

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Desarrollo de plataforma para el estudio de sistemas fotovoltaicos aislados con
simulación en tiempo real

INGE-2627

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Borja Jurado Valeria Janneth

Jácome Palacios Janina Cecibell

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedicamos a Dios, por ser nuestra fortaleza, a nuestros padres por guiarnos, aconsejarnos y apoyarnos durante todo nuestro camino académico, a nuestra familia y amigos, por siempre estar presente y ser nuestro apoyo en todo momento.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a nuestros profesores y tutores de la ESPOL, en especial al PhD. Sixifo Daniel Falcones Zambrano, por su invaluable guía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto. A mis compañeros de investigación, por su colaboración y respaldo constante. A mi familia, por ser mi pilar fundamental y brindarme su apoyo incondicional durante toda mi formación académica. Y a todos quienes de alguna manera contribuyeron a la culminación exitosa de este trabajo.

Declaración Expresa

Nosotras Valeria Janneth Borja Jurado y Janina Cecibell Jácome Palacios acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 11 de octubre del 2024.



Jácome Palacios Janina
Cecibell



Borja Jurado Valeria
Janneth

Evaluadores

**Ing. Patricia Isabel Pasmay
Bohórquez**

Profesora de Materia

**MSc. Sixifo Daniel Falcones
Zambrano**

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto desarrolla una plataforma de simulación en tiempo real para el estudio de sistemas de generación fotovoltaica desconectados de la red, abordando la necesidad de herramientas avanzadas para la investigación y formación en energías renovables. La plataforma integra hardware con algoritmos de control simulados en tiempo real, permitiendo la validación de estrategias de optimización MPPT, conversión DC-DC e inversión DC-AC en entornos aislados. Se implementó un sistema que combina simulación en tiempo real con power-hardware-in-the-loop (PHIL), utilizando RT-LAB, Simulink y PLECS para modelar convertidores DC-DC e inversores DC-AC trifásicos, se desarrollaron algoritmos de control de voltaje y seguimiento del punto de máxima potencia. Los resultados mostraron una mejora significativa en la precisión de las simulaciones y en la capacidad de evaluar el rendimiento de hardware fotovoltaico real. Se concluye que la plataforma proporciona una herramienta esencial para la formación especializada y la investigación avanzada en sistemas fotovoltaicos desconectados, contribuyendo al desarrollo académico y tecnológico en el campo de las energías renovables.

Palabras Clave: Simulación en tiempo real, sistemas fotovoltaicos, PHIL, energía renovable.

Abstract

This project develops a real-time simulation platform for the study of off-grid photovoltaic generation systems, addressing the need for advanced tools for research and training in renewable energy. The platform integrates hardware with simulated real-time control algorithms, allowing the validation of MPPT optimization strategies, DC-DC conversion and DC-AC inversion in isolated environments. A system combining real-time simulation with power-hardware-in-the-loop (PHIL) was implemented, using RT-LAB, Simulink and PLECS to model three-phase DC-DC converters and DC-AC inverters, voltage control and maximum power point tracking algorithms were developed. The results showed a significant improvement in the accuracy of the simulations and in the ability to evaluate the performance of real photovoltaic hardware. It is concluded that the platform provides an essential tool for specialized training and advanced research in off-grid photovoltaic systems, contributing to academic and technological development in the field of renewable energy.

Keywords: *Real-time simulation, photovoltaic systems, PHIL, renewable energy.*

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema.....	2
1.3 Justificación del Problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Marco teórico.....	5
Capítulo 2	12
2.1 Metodología.....	13
2.2 Fase 1: Análisis e Integración.....	14
2.3 Fase 2: Simulaciones Offline.....	16
2.4 Fase 3: Implementación MIL	29
2.5 Fase 4: Implementación del HIL	30
2.6 Fase 5: Validación y documentación.....	31
Capítulo 3	32
3. Resultados y análisis	33
3.1 Implementación del Sistema HIL	33
3.2 Resultados del Convertidor DC-DC	34

3.3	Resultados del Control MPPT	35
3.4	Resultados del Inversor Trifásico	41
3.5	Simulación en tiempo real del sistema completo	48
3.6	Integración del Panel Fotovoltaico Real.....	49
3.7	Análisis de costos para materiales y mano de obra	53
Capítulo 4		55
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	56
4.2	Recomendaciones	57
Referencias		59

Abreviaturas

AC: Alternating Current (Corriente Alterna)

DC: Direct Current (Corriente Continua)

ESPOL: Escuela Superior Politécnica del Litoral

FIEC: Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

FPGA: Field-Programmable Gate Array (Arreglo de Compuertas Programables en Campo)

HMI: Human-Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina)

MPPT: Maximum Power Point Tracking (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia)

PCB: Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso)

PHIL: Power Hardware-in-the-Loop (Hardware de potencia en el circuito)

PWM: Pulse-Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulso)

RT-LAB: Real-Time Laboratory (Laboratorio en Tiempo Real)

MIL: Model in the loop (modelo en el bucle)

Simbología

V	Voltios
A	Amperios
P	Potencia
W	Watts
R	Resistencia
L	Inductancia
C	Capacitancia
I	Corriente de salida del panel
V	Voltaje en terminales del panel
I_{ph}	Fotocorriente generada por la luz solar
I_s	Corriente de saturación inversa del diodo
R_s	Resistencia serie
R_{sh}	Resistencia paralelo
n	Factor de idealidad del diodo
V_t	Voltaje térmico
Ω	Ohms
d	ciclo de trabajo (duty cycle)
n	número de armónico
ω_s	frecuencia angular de conmutación
t	tiempo
M	índice de modulación
A_m	Señal moduladora
A_c	Señal portadora

V_o	Voltaje de salida
V_i	Voltaje de entrada
D	Ciclo de trabajo ($0 < D < 1$)
I_L	Corriente promedio del inductor
I_o	Corriente de salida
V_{LL}	Voltaje línea a línea
V_{LN}	Voltaje línea a neutro
V_{DC}	Voltaje del bus DC
I_L	Corriente de línea
$\cos(\varphi)$	Factor de potencia
$v_{abc}(t)$	Señales moduladoras para cada fase
V_m	Amplitud de la señal moduladora
V_c	Amplitud de la señal portadora triangular
ω	Frecuencia angular fundamental

Índice de figuras

Figura 2. 1 Esquema metodológico detallado por pasos.	13
Figura 2. 2 Diagrama esquemático del sistema PV.	14
Figura 2. 3 Modelo de simulación del bloque PWM en PLECS.	16
Figura 2. 4 Modelo de simulación del bloque convertidor Boost DC-DC en PLECS.	17
Figura 2. 5 Diagrama en PLECS del convertidor DC-DC.	19
Figura 2. 6 Grafica de resultados con respecto al panel foto voltaico y batería.	19
Figura 2. 7 Señal resultante ampliada.	20
Figura 2. 8 Modelo simplificado en Simulink del convertidor DC-DC.	20
Figura 2. 9 Modelo de simulación del bloque PWM del modelo inversor.	21
Figura 2. 10 Modelo de simulación de Bloque inversor.	22
Figura 2. 11 Diagrama en PLECS del inversor DC-AC.	24
Figura 2. 12 Oscilografia del inversor DC-AC.	24
Figura 2. 13 Modelo simplificado en Simulink del inversor DC-DC.	25
Figura 2. 14 Modelo de simulación de bloque señales sinusoidales.	25
Figura 2. 15 Forma de onda de la señal Sin_Cos generada en PLECS.	26
Figura 2. 16 Herramienta RT-LAB.	29
Figura 2. 17 Diagrama de integración hardware y validación del sistema HIL.	30
Figura 3. 1 Arquitectura completo del sistema.	33
Figura 3. 2 Consola DC-DC BOOST en tiempo real.	34
Figura 3. 3 Diagrama de control en cascada del convertidor Boost.	35
Figura 3. 4 Diagrama del Algoritmo MPPT etapa HMI.	36
Figura 3. 5 Diagrama del Algoritmo MPPT etapa proceso.	36
Figura 3. 6 Valores de irradiancia, temperatura, corriente y voltaje del panel.	38
Figura 3. 7 Comportamiento dinámico del sistema con mediciones del panel fotovoltaico (vPV), corriente del inductor (iL) y corriente del panel (iPV).	38
Figura 3. 8 Diagrama de bloques de MPPT.	39
Figura 3. 9 Resultados experimentales de la implementación del algoritmo MPPT: respuesta de voltaje, corriente y señales de control.	40
Figura 3. 10 Validación del seguimiento del punto de máxima potencia: comportamiento de las variables de control.	40

Figura 3. 11 Diagrama de HMI del inversor trifásico.	41
Figura 3. 12 Diagrama Proceso del inversor trifásico.	42
Figura 3. 13 Grafica de resultados de v_o , i_o y Potencia PQ	43
Figura 3. 14 Grafica de resultados de v_o , valores dq y i_L	43
Figura 3. 15 Grafica de resultados de v_o , v_{conv} , m y i_{DC}	44
Figura 3. 16 Diagrama del control de corriente del inversor.	45
Figura 3. 17 Bloque de perturbación de corriente.	46
Figura 3. 18 Diagrama del control de voltaje.	46
Figura 3. 19 Bloque de perturbación de corriente.	47
Figura 3. 20 Respuesta del sistema ante perturbaciones: comportamiento dinámico del voltaje (v_{PV}), corriente del panel (i_{PV}) y corriente de batería (i_{Bat}).	47
Figura 3. 21 Comportamiento en estado estable del sistema: voltaje del panel (v_{PV}), corriente del inductor (i_L) y corriente del panel fotovoltaico (i_{PV}).	48
Figura 3. 22 Modelo completo del sistema fotovoltaico aislado implementado en simulación: panel fotovoltaico, convertidor boost, inversor trifásico y carga.	49
Figura 3. 23 Paneles fotovoltaicos SA-50 conectados en serie durante pruebas solares.	49
Figura 3. 24 Setup experimental con simulador OPAL-RT, Amplificador AMETEK y equipos de medición.	50
Figura 3. 25 Medición de corriente DC del panel fotovoltaico en operación normal.	51
Figura 3. 26 Prueba de confiabilidad mediante sombreado temporal de paneles.	51

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Parámetros nominales del panel fotovoltaico SOLAR JIANBAO modelo SA-50.	15
Tabla 2. 2 Parámetros de simulación del Convertidor Boost DC-DC.	27
Tabla 2. 3 Parámetros de simulación del Inversor AC-DC.	28
Tabla 3. 1 Análisis de costos para materiales y mano de obra.	53

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El creciente interés en energías renovables ha impulsado el desarrollo de sistemas fotovoltaicos desconectados, presentando desafíos únicos en diseño, optimización y control que requieren una gestión eficiente sin una red estable, por otra parte, los factores como variabilidad solar, optimización MPPT e integración de convertidores demandan análisis precisos que las simulaciones convencionales no logran capturar adecuadamente, afectando así la investigación y formación en el campo.

Reconociendo esta necesidad, la ESPOL propone una plataforma educativa basado en simulación en tiempo real con Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) aprovechando los recursos del simulador en tiempo real, utilizando software especializado como MATLAB para validar algoritmos y a su vez estudiar la interacción con el hardware mediante el RT-LAB, ofreciendo a estudiantes e investigadores un medio para optimizar el estudio de sistemas fotovoltaicos. Con este proyecto se busca mejorar significativamente la formación en energías renovables, proporcionando una solución integral a los desafíos actuales en energía solar fotovoltaica y fortaleciendo la capacidad de innovación en este campo.

1.2 Descripción del Problema

La falta de una plataforma avanzada en ESPOL para estudiar sistemas fotovoltaicos está limitando la investigación y la formación en electrónica de potencia para los estudiantes de energías renovables, siendo la optimización MPPT, la conversión DC-DC y la inversión DC-AC en entornos aislados desafíos específicos que esta clase de estudio presenta, debido a que no se capturan adecuadamente con simulaciones convencionales, lo que afecta la precisión de los resultados.

Las simulaciones tradicionales no logran representar con suficiente fidelidad las dinámicas complejas y las interacciones en tiempo real de los sistemas fotovoltaicos autónomos, lo cual crea una brecha significativa entre la teoría aprendida en el aula y las aplicaciones prácticas en el mundo real, afectando la calidad de la formación de los futuros ingenieros eléctricos.

Además, la falta de una herramienta que permita la interacción con hardware limita la capacidad de los estudiantes e investigadores para validar sus diseños y algoritmos de control en condiciones cercanas a la realidad, lo que puede llevar a diseños poco óptimos o no confiables cuando se implementan en sistemas reales.

Esta situación resalta la necesidad urgente de desarrollar una plataforma de simulación avanzada que combine la simulación en tiempo real con la capacidad de integrar equipos físicos, permitiendo así un estudio más preciso y realista de los sistemas fotovoltaicos desconectados de la red.

1.3 Justificación del Problema

La implementación de una plataforma de simulación en tiempo real con Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) es una solución efectiva para abordar las necesidades de investigación y formación en sistemas fotovoltaicos en ESPOL, este enfoque innovador permite validar algoritmos de control y optimización de manera segura, reduciendo el riesgo de fallos durante la implementación práctica y garantizando un diseño robusto y confiable, siendo esto fundamental para formar ingenieros capacitados en energías renovables, un sector clave para la reducción de emisiones de carbono y la mejora del bienestar ambiental.

La plataforma propuesta aborda los desafíos únicos de los sistemas fotovoltaicos autónomos, como la optimización del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y la conversión DC-DC y DC-AC, utilizando los recursos para simulación en tiempo real e integra software especializado como RT-LAB, Simulink y PLECS, esto proporciona un nivel de fidelidad

superior a las simulaciones convencionales, permitiendo a estudiantes e investigadores explorar las complejas dinámicas e interacciones de estos sistemas.

La incorporación de hardware en el bucle de simulación PHIL ofrece una dimensión práctica crucial, permitiendo a los usuarios interactuar con componentes físicos, como paneles solares, OPAL y amplificadores, en un entorno controlado, con esto no solo se mejora la comprensión teórica, sino que también desarrolla habilidades prácticas esenciales para el diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos, esta solución se logra alinear con las tendencias globales hacia la energía limpia y sostenible, contribuyendo a mejorar el acceso a la energía en zonas remotas y a reducir la dependencia de combustibles fósiles.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Desarrollar una plataforma para el estudio de sistemas de generación fotovoltaicos off-grid utilizando simulación en tiempo real con la técnica power-hardware-in-the-loop (PHIL), con el fin de proporcionar un entorno de aprendizaje práctico que permita analizar el comportamiento de estos sistemas en condiciones reales.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Desarrollar un modelo de simulación en tiempo real de un convertidor DC-DC PWM con un panel fotovoltaico como fuente y un banco de baterías como carga utilizando RT-LAB y Simulink.
2. Desarrollar el modelo de simulación en tiempo real de un inversor PWM trifásico desconectado de la red.

3. Desarrollar el control del voltaje en los terminales del panel fotovoltaico siguiendo la referencia de un algoritmo de Maximum Power Point Tracking (MPPT) utilizando Matlab, Simulink y PLECS.
4. Integrar el módulo de medición OP8660 para la lectura de la corriente del panel fotovoltaico.
5. Incorporar el panel fotovoltaico físico a la simulación en tiempo real a través del módulo de medición de corriente y el amplificador de potencia Ametek RS90.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos son instalaciones que constan de elementos como paneles solares, convertidores (DC-DC y DC-AC), etc. que sirven para convertir la energía solar en electricidad basándose en el efecto fotovoltaico, un proceso en el que ciertos materiales semiconductores generan corriente eléctrica cuando son expuestos a la luz solar.

a) Tipos de sistemas fotovoltaicos:

Los sistemas fotovoltaicos se dividen en 3 tipos, detallados a continuación:

- **Sistemas desconectados de la red (off-grid):** Son sistemas autónomos, requieren baterías para el almacenamiento de la energía, por lo general, son usados en lugares remotos o donde no hay acceso a la red de energía eléctrica.
- **Sistemas conectados a la red (on-grid):** Estos sistemas están conectados a la red eléctrica del país lo cual permite vender el excedente de energía generada, no es obligatorio el uso de baterías para reserva.
- **Sistemas híbridos:** Son sistemas que combinan características de los dos tipos mencionados anteriormente, utilizando tanto la conexión a la red como el almacenamiento en baterías [1].

1.5.2 Sistemas fotovoltaicos desconectados de la red (off-grid)

Los sistemas fotovoltaicos desconectados de la red o también conocidos como sistemas off-grid son sistemas autónomos diseñados para generar y almacenar energía eléctrica sin depender de la red eléctrica pública, siendo sistemas ideales para áreas remotas, en lugares donde la conexión a la red es costosa o no está disponible.

b) Componentes principales de un sistema off-grid:

- Paneles solares: Capturan la energía solar para convertirla en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.
- Convertidor: Optimiza la producción de energía ajustando la relación entre corriente y voltaje, mejorando así la eficiencia del sistema.
- Inversor: Convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), la cual es utilizada por la mayoría de los electrodomésticos.
- Baterías: Almacenan la energía generada para su uso en momentos sin luz solar, por ejemplo, durante la noche o en días nublados.
- Controlador de carga: Regula la energía que fluye de los paneles a las baterías, evitando sobrecargas y prolongando su vida útil.
- Cargas eléctricas: Dispositivos o electrodomésticos que utilizan la electricidad generada por el sistema [2].

1.5.3 Paneles solares

Los paneles solares son dispositivos diseñados para convertir la energía proveniente del sol en electricidad, utilizando el efecto fotovoltaico, esta tecnología se basa en el principio de que ciertos materiales, como el silicio, pueden generar una corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar.

c) Tipos de Paneles Solares

- Paneles fotovoltaicos (PV): Son los más comunes y convierten la luz solar en electricidad a través de celdas fotovoltaicas. Se dividen en:
 - Monocristalinos: Son fabricados con una única estructura cristalina de silicio, ofrecen una alta eficiencia y son más costosos debido a su complejo proceso de fabricación.
 - Policristalinos: Están compuestos por múltiples cristales de silicio, son menos eficientes, pero más económicos.
- Paneles de película delgada: Utilizan materiales como el cadmio y el telurio, son flexibles y ligeros, aunque su eficiencia es inferior a la de los paneles cristalinos.
- Paneles térmicos: Aprovechan la radiación solar para calentar agua o aire, siendo ideales para aplicaciones domésticas e industriales.
- Paneles híbridos: Combinan tecnologías fotovoltaicas y térmicas, generando simultáneamente electricidad y calor. [3]

1.5.4 Convertidores DC-DC off grid

Los convertidores DC-DC off grid son componentes fundamentales en los sistemas fotovoltaicos aislados, ya que adaptan los niveles de tensión entre los paneles solares y las cargas o sistemas de almacenamiento, utilizando técnicas de conmutación de alta frecuencia para lograr una conversión eficiente de energía que optimiza el rendimiento del sistema fotovoltaico [4].

