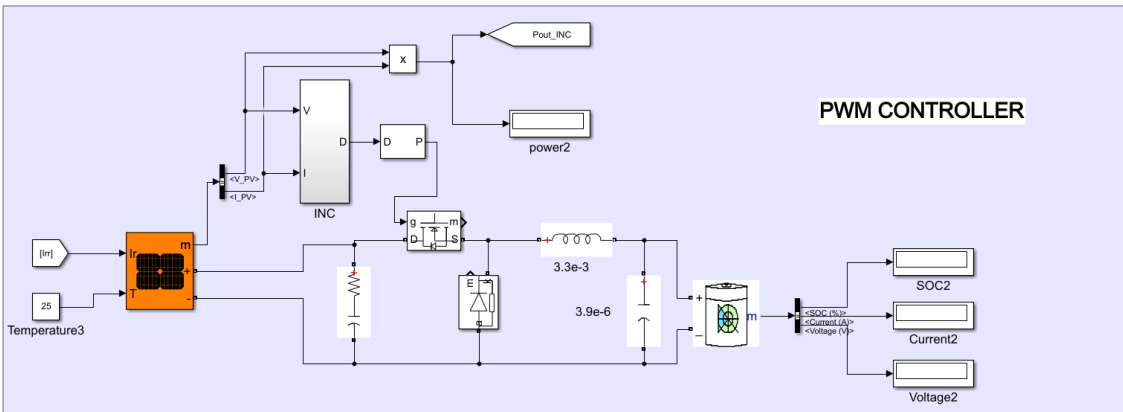


Figura 3.18 Sistema Fotovoltaico con controlador PWM.

Este modelo presentado en la Figura 3.19 simula el comportamiento de un sistema FV utilizando un controlador que ajusta dinámicamente el ciclo de trabajo para maximizar la potencia generada, un proceso fundamental para mejorar la eficiencia de los sistemas solares.

La sección “PERTURBAR & OBSERVAR” indica que estos datos de corriente y voltaje se utilizan activamente en el proceso iterativo del algoritmo P&O para ajustar la operación del módulo FV y maximizar la eficiencia energética.

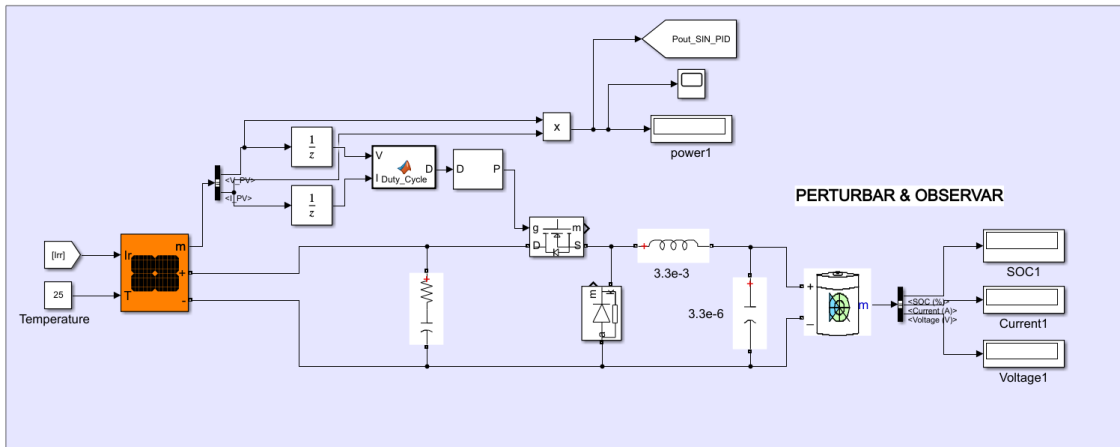


Figura 3.19 Módulo fotovoltaico con un controlador P&O.

La combinación del algoritmo MPPT con el controlador PID adaptativo permite una respuesta más dinámica y eficiente, ajustándose continuamente para mantener el sistema FV operando en condiciones óptimas, incluso ante variaciones en las condiciones ambientales o de carga.

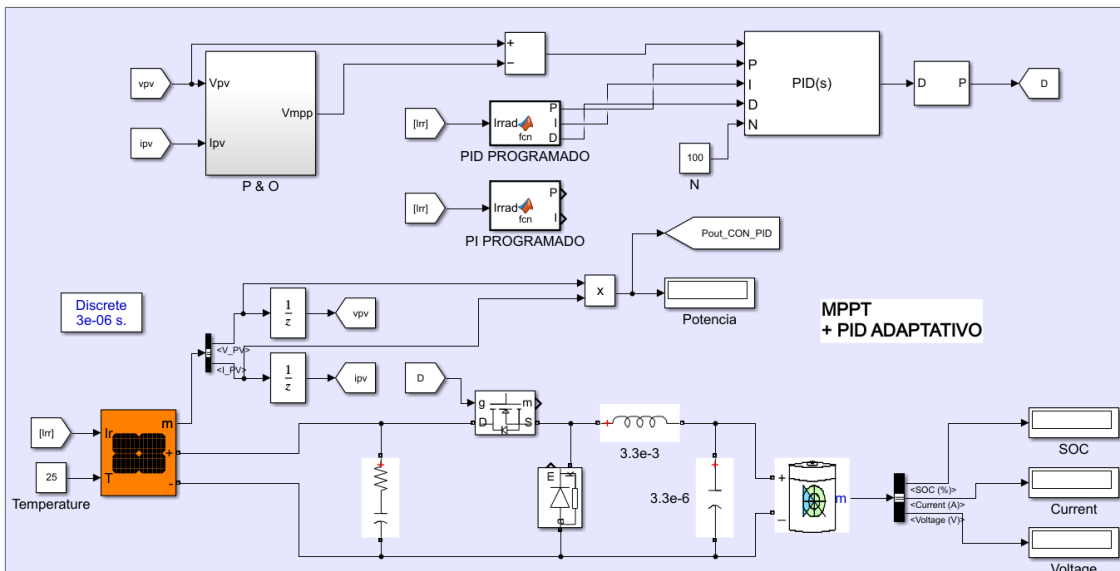


Figura 3.20 Módulo fotovoltaico con controlador MPPT + PID Adaptativo.

4 METODOS Y PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se exponen los principios teóricos que respaldan la investigación, proporcionando una base sólida para llevar a cabo un análisis fundamentado en la generación de gráficas simuladas.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como prioridad analizar el desempeño del controlador MPPT basado en un PID adaptativo en comparación con un controlador PWM en sistemas fotovoltaicos donde la carga es una batería. El estudio se llevará a cabo en un entorno de simulación utilizando el software Matlab/Simulink, y se centrará en evaluar los controladores empleados en centrales fotovoltaicas bajo diversas condiciones de irradiación solar.

4.1.1 Datos de entrada de iradiancia Solar.

Se utilizarán datos meteorológicos históricos de 10 años de la región de Latacunga estudio para simular las condiciones de radiación solar. Los datos serán obtenidos del sistema de información climática [34]. Además, se emplearán modelos de simulación previamente validados en la literatura para estimar el error relativo de los controladores aplicados en el sistema FV.

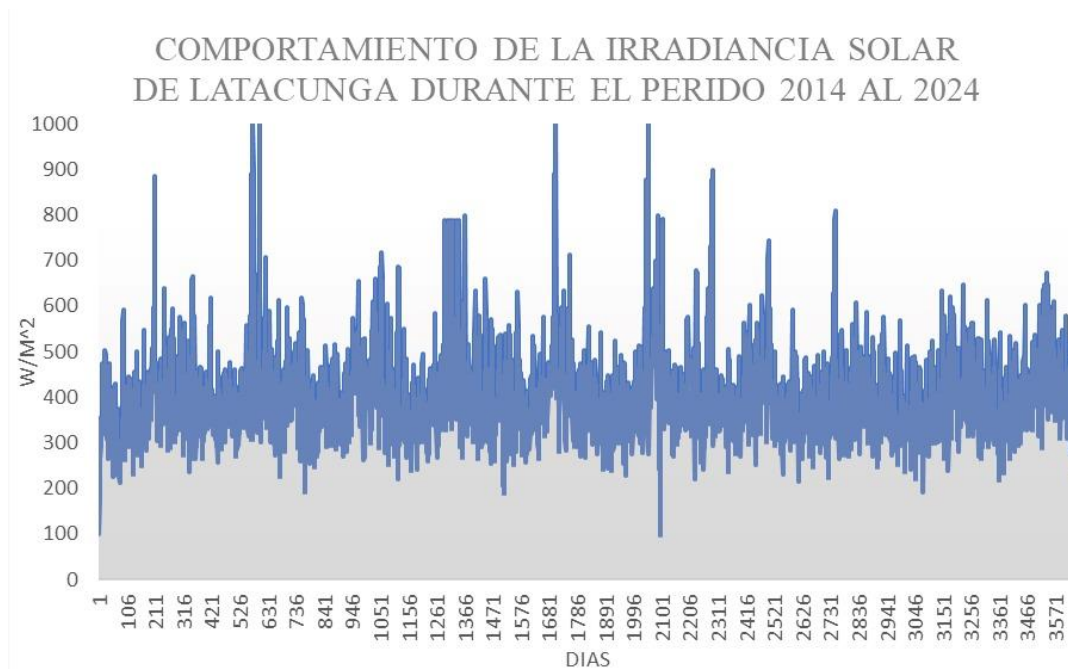


Figura 4.1 Radiación solar de Latacunga de los años 2014 al 2024.

Tabla 7. Radiación promedio en W/m².

RADIACIÓN MINIMA	RADIACIÓN MEDIA	RADIACIÓN MAXIMA
100	400	1000

- La radiación solar se obtuvo de la extracción de datos históricos de 10 años del cantón Latacunga en el Barrio San Felipe, como se visualiza en la Figura 4.1 para simular diferentes condiciones ambientales.
- Obteniendo así resultados de radiación promedio en los casos mínima, media y alta, como se visualiza en la Tabla 7.
- En base a la Figura 4.1 se determinó los escenarios de operación en base a la caída de radiación solar, por ejemplo, en el mínimo cuando la radiación cae al 100 W/m², así se fue determinando los periodos del día y de los años, para determinar día lluvioso, nublado y soleado.

4.2 CONTEXTUALIZACIÓN DE VARIABLES

4.2.1 Variables dependiente

El error relativo entre controladores del sistema fotovoltaico.

4.2.2 Variables independientes

Intensidad de radiación solar, tipo de controlador (PID adaptativo frente a PWM).

4.3 DIAGRAMA Y ELEMENTOS

4.3.1 Modelado y elementos del sistema fotovoltaico

En la siguiente tabla se detalla los elementos utilizados a consideración para el sistema FV para los diferentes controladores.

