

Módulo basado en la técnica power hardware-in-the-loop para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica

Presentado por
Sergio Manuel Brito García

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director
Johann Farith Petit Suárez
Doctor en Ingeniería Eléctrica

Co-directores
María Alejandra Mantilla Villalobos
Doctora en Ingeniería

Juan Manuel Rey López
Doctor en Ingeniería Electrónica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía, por darme salud y la sabiduría necesaria para culminar este trabajo.

A mis padres, Sabas Brito y Ereida García, por su apoyo constante. Su ejemplo de honestidad, humildad y perseverancia me ha permitido alcanzar este logro, el cual también les pertenece.

A mi hermano Santiago y mi primo Rafael quienes siempre me acompañaron y brindaron todo su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi codirectora, Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, quien con su sabiduría me orientó académicamente, por su incansable compromiso y apoyo constante. Muchas gracias por sus enseñanzas y por depositar en mi la confianza, su guía fue valiosa para el desarrollo de este proyecto.

A mi director, Dr. Johann Farith Petit Suárez gracias por su acompañamiento permanente, por su constante disposición en mi formación académica y por el apoyo humano que me brindó durante esta importante etapa de mi vida.

A mi codirector, Dr. Juan Manuel Rey López gracias por sus valiosas contribuciones, por su experiencia, por sus orientaciones académicas y por sus consejos en la divulgación científica de este trabajo.

Agradezco a mis amigos del grupo de investigación GISEL: Alejandra, Mauricio, Tania, Oscar, Jorge, Juan, Liliana y David, quienes se convirtieron en mi familia a lo largo de mis estudios de maestría, gracias por el compañerismo, por los valiosos consejos y por los momentos de diversión y alegrías que me brindaron.

Finalmente agradezco a mi familia, mis padres Sabas y Ereida, a mi hermano Santiago y a mis primos Rafael, Daniel, Ernesto y Juanse, gracias por su apoyo y acompañamiento en cada logro alcanzado. ¡Gracias!.

Contenido

1. Introducción	14
1.1. Objetivos	16
1.1.1. Objetivo general.....	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	16
1.2. Alcances	16
1.3. Divulgación científica	17
1.4. Organización del documento	18
2. Marco teórico.....	19
2.1. Simulación en tiempo real	20
2.2. Introducción al Power-Hardware-In-the-Loop (PHIL)	20
2.2.4.1. Plataforma de simulación de dSPACE	23
2.3. Emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica	23
2.4. Investigaciones relacionadas.....	24
2.5. Convertidores electrónicos de potencia	25
3. Diseño del sistema	27
3.1. Diseño del módulo basado en la técnica PHIL	27
3.1.1. Convertidor AC/DC/AC y drivers	29
3.1.2. Filtros de conexión	31
3.1.3. Sistema de control de la interfaz virtual-to-power	33

3.1.3.1 Controlador de la tensión del bus de corriente directa	34
3.1.3.2 Control de corriente en el PCR.....	37
3.1.3.3 Control de la tensión en el PCH	39
3.1.3.4. Verificación preliminar del diseño de los controladores mediante simulación	40
3.1.4. Sistema de sensado.....	44
3.1.5. Plataforma dSPACE DS1104.....	45
4. Pruebas experimentales preliminares para la interfaz virtual-to-power	45
4.1. Descripción de la prueba experimental preliminar del control de tensión	46
4.2. Descripción de la prueba experimental preliminar del control de corriente.....	47
4.4. Interfaz gráfica Matlab/Simulink de la plataforma virtual-to-power	50
4.5. Ejecución de la prueba experimental de la interfaz virtual-to-power	53
4.6. Desafíos y soluciones en la implementación	53
4.7. Ajustes de los parámetros del sistema de control	54
4.8. Resultados de las pruebas experimentales de la interfaz virtual-to-power	56
5. Modelos del sistema de distribución de energía eléctrica e implementación en dSPACE 1104.....	59
6. Pruebas experimentales del módulo PHIL	62
6.1. Modelo en Matlab/Simulink implementado en la plataforma dSPACE 1104	63
6.2. Montaje final del módulo.....	64
6.3. Inicialización y ejecución de simulaciones en tiempo real del módulo PHIL	68
6.4. Resultados de la simulación en tiempo real para una carga de 600 [W]	68