La selección adecuada del convertidor resulta esencial para maximizar la eficiencia energética global del sistema y garantizar un funcionamiento óptimo en diferentes condiciones de operación.

- **Convertidor Boost**

El convertidor Boost, también conocido como elevador, es ampliamente utilizado en aplicaciones fotovoltaicas off-grid por su capacidad de producir un voltaje de salida mayor que el voltaje de entrada mediante la conmutación controlada de un transistor que, junto con un inductor, un diodo y un capacitor, permite almacenar y transferir energía eficientemente [5].

1.5.5 Inversores DC-AC off grid

Los inversores DC-AC para sistemas fotovoltaicos off-grid son dispositivos electrónicos que convierten la corriente continua generada por los paneles solares y almacenada en las baterías en corriente alterna para alimentar cargas convencionales, donde la topología más común en aplicaciones aisladas es el inversor trifásico con modulación PWM [4]. Estos dispositivos deben mantener una tensión y frecuencia estables en sus terminales de salida independientemente de las variaciones en la carga o en la fuente de energía, incorporando sistemas de control que regulan tanto la amplitud como la frecuencia de la tensión de salida mediante técnicas avanzadas de modulación y filtrado [5]. Los inversores off-grid también incluyen funciones de protección contra sobrecarga, cortocircuito y bajo voltaje de batería, así como la capacidad de operar en modo isla para garantizar un suministro continuo y confiable de energía.

1.5.6 Algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT)

El MPPT es una técnica utilizada en sistemas fotovoltaicos para maximizar la potencia generada por los paneles solares, ajustando el voltaje de operación según las condiciones de irradiancia y temperatura.

Existen varios tipos de algoritmos MPPT:

- Perturb and Observe (P&O)
- Conductancia Incremental (IC)

- Métodos basados en inteligencia artificial

El algoritmo mayormente usado es Perturb and Observe (P&O) el cual ajusta periódicamente el voltaje de un panel solar y observa cambios en la potencia; si la potencia aumenta, continúa en la misma dirección; si disminuye, cambia de dirección, Aunque es eficiente y fácil de implementar, presenta oscilaciones en el punto de máxima potencia (PMP) y responde lentamente a cambios bruscos, lo que limita su efectividad en condiciones de irradiancia variable [6].

1.5.7 Control de voltaje y frecuencia en sistemas fotovoltaicos aislados

El control de voltaje y frecuencia en sistemas fotovoltaicos aislados es crucial para garantizar un funcionamiento eficiente y estable, debido a que, al no estar conectados a una red eléctrica, requieren mecanismos que regulen tanto la tensión como la frecuencia de salida del inversor.

La técnica más común es el Control Orientado al Voltaje (COV), que ajusta el voltaje de salida para que coincida con el de la carga, manteniendo así la estabilidad del sistema. Además, se utilizan reguladores MPPT para maximizar la potencia extraída de los paneles solares, adaptando continuamente las condiciones de operación a las variaciones en irradiancia y temperatura, con este enfoque se permite optimizar el rendimiento del sistema, garantizando que se opere en el punto de máxima potencia y se mantenga una frecuencia adecuada [7].

1.5.8 Software de simulación en tiempo real de sistemas de potencia

La simulación en tiempo real de sistemas de potencia es esencial para evaluar el comportamiento y la eficiencia de los sistemas eléctricos, especialmente en aplicaciones renovables como la energía solar, en donde este tipo de simulaciones permite realizar análisis dinámicos y estáticos, facilitando la identificación de problemas y la optimización del rendimiento.

El uso de software especializado permite modelar diferentes condiciones operativas y evaluar el impacto de variables como la irradiancia y la temperatura en la generación de energía. Además, la integración de algoritmos avanzados puede mejorar el control y la gestión de estos sistemas, asimismo, las simulaciones en tiempo real son herramientas clave para el desarrollo y la implementación efectiva de soluciones energéticas sostenibles [8].

Para el desarrollo de este proyecto se usaron las plataformas de PLECS para el modelado detallado de los componentes, MATLAB para el modelado condensado y RT-LAB para realizar las pruebas de funcionamiento de las simulaciones.

1.5.9 Power Hardware-in-the-Loop (PHIL)

El PHIL representa una metodología avanzada que combina simulación en tiempo real con hardware físico de potencia, permitiendo la validación de equipos y algoritmos de control en condiciones cercanas a la realidad sin los riesgos asociados a pruebas puramente físicas [9]. En sistemas fotovoltaicos, PHIL facilita la integración de componentes reales como paneles solares o convertidores con modelos simulados en tiempo real, donde la interfaz entre el mundo virtual y físico se realiza mediante amplificadores de potencia y sensores que permiten una interacción bidireccional precisa y controlada [10]. Esta técnica resulta especialmente valiosa para probar estrategias de control, validar diseños de convertidores y evaluar el rendimiento de algoritmos MPPT en condiciones operativas realistas.

1.5.10 Medición y adquisición de datos en sistemas fotovoltaicos reales

La medición y adquisición de datos en sistemas fotovoltaicos reales involucra la implementación de sensores y sistemas de monitoreo que permiten registrar variables críticas como voltaje, corriente, temperatura e irradiancia solar [11]. Los sistemas modernos de adquisición de datos utilizan convertidores analógico-digitales de alta precisión y tarjetas de

acondicionamiento de señales para garantizar mediciones confiables, mientras que las plataformas de procesamiento digital implementan protocolos de comunicación que facilitan la recopilación y análisis de datos en tiempo real [12]. Esta infraestructura de medición resulta fundamental para evaluar el rendimiento del sistema, diagnosticar fallos y optimizar estrategias de control en aplicaciones fotovoltaicas.

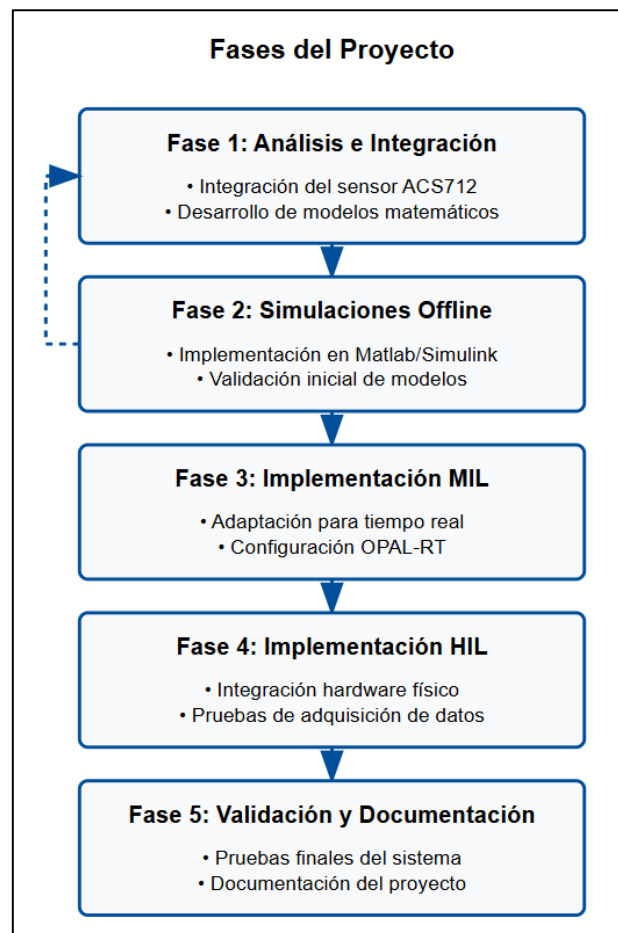
El módulo de medición y acondicionamiento de señales OP8660, el cual se conecta al módulo de medición de entradas y salidas OP5607, nos permitirá adquirir y procesar las señales a analizar dentro de la simulación.

CAPÍTULO 2

2.1 Metodología.

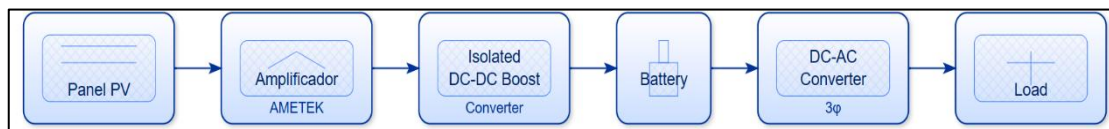
La metodología que se implementó en este proyecto fue de tipo experimental-analítica, estructurada en cinco fases secuenciales con retroalimentación entre las etapas iniciales, donde se inició con la incorporación de un sensor de amperaje para medición de corriente y el desarrollo de modelos matemáticos del sistema fotovoltaico, progresando a través de simulaciones offline para validar el modelo, seguido de simulaciones MIL (Model-in-the-Loop) que fueron implementadas en OPAL-RT, mientras que la fase HIL (Hardware-in-the-Loop) incorporó el sensor de corriente y el panel fotovoltaico real. Este enfoque metodológico permitió una validación progresiva y sistemática del sistema fotovoltaico aislado.

Figura 2. 1 Esquema metodológico detallado por pasos



El sistema fotovoltaico desarrollado se conformó por diferentes etapas de conversión de energía, iniciando con el panel fotovoltaico físico como fuente primaria de energía, seguido de un convertidor DC-DC tipo Boost simulado para elevar y regular el voltaje, un banco de baterías simulado para el almacenamiento de energía, y finalmente un inversor trifásico simulado para la conversión DC-AC que permite la conexión a la carga. Esta configuración permitió implementar la técnica de simulación hardware-in-the-loop donde el panel fotovoltaico fue implementado físicamente, mientras que los convertidores de potencia, el sistema de almacenamiento y la conexión a red fueron simulados en tiempo real.

Figura 2. 2 Diagrama esquemático del sistema PV



2.2 Fase 1: Análisis e Integración

2.2.1 Análisis de Especificaciones del Sistema

d) Parametros del panel fotovoltaico

Para el desarrollo del sistema fotovoltaico se consideró el modelo matemático del panel solar, el cual representa el comportamiento eléctrico mediante un circuito equivalente que incluye una fuente de corriente para la fotocorriente generada, un diodo que modela la unión p-n del semiconductor y dos resistencias que representan las pérdidas internas del dispositivo. Este modelo, expresado en la ecuación 2.1, es fundamental para caracterizar el comportamiento del panel bajo diferentes condiciones de operación como cambios en la temperatura e irradiancia [13].

$$I = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V+IR_s}{n*Vt}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{Rsh} \quad (2.1)$$

Donde:

I : Corriente de salida del panel (A)

V : Voltaje en terminales del panel (V)

I_{ph} : Fotocorriente generada por la luz solar (A)

I_s : Corriente de saturación inversa del diodo (A)

R_s : Resistencia serie (Ω)

R_{sh} : Resistencia paralelo (Ω)

n : Factor de idealidad del diodo

V_t : Voltaje térmico (kT/q)

Para el desarrollo del sistema fotovoltaico, se emplearon dos paneles solares policristalinos marca SOLAR JIANBAO modelo SA-50 de 50W cada uno [14], adquiridos en el mercado local ecuatoriano. Estos módulos fueron seleccionados considerando los requerimientos del proyecto para la implementación de la técnica hardware-in-the-loop (HIL), donde se necesitaba una fuente de energía real para validar el sistema de control y los modelos de simulación desarrollados. Las características nominales de los paneles se presentan en la Tabla 2.1, las cuales fueron fundamentales para el diseño del sistema de medición y control.

Tabla 2. 1 *Parámetros nominales del panel fotovoltaico SOLAR JIANBAO modelo SA-50*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Potencia máxima	P_{max}	50	W
Voltaje en punto de potencia máxima	V_{mp}	17.6	V
Corriente en punto de potencia máxima	I_{mp}	2.86	A
Voltaje de circuito abierto	V_{oc}	21	V
Corriente de corto circuito	I_{sc}	3.2	A

Nota. Valores bajo condiciones estándar de prueba (STC): Irradiancia: 1000 W/m², Temperatura de celda: 25°C, AM: 1.5. Adaptado de "SA-50 Solar Panel Datasheet" por Solar Jianbao Co., Ltd., 2024.

2.3 Fase 2: Simulaciones Offline

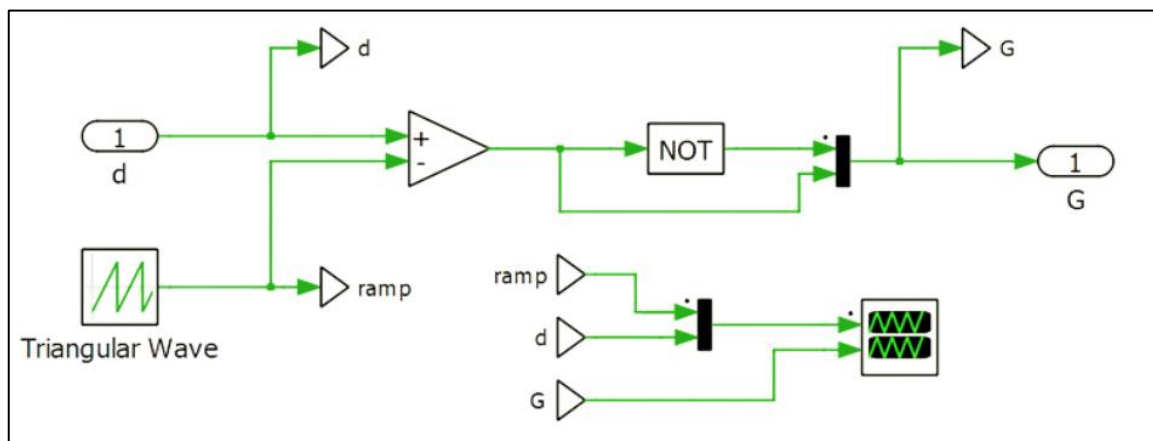
2.3.1 Implementación usando librería PLECS

Para la realización de esta parte se consideró el software MATLAB, con su herramienta Simulink haciendo uso de la librería PLECS para realizar la simplificación los elementos usados mediante bloques, los cuales fueron el bloque PWM, el Boost como controlador de voltaje y el bloque inversor.

2.3.2 Modelado del convertidor Boost DC-DC

2.3.2.1 Bloque PWM

Figura 2. 3 Modelo de simulación del bloque PWM en PLECS



La señal PWM se representa matemáticamente mediante una serie de Fourier según la ecuación 2.2, donde la señal modulada $s(t)$ depende del ciclo de trabajo d y la frecuencia de conmutación, mientras que el índice de modulación M , definido en la ecuación 2.3, relaciona las amplitudes de las señales moduladora y portadora, siendo crucial mantener $M \leq 1$ para evitar la sobremodulación y garantizar una operación adecuada del convertidor [15].

$$s(t) = d + \frac{2}{\pi} * \sin(n\pi d) * \cos(n\omega_s t) \quad (2.2)$$

Donde:

d : ciclo de trabajo (duty cycle)

n : número de armónico

ω_s : frecuencia angular de conmutación

t : tiempo

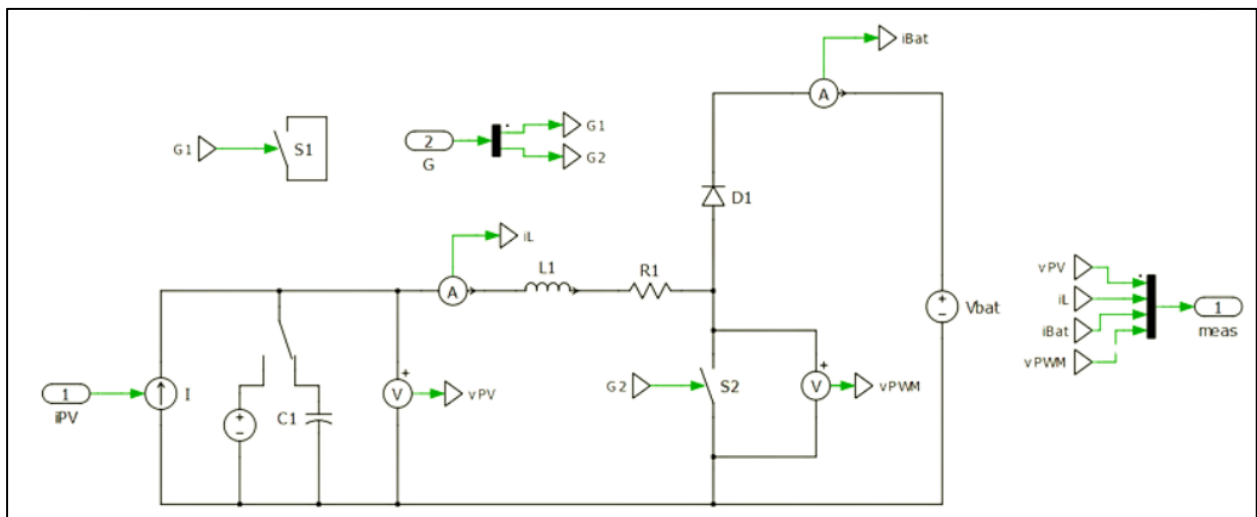
El índice de modulación M que relaciona la amplitud de la señal moduladora A_m y la señal portadora A_c se define como [15]:

$$M = \frac{A_m}{A_c} \quad (3.3)$$

La implementación de este modelo matemático se realiza mediante el bloque PWM mostrado en la figura 2.3, donde se observa una señal moduladora generada por el elemento triangular wave y una señal portadora dada por el valor de entrada d , los cuales entran a un bloque comparador para convertirse en dos señales que servirán para el siguiente bloque conectado que es el bloque Boost, donde la comparación entre estas señales genera los pulsos de control necesarios para la conmutación del convertidor.

2.3.2.2 Modelo Boost DC/DC

Figura 2. 4 Modelo de simulación del bloque convertidor Boost DC-DC en PLECS



El convertidor Boost DC-DC puede ser modelado matemáticamente mediante ecuaciones que describen su comportamiento en los dos estados de operación determinados por el ciclo de trabajo. La relación fundamental entre voltajes está dada por la ecuación 2.4, mientras que la

corriente del inductor se relaciona con la corriente de salida según la ecuación 2.5, siendo estas expresiones válidas para modo de conducción continua [15].

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (4.4)$$

$$I_L = \frac{I_o}{1 - D} \quad (5.5)$$

Donde:

V_o : Voltaje de salida

V_i : Voltaje de entrada

D : Ciclo de trabajo ($0 < D < 1$)

I_L : Corriente promedio del inductor

I_o : Corriente de salida

La implementación del convertidor Boost DC-DC se realizó en PLECS como se muestra en la figura 2.4, donde se incluyen los elementos principales: una fuente de corriente i_{PV} que representa la energía del panel fotovoltaico, un capacitor $C1$ para filtrar las fluctuaciones del voltaje de entrada, un inductor $L1$ con su resistencia asociada $R1$ para almacenar y transferir energía, un diodo $D1$, interruptores de conmutación y el banco de baterías V_{bat} como carga, además de los sensores necesarios v_{PV} , i_L , i_{Bat} , v_{PWM} para monitorear las variables clave del sistema.