Panel Solar

Dentro del modelo de simulación los elementos que tomó a consideración en la librería de simulink es el PV con las características del tipo Jinko Solar 340 w 72, los datos de entrada se los introduce con una constante de entrada que es la irradiación conjunta con el valor constante de temperatura, para el caso de la irradiación esta puede variar.

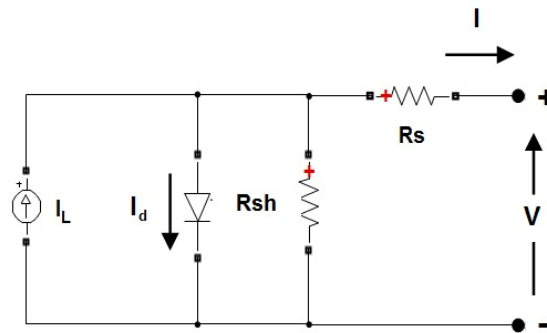


Figura 4.2 Modelo Unifilar del panel fotovoltaico

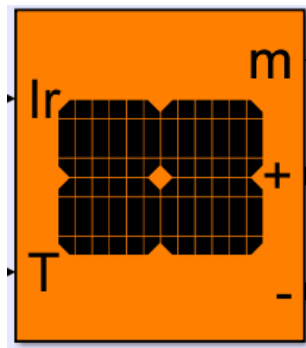


Figura 4.3 Panel solar sacado de la librería Simulink.

Completando el modelo fotovoltaico se tiene:

- Bloque serie RC actuando como filtro para reducir el ruido eléctrico y las fluctuaciones en la señal eléctrica del sistema FV.
- Bloque condensador (C) con un parámetro constantes de $3.3e-6$.
- Un inductor con un parámetro constante de $3.3e-3$.
- El diodo permite que la corriente opere en una dirección, mientras que bloquea su paso en la dirección opuesta.

- Mosfet Cuando se aplica una señal de puerta, el MOSFET conduce y actúa como una resistencia en ambas direcciones, controla el flujo de corriente en el circuito, actuando como un interruptor en los convertidores DC-DC
- Batería de Ion de litio de 24V, siendo una de los más confiables para sistemas fotovoltaicos.

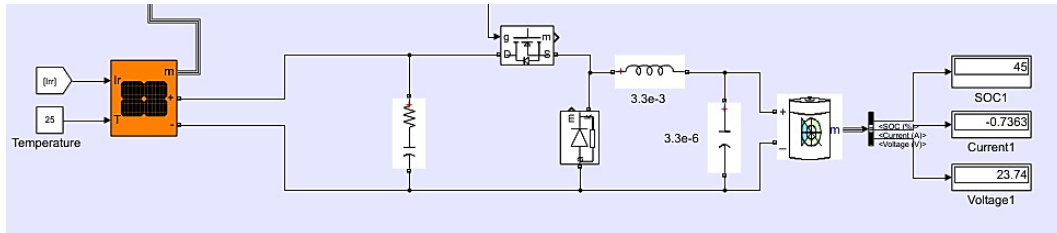


Figura 4.4 Modelo implementado en simulink de sistema FV.

4.3.2 Datos de entrada de panel.

Dado los valores de la Tabla 8 son usados dentro del modelado del sistema FV en Simulink con la finalidad de obtener datos correctos.

Tabla 8 Valores característicos del panel Jinko Solar [35].

PARÁMETROS		MÓDULO JKM 340W
POTENCIA MÁXIMA (P _{MAX})	P _{max}	340 W
TENSIÓN DE MÁXIMA POTENCIA (V _{MP})	V _{mp}	33.93 V
CORRIENTE DE MÁXIMA POTENCIA (I _{MP})	I _{mp}	10.02 A
TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO (V _{OC})	V _{oc}	41.00 V
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I _{SC})	I _{sc}	10.82 A
EFICIENCIA DEL MÓDULO STC (%)		20.15 %

<i>TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO (°C)</i>	°C	-40°C~ +85%
<i>TENSIÓN MÁXIMA DEL SISTEMA</i>		1000/1500 VDC(IEC)
<i>CAPACIDAD MÁXIMA DEL FUSIBLE EN SERIE</i>		20 A
<i>TOLERANCIA DE POTENCIA</i>		0~+3%
<i>COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE P_{MAX}</i>		-0.35%/°C
<i>COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE V_{OC}</i>		-0,29%/°C
<i>COEFICIENTES DE TEMPERATURA DE I_{SC}</i>		0.048%/°C
<i>TEMPERATURA NOMINAL DE FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA (NOCT)</i>		45+- 2°C

4.3.3 Modelación matemática del panel solar:

Fotocorriente del panel solar aplicando la Ecuación (4.1), modelar y predecir el comportamiento eléctrico del panel bajo condiciones de operación reales, según el nivel de irradiancia que se ingrese como valor constante [36]:

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

Donde:

G : Irradiancia solar [W/m²].

I_{Ph} : Fotocorriente [A].

I_{sc} : Corriente de corto circuito [A].

K_i : Corriente de corto circuito de una celada a 25 °C y 1000 [W/m²].

T : Temperatura de operación [K].

Corriente de Saturación: Para calcular interacción la corriente de saturación inversa con la temperatura, a diferentes condiciones ambientales que se encuentra expuesto el panel solar dada la Ecuación (4.2) [36].

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

Donde:

I_0 : Corriente de Saturación.

I_{rs} : Corriente de Saturación de referencia.

T_n : Temperatura nominal [K].

T : Temperatura de operación [K].

q : Carga de electrón 1.602×10^{-19} [C].

n : Factor de diodo.

K : Constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} [J/K].

E_{go} : Grafico de banda de energía del semiconductor [eV].

Corriente de Saturación de referencia (reversa):

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

Donde:

I_{rs} : Corriente de Saturación de referencia.

q : Carga de electrón 1.602×10^{-19} [C].

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto [V]

N_s : Número de celdas conectadas en serie.

K : Constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} [J/K].

T : Temperatura de operación [K].

Corriente Shunt: Es la corriente de fuga, que fluye a través de una resistencia que se modela en paralelo con el diodo ideal en el circuito equivalente de una celda solar [37].

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

Donde:

I_{sh} : Corriente Shunt (compensador).

I : Corriente del panel solar [A].

N_p : Número de celdas conectadas en paralelo.

R_s : Resistencia serie [Ω].

R_{sh} : Resistencia shunt [Ω].

Se empleará un modelo matemático basado en la ecuación de la curva I-V de un PV, que se detallará a continuación en la ecuación (4.5).

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{V_{pv} + IR_s}{nV_t}} - 1 \right] \quad (4.5)$$

Donde:

- I_{sc} : Es la corriente de cortocircuito.
- V_{pv} : Tensión de salida del panel
- I_0 : Es la corriente de saturación inversa.
- R_s : Es la resistencia en serie del panel.
- n : Es el factor de idealidad.
- V_t : es la tensión térmica.

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

Donde:

$K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/k (Constante de Boltzman)

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Carga del electrón)

- T: Temperatura en grados Kelvin
- Ajuste de parámetros por temperatura e Irradiancia

Los valores de I_{sc} y V_{oc} se ajustan en función de la temperatura y la irradiancia.

$$I_{sc}(T) = I_{sc} * [1 + \alpha_{I_{sc}} * (T - T_{STC})] \quad (4.7)$$

- Ajuste de I_{sc} por temperatura .

$$V_{oc}(T) = V_{vo} * [1 + \beta_{V_{oc}} * (T - T_{STC})] \quad (4.8)$$

- Ajuste de I_{sc} por irradiancia

$$I_{cs}(G) = I_{cs} * \frac{G}{1000} \quad (4.9)$$

Donde:

- $\alpha_{I_{sc}} = 0.048\%/^{\circ}\text{C}$
- $\beta_{V_{oc}} = -0.29\%/^{\circ}\text{C}$
- T_{STC} : Temperatura estándar (25°C)

Ecuación para hallar la potencia del panel:

$$P = V * I \quad (4.10)$$

Aplicación en Simulink.

El sistema descrito detalla los procesos involucrados en la conversión y acumulación de energía solar en un modelo fotovoltaico típico. Los PV generan electricidad en función de los parámetros de irradiancia y la temperatura. Posteriormente, la corriente eléctrica pasa a través de varios componentes electrónicos que regulan y acondicionan la energía antes de almacenarla en una batería. Este tipo de sistema es común tanto en instalaciones convencionales como en sistemas a gran escala, donde la energía solar se convierte en electricidad y se almacena para su uso futuro. Por ello, se busca que los PV operen en su punto de máxima potencia mediante el uso de controladores especializados.

4.4 DISEÑO DE CONTROLADOR MPPT

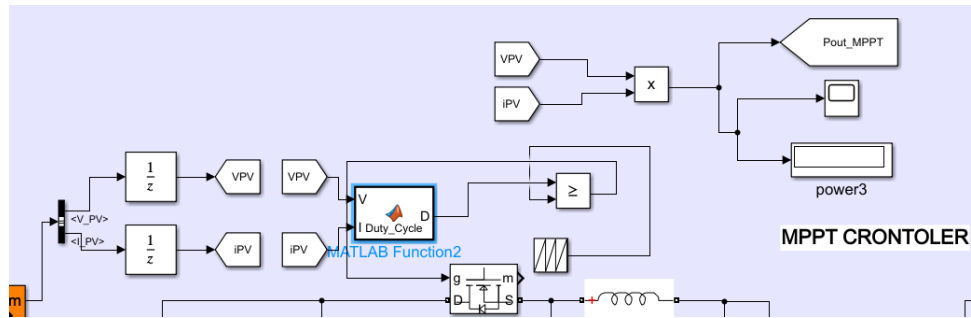


Figura 4.5 Modelo de controlador MPPT.

En la Figura 4.5 se observa los elementos utilizados en el Software Simulink para el desarrollo de controlador, mostrando los elementos a utilizar con la función y característica que ocupan dentro de la simulación planteada.

El controlador MPPT a manera detallada, de la salida “m” del PV se conecta a un Bus Colector hacia el bloque de retardo discreto cuya función es almacenar el valor de la entrada, que entrega como salida el PV (V_{pv} y I_{pv}).

Por consiguiente, se usa el bloque de función de Matlab con la finalidad de calcular el ciclo de trabajo (duty cycle) teniendo valores de entrada (V y I) y el valor de salida (D), las señales de entrada representan valores en tensión y corriente del panel y como salida se presenta el ciclo de trabajo que se utilizará para ajustar el convertidor.

4.4.1 Descripción general del modelo

En la Figura 4.6 del modelo de Simulink representa un sistema FV con un controlador MPPT.