6.5. Análisis de resultados.....	71
6.5.1. Análisis de resultados experimentales de la simulación en tiempo real	72
6.6. Resultados de la simulación en tiempo real ante variación de carga en el PCH.....	73
7. Conclusiones	75
7.1. Conclusiones generales.....	75
7.2. Síntesis del cumplimiento de los objetivos	75
7.3. Hallazgos Principales.....	76
7.4. Limitaciones	77
7.5. Líneas de investigación futuras	77
8. Referencias bibliográficas.....	79

Tablas

Tabla 1 Principales especificaciones del inversor.....	30
Tabla 2 <i>Parámetros para la prueba experimental de control de tensión.</i>	46
Tabla 3 <i>Parámetros para la prueba experimental de control de corriente.</i>	48
Tabla 4 Ajustes de ganancias del sistema de control.....	55
Tabla 5 <i>Parámetros de las pruebas experimentales.</i>	56
Tabla 6 <i>Tiempo de ejecución de acuerdo con el modelo de red eléctrica emulado.</i>	61
Tabla 7 <i>Resultados del MAE para las señales de tensión y corriente en la prueba con carga balanceada de 600W.</i>	72

Figuras

Figura 1 Configuración general del modelo desarrollado.....	17
Figura 2 Estructura general de un sistema PHIL.....	21
Figura 3 Configuración del módulo PHIL propuesto para emular sistemas de distribución de energía eléctrica.....	29
Figura 4 Esquema por fase del filtro LCL.	32
Figura 5 Diagrama de bloques del controlador PI del bus de DC.	34
Figura 6 Diagrama de bloques del controlador PR para el seguimiento de corriente.....	38
Figura 7 Diagrama de bloques del controlador PR para el seguimiento de tensión.	40
Figura 8 Modelo en simulink de la interfaz virtual-to-power.	41
Figura 9 Resultados del control de tensión en el PCH: tensión de referencia vs. tensión medida en el PCH para la fase a.....	42
Figura 10 Resultados del control de corriente en el PCR: corriente de referencia vs. corriente medida en el PCR para la fase a.	43
Figura 11 Resultados del control del bus de DC: tensión de referencia vs. tensión medida en el bus de DC.	44
Figura 12 Esquema para verificar el funcionamiento del control de tensión en AC en el PCH.....	47
Figura 13 Esquema para verificar el funcionamiento del control de corriente en AC en el PCR.	48
Figura 14 Esquema del circuito de inicialización y carga del bus DC.....	50
Figura 15 Interfaz gráfica para el acondicionamiento de señales.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16 Interfaz gráfica del sistema de control.	52
Figura 17 Interfaz gráfica de las protecciones digitales para el módulo PHIL.....	53
Figura 18 Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase a. 57	
Figura 19 Comparación de resultados de la corriente en el PCR y la corriente de referencia para la fase a.	57
Figura 20 Resultado de la tensión del bus DC del convertidor back-to-back.....	58
Figura 21 Interfaz del modelo del sistema de distribución implementado en la plataforma dSPACE.	59
Figura 22 Circuitos de inicialización para carga de capacitores del bus DC del convertidor AC/DC/AC del módulo PHIL.	64
Figura 23 Filtro LCL y módulo de sensado de señales de tensión y corriente.	65
Figura 24 Panel de conexión de la plataforma dSPACE 1104 y fuente Chroma programable AC 61701 ..	65
Figura 25 Convertidores SPM-VFD-KIT de Taraz Technologies.....	66

Figura 26 Tarjeta de control de Texas Instruments	66
Figura 27 Carga trifásica balanceada de 600 [W].....	67
Figura 28 Módulo completo de la interfaz virtual-to-power para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica.....	68
Figura 29 <i>Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase A.</i>	68
Figura 30 Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase B.	69
Figura 31 Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase C.	70
Figura 32 <i>Comparación de resultados de la corriente en el PCR y la corriente de referencia para la fase A.</i>	70
Figura 33 <i>Resultado de la tensión del bus DC del convertidor back-to-back.</i>	71
Figura 34	74
Figura 35 <i>Comparación de resultados de la corriente de la fase A en el PCR y la corriente de referencia ante variación de carga.</i>	74
Figura 36 <i>Bloques en Matlab/Simulink para el encendido/apagado del relé NA de carga del bus DC.</i>	86
Figura 37 Modelo del sistema de distribución de 9 nodos.	89
Figura 38 Modelo del sistema de distribución de 30 nodos.	90