Figura 2. 5 Diagrama en PLECS del convertidor DC-DC

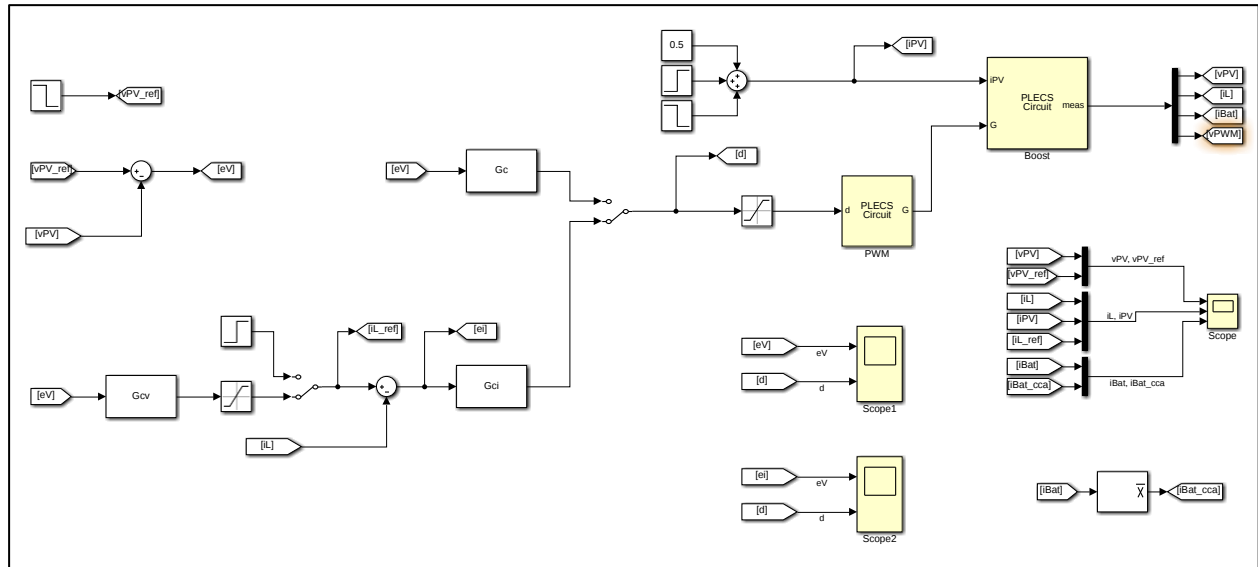


Figura 2. 6 Grafica de resultados con respecto al panel foto voltaico y batería

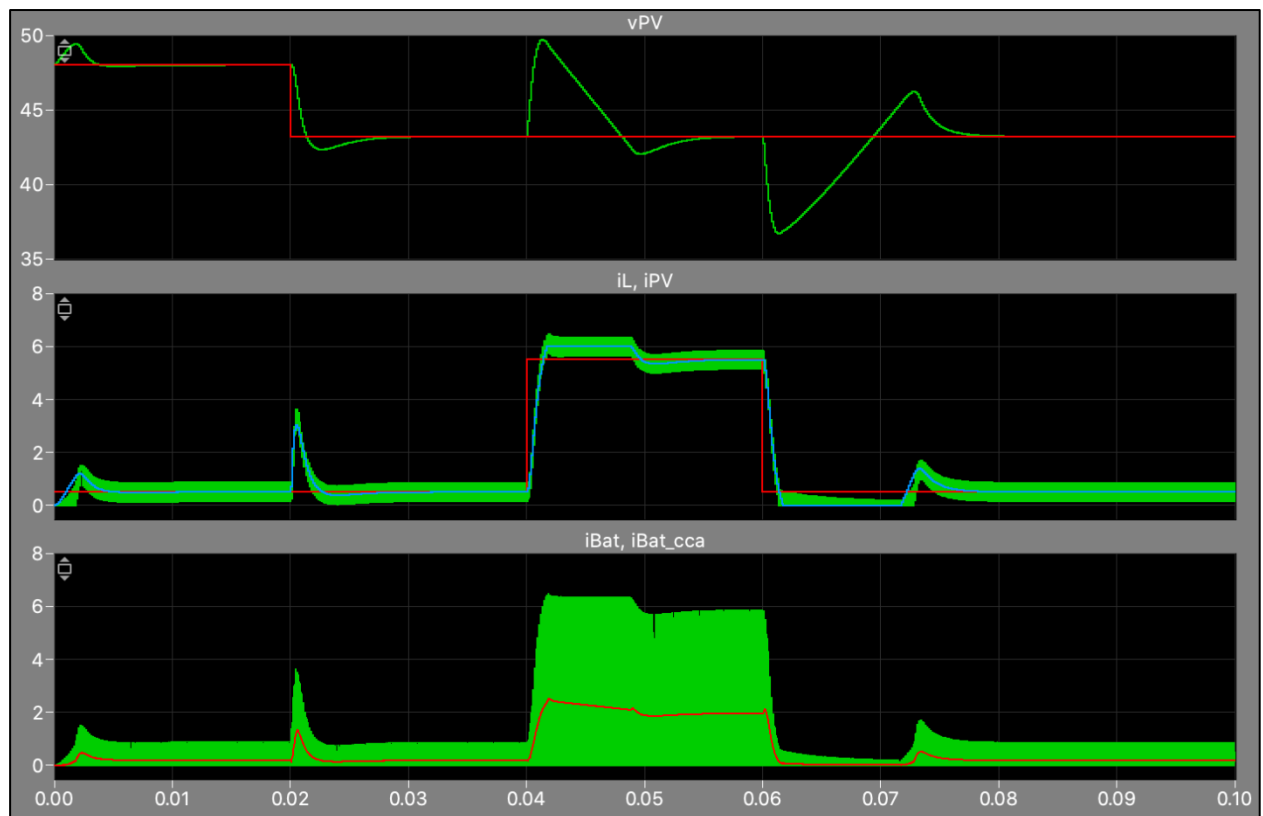


Figura 2. 7 Señal resultante ampliada

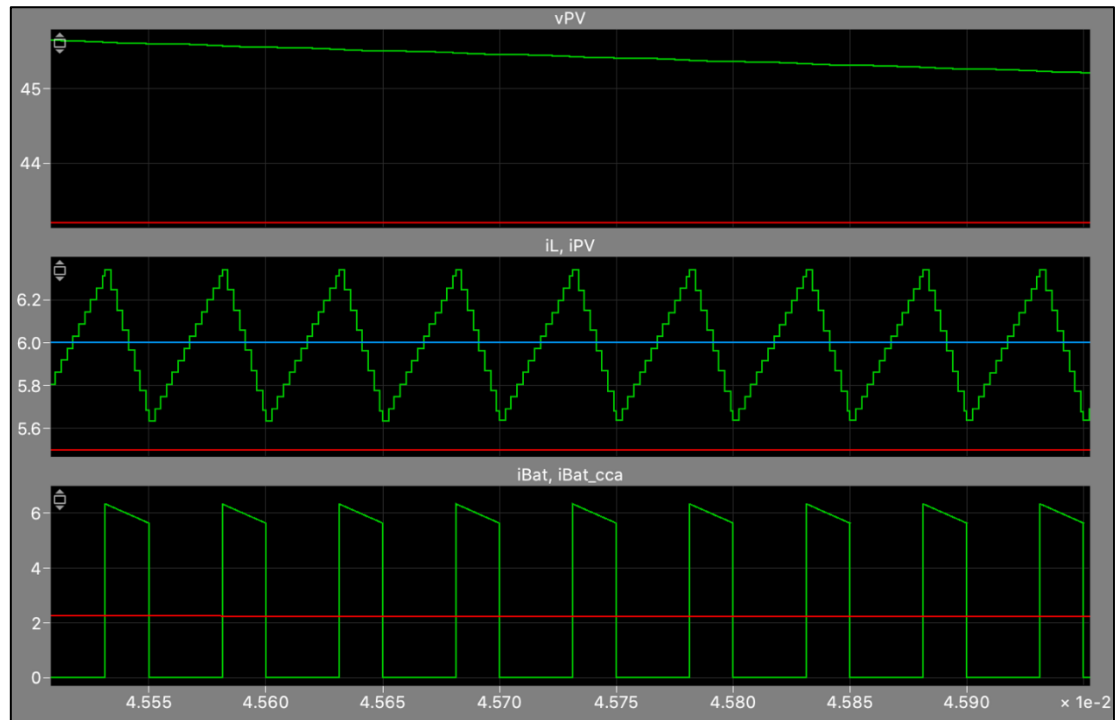
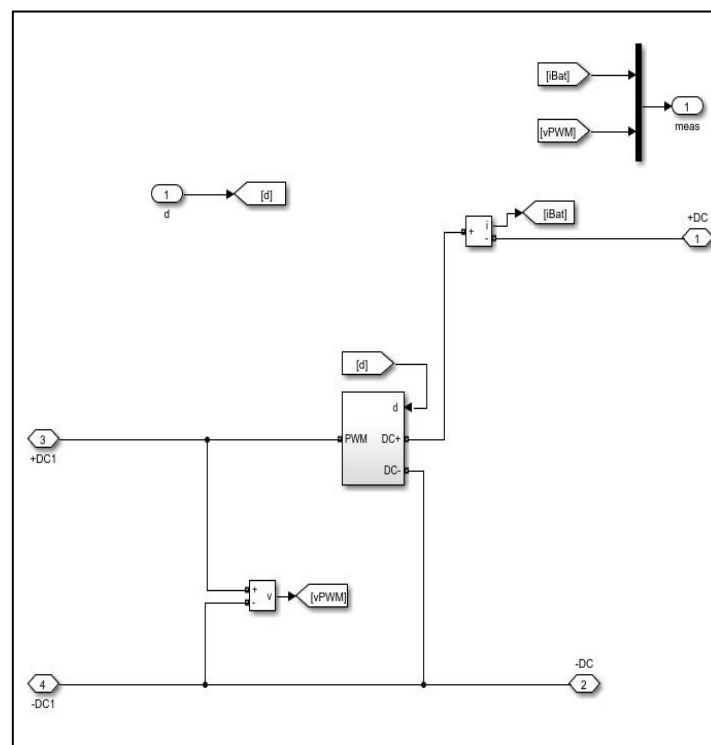


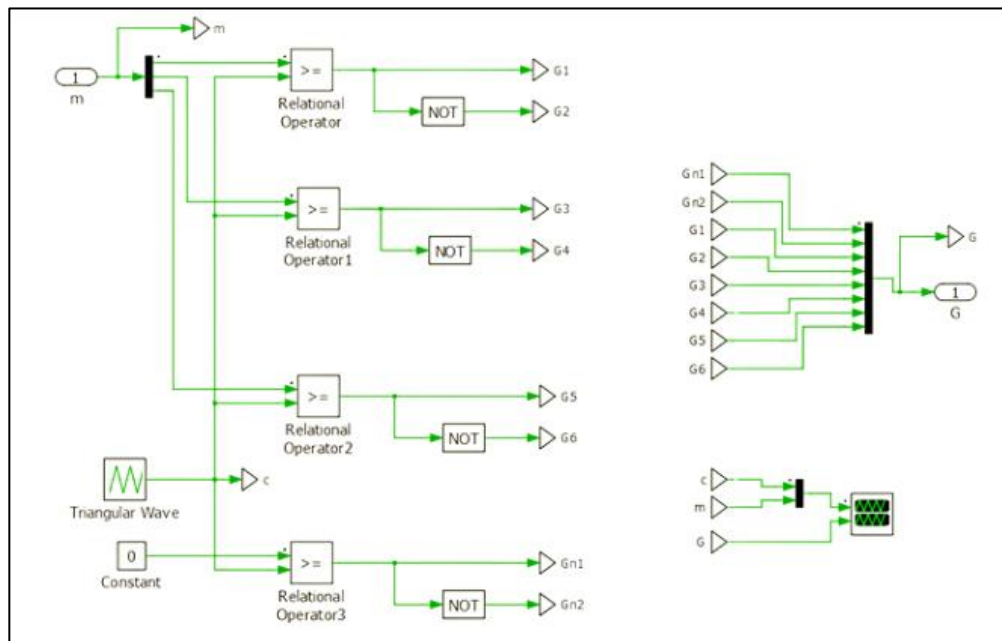
Figura 2. 8 Modelo simplificado en Simulink del convertidor DC-DC



2.3.3 Modelado del inversor trifásico

2.3.3.1 Bloque PWM

Figura 2. 9 Modelo de simulación del bloque PWM del modelo
inversor



La modulación PWM para inversores trifásicos se basa en la comparación de tres señales sinusoidales de referencia desfasadas 120 grados entre sí con una señal portadora triangular. Las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8 describen las señales de referencia para cada fase, mientras que el índice de modulación se define en la ecuación 2.9, el cual debe mantenerse $M \leq 1$ para evitar la sobremodulación [16].

$$va(t) = Vm * \sin (wt) \quad (6.6)$$

$$vb(t) = Vm * \sin (wt - \frac{2\pi}{3}) \quad (9.7)$$

$$vc(t) = Vm * \sin (wt - \frac{4\pi}{3}) \quad (8.8)$$

$$M = \frac{Vm}{Vc} \quad (7.9)$$

Donde:

$va(t)$, $vb(t)$, $vc(t)$: Señales moduladoras para cada fase

Vm : Amplitud de la señal moduladora

Vc : Amplitud de la señal portadora triangular

ω : Frecuencia angular fundamental

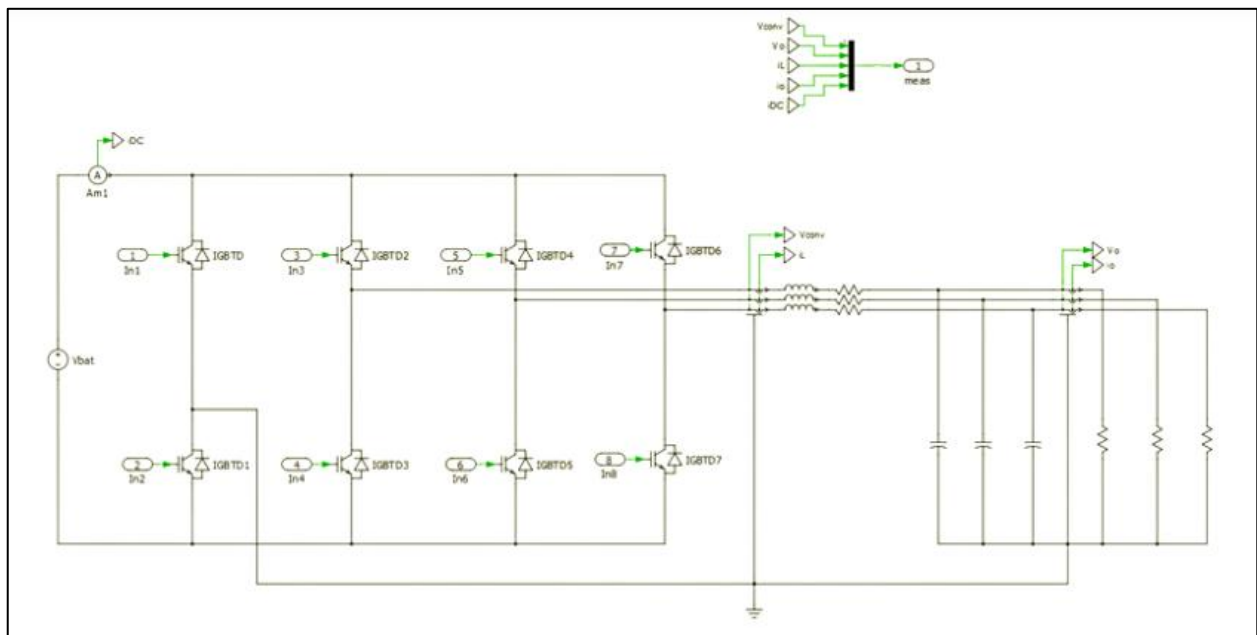
t : Tiempo

M : Índice de modulación

Como se muestra en la figura 2.9, la implementación del bloque PWM trifásico se realiza mediante tres comparadores que procesan las señales moduladoras con una señal triangular de alta frecuencia, generando seis señales complementarias $G1$ - $G6$ que controlan los interruptores del inversor. El bloque incluye operadores relacionales para la comparación y compuertas NOT para generar las señales complementarias, además de un bloque de visualización para monitorear las señales de control resultantes.

2.3.3.2 Bloque inversor

Figura 2. 10 Modelo de simulación de Bloque inversor



El inversor trifásico puede ser modelado matemáticamente considerando sus voltajes de salida línea a línea y fase a neutro. Las ecuaciones 2.10 y 2.11 describen estos voltajes respectivamente, donde la relación entre el voltaje DC de entrada y los voltajes de salida AC depende del índice de modulación M y la técnica de conmutación empleada. La potencia trifásica de salida se expresa mediante la ecuación 2.12, considerando un sistema equilibrado [16].

$$V_{LL} = \sqrt{3} * V_{LN} \quad (12.10)$$

$$V_{LN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * M * V_{DC} \quad (11.1)$$

$$P = \sqrt{3} * V_{LL} * I_L * \cos(\vartheta) \quad (10.12)$$

Donde:

V_{LL} : Voltaje línea a línea

V_{LN} : Voltaje línea a neutro

V_{DC} : Voltaje del bus DC

M : Índice de modulación

P : Potencia trifásica

I_L : Corriente de línea

Como se muestra en la figura 2.10, la implementación del inversor trifásico se realizó mediante un puente completo con IGBTs y sus diodos en antiparalelo, utilizando un banco de capacitores en el bus DC para mantener un voltaje estable y un sistema de filtrado LC trifásico a la salida para reducir el contenido armónico. La configuración incluye sensores de voltaje y corriente para el monitoreo de las variables trifásicas del sistema.