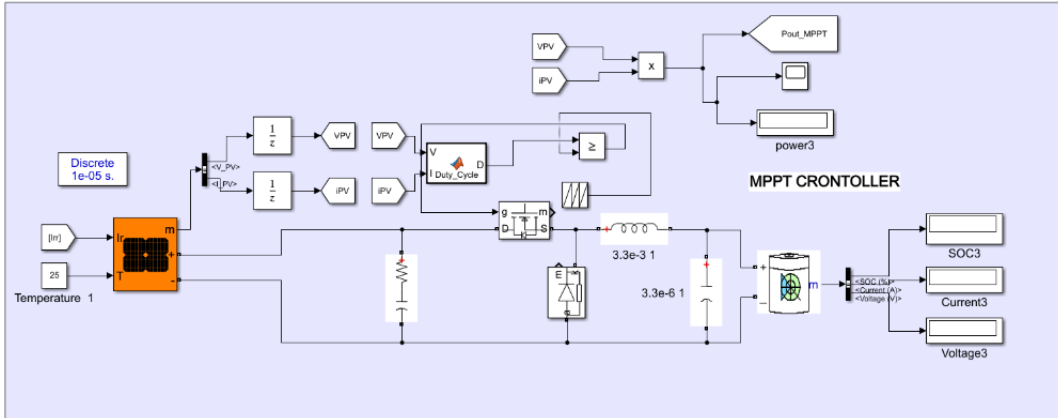


Figura 4.6 Modelo completo del Sistema FV y controlador.

Panel Fotovoltaico PV:

- El PV es modelado con entradas para la irradiancia (Irr) y la temperatura (T). Estas entradas afectan la salida de corriente y voltaje del PV, los datos del panel son tomados de las carteristas que presenta el fabricante.
- La salida de corriente (iPV) y voltaje (vPV) se envía al resto del sistema, incluido el controlador MPPT.

Convertidor DC-DC:

- El sistema incluye un convertidor DC-DC controlado por el ciclo de trabajo (D). Este convertidor ajusta la tensión y la corriente de salida para optimizar la extracción de energía del PV.

Bloques de Control y Monitorización:

- Hay varios bloques para calcular la potencia (Pout MPPT), así como para monitorear la carga (SOC), la corriente y el voltaje de una batería conectada al sistema.

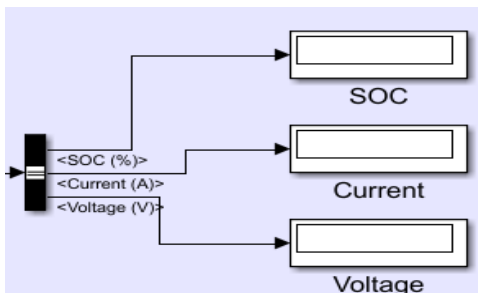


Figura 4.7 Bloque de monitoreo.

Entradas al Controlador MPPT:

- El controlador MPPT recibe como entradas el voltaje (V_{pv}) y la corriente (I_{pv}) del PV.
- Estos valores son utilizados para calcular la potencia del panel por la ecuación (4.2) que es esencial para el funcionamiento del algoritmo MPPT.

$$P = V_{pv} * I_{pv} \quad (4.11)$$

Cálculo del Ciclo de Trabajo (Duty Cycle):

- El controlador usa la función Duty Cycle (V, I) para determinar el ciclo de trabajo óptimo. Para un mejor desempeño la función implementa un algoritmo P&O (Perturbar y Observar).
- El algoritmo ajusta el ciclo de trabajo en función de las variaciones de potencia (dP) y voltaje (dV) entre iteraciones, con el objetivo de mantener el sistema operando en el MPP.

$$dV = V - V_{old} \quad (4.12)$$

$$dP = P - P_{old} \quad (4.13)$$

- Las diferencias son usadas para comparar valores antiguos y los valores actuales con la finalidad de obtener criterios de evaluación del error relativo de los controladores
- Existen bloques que aseguran los límites de trabajo no exceda el máximo o el mínimo mostrado en la ecuación (4.5).

$$D \geq D_{max} \parallel D < D_{min} \quad (4.14)$$

El ciclo de trabajo se ajusta de manera dinámica en respuesta a las variaciones de potencia y voltaje, con el fin de mantener el sistema operando en su MPP.

Ajuste del Convertidor DC-DC:

- El ciclo de trabajo calculado (D) es utilizado para controlar el convertidor DC-DC, que a su vez ajusta la salida del panel, tanto en voltaje y corriente.

- Este ajuste asegura que el sistema funcione en el punto donde la potencia del panel es máxima (MPP).

Monitoreo y Control Adicional:

- La señal de ciclo de trabajo ajustada se retroalimenta a los bloques de control para mantener el MPPT, retornando a la compuerta del mosfet.
- También se monitorean otras variables, como la potencia generada (P_{out} MPPT), para analizar el error relativo del sistema y asegurarse de que se está optimizando correctamente, estas señales son mostradas en la interfaz.
- Esta función regula el ciclo de trabajo de un convertidor en un sistema FV, utilizando variaciones sutiles en la tensión y la potencia.
- El ajuste del ciclo de trabajo se realiza de manera iterativa para optimizar la captación de energía del PV.

Este enfoque es crucial en sistemas fotovoltaicos, ya que permite maximizar la eficiencia en la conversión de energía, asegurando que el sistema opere en su punto MPP (punto de máximo potencia), independientemente de las fluctuaciones meteorológicas externas.

4.5 ALGORITMO MPPT CON PID ADAPTATIVO

4.5.1 Proceso matemático del modelo fotovoltaico luego de obtener tensión y corriente como salida del panel.

4.5.1.1 Bloques de entrada

A la salida del panel los valores que se obtienen de tensión y corriente se pasa por el “Bloque de retardo Unitario”

El bloque $\frac{1}{z}$ en Simulink es un bloque que introduce un retraso de una muestra en una señal discreta.

Matemáticamente, esto se representa como:

$$y[n] = x[n - 1] \quad (4.15)$$

Donde:

- $y[n]$ es la salida del bloque

- $x[n]$ Entrada actual
- $x[n - 1]$ Valor de la entrada en el instante de tiempo anterior

Funcionamiento:

El bloque toma como entrada la señal actual de voltaje V_{PV} o corriente I_{PV} , dando como salida del bloque el valor de la entrada en el instante de tiempo anterior.

4.5.1.2 Modelo Perturbador Observador

El algoritmo introduce una pequeña señal de perturbación en el voltaje del panel V_{PV} dando a un incremento o a una disminución en el voltaje de operación.

$$V_{PV}(t + \Delta t) = V_{PV}(t) \pm \Delta V \quad (4.16)$$

Donde:

- $V_{PV}(t + \Delta t)$ Voltaje perturbado en el siguiente instante de tiempo.
- ΔV Pequeño incremento o decremento en el voltaje

4.5.1.3 Cálculo del cambio de potencia.

Después de la perturbación, se mide la potencia nuevamente y se calcula el cambio de potencia.

$$\Delta P = P_{PV}(t + \Delta t) - P_{PV}(t) \quad (4.17)$$

Donde:

- ΔP Cambio en la potencia debido a la perturbación en el voltaje

Decisión basada en observación:

La dirección de la perturbación en el siguiente ciclo va a depender la observación ΔP :

Donde:

- Si $\Delta P > 0$: Si el cambio de potencia es positivo, significa que la perturbación en la misma dirección ha llevado a un aumento en la potencia. Por lo tanto, el algoritmo continuará perturbando en la misma dirección.
- Si $\Delta P < 0$: Si el cambio de potencia es negativo, significa que la perturbación ha llevado a una disminución en la potencia. En este caso, el algoritmo invierte la dirección de la perturbación para volver al punto de mayor potencia.

4.5.2 Controlador PID Adaptativo

El control adaptativo se emplea cuando los controladores tradicionales de MPPT enfrentan dificultades al operar cerca del punto de trabajo. Es común en la literatura ajustar el algoritmo de P&O variando el valor de las perturbaciones según la posición en la curva y la proximidad al punto de máxima potencia. Este enfoque permite equilibrar el tiempo de respuesta del algoritmo con las oscilaciones que ocurren cerca del punto de operación [21].

Se sabe que un controlador PD puede aumentar el amortiguamiento de un sistema, sin embargo, no modifica la respuesta en estado estable. Por otro lado, un controlador PI puede mejorar tanto la estabilidad relativa como reducir el error en estado estable, aunque esto puede resultar en un incremento del tiempo de levantamiento. Debido a esto, se recurre al uso de un controlado PID, que combina las mejores características PI y PD [38].

El controlador PID está compuesto por una sección PI conectada en cascada con una sección PD. Este tipo presenta todas las ventajas de cada acción de control. La función de transferencia se presenta en la ecuación (4.6) [38].

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{K_I}{S} + K_p * S \right) \quad (4.18)$$

Donde las ganancias proporcional, integral y derivativa se representan a través de K_p , K_I y K_D ; respectivamente.

- Desarrollar el controlador PID adaptativo que ajusta automáticamente los parámetros: K_p, K_i, K_d en función de la variable de entrada dado la Tabla 9.

La aplicación del controlador busca sintonizar el PID de manera programada considerando la variación de irradiación mostrada en la Figura 4.1 en pasos de 100 [21], para ello se usa el método dos de sintonización por Ziegler-Nichols por lazo cerrado, con el fin de tomar la acción proporcional del controlador PID, tomando en cuenta los valores incrementales mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9 Valores de parámetros constantes K_p , T_i , T_d [38].

CONTROLADOR	K_p	T_i	T_d
-------------	-------	-------	-------

P	$K_{cr}/2$	∞	0
PI	$9K_{cr}/20$	$6P_{cr}/5$	0
PID	$3K_{cr}/5$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

Aplicando la ley de control:

$$D(t) = D_{anterior} + K_p e(t) + k_i * \int e(t)dt + T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (4.19)$$

En la Figura 4.8 se ilustra el modelo de sintonización de lazo cerrado.

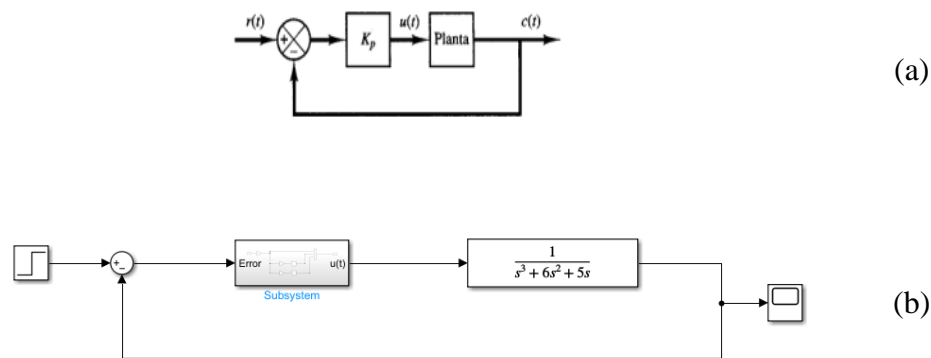


Figura 4.8 (a) Sistema de lazo cerrado Nichols, (b) Sistema lazo cerrado Simulink.