Abreviaciones

AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico a Digital)
AMI	Advanced Metering Infrastructure (Infraestructura de Medición Avanzada)
CHIL	Control Hardware-In-the-Loop
DAC	Digital-to-Analog Converter (Convertidor Digital-Analógico)
DC	Direct Current
GD	Generación Distribuida
HIL	Hardware-In-the-Loop
HUT	Hardware Under Test (Hardware bajo prueba)
MAE	Mean Absolute Error (Error Absoluto Medio)
PCH	Punto de Conexión del HUT
PCR	Punto de Conexión con la Red
PHIL	Power Hardware-In-the-Loop
PI	Proporcional – Integral
PR	Proporcional – Resonante
RTDS	Real Time Digital Simulator (Simulador digital en tiempo real)
RTS	Real Time Simulator (Simulador en tiempo real)
SG	Smart Grids (redes eléctricas inteligentes)
TI	Texas Instruments

Lista de Apéndices

Apéndice A. Filtro digital	84
Apéndice B. Sensores de tensión y corriente.....	85
Apéndice C. Pasos para ejecutar el circuito de inicialización y carga del bus DC.....	86
Apéndice D. Pasos para la ejecución de simulaciones de la interfaz virtual-to-power.....	87
Apéndice E. Modelos de las redes eléctricas adaptadas de la IEEE	89
Apéndice F. Documentos	91

Resumen

Título: Módulo basado en la técnica power hardware-in-the-loop para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica *

Autor: Ing. Sergio Manuel Brito García **

Palabras clave: Sistemas de distribución de energía eléctrica; convertidor electrónico de potencia; simulación en tiempo real; hardware-in-the-loop; power-hardware-in-the-loop; redes eléctricas inteligentes.

Descripción:

La evolución de las redes eléctricas hacia las redes eléctricas inteligentes (*Smart Grids*) ha impulsado la adopción de nuevas tecnologías que mejoran la eficiencia y flexibilidad de los sistemas eléctricos. Sin embargo, esta transformación plantea nuevos desafíos en términos de operación y control en entornos reales. En este contexto, las herramientas de simulación en tiempo real, especialmente la técnica *Power-Hardware-in-the-Loop* (PHIL), permiten la integración de equipos físicos en entornos virtuales, facilitando el desarrollo de estudios sobre estos desafíos y la implementación de pruebas seguras en condiciones cercanas a la realidad.

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un módulo de simulación en tiempo real basado en la técnica PHIL. El diseño se centra en la emulación de un sistema de distribución de energía eléctrica en su operación normal en estado estable. La integración de dispositivos de hardware reales, como cargas o generadores distribuidos, se realiza por medio de una interfaz a base de convertidores electrónicos de potencia usando una topología bidireccional AC/DC/AC en configuración *back-to-back*, cumpliendo un papel importante en la implementación de la técnica PHIL. De esta manera, el modelo del sistema de distribución es simulado en tiempo real en una plataforma digital y dispositivos reales bajo prueba son integrados al entorno de simulación mediante la interfaz de electrónica de potencia desarrollada y sistemas de sensado, permitiendo de esta forma realizar pruebas que combinan los dos sistemas (modelos de software y dispositivos de hardware reales) en una simulación en lazo cerrado. Se presentan resultados de simulación y experimentales del módulo desarrollado, los cuales permitieron verificar su funcionamiento y evaluar su desempeño ante variaciones de carga (dispositivo real bajo prueba).

Finalmente, con este trabajo se busca fortalecer los procesos de investigación y aprendizaje en el campo de las redes eléctricas inteligentes para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

*Tesis de Maestría

**Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Johann Farith Petit Suárez. Codirectores: Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, Dr. Juan Manuel Rey

Abstract

Title: Power Hardware-in-the-Loop-Based Module for Emulating Electric Power Distribution Systems *

Author: Eng. Sergio Manuel Brito García **

Keywords: Electric power distribution systems; power electronic converter; real-time simulation; hardware-in-the-loop; power-hardware-in-the-loop; smart grids.