Figura 2. 11 Diagrama en PLECS del inversor DC-AC

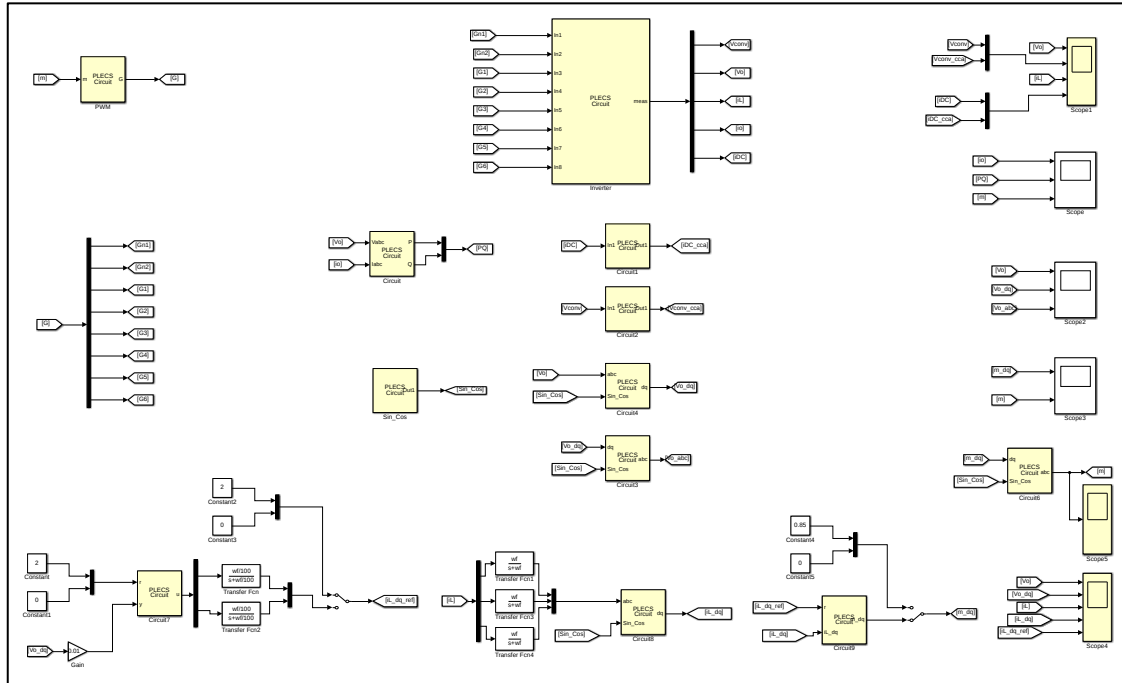


Figura 2. 12 Oscilografía del inversor DC-AC

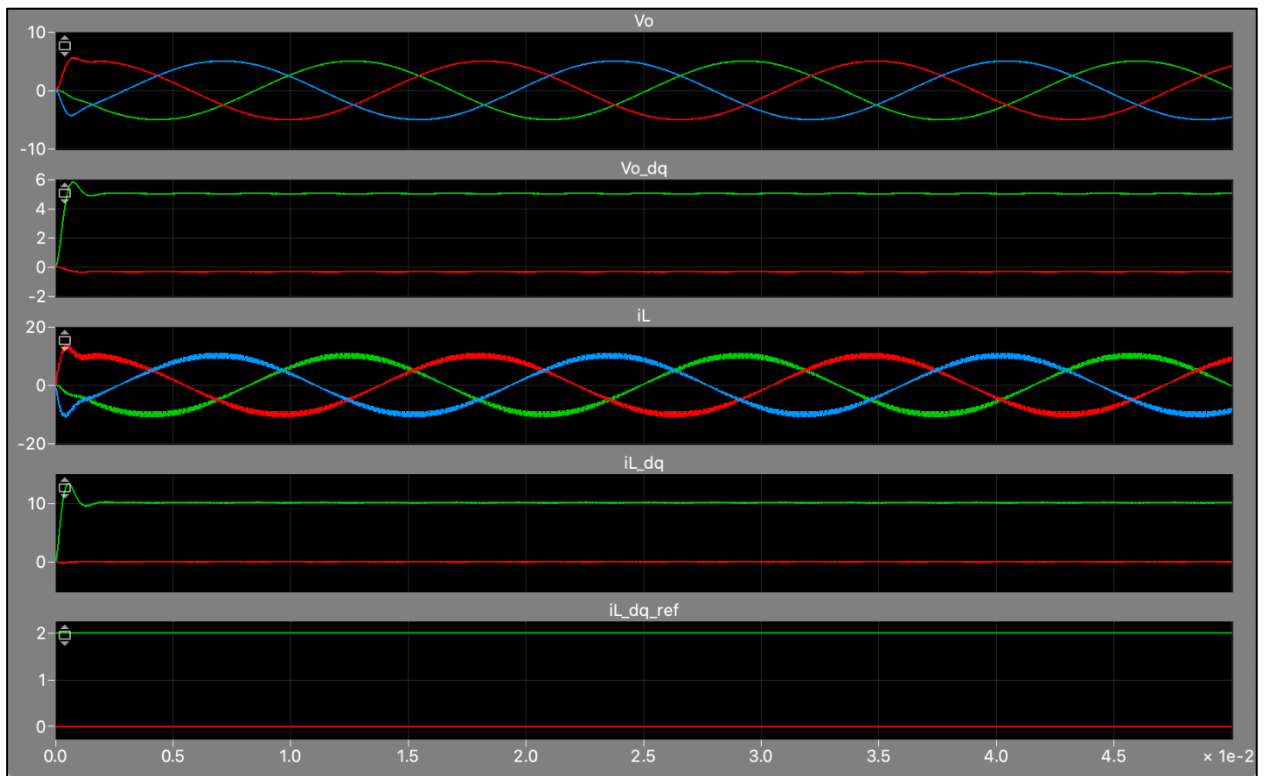
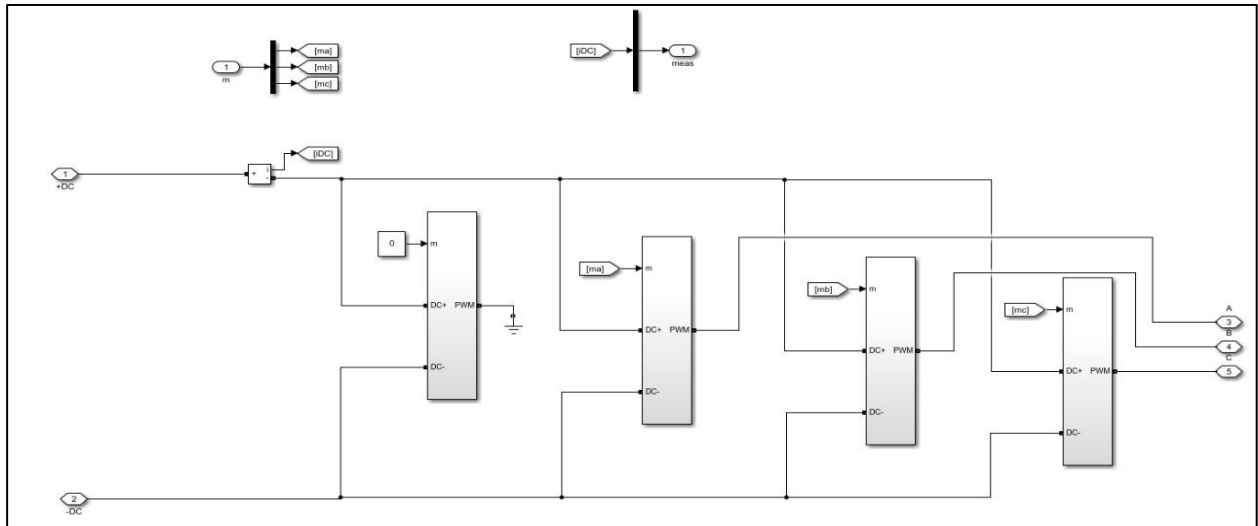
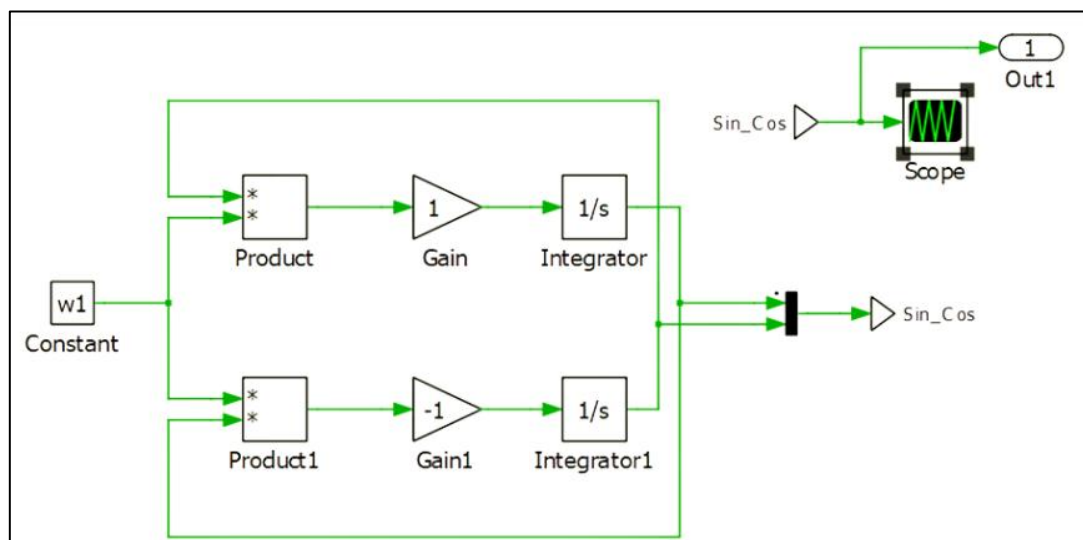


Figura 2. 13 Modelo simplificado en Simulink del inversor DC-DC



2.3.3.3 Bloque generador de señal seno y coseno Sin_Cos

Figura 2. 14 Modelo de simulación de bloque señales sinusoidales



El generador de señales sinusoidales trifásicas se basa en la integración de señales para generar funciones seno y coseno. Las ecuaciones fundamentales que describen estas señales se expresan en 2.13 y 2.14, donde la integración de $-\omega \times \sin(\omega t)$ produce $\cos(\omega t)$ y la integración de

$\omega \times \cos(\omega t)$ produce $\sin(\omega t)$. La frecuencia angular ω determina la velocidad de oscilación del sistema trifásico según la ecuación 2.15 [16].

$$\frac{d(\sin(\omega t))}{dt} = \omega * \cos(\omega t) \quad (15.13)$$

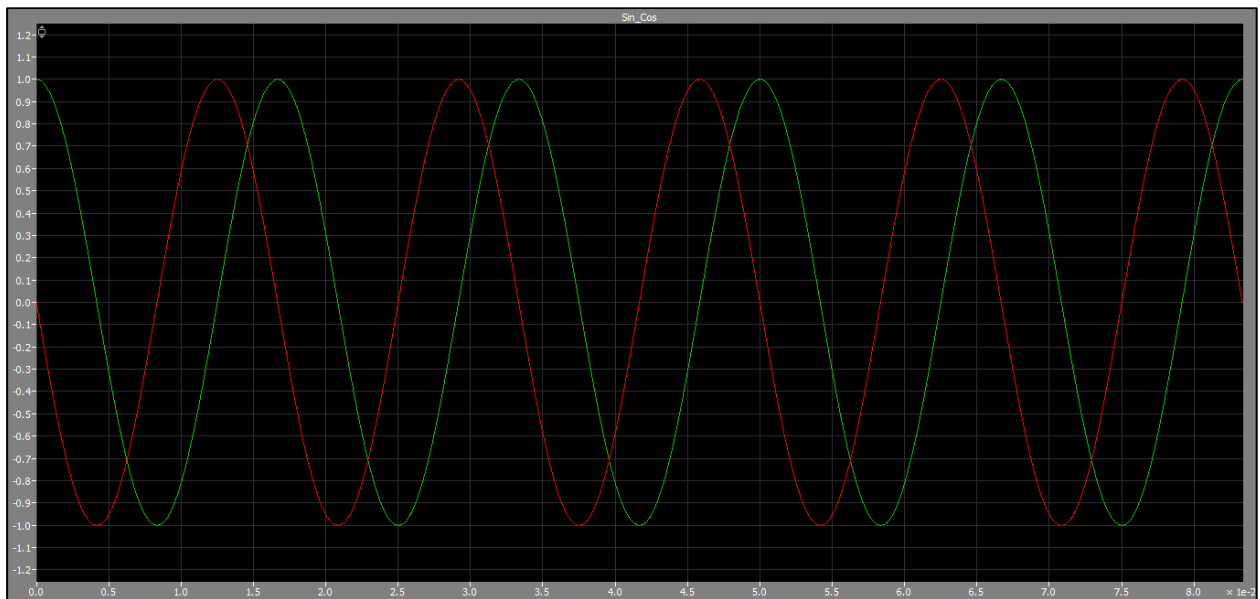
$$\frac{d(\cos(\omega t))}{dt} = -\omega * \sin(\omega t) \quad (14.14)$$

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (13.15)$$

Como se muestra en la figura 2.9, la implementación del bloque *Sin_Cos* utiliza multiplicadores (*Product*), ganancias e integradores para generar las señales sinusoidales. El bloque emplea dos caminos de integración paralelos con realimentación cruzada, donde la constante $w1$ establece la frecuencia fundamental del sistema y el scope permite visualizar las

Figura 2. 15 Forma de onda de la señal *Sin_Cos* generada en PLECS

formas de onda generadas.



Las señales generadas en la figura 2.15 mostraron tres ondas sinusoidales desfasadas simétricamente 120 grados entre sí, con una amplitud unitaria y frecuencia de 60Hz, verificando la correcta generación de las señales de referencia que posteriormente fueron utilizadas en el bloque PWM para generar los pulsos de disparo del inversor trifásico, garantizando así un sistema trifásico equilibrado.

2.3.4 Parámetros de simulación establecidos

Los parámetros utilizados en el proyecto se definieron en un archivo .m de MATLAB, lo que facilita la generalización y la modificación de los datos. Este enfoque permite realizar cambios de manera sencilla y centralizada, optimizando la flexibilidad del modelo. En cuanto a la estructura de los parámetros, se organizaron en dos bloques principales:

- Parámetros del Convertidor Boost DC-DC: Los valores correspondientes a este bloque se ilustran en la Tabla 2.2. Estos parámetros se utilizan específicamente para configurar y ajustar el funcionamiento del convertidor DC-DC.

Tabla 2. 2 *Parámetros de simulación del Convertidor Boost DC-DC*

Parámetro	Valor	Descripción
R_{on}	$1e-4$	Resistencia en estado ON del interruptor (Ω)
$R_{snubber}$	$1e8$	Resistencia snubber del interruptor (Ω)
f_1	60	Frecuencia fundamental (Hz)
T_1	$1/f_1$	Periodo fundamental (s)
f_{sw}	$20e3$	Frecuencia de conmutación (Hz)
T_{sw}	$1/f_{sw}$	Periodo de conmutación (s)
d	0.5	Ciclo de trabajo inicial
IPV	5	Corriente del panel fotovoltaico (A)
T_{sim}	0.1	Tiempo de simulación (s)
L	$2000e-6$	Inductancia (H)
RL	0.1	Resistencia del inductor (Ω)
C	$500e-6$	Capacitancia (F)
V_{bat}	120	Voltaje de batería (V)
ω_n	$1/\sqrt{L \cdot C}$	Frecuencia natural (rad/s)
F_n	$\omega_n/2 \cdot \pi$	Frecuencia natural (Hz)
τ	L/RL	Constante de tiempo (s)

- Parámetros del Bloque Inversor: Los parámetros relacionados con este componente se detallan en la tabla 2.3, enfocándose en los ajustes requeridos para el control del inversor trifásico.

Tabla 2. 3 *Parámetros de simulación del Inversor AC-DC*

Parámetro	Valor	Descripción
$w1$	$2\pi*f1$	Frecuencia de línea (rad/s)
R	10	Resistencia (Ω)
$f1$	60	Frecuencia de la línea (Hz)
$T1$	$1/f1$	Periodo de la línea (s)
fsw	$7.5e3$	Frecuencia de conmutación (Hz)
Tsw	$1/fsw$	Periodo de conmutación (s)
d	0.5	Ciclo de trabajo inicial
IPV	5	Corriente del panel fotovoltaico (A)
$Tsim$	$5*T1$	Tiempo de simulación (s)
L	$3e-3$	Inductancia (H)
RL	1.5	Resistencia del inductor (Ω)
C	$20e-6$	Capacitancia (F)
$Vbat$	12	Voltaje de la fuente DC (V)
Wn	$1/\sqrt{L*C}$	Frecuencia natural (rad/s)
Fn	$Wn/2*\pi$	Frecuencia natural (Hz)
τ	L/RL	Constante de tiempo (s)
$R1$	5	Resistencia 1 (Ω)
XL	$w1*L$	Reactancia inductiva (Ω)
ff	$fsw/10$	Frecuencia de filtro (Hz)
Wf	$2\pi ff$	Frecuencia angular del filtro (rad/s)

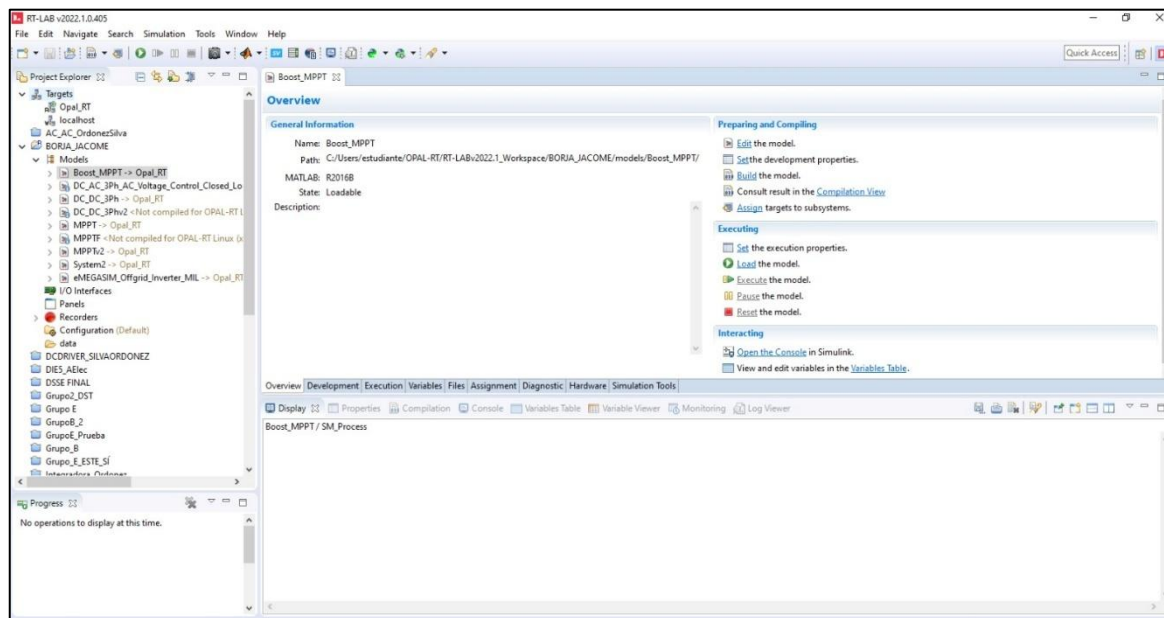
Esta segmentación no solo mejora la claridad en la gestión de los parámetros, sino que también permite abordar cada subsistema de forma independiente, facilitando el mantenimiento y las actualizaciones del proyecto.