En la ecuación (11.1) que se indica, se usa para la sintonización del método 2 de Ziegler Nichols.

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+5)} \quad (4.20)$$

Dado la Figura 4.9 indica las oscilaciones sostenidas que representa el método 2 de Ziegler Nichols, con ello se tendrá el tiempo crítico para posteriores resultados.

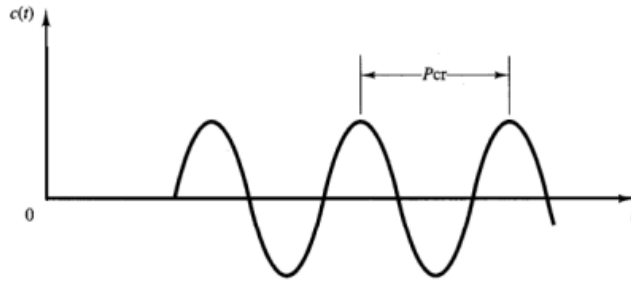


Figura 4.9 Oscilaciones sostenida con periodo P_{cr} [38].

En el modelado del PID sintonizado del PID por la Ziegler-Nichols se configura mediante la obtención de los valores de la ganancia crítica K_u , incluyendo la medición del periodo de las oscilaciones sostenidas, dado su nombre periodo de oscilación P_u mostrada en la Figura 4.9.

Con el uso de la Ecuación (4.13) se calcula la P o constante proporcional:

$$K_p = 0.6 * K_u \quad (4.21)$$

Dada la Ecuación (4.14) se obtiene el tiempo de integración:

$$T_i = \frac{P_u}{2} \quad (4.22)$$

Para la Ecuación (4.15) se calcula el tiempo derivativo:

$$T_d = \frac{P_u}{8} \quad (4.23)$$

Dado los valores actuales se obtuvo para cada caso de irradiancia los valores indicados en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10 Valores para diseño del PID.

CONTROLADOR

PID

IRRADIANCIA	Ku	Pu	Ki	Ti	Td	1/Ti
W/m^2			(P)		(D)	(I)
100	1.2	0.016	0.72	0.0080	0.002	120
200	0.8	0.008	0.48	0.0040	0.001	250
300	0.6	0.008	0.36	0.0040	0.001	250
400	0.6	0.008	0.36	0.0040	0.001	250
500	0.8	0.004	0.48	0.0020	0.0005	500
600	0.7	0.004	0.42	0.0020	0.0005	500
700	0.6	0.0084	0.36	0.0040	0.0010	248
800	0.4	0.0078	0.24	0.0039	0.0009	253
900	0.35	0.0080	0.21	0.0040	0.0010	247
1000	0.25	0.008	0.15	0.0040	0.001	250

Dados los valores obtenidos fueron comparados con el autor Javier Loachamin [21], con la finalidad de tener resultados comprobables.

Para el modelo de simulink se aplicó en diagrama de bloques según la ecuación (4.8) para determinar el error del PID Adaptativo como se visualiza en la Tabla 10 los valores para el diseño del PID tomando valores de constante crítica y el tiempo crítico entre curva y curva como se indica en la Figura 4.10.

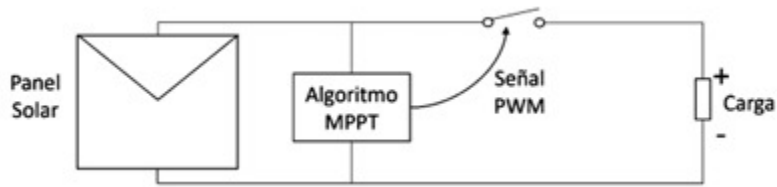


Figura 4.10 Modelo de bloques del MPPT.

Este diagrama representa un algoritmo clásico de MPPT donde, en cada iteración, se mide la potencia y el voltaje del panel, se calcula el incremento de potencia y de voltaje, y se decide si se debe aumentar o disminuir el voltaje de trabajo del panel para encontrar el MPP [22]. El sistema sigue perturbando ligeramente el voltaje y observando los resultados hasta que encuentra el punto óptimo.

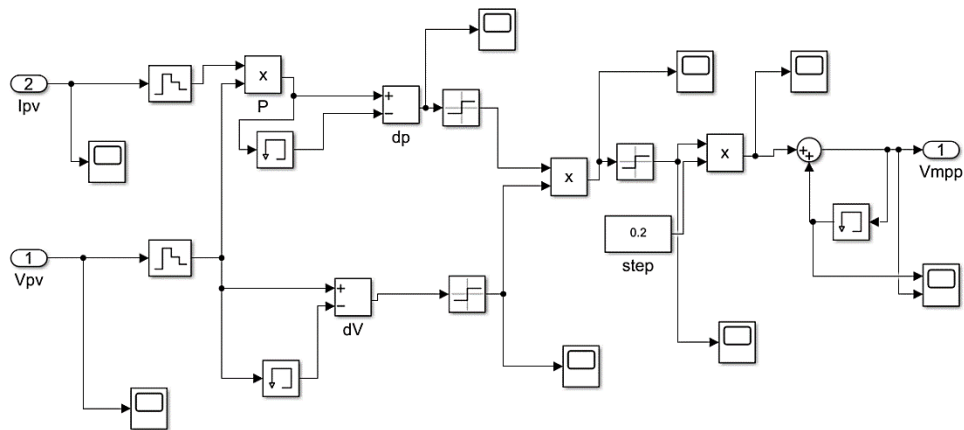


Figura 4.11 Modelo de seguimiento del Punto de Máxima Potencia Simulink.

La Figura 4.11 indica un diagrama de Simulink del algoritmo de MPPT, probablemente del tipo P&O, que es común en sistemas FV para maximizar el punto de máxima potencia en generación de energía.

4.5.3 Descripción General del modelo MPPT+PID

Entradas (I_{pv} y V_{pv}):

- I_{pv} : Es la corriente generada por el PV.
- V_{pv} : Es la tensión generada por el PV.

Cálculo de la Potencia (P):

- La potencia instantánea se calcula multiplicando la corriente (I_{pv}) y la tensión (V_{pv}). Este valor es clave para el algoritmo MPPT, ya que busca maximizar esta potencia.

Cálculo de los Incrementos (ΔP y ΔV):

- ΔP (dp): se determina como la diferencia de potencias de las iteraciones, actual y anterior.
- ΔV (dV): operación matemática similar al caso anterior, pero con voltajes, actual y anterior.

Lógica del Algoritmo P&O:

El algoritmo compara los cambios en la potencia (ΔP) y el voltaje (ΔV). Basado en estas comparaciones, decide si debe aumentar o disminuir el voltaje de trabajo del panel para acercarse al punto de máxima potencia (V_{mpp}) como se visualiza en la Figura 4.11.

Si ΔP es positivo y ΔV es positivo, o si ambos son negativos, entonces el voltaje se ajusta en una dirección (normalmente se aumenta). Si ΔP y ΔV tienen signos opuestos, se ajusta en la dirección contraria (se disminuye) [4].

Generación del Nuevo V_{mpp} :

El resultado del análisis anterior se utiliza para ajustar el valor del voltaje de operación (V_{mpp}), que es el valor donde se espera que el sistema opere para maximizar la extracción de potencia [4].

Incremento o Decremento de V_{mpp} :

Se observa un bloque de Step que introduce una pequeña variación en el voltaje (V_{mpp}), normalmente con un valor pequeño como 0.2. Esto representa la perturbación introducida en cada iteración para evaluar la respuesta del sistema.

Controlador PID Programado

El resultado de la Tabla 6 se usa para modelar el PID con ellos se logra ajustar los valores de los parámetros proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) de un controlador PID en función de un valor de irradiancia solar (Irrad). Esto es útil en sistemas fotovoltaicos donde la irradiancia puede variar dadas las condiciones meteorológicas y, en consecuencia, se requiere ajustar el controlador PID para mantener el sistema funcionando de manera óptima.

Este enfoque es particularmente útil en sistemas donde las condiciones ambientales cambian con frecuencia, como en sistemas solares, donde la irradiancia puede variar a lo largo del día debido a las nubes, la posición del sol, etc.

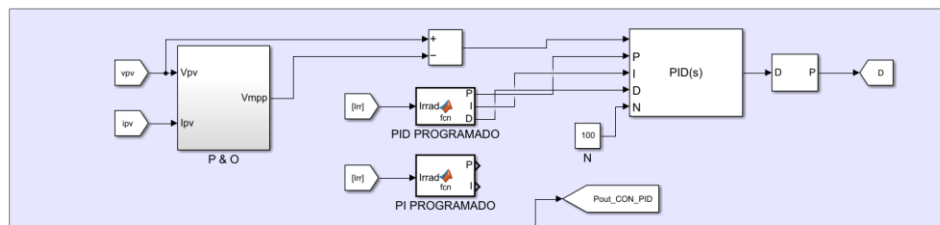


Figura 4.12 Modelo de controlador MPP con PID adaptativo

Este diagrama de Simulink muestra un modelo de MPPT utilizando un controlador PID adaptativo, que se ajusta dinámicamente en función de la irradiancia solar, este es el controlador PID principal del sistema. El parámetro N también se ajusta y se introduce en el controlador, que podría estar relacionado con la frecuencia de muestreo o alguna otra configuración dependiente del sistema, el controlador utiliza los parámetros ajustados para generar una señal de control que será utilizada para mantener el sistema en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) [39].

Bloques de Sumadores y Dispositivos de Salida:

- El bloque de suma (+ -) que está antes del controlador PID combina la referencia de voltaje V_{mpp} con otra señal (probablemente una retroalimentación del sistema), y esta señal de error es lo que el controlador PID intentará minimizar.
- La salida del controlador PID pasa a través de un filtro o procesador (bloque D), y finalmente llega a un bloque que representa la salida final ($P_{out_CON_PID}$), que se usa para controlar algún dispositivo de salida. Este tipo de modelo es muy útil en sistemas fotovoltaicos donde las condiciones ambientales varían y se requiere un

control adaptativo para mantener la eficiencia y maximizar la generación de energía [40].

4.6 DISEÑO DE CONTROLADOR PWM

Este diagrama de Simulink mostrado en la Figura 4.13 representa un sistema FV que utiliza un controlador PWM, para gestionar la energía que se extrae del PV y se transfiere a una carga, como una batería. A continuación, se explica cómo funciona cada parte del modelo, con un enfoque en el controlador PWM.