Description:

The evolution of electrical grids toward smart grids has driven the adoption of new technologies that enhance the efficiency and flexibility of power systems. However, this transformation introduces new challenges in terms of operation and control under real-world conditions. In this context, real-time simulation tools—particularly the Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) technique—enable the integration of physical devices into virtual environments, facilitating the development of studies on these challenges and the implementation of safe testing under conditions close to reality.

This work presents the design and implementation of a real-time simulation module based on the PHIL technique. The design focuses on emulating a power distribution system under normal steady-state operation. The integration of real hardware devices, such as loads or distributed generators, is achieved through an interface based on power electronic converters using a bidirectional AC/DC/AC back-to-back topology, which plays a key role in the implementation of the PHIL technique. In this way, the distribution system model is simulated in real time on a digital platform, and real devices under test are integrated into the simulation environment via the developed power electronics interface and sensing systems, enabling testing that combines both systems (software models and real hardware devices) in a closed-loop simulation. Simulation and experimental results of the developed module are presented, which validated its operation and assessed its performance under load variations (real device under test).

Finally, this work aims to strengthen research and learning processes in the field of smart grids for students of Electrical and Electronic Engineering at the Universidad Industrial de Santander (UIS).

*Master's Thesis

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Department of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Director: Dr. Johann Farith Petit Suárez. Co-directors: Dra. María Alejandra Mantilla Villalobos, Dr. Juan Manuel Rey

1. Introducción

Actualmente, importantes avances que contemplan la modernización de las redes eléctricas están orientados hacia las redes eléctricas inteligentes, conocidas como *Smart Grids* (SG). Estos sistemas modernos se caracterizan por la integración de nuevas tecnologías que mejoran su eficiencia operativa y flexibilidad (Yee Chong et al., 2020). Entre estas tecnologías se destacan las infraestructuras de medición avanzada (*Advanced Metering Infrastructure*, AMI), las cuales proporcionan datos precisos para la gestión eficiente de la energía (Bansal & Singh, 2016), y los recursos energéticos distribuidos, como las fuentes de energía renovable, y los vehículos eléctricos (Bayindir et al., 2016a) (Sanchez-Acevedo & D'Arco, 2021). Las SG, además de permitir la integración de estas nuevas tecnologías, contribuyen a reducir la dependencia a las fuentes de energía convencionales a base de combustible fósiles por medio de la gestión de las fuentes de energía renovables (Bayindir et al., 2016b).

La implementación de estas tecnologías en las redes de distribución plantea nuevos desafíos en términos de calidad, confiabilidad, flexibilidad, estabilidad, operación y gestión de la energía del sistema eléctrico (Ullah et al., 2020). Los estudios de estos retos han sido apoyados por medio de herramientas de simulación de sistemas eléctricos de potencia (Magnago et al., 2021).

Las herramientas de simulación son esenciales en diferentes áreas de la investigación en el campo de la ingeniería eléctrica. Adquieren un papel fundamental en el modelado, recreación y análisis de sistemas eléctricos complejos (Ebeid et al., 2017a). La principal ventaja es que permiten simular las condiciones de funcionamiento de un sistema eléctrico en un entorno virtual y controlado (Nguyen et al., 2019). Esto resulta esencial para el diseño, desarrollo de pruebas e implementación de nuevas tecnologías (Silva & Solano, 2018). Estas herramientas de simulación no solo recrean condiciones reales de operación, sino que, además, facilitan la evaluación de escenarios complejos y ayudan en la

planificación previo a la implementación de un sistema eléctrico (Lucero-Tenorio et al., 2024) (Villamarín-Jácome et al., 2025).