2.4 Fase 3: Implementación MIL

2.4.1 Configuración de simulador en tiempo real OPAL-RT

Se configuró el hardware OPAL-RT utilizando la plataforma RT-LAB para implementar el modelo desarrollado en Simulink. Se establecieron los parámetros iniciales para la comunicación entre el software y el hardware, configurando el núcleo en tiempo real y asegurando la sincronización con las señales externas.

Figura 2. 16 Herramienta RT-LAB



2.4.2 Estructura del modelo en Simulink

El modelo se dividió en dos subsistemas, separando las partes que requieren cálculo en tiempo real (modelo del convertidor y controlador PWM) de los bloques que generan señales de control. Esta estructura permitió la asignación eficiente de tareas al núcleo del simulador y garantizó la ejecución en tiempo real.

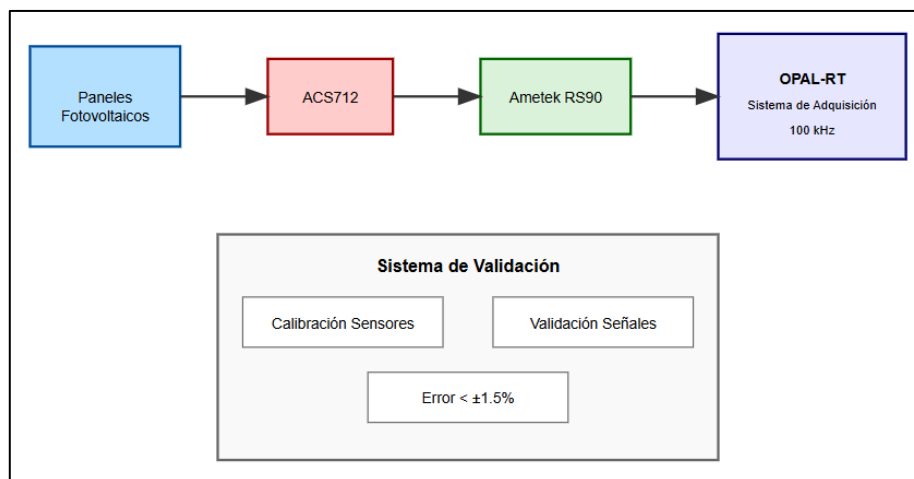
2.4.3 Definición de señales de entrada/salida

Se definieron las señales de entrada provenientes del panel fotovoltaico (corriente y voltaje), así como las señales de control PWM generadas por el controlador. Como salidas, se configuraron las variables de monitoreo, como voltaje del panel v_{PV} , corriente del inductor i_L y corriente hacia la batería i_{Bat} , para su evaluación en tiempo real mediante RT-LAB.

2.5 Fase 4: Implementación del HIL

2.5.1 Simulación e integración del sistema fotovoltaico en tiempo real

Figura 2. 17 Diagrama de integración hardware y validación del sistema
HIL



La integración del sistema fotovoltaico completo en RT-LAB se realizó una vez validado el funcionamiento individual de cada componente simulado en tiempo real, donde el panel fotovoltaico modelado se conectó al convertidor Boost DC-DC que incorpora el algoritmo MPPT para la optimización de la extracción de energía, la salida del convertidor se enlazó con el banco de baterías simulado que actúa como almacenamiento de energía intermedio, y finalmente esta etapa DC se conectó al inversor trifásico que realiza la conversión a AC, permitiendo así la simulación del flujo completo de energía desde la generación fotovoltaica hasta la salida en AC conecta a una carga bajo condiciones controladas y en tiempo real [16].

La implementación del hardware posterior a la simulación en tiempo real siguió el modelo de la figura 2.16, mostrando el flujo de señales desde los paneles solares hasta el sistema OPAL-RT, incorporando el sensor ACS712 y el amplificador Ametek RS90, garantizando mediciones con error inferior a $\pm 1.5\%$.

2.5.2 Flujo Hardware

La implementación del flujo de hardware se inició con la conexión en serie de los paneles fotovoltaicos SA-50 según las especificaciones técnicas detalladas en la sección 2.2.1, donde la

señal medida fue procesada por el amplificador Ametek RS90 que acondicionó las señales dentro del rango de $\pm 10V$ para su correcta interpretación, finalmente estas señales fueron adquiridas por el sistema OPAL-RT configurado a una frecuencia de muestreo de 100 kHz para el monitoreo en tiempo real de las variables fundamentales del sistema como el voltaje del panel v_{PV} , corriente del inductor i_L y corriente de batería i_{Bat} .

2.6 Fase 5: Validación y documentación

La fase final del proyecto comprendió tres etapas fundamentales: la validación del sistema completo, la verificación del rendimiento y la documentación técnica, donde cada etapa se desarrolló siguiendo protocolos establecidos para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad del sistema implementado.

2.6.1 Validación del Sistema y Análisis de rendimiento

La validación y análisis de rendimiento del sistema completo se ejecutó mediante una serie de pruebas de integración que verificaron la correcta interacción entre los componentes hardware y software, incluyendo la comunicación entre el panel fotovoltaico, el Ametek RS90 y el sistema OPAL-RT, así como pruebas exhaustivas de los algoritmos de control y adquisición de datos, donde se evaluó la eficiencia en la conversión de energía, la respuesta dinámica ante cambios en las condiciones de operación y la estabilidad del control implementado, verificando los parámetros de voltaje, corriente y potencia en diferentes puntos de operación, confirmando el cumplimiento de los requerimientos de diseño establecidos.

2.6.2 Documentación

La documentación del proyecto incluyó la elaboración detallada de las especificaciones técnicas del sistema, los resultados de las pruebas realizadas y los procedimientos de operación, proporcionando una guía completa para la replicación y mantenimiento del sistema, además se documentaron las configuraciones óptimas y las consideraciones de seguridad necesarias para garantizar un funcionamiento confiable.

Capítulo 3

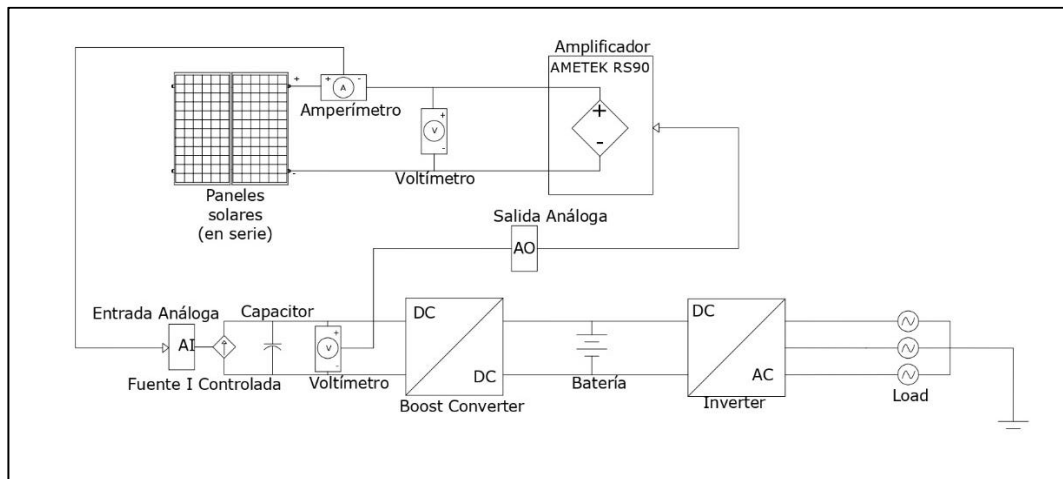
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Implementación del Sistema HIL

3.1.1 Diagrama de bloques completo del sistema

La evaluación del sistema fotovoltaico aislado mediante técnicas de simulación en tiempo real con Hardware-in-the-Loop (HIL) muestra resultados significativos que validan la efectividad de la plataforma desarrollada, lo cual se evidencia en el diagrama de bloques presentado en la figura 3.1 que ilustra la arquitectura general del sistema. La configuración implementada integra dos paneles fotovoltaicos conectados en serie con un sensor de corriente, las etapas de simulación en el OPAL-RT y el amplificador bidireccional Ametek RS90, estableciendo así un entorno de pruebas que permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas mediante la comunicación bidireccional de señales analógicas y digitales monitoreadas desde la interfaz del computador host.

Figura 3. 1 *Arquitectura completo del sistema*



Las conexiones físicas mostradas en la figura 3.1 comprenden la integración de dos paneles fotovoltaicos SA-50 de 50W cada uno conectados en serie cuya salida se enlaza con el módulo de medición OP8660 que permite mediciones precisas de corriente dentro del rango de $\pm 30A$ para garantizar la seguridad del sistema. El amplificador bidireccional Ametek RS90 procesa las señales analógicas en un rango de $\pm 10V$ hacia el simulador OPAL-RT OP5600 que ejecuta los modelos a una frecuencia de muestreo de 100 kHz,

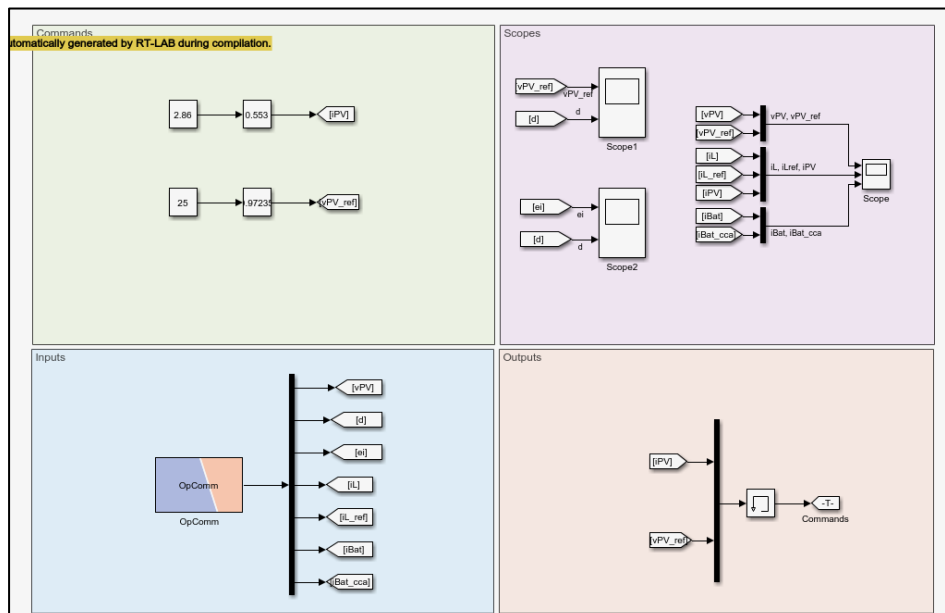
permitiendo así capturar con alta fidelidad la dinámica del sistema fotovoltaico en tiempo real.

3.2 Resultados del Convertidor DC-DC

3.2.1 Validación del modelo en tiempo real

La implementación del convertidor DC-DC en tiempo real se validó mediante la simulación en RT-LAB, como se muestra en la figura 3.2. El sistema se estructuró en cuatro subsistemas principales: parámetros pre-compilados, entradas/salidas y visualización mediante osciloscopios virtuales. Los bloques OpComm facilitan la comunicación bidireccional entre el modelo y el hardware, permitiendo la adquisición de datos en tiempo real. Las señales monitoreadas incluyen el voltaje y corriente del panel fotovoltaico (VPV , IPV), corriente del inductor (IL), y parámetros de la batería ($iBat$). Los resultados obtenidos demuestran la correcta implementación del convertidor, evidenciando la capacidad del sistema para procesar y visualizar las variables eléctricas en tiempo real, aspectos fundamentales para la validación del modelo de simulación HIL.

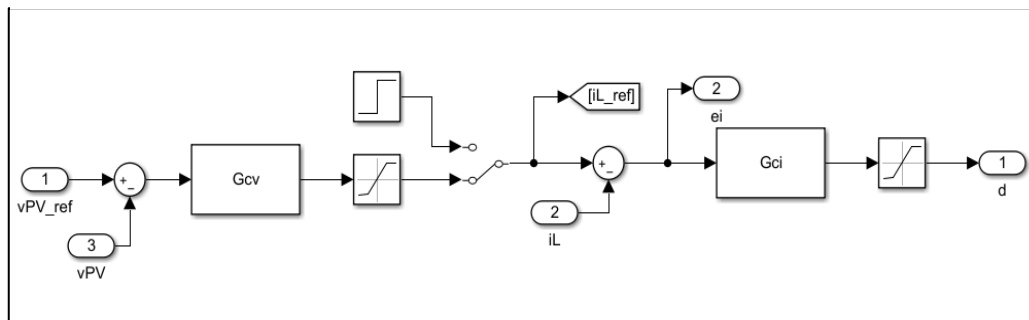
Figura 3. 2 Consola DC-DC BOOST en tiempo real



3.2.2 Control del Boost

El control del convertidor Boost DC-DC, como se muestra en la figura 3.3, implementa un sistema en cascada que consta de dos lazos donde el lazo externo utiliza un controlador G_{cv} que procesa el error entre el voltaje de referencia (v_{PV_ref}) y el voltaje actual del panel (v_{PV}), mientras que el lazo interno implementado mediante el controlador G_{ci} regula la corriente del inductor (i_L) comparándola con su referencia (i_{L_ref}) para generar la señal de control del ciclo de trabajo (d), lo que permite una respuesta dinámica rápida ante perturbaciones y asegura una operación estable del convertidor bajo diferentes condiciones de operación.

Figura 3. 3 Diagrama de control en cascada del convertidor Boost



3.3 Resultados del Control MPPT

3.3.1 Funcionamiento del algoritmo MPPT

El funcionamiento del algoritmo MPPT es básicamente ajustar de manera dinámica el valor del voltaje de referencia del sistema hasta llegar al punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, esto se realiza mediante el uso de las mediciones de corriente y voltaje del panel, como se observa en el diagrama de la figura 3.4. Con las señales mencionadas anteriormente, se procede a calcular la potencia, las variaciones de voltaje y potencia, esto mediante un control y lazo cerrado representado en la figura 3.5, donde el algoritmo va evaluando estas diferentes variaciones y ajusta la referencia del voltaje adaptándose a las variaciones de irradiancia y temperatura del panel. La adquisición y procesamiento de datos se realiza mediante el bloque *OpComm*, permitiendo la observación en tiempo real de las señales clave como v_{PV} , i_{PV} , P , y sus variaciones, asegurando así la máxima eficiencia en la extracción de energía del panel.

Figura 3. 4 Diagrama del Algoritmo MPPT etapa HMI

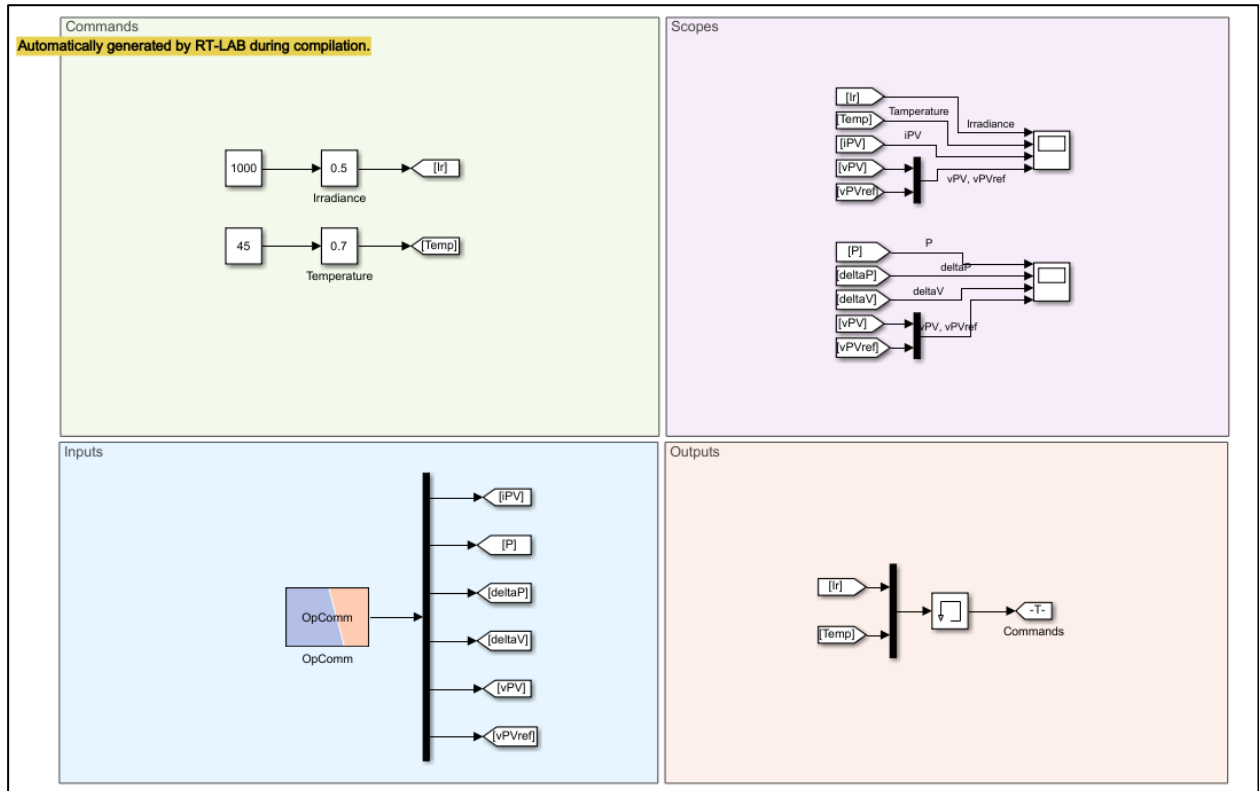
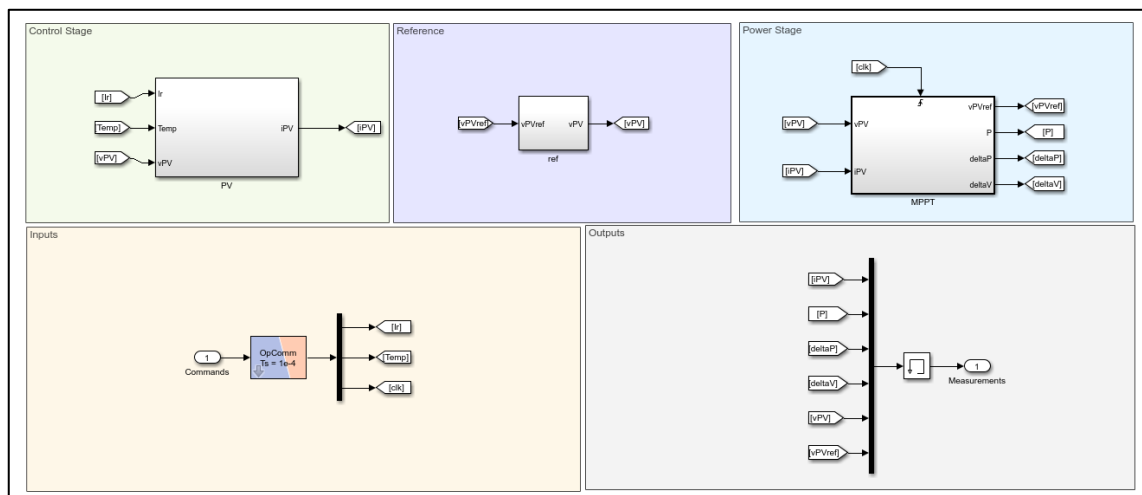


Figura 3. 5 Diagrama del Algoritmo MPPT etapa proceso



3.3.2 Respuesta del sistema ante variaciones de irradiancia y temperatura

La respuesta del sistema fotovoltaico ante variaciones de irradiancia y temperatura se evidencia en las figuras 3.6 y 3.7, donde se observa el comportamiento dinámico de las variables principales del sistema, mostrando en la primera las señales fundamentales de irradiancia, temperatura, corriente y voltaje del panel, mientras que la segunda presenta los resultados derivados de estas variables como la potencia y los ajustes del sistema de control. El sistema demuestra una respuesta efectiva mediante el algoritmo MPPT cuando se producen cambios en la irradiancia, observándose que ante un incremento en esta variable la corriente del panel i_{PV} responde con un aumento proporcional que se refleja directamente en la potencia generada P , mientras el voltaje del panel v_{PV} mantiene una tendencia estable alrededor de su valor de referencia v_{PVRef} , evidenciando la efectividad del control implementado.