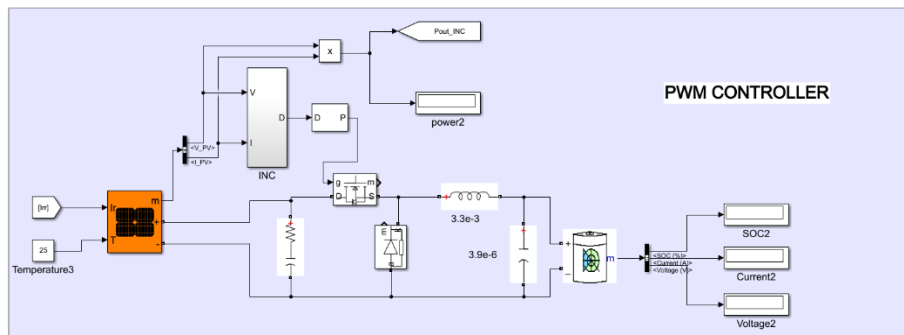


Figura 4.13 Modelo completo del sistema FV con controlador PWM.

Panel Fotovoltaico PV:

- Similar al modelo anterior, el PV recibe como entradas la irradiancia (Irr) y la temperatura (T). Estas entradas determinan la corriente (Ipv) y el voltaje (Vpv) generados por el panel.
- Las salidas (Vpv y Ipv) son utilizadas en el resto del sistema para calcular la potencia y para controlar el convertidor DC-DC.

4.6.1 Controlador PWM

Implementación de un controlador PWM clásico que utiliza la técnica incremental de conductancia, aplicando la ecuación (4.9), muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \sigma \left(\frac{dP}{dV} \right) \quad (4.24)$$

Donde:

P: Es la potencia

V: Es el voltaje en la salida del panel.

σ : Sigma el ángulo de seguimiento del P&O

El controlador PWM es clave para la operación del convertidor DC-DC. Aquí se presenta un desglose de su funcionamiento.

Entradas al Controlador PWM:

- El controlador recibe el voltaje (V_{pv}) y la corriente (I_{pv}) del PV.
- Estas señales se utilizan para calcular la potencia con la ecuación (4.2), que es crucial para determinar el ciclo de trabajo (Duty Cycle, D) del PWM.

Generación de la Señal PWM:

- El ciclo de trabajo (D) calculado se emplea para generar una señal PWM que regula el funcionamiento del convertidor DC-DC.
- Esta señal PWM modula la operación del convertidor, ajustando la transferencia de energía desde el PV a la carga (batería, por ejemplo).

4.6.2 Componentes y Funcionamiento del Diagrama (PWM)

Este diagrama representa un sistema de control MPPT en Simulink que utiliza el PWM para ajustar un convertidor DC-DC en un sistema FV. El bloque central (MYMPPT) implementa un algoritmo de MPPT que ajusta el ciclo de trabajo en función del voltaje y corriente del PV, con el objetivo de maximizar la energía extraída. Este bloque recibe como entradas tanto los valores actuales como los anteriores de tensión y corriente, lo que indica que se está utilizando un algoritmo iterativo, posiblemente el método P&O.

Funcionamiento del Controlador PWM

Este modelo utiliza un controlador PWM para regular el convertidor DC-DC, que es responsable de transferir la energía del PV a la carga. El controlador ajusta el ciclo de trabajo en función de la potencia generada por el panel, utilizando algoritmos de control que optimizan la eficiencia energética. Este enfoque asegura que el sistema opere de manera eficiente, maximizando la cantidad de energía almacenada en la batería o utilizada en la carga [41].

El diagrama de la Figura 4.14 de la implementación en Simulink de un controlador MPP (Maximum Power Point) que utiliza un método basado en PWM (Modulación por Ancho de Pulso), se va a desglosar los componentes y el flujo de señales en este sistema.

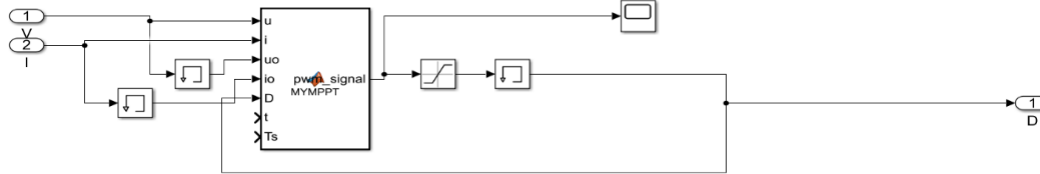


Figura 4.14 Modelo de controlador PWM.

Entradas (V e I):

- V: Representa la tensión generada por el PV.
- I: Representa la corriente generada por el PV.

Bloque MYMPPT:

- Este bloque es el corazón del controlador MPPT. El bloque personalizado que probablemente implemente algún algoritmo de MPPT, como Perturb and Observe (P&O) o Incremental Conductance.

Entradas del bloque MYMPPT:

- u y i : Son las entradas de tensión y corriente del PV.
- uo y io : Estas entradas parecen representar los valores previos de tensión y corriente, utilizados para calcular las diferencias en potencia y voltaje entre iteraciones, lo que es típico en algoritmos como P&O.
- D : Esta entrada es probablemente el ciclo de trabajo (Duty Cycle) inicial o previo, que se ajustará en función de la lógica MPPT.
- t y Ts : Podrían ser la referencia temporal y el tiempo de muestreo, respectivamente, que son útiles para determinar la frecuencia de actualización del ciclo de trabajo.

Concepto básico de conductancia incremental.

El objetivo del método de conductancia incremental es encontrar el MPP para ajustar el ciclo de trabajo del PWM, para encontrar el MPP se da con la derivada de la potencia respecto a voltaje es cero:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (4.25)$$

- $P = V \cdot I$ es la potencia generada por el panel
- V , es el voltaje de salida del panel
- I , es la corriente generada por el panel

Para encontrar el MPP:

- Para el MPP: $\frac{dP}{dV} = 0$, lo que implica $I = -V * \frac{dI}{dV}$
- A la izquierda del MPP: $\frac{dP}{dV} > 0$, lo que implica $I > -V * \frac{dI}{dV}$
- A la derecha del MPP: $\frac{dP}{dV} < 0$, lo que implica $I < -V * \frac{dI}{dV}$

Ajuste del PWM:

El ciclo de trabajo PWM se ajusta en función de si el sistema se encuentra operando a la izquierda o derecha:

- Si $\frac{dP}{dV} = -\frac{I}{V}$, se encuentra el MPP, y el ciclo de trabajo no se ajusta
- Si $\frac{dP}{dV} > -\frac{I}{V}$, se encuentra a izquierda del MPP, por lo que es necesario aumentar el voltaje, el ciclo de trabajo del PWM se reduce para reducir la corriente y aumentar el voltaje.
- Si $\frac{dP}{dV} < -\frac{I}{V}$, se encuentra a la derecha del MPP, por lo que es necesario reducir el voltaje, el PWM aumenta la corriente y reduce el voltaje.

Ejemplo:

Para el siguiente ejemplo se plantea que el panel solar se encuentra operando dado los siguientes valores:

- Voltaje $V = 20 \text{ V}$
- Corriente $I = 5 \text{ A}$

Se asume que el valor para la iteración anterior fuese:

- Voltaje $V_{anterior} = 19.5 \text{ V}$
- Corriente $I_{anterior} = 5.2 \text{ A}$

Cálculo:

Cambio en Voltaje y Corriente:

$$dV = V - V_{anterior} = 20 - 19.5 = 0.5V \quad (4.26)$$

$$dI = I - I_{anterior} = 5 - 5.2 = -0.2A \quad (4.27)$$

Comparación de conductancia incremental:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-0.2}{0.5} = -0.4 A/V \quad (4.28)$$

$$-\frac{I}{V} = -\frac{5}{20} = -0.25 A/V \quad (4.29)$$

Ajuste del ciclo de trabajo:

- Comparar $\frac{dI}{dV}$ con $-\frac{I}{V}$

Por lo tanto:

- $\frac{dI}{dV}$ es -0.4 A/V es menor que $-\frac{I}{V}$ es -0.25 A/V

El sistema se encuentra operando a la derecha del MPP, es por ello que se tiene que aumentar el ciclo de trabajo del PWM para aumentar la corriente y reducir el voltaje.

Parámetros Internos:

En el desarrollo del modelo de controlador PWM se usa basado en la conductancia incremental para el sistema de seguimiento de punto de máxima potencia, basado en la relación de la derivada de la potencia con respecto al voltaje (di/du) y la relación corriente/voltaje (i/u).

- Diferencia de tensión entre el instante actual y el anterior.

$$du = u - u_0 \quad (4.30)$$

- Diferencia de corriente entre el instante actual y el anterior.

$$di = i - i_0 \quad (4.31)$$

- Incremento o decremento del ciclo de trabajo que se aplicará: $d = 0.005$.
- Periodo de la señal PWM, $T_{pwm} = 1$.
- Si di/du es igual a $-(i/u)$, entonces ya estamos en el punto de máxima potencia, y no es necesario ajustar el ciclo de trabajo.
- Si di/du es mayor o menor que $-(i/u)$, el código ajusta D para acercarse al MPP

Salida del bloque MYMPPT:

- PWM signal: Es la señal de control PWM que ajusta el convertidor DC-DC para maximizar la potencia extraída del PV. Este valor se actualiza en función del algoritmo MPPT implementado en el bloque.

Bloques Adicionales:

Después de la salida del bloque MYMPPT, la señal pasa por una serie de bloques:

- **Bloque de saturación** (posiblemente una función de saturación o limitación): Asegura que la señal PWM opere dentro del rango permitido para el convertidor DC-DC.
- **Bloque de retardo** (Delay): Introduce un pequeño retardo, posiblemente para sincronizar la señal o para evitar inestabilidad debido a cambios rápidos en el ciclo de trabajo.
- La salida final D es el ciclo de trabajo ajustado que se utiliza para controlar el convertidor DC-DC.

Ciclo de Retroalimentación:

- El ciclo de trabajo ajustado se retroalimenta de nuevo al bloque MYMPPT, lo que indica que este sistema funciona en un lazo cerrado, adaptándose continuamente a las condiciones cambiantes de irradiancia y temperatura.

Luego, el ciclo de trabajo ajustado se usa para componer una señal PWM, que es la señal de control que modula el convertidor DC-DC para optimizar la extracción de energía del PV. La señal PWM generada es un pulso digital que controla la cantidad de tiempo que el

convertidor está "activo" durante cada ciclo de PWM, lo que afecta directamente la transferencia de energía.

El ciclo de trabajo ajustado se emplea para regular el convertidor DC-DC, y el sistema se adapta de manera continua mediante la retroalimentación de la señal PWM, garantizando que el panel funcione en su punto de máxima potencia.

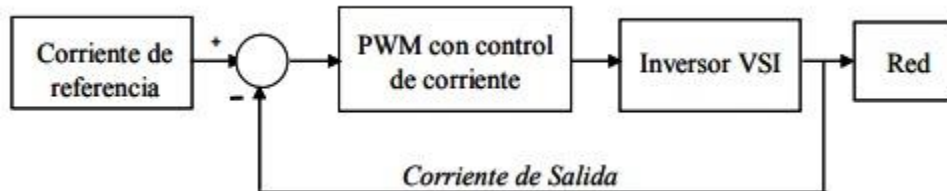


Figura 4.15 Modelo de bloques del PWM

Este enfoque es efectivo para maximizar la eficiencia del sistema FV bajo diferentes condiciones de operación meteorológicas.