Dentro de las técnicas de simulación más avanzadas, se destacan las simulaciones en tiempo real basadas en la técnica *Hardware-In-the-Loop* (HIL), gracias a que tienen la capacidad de combinar dispositivos de hardware reales, como cargas eléctricas, dispositivos de control, recursos energéticos distribuidos, entre otros, con un entorno de simulación en tiempo real (Huo et al., 2017a). Esta técnica permite evaluar el desempeño de equipos o sistemas bajo condiciones de operación cercanas a la realidad, garantizando resultados precisos y confiables (J. Shi et al., 2022a). En este enfoque, los sistemas eléctricos simulados interactúan en tiempo real con los dispositivos bajo prueba (*Hardware under Test*, HuT), permitiendo así, validar su funcionamiento en un entorno seguro y controlado (Genić et al., 2016).

Particularmente, para sistemas eléctricos de potencia, destaca la técnica *Power-Hardware-In-the-Loop* (PHIL), dado que integra equipos de potencia reales en la simulación en tiempo real, lo que facilita la evaluación del comportamiento dinámico del sistema y la interacción con el hardware en condiciones similares a la realidad (Cai et al., 2021) (Ruhe et al., 2020).

Este trabajo de investigación de maestría se centra en el diseño e implementación de un módulo de simulación en tiempo real basado en la técnica PHIL. Este módulo está diseñado específicamente para emular el comportamiento de un sistema de distribución de energía eléctrica en condiciones normales de operación y en estado estable, considerando la conexión a escala de cargas o generadores distribuidos reales. Para el desarrollo del trabajo se establecen una serie de objetivos y alcances como se especifican a continuación.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar un módulo de simulación basado en la técnica *Power Hardware-In-the-Loop* (PHIL) para emular la operación de un sistema de distribución ante la conexión a escala de cargas o generadores distribuidos.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un módulo basado en la técnica PHIL para la emulación de un sistema de distribución, considerando el uso de convertidores electrónicos de potencia para la conexión a escala de cargas o generadores distribuidos.

2. Implementar un modelo que permita emular un sistema de distribución en una plataforma dSPACE contemplando la conexión a escala de una carga o generador distribuido para un nodo del sistema, empleando una interfaz a base de convertidores electrónicos de potencia.

3. Evaluar la operación del módulo implementado bajo escenarios de conexión a escala de cargas para un nodo.

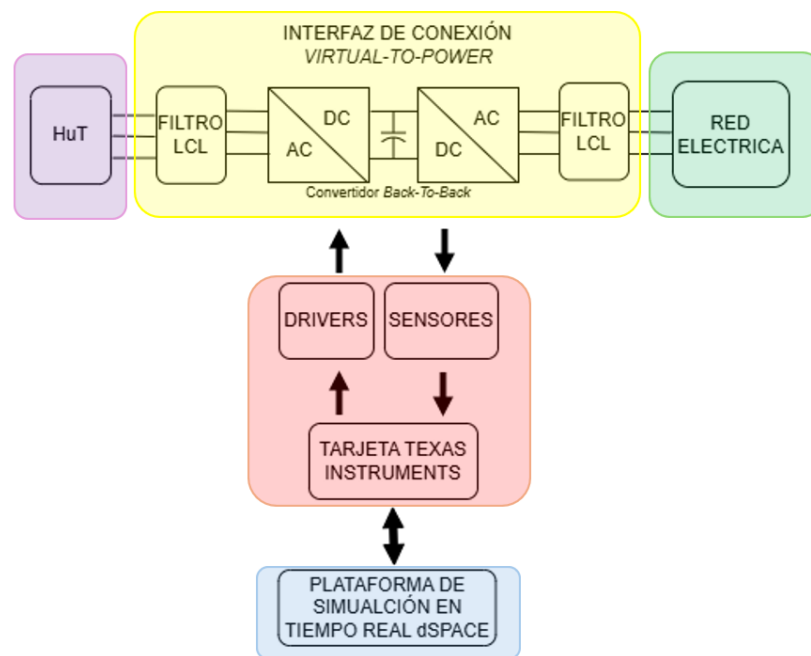
1.2. Alcances

Este trabajo de investigación está encaminado a desarrollar un módulo de simulación mediante la técnica PHIL para emular la operación de un sistema de distribución de energía eléctrica en condiciones normales de operación y en estado estable, considerando la integración de dispositivos de hardware reales, denominados hardware bajo prueba (HuT, por sus siglas en inglés). En este trabajo, el Hut corresponde a cargas eléctricas o generadores distribuidos (GD) a escala, y su integración con el sistema eléctrico simulado en tiempo real se realiza mediante una interfaz para la interconexión (interfaz de conexión *virtual-to-power*) implementada mediante el uso de convertidores electrónicos de potencia

controlados usando una topología trifásica bidireccional AC/DC/AC en configuración *back-to-back*. En la figura 1 se presenta la configuración general del modelo PHIL desarrollado.