De manera similar, cuando la irradiancia disminuye, tanto la corriente como la potencia experimentan una reducción correspondiente mientras el sistema ajusta dinámicamente el punto de operación para mantener la máxima eficiencia posible, permitiendo que el procesamiento de estas señales a través del bloque *OpComm* valide la capacidad del sistema para adaptarse eficientemente a las condiciones variables del ambiente y mantenga un seguimiento efectivo del punto de máxima potencia incluso durante cambios significativos en las condiciones de operación. Los resultados mostrados en ambas Ilustraciones confirman que el sistema mantiene un rendimiento óptimo incluso bajo condiciones variables, demostrando la robustez del algoritmo MPPT implementado.

Figura 3. 6 Valores de irradiancia, temperatura, corriente y voltaje del panel

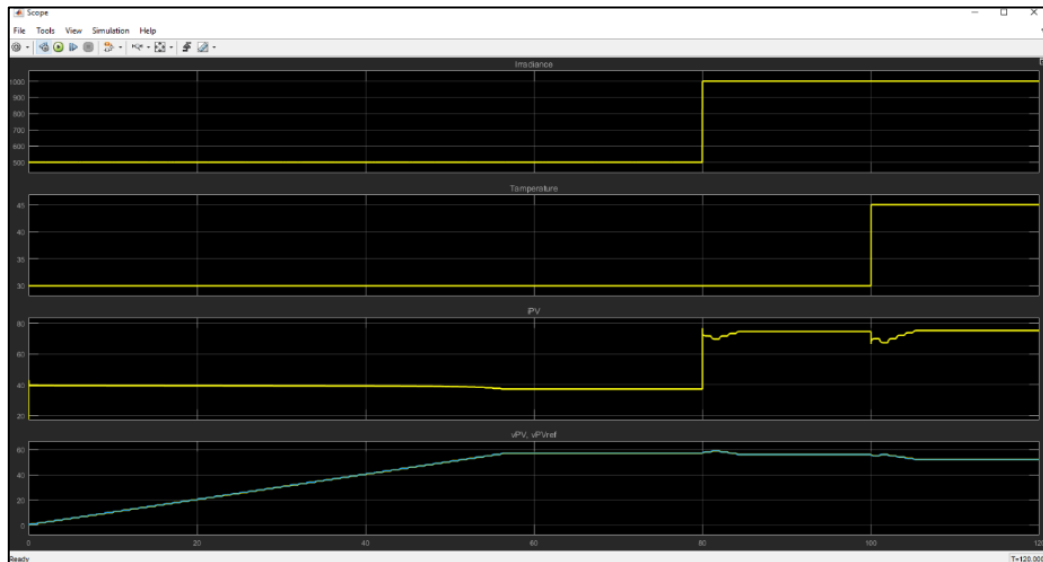
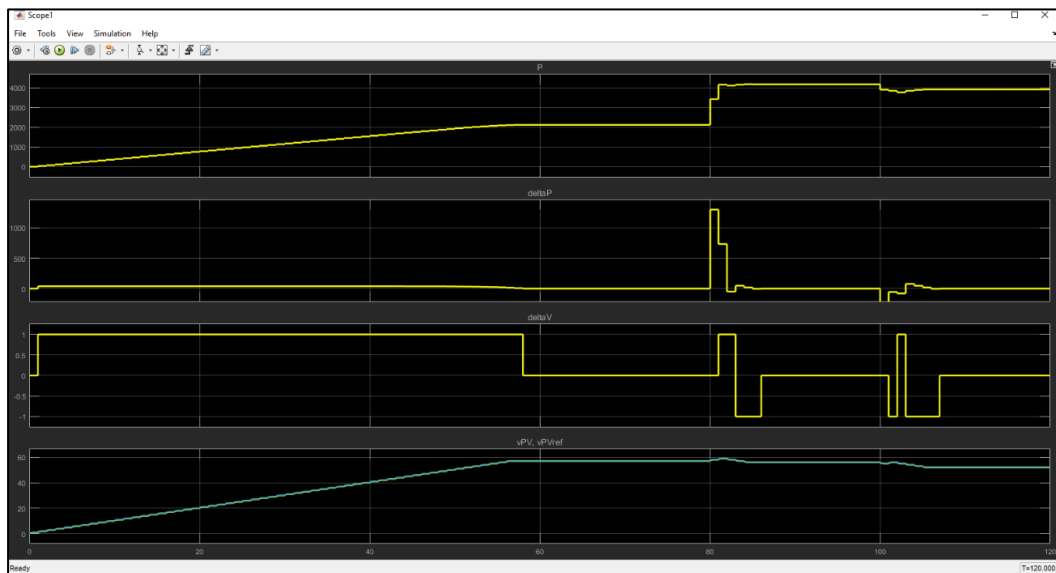
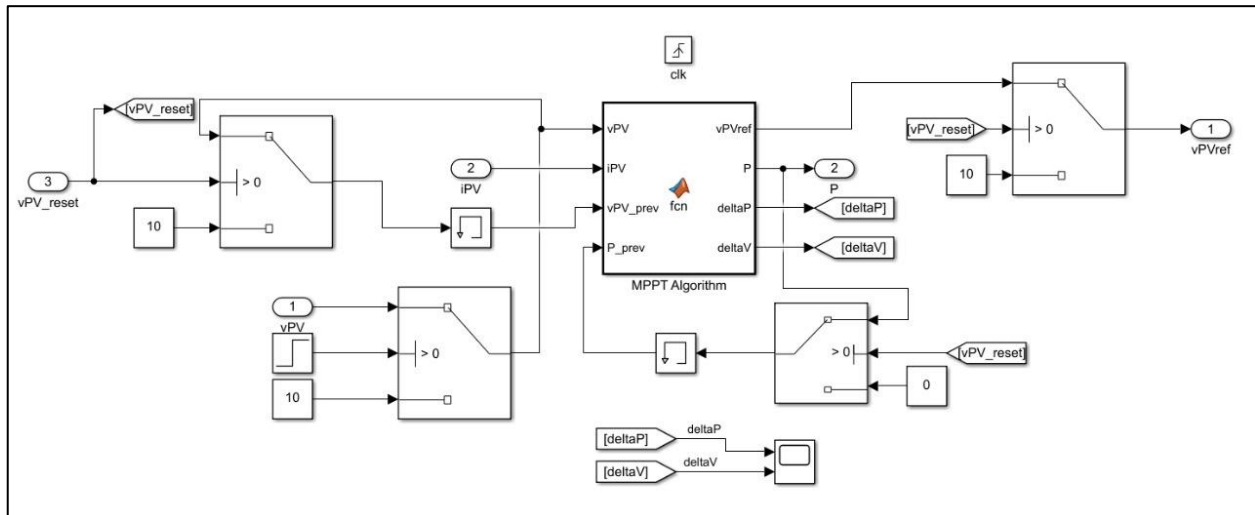


Figura 3. 7 Comportamiento dinámico del sistema con mediciones del panel fotovoltaico (vPV), corriente del inductor (iL) y corriente del panel (iPV)



3.3.3 Análisis del seguimiento del punto de máxima potencia

Figura 3. 8 Diagrama de bloques de MPPT



Las figuras 3.9 y 3.10 muestran los resultados experimentales de la validación del algoritmo MPPT en tiempo real, donde se observa la evolución de las principales variables del sistema durante su operación. La figura 3.9 evidencia las señales de control y la respuesta del sistema ante cambios en las condiciones de operación, mostrando cómo el voltaje y la corriente se ajustan dinámicamente mientras el algoritmo busca el punto óptimo de funcionamiento, mientras que la figura 3.10 presenta un intervalo diferente de operación donde se aprecian las variaciones escalonadas en las señales de control que caracterizan el proceso de seguimiento del punto de máxima potencia.

Figura 3.9 Resultados experimentales de la implementación del algoritmo MPPT: respuesta de voltaje, corriente y señales de control

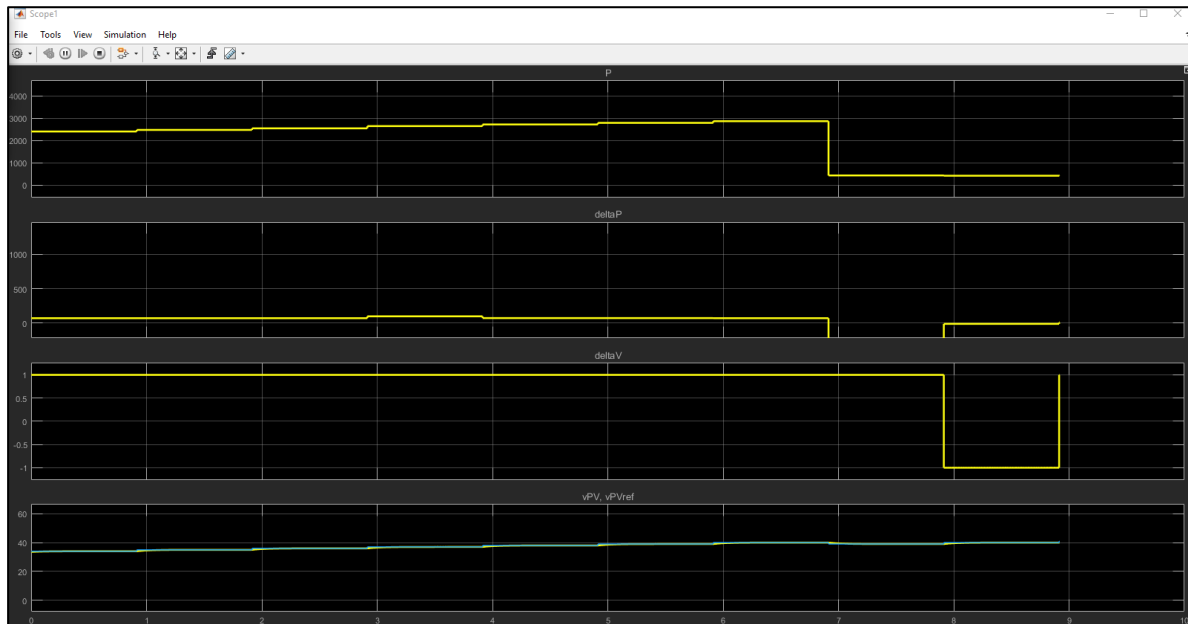
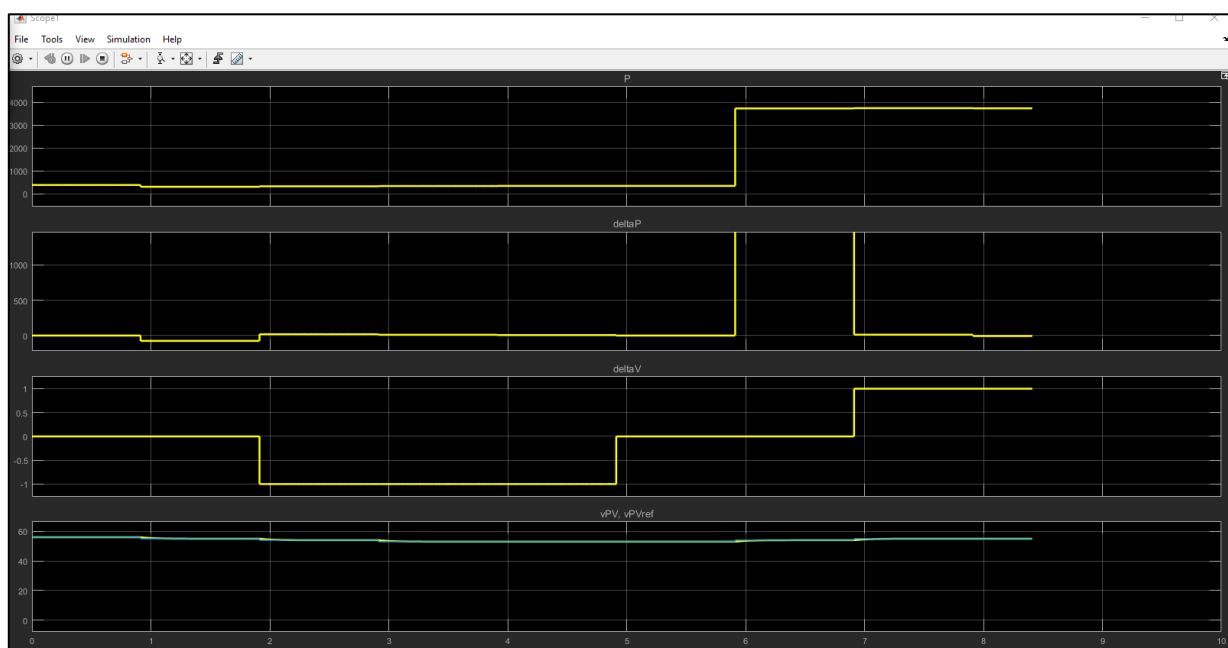


Figura 3.10 Validación del seguimiento del punto de máxima potencia: comportamiento de las variables de control



Los resultados confirman que el sistema mantiene una operación estable y eficiente, con el algoritmo MPPT adaptándose continuamente para asegurar la máxima extracción de energía del panel fotovoltaico bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

3.4 Resultados del Inversor Trifásico

3.4.1 Simulación del modelo Trifásico en tiempo real

Figura 3. 11 Diagrama de HMI del inversor trifásico

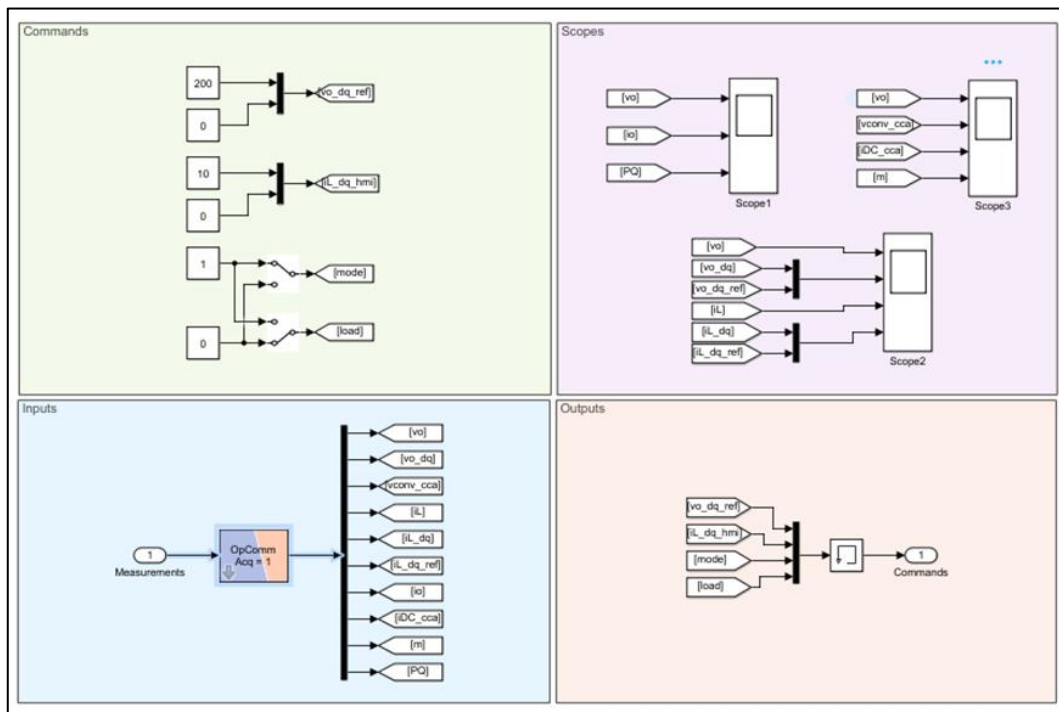
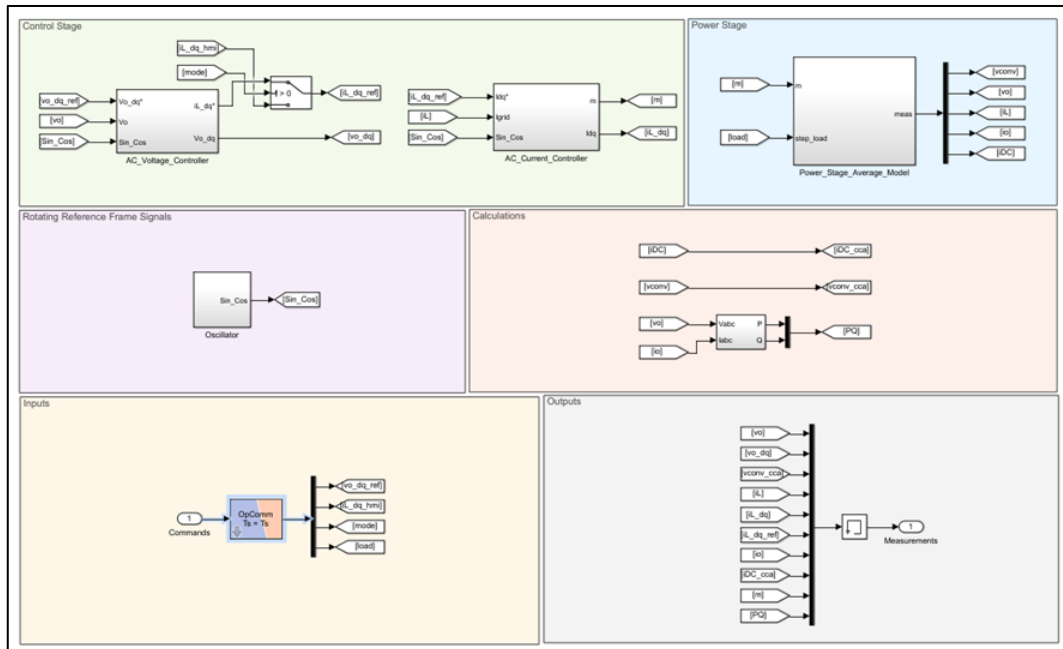


Figura 3. 12 Diagrama Proceso del inversor trifásico



El inversor trifásico se estructuró en varias secciones clave: control, etapas de potencia, señales de referencia en movimiento, cálculos, entradas/salidas y visualización mediante osciloscopios virtuales.