4.7 DISEÑO DE CONTROLADOR PERTURBAR Y OBSERVADOR P&O

El sistema utiliza el algoritmo P&O mostrado en la Figura 4.16 para maximizar la energía extraída del PV. Este algoritmo ajusta el periodo de trabajo del convertidor DC-DC para operar en el MPP del panel. Las mediciones de voltaje y corriente se usan para calcular la potencia. Si una perturbación aumenta la potencia, el sistema sigue en esa dirección; si la disminuye, cambia la dirección de la perturbación. Este proceso se repite continuamente para seguir el MPP, incluso cuando las condiciones de irradiancia y temperatura cambian [21].

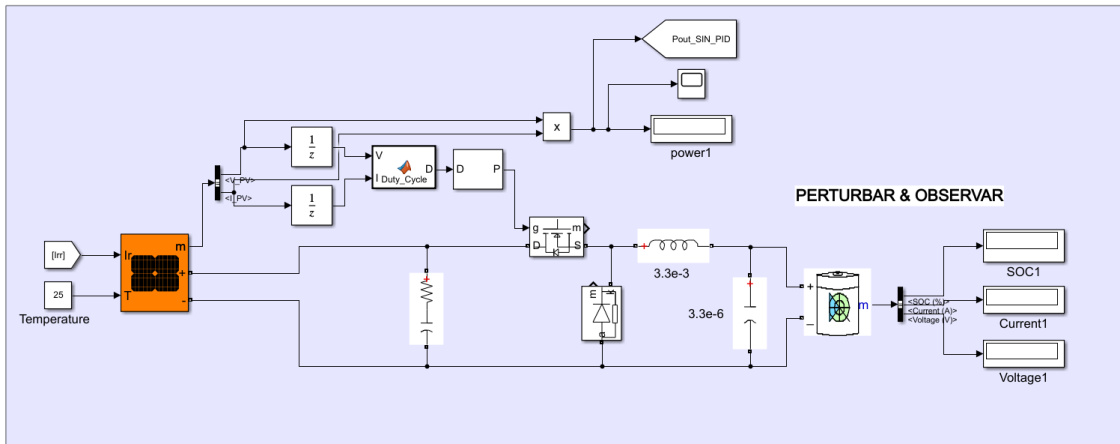


Figura 4.16 Modelo del controlador Perturbar y Observar (P&O).

El controlador mostrado en el sistema de la Figura 4.16 está delineado para implementar el algoritmo de P&O, una técnica comúnmente utilizada para el MPPT en sistemas FV [4].

Entradas del Controlador:

- **Voltaje y Corriente del PV (V_{pv} , I_{pv}):** El controlador recibe las entradas las señales de voltaje y corriente del PV. Estas señales son cruciales para calcular la potencia instantánea generada por el panel.
- **Bloques de Memoria ($1/z$):** Estos bloques almacenan el valor anterior de la corriente y el voltaje, lo que permite al algoritmo comparar el estado actual con el anterior. Esto es esencial para definir la dirección de la perturbación.

Cálculo de Potencia:

- **Producto (x):** El controlador calcula la potencia generada por el PV multiplicando la corriente (I_{pv}) por el voltaje (V_{pv}). Este cálculo es fundamental, ya que el objetivo del MPPT es maximizar esta potencia.

Algoritmo P&O:

- **Lógica de Decisión (bloque no mostrado explícitamente):** Una vez calculada la potencia, el controlador evalúa si la perturbación anterior en el ciclo de trabajo (Duty Cycle) ha resultado en un aumento o disminución de la potencia.
- **Decisión de Perturbación (Duty_Cycle):** Basado en la comparación, el algoritmo decide si debe aumentar/reducir el ciclo de trabajo. Si la perturbación ha aumentado

la potencia, el ciclo de trabajo se sigue ajustando en la misma dirección; si la ha disminuido, se cambia la dirección de la perturbación.

Generación de la Señal de Control:

- **Salida de Control (Duty_Cycle):** La salida del controlador corresponde a la señal de ciclo de trabajo (Duty Cycle), la cual se utiliza para gestionar el interruptor MOSFET en el convertidor DC-DC. Al ajustar este ciclo de trabajo, se regula la conversión de energía del PV hacia la carga o batería, asegurando que el sistema funcione en el MPP.

Monitoreo de Resultados:

- **Retroalimentación:** El sistema continuamente monitorea el voltaje y corriente para recalcular la potencia y ajustar el ciclo de trabajo según sea necesario. Este ciclo de observación y ajuste es lo que caracteriza al método de Perturbar y Observar.

Salida de Potencia:

- **Potencia de Salida:** Aunque no es parte directa del controlador P&O, la potencia de salida es monitorizada y posiblemente se usa para otras funciones dentro del sistema (como control adicional o monitoreo).

Generación de la Señal PWM:

- El generador PWM utiliza el ciclo de trabajo proporcionado para crear una señal de conmutación que controla cuándo el MOSFET está encendido o apagado. Es decir, la señal PWM es una onda cuadrada donde la relación entre el tiempo en alto (encendido) y el período total de la onda cuadrada está determinada por el ciclo de trabajo.

El generador PWM (DC-DC) es esencialmente un modulador que convierte la decisión del controlador MPPT (el ciclo de trabajo) en una señal práctica que regula la operación del conversor DC-DC. Esto es crucial para la eficiencia del sistema, asegurando que el PV funcione en su punto óptimo bajo diversas condiciones de irradiancia y temperatura.

Este enfoque, aunque simple, es efectivo y ampliamente utilizado en sistemas fotovoltaicos debido a su facilidad de implementación y adaptabilidad a diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

4.8 SEÑAL DE REFERENCIA

En la Figura se observa un bloque de "Señales de Referencia" que se diseñó para simular diferentes condiciones de irradiancia y proporcionar referencias de corriente y potencia al sistema FV. A continuación, se explica cada componente y cómo funciona en el contexto de un sistema FV.

Este conjunto de señales y referencias es clave para probar y validar el error relativo del sistema FV bajo diferentes condiciones de operación meteorológicas simuladas.

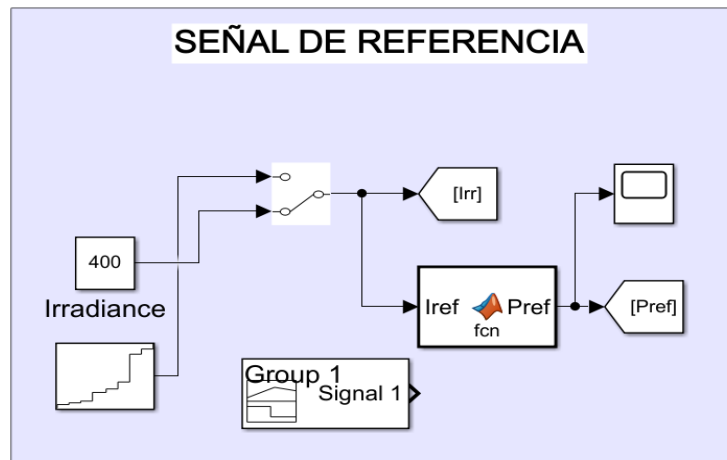


Figura 4.17 Modelo de señal de referencia en Simulink.

Señales de Irradiancia:

- Generadores de Señal (en la izquierda): Estos bloques generan diferentes perfiles de irradiancia (simulación de cómo varía la luz solar a lo largo del tiempo). Estos perfiles pueden ser constantes, escalonados, o tener otra forma para simular cond
- Señal escalonada (arriba): Representa un cambio brusco en la irradiancia, simulando un cambio rápido en las condiciones de iluminación.
- Señal de rampa o subida escalonada (abajo): Representa un aumento progresivo en la irradiancia, simulando el amanecer o un aumento gradual de la luz solar.
- Bloque 400 (Irradiancia): Este valor puede representar una irradiancia constante (400 W/m²) o un punto de referencia base sobre el cual se aplican los cambios de las otras señales.

Selector de Señal:

- Bloque de Conmutación: Este bloque permite seleccionar entre diferentes perfiles de irradiancia. En función de la configuración, el sistema puede simular diferentes escenarios de irradiancia solar. Esta señal seleccionada se convierte en la irradiancia efectiva ([Irr]) que afecta al PV en el modelo.

Función de Referencia (Iref y Pref):

- Bloque Función (fcn): Este bloque toma la irradiancia seleccionada y genera las señales de referencia de corriente (Iref) y potencia (Pref). Estas referencias son utilizadas para evaluar y comparar el error relativo del sistema FV.
- Iref: Es la corriente de referencia que el sistema debería generar bajo la irradiancia dada.
- Pref: Es la potencia de referencia, calculada probablemente usando la razón entre la irradiancia y la potencia máxima que el PV genera en esas condiciones.

Bloques de Salida (Pref):

- Estas salidas son monitoreadas y utilizadas para analizar el error relativo del sistema. El valor de potencia de referencia ([Pref]) puede compararse con la potencia real generada por el sistema para determinar si el MPPT y otros componentes están funcionando correctamente.

4.8.1 Funcionamiento General

Este bloque de "Señales de Referencia" simula diferentes condiciones de irradiancia y genera las señales de referencia correspondientes para corriente y potencia. Esto es crucial para evaluar cómo responde el sistema FV bajo diferentes condiciones de luz solar. Las señales de referencia permiten al sistema de control (como el MPPT) saber qué debería estar ocurriendo en un escenario ideal y comparar el error relativo para hacer los ajustes necesarios.

En la Tabla 10 se muestra la descripción del código usado para la entrada y salida del valor de referencia.

4.9 ESCENARIOS DE OPERACIÓN DE LA IRRADIANCIA FRENTE A CONDICIONES METEOROLÓGICAS.

Lluvia fuerte (100 W/m²)

En condiciones de lluvia fuerte, la cobertura de nubes es densa y bloquea una gran parte de la radiación solar directa, resultando en valores de irradiación muy bajos. Los estudios sobre la influencia de la nubosidad en la radiación solar muestran que la irradiancia global horizontal puede reducirse significativamente bajo condiciones de nubosidad intensa y precipitación, a niveles tan bajos como 100 W/m² [42].

Lluvia normal (200 W/m²)

Durante lluvia normal, aunque sigue habiendo una significativa cobertura nubosa, la densidad no es tan alta como en la lluvia fuerte, permitiendo una mayor penetración de la luz solar. Esto se traduce en niveles de radiación superiores, aproximadamente en el rango de 200 W/m², que es consistente con estudios que indican cómo la radiación puede variar bajo diferentes niveles de nubosidad [42].