Figura 1

Configuración general del modelo desarrollado



1.3. Divulgación científica

Titulo	Autores	Revista/Evento	Estado
Diseño de un módulo basado en la técnica Power hardware-In-the-Loop para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica	Sergio Manuel Brito García Johann Farith Petit Suárez María Alejandra Mantilla Villalobos, Juan Manuel Rey López	EIEI ACOFI, Colombia, Septiembre 2024	Publicado ¹

¹ EIEI ACOFI 2024: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3970>

Real-time simulation of electric power distribution systems using Power Hardware-In-the-Loop	Sergio M. Brito, María A. Mantilla, Juan M. Rey, Johann F. Petit	En preparación
--	--	----------------

1.4. Organización del documento

Este documento está estructurado en siete capítulos principales que detallan el desarrollo del trabajo de investigación. A continuación, se describe el contenido de cada capítulo:

El **capítulo 1** presenta el contexto del estudio, destacando la relevancia de la técnica de simulación PHIL en la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. Se definen los objetivos generales y específicos del trabajo, los cuales orientan el desarrollo de la investigación.

En el **capítulo 2** se desarrollan los fundamentos teóricos base para la investigación. Se describe la técnica de simulación en tiempo real y su implementación en simuladores digitales en tiempo real (RTDS, por sus siglas en inglés), como la plataforma de dSPACE. Se introduce el concepto de PHIL, sus bases y aplicaciones en el contexto de la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica, y se realiza una revisión de investigaciones relacionadas. Asimismo, se realiza una descripción general sobre los tipos de convertidores electrónicos de potencia, con un enfoque en los convertidores bidireccionales *back-to-back* (conversión AC/DC/AC).

El **capítulo 3** detalla el diseño del módulo basado en la técnica PHIL para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. Se abordan los componentes principales de la interfaz de conexión *virtual-to-power* que incluyen: el convertidor bidireccional AC/DC/AC, los filtros de conexión, el sistema de control, y el sistema de sensado. Asimismo, se presentan resultados preliminares de simulación de esta interfaz, los cuales sirven como base para la validación del diseño y su implementación.

En el **capítulo 4** se describe el desarrollo y ejecución de pruebas experimentales preliminares para la interfaz *virtual-to-power*. Se especifica el protocolo de pruebas, la creación de una interfaz gráfica en Matlab/Simulink y los resultados obtenidos. Además, se discuten los desafíos enfrentados al llevar a cabo la implementación, las soluciones propuestas y los ajustes realizados en los parámetros del sistema de control.

El **capítulo 5** aborda la implementación de los modelos del sistema de distribución de energía eléctrica en la plataforma dSPACE 1104.

En el **capítulo 6** se presenta el desarrollo de las pruebas experimentales del módulo completo propuesto. Se presenta la interfaz gráfica desarrollada en Matlab/Simulink y el protocolo para la realización de las simulaciones en tiempo real. Se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos. Además, se incluye el análisis de los resultados ante la conexión y variación de carga. Asimismo, se describe el montaje final del módulo PHIL y se visualizan sus componentes.

En el **capítulo 7** se concluye con un resumen de los hallazgos más importantes y las conclusiones generales del trabajo. Se realiza una síntesis sobre el cumplimiento de los objetivos planteados. Además, se describen las recomendaciones técnicas para futuras implementaciones e investigaciones relacionadas con el trabajo.

En el **capítulo 8** se evidencia la bibliografía del documento.

En el **capítulo 9** se presentan los anexos que complementan el documento.

2. Marco teórico

En este capítulo se proporciona el contexto teórico y conceptual base para el desarrollo del módulo basado en la técnica PHIL.