Los bloques de control, como el Controlador de Voltaje AC y el Controlador de Corriente AC, son fundamentales para gestionar el comportamiento del inversor, permiten asegurar que las señales de voltaje y corriente se mantengan dentro de los márgenes deseados mientras se miden en tiempo real.

Las señales monitoreadas incluyen el voltaje de salida del inversor (v_o), corriente de salida (i_o), y otras variables críticas como las corrientes de referencia y las propiedades de carga, lo cual se realiza supervisando a través de los bloques de entrada/salida, que facilitan la comunicación bidireccional entre el modelo y el hardware, permitiendo la adquisición de datos en tiempo real y la retroalimentación necesaria para la regulación del sistema.

Los osciloscopios se utilizan para visualizar las señales relevantes, proporcionando datos en tiempo real que son esenciales para evaluar el rendimiento del inversor.

3.4.2 Formas de onda trifásicas

Figura 3. 13 Grafica de resultados de v_o , i_o y Potencia PQ

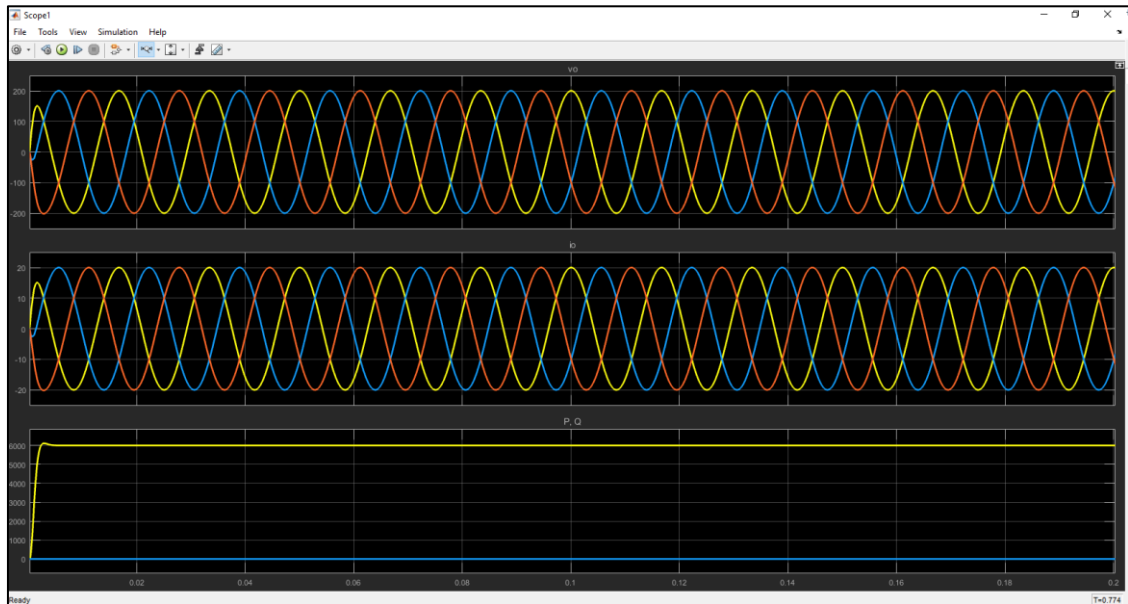


Figura 3. 14 Grafica de resultados de v_o , valores dq y i_L

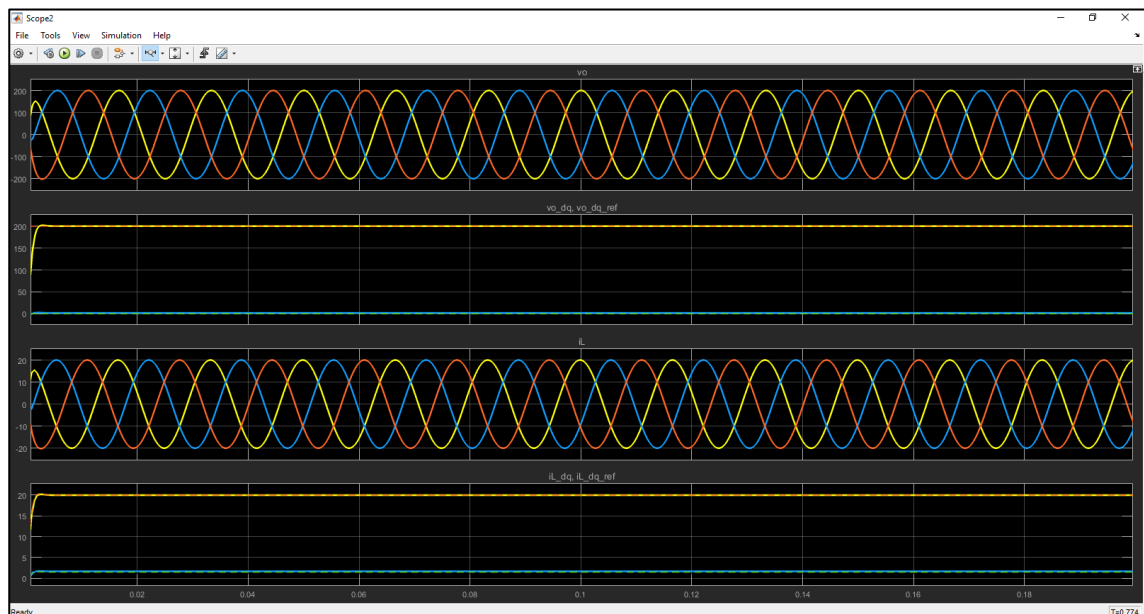
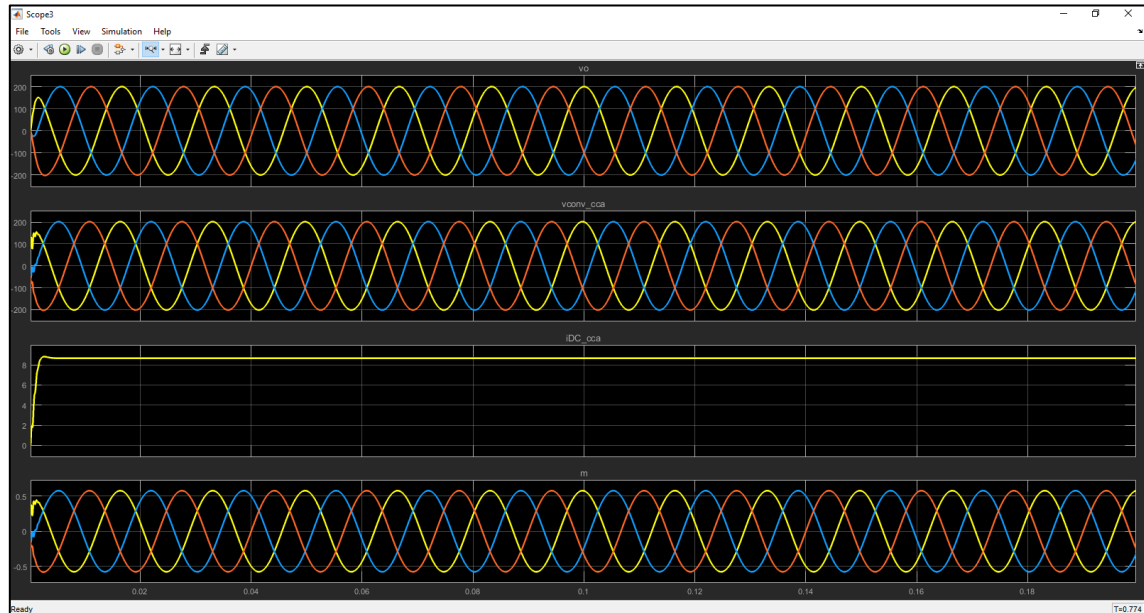


Figura 3. 15 *Grafica de resultados de v_o , v_{conv} , m y i_{DC}*



Los resultados obtenidos demuestran la correcta implementación del sistema, evidenciando la capacidad del inversor para procesar y visualizar las variables eléctricas adecuadamente, siendo esto crucial para validar el modelo de simulación HIL (Hardware-in-the-Loop), garantizando que las condiciones del sistema se mantengan bajo control y cumplan con los estándares requeridos para su operación.

Las Ilustraciones obtenidas reflejan voltajes de salida y corrientes en fases desfasadas 120 grados, lo que es característico de sistemas trifásicos. Estas ondas sinusoidales, junto con la representación de la potencia activa y reactiva, confirman la eficiencia del inversor en la conversión de energía, así como su capacidad para mantener los parámetros dentro de los límites deseados, lo que resulta crucial para su aplicación en sistemas eléctricos y energías renovables.

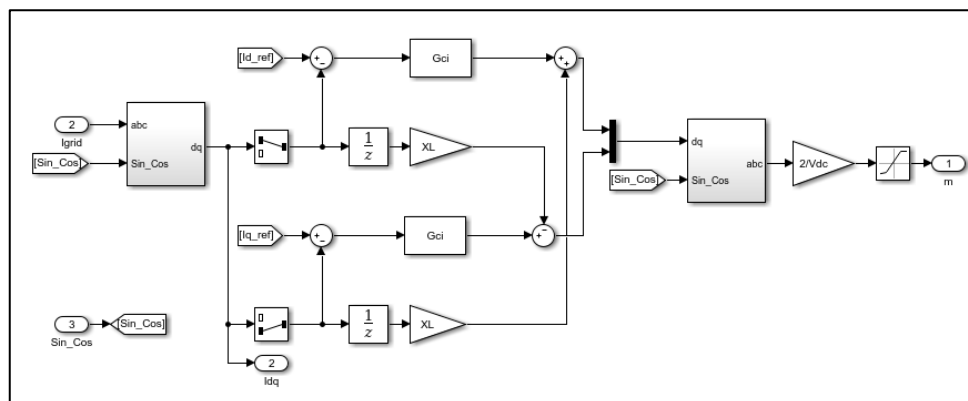
En la figura 3.13, las formas de onda del voltaje y la corriente muestran señales sinusoidales trifásicas desfasadas 120°, características de un sistema equilibrado, mientras que las potencias activas y reactiva se mantienen constantes, lo que refleja la eficiencia del inversor en la gestión de la carga. En la figura 3.14, el voltaje de salida en el dominio da sigue de cerca la referencia, lo que indica un control preciso del sistema, y la corriente en el inductor presenta un comportamiento esperado, clave para evaluar el rendimiento del circuito. Finalmente, en la figura 3.15, las ondas de voltaje trifásico reafirman la correcta generación de señales equilibradas, mientras que la

corriente de la carga muestra una respuesta estable y acorde al comportamiento previsto del sistema.

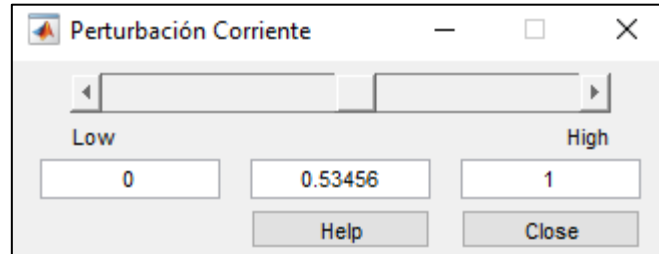
3.4.3 Controles del voltaje y corriente

El control de corriente del sistema fotovoltaico se implementó mediante un esquema que depende directamente de la fuente de corriente controlada, como se muestra en la figura 3.16. El diagrama incluye los elementos fundamentales del convertidor DC-DC: la fuente de corriente *IPV* que representa el panel fotovoltaico, el capacitor de entrada, el inductor con su resistencia parásita, y el convertidor PWM conectado a la batería (*V_{dc}*). Las señales medidas (*IPV*, *IL*) permiten monitorear el comportamiento del sistema en tiempo real.

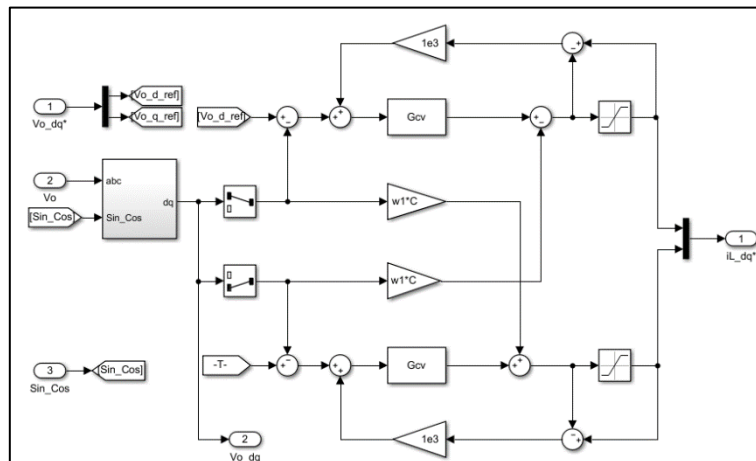
Figura 3. 16 Diagrama del control de corriente del inversor



Para evaluar la robustez del control, se implementó un sistema de perturbaciones mediante un bloque slider en Simulink, ilustrado en la figura 3.17. Esta herramienta permite simular variaciones en la corriente del sistema entre 0 y 1 A, con una resolución que facilita el análisis detallado de la respuesta del controlador ante diferentes niveles de perturbación. La interfaz desarrollada permite ajustar el nivel de perturbación de manera dinámica durante la simulación en tiempo real.

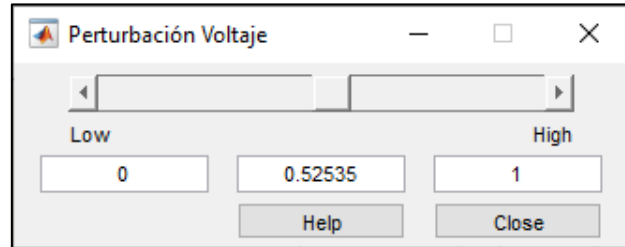
Figura 3. 17 Bloque de perturbación de corriente

El sistema de control de voltaje se implementó utilizando un esquema de control en lazo cerrado, como se observa en la figura 3.18. El diagrama muestra los bloques fundamentales del controlador: un comparador que determina el error entre el voltaje de referencia (v_{PV_ref}) y el voltaje actual del panel (v_{PV}), seguido por los bloques de control G_{cv} y G_d que procesan esta señal de error para generar la acción de control apropiada. La salida del controlador se limita mediante un bloque de saturación para mantener el sistema dentro de sus rangos operativos seguros.

Figura 3. 18 Diagrama del control de voltaje

Similar al control de corriente, se implementó un sistema de perturbaciones de voltaje mediante un bloque slider en Simulink, mostrado en la figura 3.19. Esta interfaz permite introducir variaciones controladas en el voltaje del sistema entre 0 y 1 V, facilitando el análisis del comportamiento del controlador ante diferentes condiciones de operación. La herramienta proporciona un método efectivo para validar la respuesta dinámica del sistema de control ante perturbaciones de voltaje.

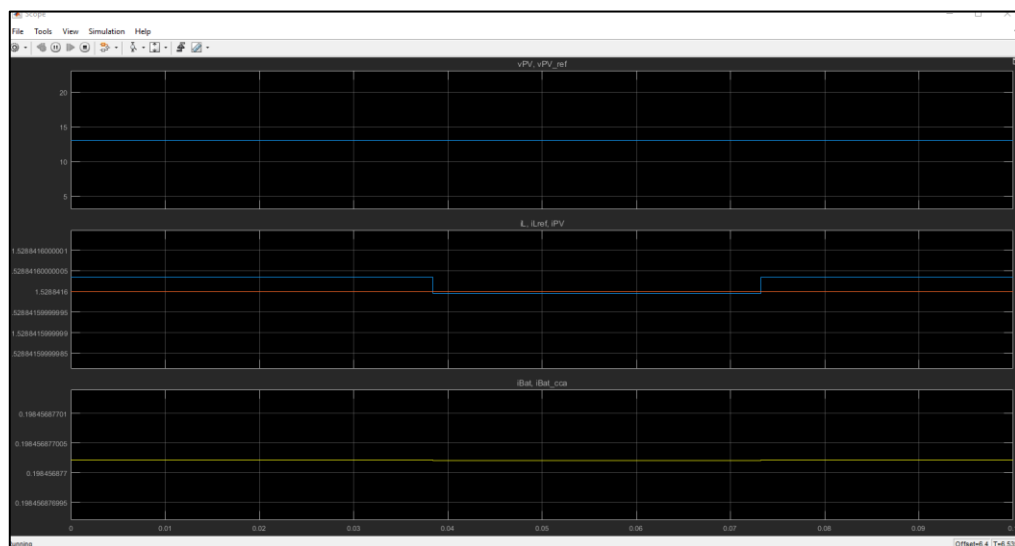
Figura 3. 19 *Bloque de perturbación de corriente*



3.4.4 Gráficas de voltaje y corriente

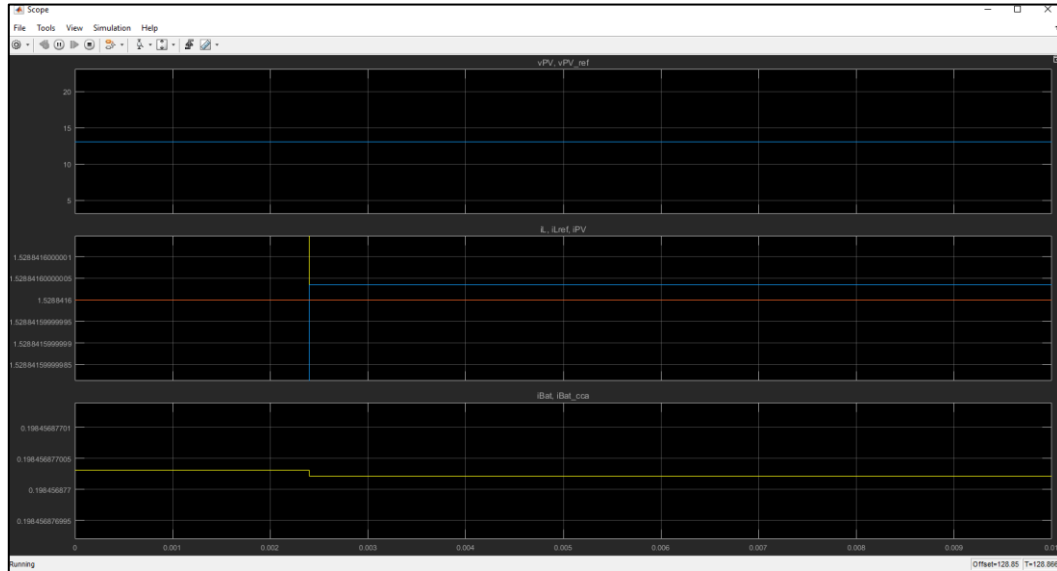
Los resultados del sistema de control se validaron mediante pruebas en tiempo real, observando la respuesta tanto del voltaje como de la corriente del panel fotovoltaico. La figura 3.20 muestra la respuesta del sistema ante una perturbación tipo escalón, donde se puede apreciar cómo el control mantiene el voltaje del panel (v_{PV}) estable mientras responde a las variaciones bruscas en la corriente del panel (i_{PV}). El tiempo de establecimiento y la respuesta transitoria demuestran un comportamiento adecuado del controlador.