Lluvia leve (300 W/m²)

En situaciones de lluvia leve, la nubosidad sigue presente, pero la radiación solar recibida es mayor, típicamente alrededor de 300 W/m². Este valor puede ser respaldado por mediciones en estudios de campo que miden la radiación en condiciones de precipitación moderada [42].

Llovizna (400 W/m²)

En condiciones de llovizna, donde la cobertura nubosa es aún más dispersa, se permite que más radiación solar llegue a la superficie, con valores que suelen estar alrededor de los 400 W/m² [42].

Muy Nublado (500 W/m²)

En días muy nublados, aunque el cielo está cubierto, no hay precipitación significativa, y la radiación solar puede ser alrededor de 500 W/m². Estudios de climatología y radiación solar muestran que bajo condiciones de cielo completamente cubierto, pero sin precipitación, estos son valores típicos [42].

Poco Nublado (600 W/m²)

Cuando el cielo está parcialmente nublado, admite una mayor cantidad de radiación solar directa alcance la superficie, resultando en valores cercanos a 600 W/m². Esto se encuentra en la línea de estudios que indican cómo la nubosidad parcial afecta la irradiancia [42].

Nublado (700 W/m²)

En días nublados donde las nubes no son tan densas, la radiación solar puede alcanzar valores de aproximadamente 700 W/m², lo cual es consistente con observaciones en estudios sobre la influencia de la nubosidad dispersa [42].

Soleado Bajo (800 W/m²)

En días soleados con baja intensidad, típicamente se pueden esperar valores de irradiancia de alrededor de 800 W/m², que son característicos de condiciones de cielo claro pero con cierto grado de dispersión [43].

Soleado Medio (900 W/m²)

Bajo condiciones de sol medio, la radiación solar directa es predominante, alcanzando valores cercanos a los 900 W/m². Este nivel es comúnmente registrado en días claros con alta irradiancia solar [43].

Soleado Alto (1000 W/m²)

En condiciones de sol pleno y sin nubes, la irradiancia solar puede llegar hasta 1000 W/m² o más, especialmente en áreas con alta incidencia solar directa, lo cual es respaldado por numerosos estudios climáticos y solares (MDPI) [43].

4.9.1 Simulación de las Condiciones de Operación

Condiciones de Radiación y Condiciones meteorológicas:

- Simular diferentes escenarios de radiación solar tomando en cuenta los escenarios de operación como ilustra la Tabla 11.

Tabla 11 Escenario de operación para evaluar los controladores.

RADIACIÓN PROMEDIO:	ESCENARIO REPRESENTADO:
100 [W/M ²]	Lluvia fuerte
200 [W/M ²]	Lluvia normal
300 [W/M ²]	Lluvia Leve
400 [W/M ²]	Llovizna
500 [W/M ²]	Muy Nublado
600 [W/M ²]	Poco Nublado
700 [W/M ²]	Nublado
800 [W/M ²]	Soleado Bajo
900 [W/M ²]	Soleado Medio
1000 [W/M ²]	Soleado Alto

Evaluación del error relativo:

- Ejecutar las simulaciones para cada escenario y medir la potencia extraída, eficiencia, y estabilidad del sistema bajo cada controlador.
- Realizar múltiples simulaciones para capturar la variabilidad y obtener resultados estadísticamente significativos.

4.9.2 Detalles de los cálculos

Cálculo del Error Relativo de Captación de Energía

El error relativo de los controladores en los diferentes casos de estudio se calcula aplicando la ecuación (4.32).

$$n = \frac{P_{entrada} - P_{salida}}{P_{entrada}} * 100\% \quad (4.32)$$

Donde:

P_{salida} : Es la potencia extraída por controlador.

$P_{entrada}$: Es la potencia teórica de los PV en su punto de máxima radiación.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de los resultados de la Tabla 12 muestra que el controlador MPPT con PID adaptativo es consistentemente más preciso en el seguimiento del punto de máxima potencia, con un error relativo promedio muy bajo de 0.179% en un trabajo previo y 0.189% en la tesis.

Tabla 12 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.

TRABAJO PREVIO	TRABAJO AUTÓNOMO			
1000 [W/M ²]	1000 [W/m ²]			
ERROR RELATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT CON PID ADAPTATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT	Error Relativo Promedio del P&O	Error Relativo Promedio del PWM
0.179%	0.189%	1.20%	1.37%	4.26%

En comparación, otros controladores como el MPPT convencional y P&O tienen errores relativos más altos, de 1.20% y 1.37% respectivamente, lo que indica menor precisión. El controlador PWM presenta un error relativo significativamente mayor, de 4.26%, evidenciando una menor eficiencia en comparación con los métodos MPPT evaluados.

El análisis de los resultados obtenidos en la Tabla 13 a 800 W/m² muestra que el controlador MPPT con PID adaptativo sigue siendo el más preciso, con un error relativo promedio de 0.514% en el trabajo previo y 0.52% en la tesis.

Tabla 13 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.

TRABAJO PREVIO	TESIS			
800 [W/M ²]	800 [W/m ²]			
ERROR RELATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT CON PID ADAPTATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT	Error Relativo Promedio del P&O	Error Relativo Promedio del PWM
0.514%	0.52%	0.74%	1.06%	7.57%

En comparación, los controladores MPPT convencional y P&O tienen errores relativos de 0.74% y 1.06%, respectivamente, lo que indica una disminución en la precisión. El

controlador PWM muestra un error mucho mayor, de 7.57%, destacando su menor eficiencia en condiciones de menor irradiancia.

En las condiciones de la Tabla 14 la irradiancia de 600 W/m², el análisis muestra que el controlador MPPT con PID adaptativo mantiene su precisión con un error relativo promedio de 1.342% en el trabajo previo y 1.36% en la tesis.

Tabla 14 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.

TRABAJO PREVIO		TESIS			
600 [W/M²]		600 [W/m²]			
ERROR RELATIVO		Error Relativo Promedio del MPPT CON PID ADAPTATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT	Error Relativo Promedio del P&O	Error Relativo Promedio del PWM
1.342%		1.36%	1.50%	2.21%	10.44%

A medida que disminuye la irradiancia, los errores relativos de los controladores MPPT convencional y P&O aumentan a 1.50% y 2.21%, respectivamente, indicando menor eficiencia. El controlador PWM muestra un error relativo significativamente mayor de 10.44%, lo que resalta su baja precisión bajo estas condiciones.

En los resultados de la Tabla 15 las condiciones de irradiancia de 400 W/m², el error relativo promedio del controlador MPPT con PID adaptativo se incrementa ligeramente a 2.321% en el trabajo previo y 2.49% en la tesis, mostrando aún un rendimiento superior en comparación con otros controladores.

Tabla 15 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.

TRABAJO PREVIO		TESIS			
400 [W/M²]		400 [W/m²]			
ERROR RELATIVO		Error Relativo Promedio del MPPT CON PID ADAPTATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT	Error Relativo Promedio del P&O	Error Relativo Promedio del PWM
2.321%		2.49%	3.74%	4.25%	15.96%

El MPPT convencional y el P&O muestran errores más elevados, de 3.74% y 4.25% respectivamente, indicando una disminución en la precisión bajo baja irradiancia. El controlador PWM presenta un error relativo significativamente alto de 15.96%, lo que resalta su baja efectividad en condiciones de baja irradiancia.

En condiciones mostrados en la Tabla 16 la irradiancia de 200 W/m², los resultados muestran que el error relativo promedio del controlador MPPT con PID adaptativo es de 3.763% en el trabajo previo y 3.39% en la tesis, manteniéndose dentro de un rango aceptable.

Tabla 16 Comparativa de resultados entre referencia [21] y desarrollo autónomo.

TRABAJO PREVIO	TESIS			
200 [W/M²]	200 [W/m²]			
ERROR RELATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT CON PID ADAPTATIVO	Error Relativo Promedio del MPPT	Error Relativo Promedio del P&O	Error Relativo Promedio del PWM
3.763%	3.39%	3.67%	3.07%	15.76%

En contraste, el MPPT convencional presenta un error de 3.67%, y el P&O tiene un error más bajo de 3.07%, lo que indica un rendimiento más variable bajo baja irradiancia. El controlador PWM, por su parte, sigue mostrando un error elevado de 15.76%, confirmando su baja precisión en estas condiciones.

5.1.1 Discusión de resultados

El elevado o bajo nivel de error indica una baja o alta capacidad de seguimiento del punto de máxima potencia en condiciones de baja irradiancia o alta irradiancia, en la simulación se requiere esfuerzo computacional más elevado debido a la complejidad de su algoritmo adaptativo, que ajusta dinámicamente los parámetros para optimizar la eficiencia. Esto puede implicar un mayor costo en términos de hardware y procesamiento, especialmente en sistemas de gran escala. Mientras que el MPPT estándar, siendo menos complejo, demanda menos esfuerzo computacional, lo que podría traducirse en costos menores y una implementación más sencilla. Por otro lado, el P&O, aunque también relativamente simple en comparación con el PID Adaptativo, tiene un rendimiento menos consistente y puede requerir ajustes frecuentes para optimizar su desempeño, lo que puede agregar complejidad

a largo plazo, incurriendo en mayores costos en cuanto al mantenimiento. El PWM, a pesar de ser el controlador más simple y menos costoso de implementar, presenta serias deficiencias en su capacidad para maximizar el rendimiento, lo que podría ocasionar pérdidas de energía considerables y, por lo tanto, reducir la rentabilidad del sistema FV.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El controlador PWM mostró un error relativo considerablemente alto en todas las condiciones de irradiancia, especialmente en niveles bajos, donde alcanzó hasta un 15.96% de error. Esto indica que, aunque pueda ser adecuado para ciertas aplicaciones, no es la mejor opción para sistemas que requieren alta precisión en el seguimiento del punto de máxima potencia bajo variaciones de irradiancia.
- El controlador MPPT con PID adaptativo demostró ser el más eficiente en todas las condiciones de irradiancia, con errores relativos que van desde un mínimo de 0.189% a 1000 W/m² hasta un máximo de 3.39% a 200 W/m². Esta consistencia refleja su capacidad para mantener un rendimiento elevado incluso en condiciones de baja irradiancia.
- Los controladores MPPT convencional y P&O mostraron un aumento notable en el error relativo con la disminución de la irradiancia. El MPPT convencional pasó de 1.20% a 1000 W/m² a 3.67% a 200 W/m², mientras que el P&O pasó de 1.37% a 4.25% en las mismas condiciones, indicando una menor robustez en entornos con irradiancia baja.

6.2 RECOMENDACIONES

- Dado el elevado error relativo del controlador PWM, especialmente en baja irradiancia (15.96% a 400 W/m²), se recomienda evitar su uso en aplicaciones críticas que operan bajo condiciones de luz variable.
- Para aplicaciones que requieren alta precisión y robustez en el seguimiento del punto de máxima potencia, se recomienda utilizar el controlador MPPT con PID adaptativo, dado su bajo error relativo (0.189% a 1000 W/m² y 3.39% a 200 W/m²), lo que asegura un rendimiento eficiente en diversas condiciones de irradiancia.
- Para posteriores estudios es recomendable que se agregue un PID al controlador PWM con la finalidad de encontrar el punto de máxima potencia para controladores de este tipo y mejorar su calidad.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Sahoo, S. Samanta, and S. Bhattacharyya, “Adaptive PID Controller with P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System,” *IETE J. Res.*, vol. 66, no. 4, pp. 442–453, 2020, doi: 10.1080/03772063.2018.1497552.
- [2] G. S. Inca Yajamín, D. F. Cabrera Carrión, D. F. Villalta Gualán, R. C. Bautista Zurita, and H. D. Cabrera Carrion, “Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas,” *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 7, no. 3, pp. 9493–9509, 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i3.6835.
- [3] R. K. Jain, H. K. V. Gadiraju, V. R. Barry, and S. R. Parne, “High performance MPPT controller based on adaptive sliding mode control,” *2020 21st Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2020*, pp. 2–7, 2020, doi: 10.1109/NPSC49263.2020.9331826.
- [4] B. Subudhi and R. Pradhan, “A New Adaptive Maximum Power Point Controller for a Photovoltaic System,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1625–1632, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2865753.
- [5] E. A. Luna Paipa, M. Á. Laguado Serrano, and S. B. Sepúlveda Mora, “Controlador de carga PWM eficiente y de bajo costo para sistemas fotovoltaicos autónomos,” *Respuestas*, vol. 23, no. S1, pp. 6–13, 2018, doi: 10.22463/0122820x.1491.
- [6] Y. Wu, J. Li, and C. Li, “Study of the improved INC MPPT algorithm for PV systems,” *2017 3rd IEEE Int. Conf. Control Sci. Syst. Eng. ICCSSE 2017*, vol. 1, no. 2, pp. 412–415, 2017, doi: 10.1109/CCSSE.2017.8087969.
- [7] C. A. Estrada Gasca, “Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia,” *Rev. Mex. Física*, vol. 59, no. 2, pp. 75–84, 2013, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57030971010>
- [8] A. Escobar Mejia, C. Torres, and A. Hincapie Isaza, “Conexión De Un Sistema Fotovoltaico a La Red Eléctrica,” *Sci. Tech. Año XVI*, vol. 44, pp. 31–36, 2010.
- [9] L. . Ruiz, J. J. Beristáin, I. . Sosa, and J. L. Hernandez, “Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar Study of the maximum power point tracking algorithm perturb and observe,” *Rev. Ing. eléctrica, electrónica y Comput.*, vol. 8, no. 1, p. 7, 2010, [Online]. Available: https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_seguimiento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf
- [10] C. Juan and S. Adriana, “Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,” p. 11, 2017.
- [11] W. Hidalgo, P. Vaquez, G. Garrillo, and F. Vasquez, “Energías Renovables,” *Energías Renovables*. p. 121, 2021. [Online]. Available: <http://libros.cienciadigital.org/index.php/CienciaDigitalEditorial/catalog/view/7/24/84-3>

- [12] M. Rivki, A. M. Bachtiar, T. Informatika, F. Teknik, and U. K. Indonesia, “A matheuristic algorithm for the three- dimensional loading capacitated vehicle routing problem (3L-CVRP),” vol. 78, no. 159, 2016, doi: 10.17533/udea.redin.n78a02.
- [13] R. Herrera Salcedo, “Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos,” p. 84, 2013.
- [14] X. Zheng and M. Chen, “Research on MPPT of photovoltaic generation based on fuzzy pid control,” *Proc. Int. Conf. Anti-Counterfeiting, Secur. Identification, ASID*, vol. 2018-Novem, pp. 93–97, 2018, doi: 10.1109/ICASID.2018.8693106.
- [15] C. A. Ramos-Paja, A. J. Saavedra-Montes, and J. D. Bastidas-Rodríguez, “Cargador de baterías fotovoltaico con control por modos deslizantes y limitación de la derivada de corriente de carga,” *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 42, pp. 129–145, 2018, doi: 10.22430/22565337.784.
- [16] R. A. REITER, R. D. O. REITER, and A. PÉRES, “Controlador De Carga De Acuerdo Com a Portaria 396 Do Inmetro,” *Semin. Eletrônica Potência e Control.*, no. August 2014, p. 94, 2014, doi: 10.13140/RG.2.1.3871.0882.
- [17] L. Jaime, “DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE CARGA MPPT PARA SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS DE LA RED ELÉCTRICA,” vol. 14, no. 1, p. 84, 2021.
- [18] P. A. Caceres Samaniego, “Diseño De Un Regulador De Carga P.W.M Para Instalaciones Fotovoltaicas,” *Proy. Grado*, pp. 12–20, 2018, [Online]. Available: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18773>
- [19] X. Parrales and J. Ortega, “ANÁLISIS DE COSTOS ENERGETICOS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO, COMPARANDO REGULADORES MPPT Y PWM PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ENERGIA,” *γ787*, no. 8.5.2017, pp. 2003–2005, 2022, [Online]. Available: <https://dataindonesia.id/sector-riil/detail/angka-konsumsi-ikan-ri-naik-jadi-5648-kgkapita-pada-2022>
- [20] P. A. Ortiz Valencia, “Metodologías de diseño conjunto y controladores y algoritmos MPPT para sistemas fotovoltaicos,” *Univ. Nac. Colomb.*, p. 138, 2017.
- [21] G. L. D. Javier, “Diseño y simulación de un controlador MPPT basado en un PID adaptativo por ganancias programadas para el seguimiento del punto de máxima potencia en una central fotovoltaica que tienen como carga una batería,” *Repos. Uta*, p. 67, 2024, [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6265>
- [22] C. A. Robles Algarín, J. P. Vilorio Porto, and D. A. Restrepo Leal, “Control neuronal y difuso para sistemas fotovoltaicos,” *Control neuronal y difuso para sistemas fotovoltaicos*. 2022. doi: 10.21676/9789587465532.
- [23] O. Perpiñán, “Energía Solar Fotovoltaica,” no. January 2011, 2013.
- [24] W. A. Alarcon Vanegas and S. Sánchez Jaimes, “Características de baterías para instalaciones de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas rurales del departamento de Santander Colombia.” pp. 31–34, 2021. [Online]. Available: http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/8311/FDC_125

WA-SS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [25] R. Energía, “Batería de ciclo profundo RITAR DC12100 12V100AH.” Accessed: Jul. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.renova-energia.com/productos/baterias_ritar_ra12100d_12v100ah-2/#:~:text=Las baterías que se utilizan,ser libre%2C gel o AGM.
- [26] H. Cornejo, “Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el centro materno Infantil de la universidad de Piura,” p. 114, 2013.
- [27] L. Hassaine, “Implementación de un control digital de potencia activa y reactiva para inversores,” 2010, [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10230#preview>
- [28] J. C. Schallenberg *et al.*, *Energías renovables y eficiencia energética*. 2008.
- [29] L. Peña, “Diferencia entre radiación, irradiancia e irradiación solar.” [Online]. Available: <https://ilumin.online/diferencias-entre-radiacion-irradiancia-e-irradiacion-solar/>
- [30] Q. A. S. Module, “Q.plus 1-g4.2 340-350,” 2015.
- [31] M. L. O. Gabriela Delgado, “ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL DIARIA EN EL CANTÓN CUENCA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO BRISTOW & CAMPBELL,” *Clin. Immunol.*, p. 94, 2015, doi: 10.1016/j.clim.2018.03.003.
- [32] CONELEC, “Atlas solar del Ecuador,” *Conelec*, pp. 1–51, 2008, [Online]. Available: http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf
- [33] L. Suintaxi, *Caracterización energética del sistema de Hidroconversión de la luz solar para aplicaciones de media temperatura utilizando una lente de forma parabólica*. Sangolquí, 2014.
- [34] P. Stackhouse, “Nasa Power.” Accessed: Jul. 25, 2021. [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [35] Jinko Solar, “Datasheet Cheetah HC 60M,” p. 2, 2020.
- [36] A. G. Vera-Dávila, J. C. Delgado-Ariza, and S. B. Sepúlveda-Mora, “Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab,” *Rev. Investig. Desarro. e Innovación*, vol. 8, no. 2, pp. 343–356, 2018, doi: 10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972.
- [37] A. Esteban, C. Medina, and I. Electronico, “Emulación de un sistema solar fotovoltaico en un dispositivo de ejecución en tiempo real de bajo costo mediante ‘Hardware un the Loop,’” 2018.
- [38] B. Kuo, “Criterio de Estabilidad de Nyquist,” *Sistemas de Control Automático*. pp. 557-567., 1996.
- [39] F. A. Mohammed, M. E. Bahgat, S. S. Elmasry, and S. M. Sharaf, “Design of a maximum power point tracking-based PID controller for DC converter of stand-

alone PV system,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 9, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s43067-022-00050-5.

- [40] F. Sedaghati, A. Nahavandi, M. A. Badamchizadeh, S. Ghaemi, and M. Abedinpour Fallah, “PV maximum power-point tracking by using artificial neural network,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/506709.
- [41] F. Ferrari and F. Ruggeri, “Diseño y construcción de una microrred de cc,” p. 110, 2022.
- [42] E. Muñoz and A. Ochoa, “Características climáticas sobre los índices diarios de claridad y nubosidad,” vol. 18, pp. 573–584, 2021, doi: doi.org/10.5194/bg-18-573-2021.
- [43] I. Fountoulakis *et al.*, “Effects of aerosols and clouds on the levels of surface solar radiation and solar energy in cyprus,” *Remote Sens.*, vol. 13, no. 12, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/rs13122319.

8 ANEXOS

www.jinkosolar.com

Jinko Solar
Building Your Trust in Solar

Cheetah HC 60M

325-345 Watt

MONO PERC HALF CELL MODULE


Positive power tolerance of 0~+3%

- Half Cell
- Mono PERC 60 Cell









PERC





KEY FEATURES

- 
5 Busbar Solar Cell
 5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.
- 
High Efficiency
 Higher module conversion efficiency (up to 20.45%) benefit from half cell structure (low resistance characteristic).
- 
PID Resistance
 Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.
- 
Low-light Performance
 Advanced glass and cell surface textured design ensure excellent performance in low-light environment.
- 
Severe Weather Resilience
 Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).
- 
Durability Against Extreme Environmental Conditions
 High salt mist and ammonia resistance certified by TÜV NORD.

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

12 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty







- ISO9001:2015, ISO14001:2015, ISO45001:2018 certified factory
- IEC61215, IEC61730, UL1703 certified product

Nomenclature:
JKMxxxM-60/72H-V

Code	Cell	Code	Certification
xx	Full	xx	1000V
H	Half	V	1500V



Legend: ■ Linear performance warranty, ■ Standard performance warranty.