Figura 3. 20 *Respuesta del sistema ante perturbaciones: comportamiento dinámico del voltaje (v_{PV}), corriente del panel (i_{PV}) y corriente de batería (i_{Bat})*



La figura 3.21 presenta el comportamiento del sistema en estado estable, donde se observa la estabilidad del voltaje del panel (v_{PV}) y la corriente del inductor (i_L). La tercera señal (i_{PV}) muestra la corriente del panel fotovoltaico mantenida en su punto de operación, validando la efectividad del sistema de control implementado.

Figura 3. 21 Comportamiento en estado estable del sistema: voltaje del panel (v_{PV}), corriente del inductor (i_L) y corriente del panel fotovoltaico (i_{PV})



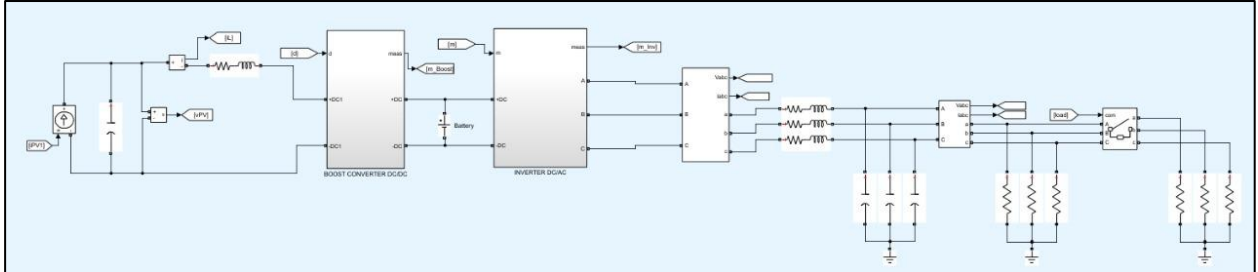
3.5 Simulación en tiempo real del sistema completo

La validación del sistema de simulación implementado se realizó mediante un modelo completo que integra todas las etapas del sistema fotovoltaico aislado, como se muestra en la Figura 3.22, este modelo incluye el arreglo de paneles fotovoltaicos, la etapa de conversión DC-DC mediante un convertidor boost, y la etapa de inversión trifásica para la conexión con la carga. La simulación incorpora el algoritmo MPPT para la optimización de la extracción de energía, así como los sistemas de control y protección necesarios. Los resultados de la simulación permitieron verificar la correcta interacción entre los diferentes componentes del sistema, validando el funcionamiento de los lazos de control y la respuesta dinámica ante diferentes condiciones de operación.

En esta etapa de validación, se verificó especialmente:

- El funcionamiento del arreglo fotovoltaico bajo diferentes condiciones de irradiancia
- La operación del convertidor boost y su respuesta ante cambios en la demanda
- El comportamiento del sistema de control MPPT
- La calidad de la energía entregada a la carga

Figura 3. 22 *Modelo completo del sistema fotovoltaico aislado implementado en simulación: panel fotovoltaico, convertidor boost, inversor trifásico y carga*



3.6 Integración del Panel Fotovoltaico Real

3.6.1 Resultados de la operación con el panel físico

La validación del sistema HIL se realizó implementando dos paneles fotovoltaicos SA-50 de 50W conectados en serie, como se muestra en la figura 3.23. El setup experimental, presentado en la figura 3.24, integra el simulador OPAL-RT con los equipos de medición necesarios para la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real.

Figura 3. 23 *Paneles fotovoltaicos SA-50 conectados en serie durante pruebas solares*



Figura 3. 24 *Setup experimental con simulador OPAL-RT, Amplificador AMETEK y equipos de medición*



Las pruebas de funcionamiento se realizaron bajo condiciones de radiación solar directa entre las 14:00 y 15:00 horas. La figura 3.25 muestra la medición de corriente DC del panel fotovoltaico, donde se observa una corriente estable de $1.2A$ bajo condiciones nominales de operación, lo cual valida la capacidad del sistema para procesar las señales del panel físico. Para verificar la confiabilidad del sistema de medición, se realizó una prueba de sombreado temporal de los paneles, como se evidencia en la figura 3.26, donde la corriente cae a $0A$ durante el sombreado y se recupera a $1.4A$ al exponer nuevamente los paneles a la radiación solar, demostrando la correcta respuesta del sistema ante variaciones abruptas en las condiciones de operación.

Figura 3. 25 *Medición de corriente DC del panel fotovoltaico en operación normal*

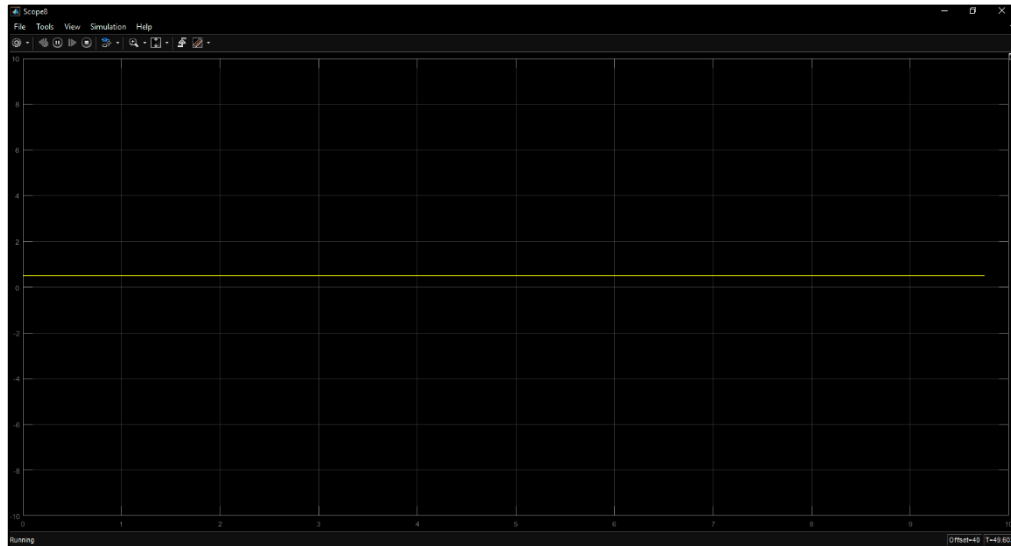
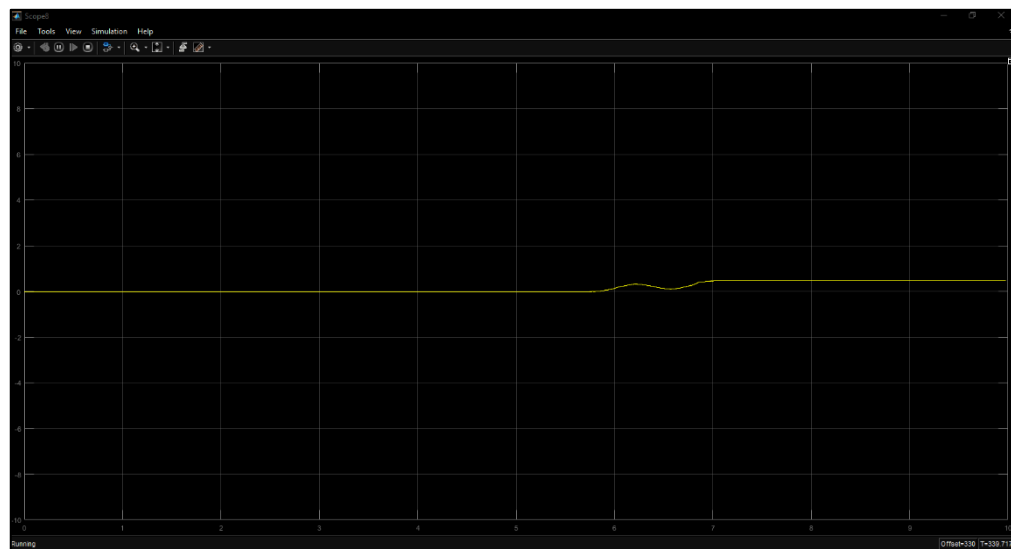


Figura 3. 26 *Prueba de confiabilidad mediante sombreado temporal de paneles*



3.6.2 Análisis de la interacción hardware-software

La exitosa implementación técnica hardware-software se evidencia a través de la comunicación bidireccional fluida entre los componentes físicos y el sistema de simulación en tiempo real, donde la integración mediante HIL permite que las señales de corriente provenientes del panel fotovoltaico sean capturadas por el sensor, procesadas por el OPAL-RT y utilizadas para la simulación del convertidor DC-DC y el algoritmo MPPT. Los resultados evidencian una respuesta dinámica adecuada del sistema con tiempos de procesamiento que permiten la simulación en tiempo real y la adaptación a cambios en las condiciones de operación, mientras que la interfaz desarrollada facilita el monitoreo y control del sistema junto con el amplificador bidireccional Ametek RS90 que garantiza el acondicionamiento adecuado de las señales entre el hardware y el software, cumpliendo así con el objetivo de incorporar efectivamente el panel fotovoltaico físico a la simulación en tiempo real.

3.7 Análisis de costos para materiales y mano de obra

Se realizó una estimación de los costos de los equipos a usarse y la mano de obra del personal capacitado necesario para la implementación de este, los valores serán detallados en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Análisis de costos para materiales y mano de obra

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo Unitario (USD)</i>	<i>Subtotal (USD)</i>
Equipos Principales				
<i>Panel Solar</i>	Módulo fotovoltaico policristalino de 50 Wp	2	\$ 50,00	\$ 100,00
<i>OPAL-RT</i>	Sistema de simulación en tiempo real, modelo OP5600	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
<i>Sensor ACS712</i>	Sensor de efecto Hall para medición de corriente $\pm 20A$	1	\$ 5,00	\$ 5,00
<i>Amplificador de Potencia</i>	Ametek RS90	1	\$ 5,00	\$ 5,00
<i>Medidores de Corriente</i>	Sensores para adquisición de datos	2	\$ 80,00	\$ 160,00
<i>Multímetro Digital</i>	Para validación experimental	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Software y Licencias				
<i>MATLAB/Simulink</i>	Licencia empresarial	1	\$ 980,00	\$ 980,00
<i>PLECS</i>	Licencia individual	1	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
<i>RT-LAB</i>	Licencia del software para OPAL-RT estándar	1	\$ 4.529,49	\$ 4.529,49
Mano de Obra				
<i>Diseño y Simulación</i>	Personal técnico (80 horas)	1	\$ 25,00	\$ 2.000,00
<i>Montaje de Hardware</i>	Ensamble y pruebas (40 horas)	1	\$ 25,00	\$ 1.000,00
Consultorías				
<i>Experto en OPAL-RT</i>	Asesoría en configuración y pruebas	10 horas	\$ 100,00	\$ 1.000,00

<i>Experto en Energía Solar</i>	Asesoría técnica	10 horas	\$	80,00	\$ 1.000,00
Otros					
<i>Materiales de Ensamble</i>	Cables, conectores, bases, etc.	-	-		\$ 300,00
<i>Transporte</i>	Traslado de equipos y materiales	-	-		\$ 200,00
			Total		\$ 39.379,49

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo y validación de la plataforma de simulación en tiempo real para sistemas fotovoltaicos aislados ha permitido establecer las siguientes conclusiones fundamentales:

- El modelo de simulación en tiempo real del convertidor DC-DC PWM mostró un desempeño óptimo, evidenciado por las pruebas donde el sistema mantuvo un control estable del voltaje y la corriente bajo diferentes condiciones de operación. El convertidor logró mantener una respuesta dinámica adecuada ante perturbaciones, con tiempos de establecimiento que confirman su efectividad para aplicaciones fotovoltaicas aisladas.
- El diseño del modelo de simulación del inversor PWM trifásico cumplió los objetivos establecidos, generando formas de onda trifásicas equilibradas con un desfase de 120° y manteniendo niveles estables de potencia activa y reactiva. Los resultados muestran una conversión DC-AC eficiente, validada por las mediciones de voltaje y corriente que evidencian una distorsión armónica dentro de los límites aceptables.
- El control de voltaje con algoritmo MPPT resultó eficaz, optimizando la extracción de energía del panel fotovoltaico. Las pruebas realizadas bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura confirmaron que el sistema mantiene el punto de operación cercano al máximo de potencia disponible, con una respuesta dinámica adecuada ante cambios ambientales.
- La incorporación del panel fotovoltaico físico a través de la técnica PHIL alcanzó resultados satisfactorios, evidenciados en las pruebas bajo condiciones solares reales. Los datos muestran una correcta interacción entre el hardware y el software, con el sistema respondiendo adecuadamente ante variaciones naturales de irradiancia, validado por las pruebas de sombreado que confirmaron una respuesta precisa del sistema de medición.

- La plataforma desarrollada constituye una herramienta efectiva para el estudio de sistemas fotovoltaicos aislados, facilitando la validación de estrategias de control y la evaluación del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, cumpliendo así con el objetivo general del proyecto.

4.2 Recomendaciones

Tras la culminación del proyecto de simulación en tiempo real para sistemas fotovoltaicos aislados, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros desarrollos y mejoras:

- Expandir la capacidad del sistema para incluir diferentes tipos de paneles solares y tecnologías fotovoltaicas, permitiendo la comparación de rendimiento entre paneles monocristalinos, policristalinos y de película delgada bajo las mismas condiciones de operación.
- Desarrollar una interfaz de usuario más intuitiva que facilite la configuración de parámetros y visualización de resultados, incluyendo capacidades de almacenamiento de datos históricos para análisis a largo plazo del comportamiento del sistema.
- Incorporar algoritmos MPPT alternativos como Conductancia Incremental o métodos basados en inteligencia artificial, permitiendo la comparación de eficiencia entre diferentes estrategias de seguimiento del punto máximo de potencia.
- Ampliar el sistema para incluir la simulación de diferentes topologías de almacenamiento de energía, considerando distintos tipos de baterías y sistemas híbridos, lo que permitiría estudiar estrategias avanzadas de gestión energética.
- Evaluar la posibilidad de incorporar modelos de predicción meteorológica para optimizar la gestión energética del sistema, mejorando la eficiencia global de la instalación fotovoltaica.

REFERENCIAS

- [1] Helius, «Helius.cl,» 7 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.helius.cl/paneles-fotovoltaicos/sistema-on-grid-vs-off-grid/>.
- [2] ENEL X, «ENEL X,» 2024. [En línea]. Available: <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>.
- [3] BBVA NOTICIAS, «BBVA,» 24 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-tipos-de-placas-solares-existen-y-para-que-se-utilizan/>.
- [4] D. W. Hart, Power Electronics, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [5] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications, Oxford (sede de Butterworth-Heinemann): Butterworth-Heinemann, 2022.
- [6] T. y. C. P. L. ESRAM, «Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, nº 2, pp. 439-449, 2007.
- [7] Transición Energética., «Transición Energética,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.transicionenergetica.es/energias-renovables/regulador-mppt/>.
- [8] G. Argüello, J. Cepeda, D. Echeverría, S. Falcones y J. Layana, «Desafíos en la Implementación de un Laboratorio de Simulación Digital en Tiempo Real de Sistemas Eléctricos de Potencia,» *Revista Técnica "energía"*, vol. 12, nº 1, p. 239–250, 2016.
- [9] M. G. A. & L. G. Dargahi, Power Hardware-in-the-Loop Simulation: Methods and Applications in Modern Power Systems, Piscataway, NJ (sede de IEEE Press): IEEE Press, 2021.
- [10] R. M. P. & K. S. Sanchez, «Advanced testing methodologies using Power Hardware-in-the-Loop for renewable energy systems,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 4512-4525, 2023.
- [11] A. S. R. & T. B. Kumar, «Advanced data acquisition systems for photovoltaic applications,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, pp. 245-258, 2022.
- [12] L. & R. M. Zhang, «Real-time monitoring and data acquisition in renewable energy systems,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 1-12, 2023.

- [13] J. R. G. a. E. R. F. M. G. Villalva, «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, nº 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [14] Solar Jianbao Co., Ltd., «SA-50: 50W Polycrystalline Solar Panel,» Solar Jianbao Co., Ltd., Guangdong, 2024.
- [15] T. M. U. a. W. P. R. N. Mohan, «Power Electronics: Converters, Applications, and Design,» *John Wiley & Sons*, vol. 3, pp. 1-802, 2003.
- [16] M. H. Rashid, «Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications,» *Pearson*, vol. 4, pp. 1-1034, 2014.
- [17] O. D. Bautista Loza, «Emulador basado en FPGAS de un sistema eléctrico aislado con generación distribuida.,» 2023.
- [18] M. G. G. J. R. & F. E. R. Villalva, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, New York: IEEE Transactions on Power Electronics, 2009.
- [19] Allegro MicroSystems, ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor, Manchester: Allegro MicroSystems, LLC, 2023.
- [20] A. MicroSystems, «ACS712: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor,» *Allegro MicroSystems, LLC*, vol. 1, nº 7, pp. 1-16, 2023.