2.1. Simulación en tiempo real

La simulación en tiempo real es una herramienta fundamental en el desarrollo y validación de sistemas, equipos, y dispositivos. Se diferencia de la simulación fuera de línea, en donde el tiempo de ejecución de los modelos no está restringido por el tiempo real. En la simulación en tiempo real los cálculos deben ejecutarse en sincronía con el tiempo físico real del sistema o proceso bajo estudio, permitiendo así interactuar con dispositivos físicos (Zhang et al., 2024). En este tipo de simulaciones es esencial que el tiempo de ejecución de cada paso de la simulación sea igual o menor al paso de tiempo definido, esta condición permite integrar modelos computacionales con hardware real como en aplicaciones Hardware-in-the-Loop (HIL), donde se conforma un entorno semifísico para el desarrollo y validación de pruebas (Hao, Chen, Dusan, & Fei, 2023).

Una adecuada simulación en tiempo real requiere de una plataforma de hardware con altas capacidades de procesamiento, interfaces de entrada/salida de alta velocidad y la capacidad de ser compatibles con herramientas de programación, como por ejemplo, el entorno de Matlab/Simulink (Archetti et al., 2018).

2.2. Introducción al Power-Hardware-In-the-Loop (PHIL)

Existen diferentes técnicas de simulación en tiempo real, cada una con sus propias ventajas y aplicaciones de acuerdo con el enfoque o estudio que se desee abordar. Una de las técnicas es la denominada *Hardware-In-the-Loop* (HIL). Esta técnica posee variantes según su aplicación, entre las cuales se tiene la técnica *Power-Hardware-In-the-Loop* (PHIL). Su principal característica es que esta permite la integración de hardware real de potencia con simulaciones en tiempo real, lo que permite evaluar equipos bajo condiciones de operación cercanas a la realidad (Meyers et al., 2023). Dicho de otra manera, esta técnica permite probar y verificar el funcionamiento de los componentes reales ante una

variedad de escenarios y condiciones de operación, inclusive bajo situaciones difíciles de evaluar en un sistema real (Diaz et al., 2024).

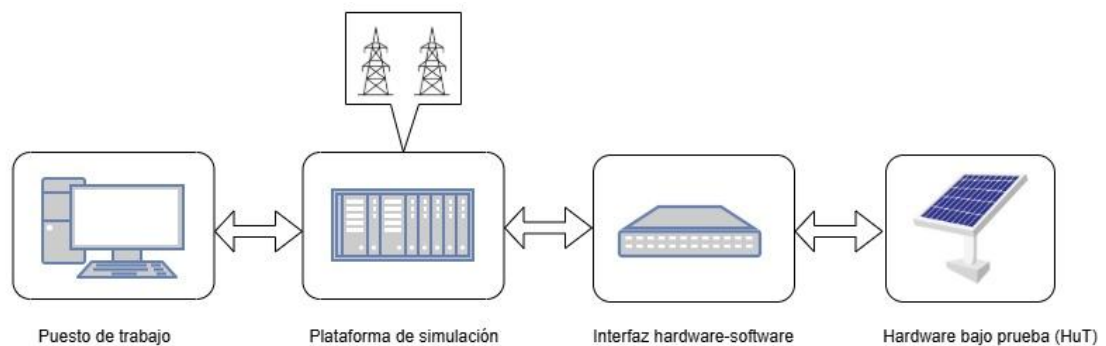
La técnica de simulación HIL se basa en la integración de modelos de software y componentes físicos (hardware) en un lazo de retroalimentación cerrado. En este proceso, el dispositivo bajo prueba (HuT, por sus siglas en inglés) se conecta mediante una interfaz a un simulador en tiempo real que tiene como tarea ejecutar el modelo que representa el comportamiento del sistema simulado. Los datos generados por el HuT se utilizan para alimentar los modelos de software. Las salidas generadas por el modelo de software se aplican al HuT para crear una interacción dinámica y continua (Heo et al., 2020).

En la actualidad, la técnica HIL se ha utilizado en el campo de los sistemas eléctricos de distribución para estudiar el impacto de la integración de nuevas tecnologías como las energías renovables (Liu et al., 2020).

En la figura 2 se presenta la estructura general para la implementación de un sistema PHIL.

Figura 2

Estructura general de un sistema PHIL



2.2.1. Hardware bajo prueba (HuT, Hardware under Test)

Estos representan los componentes físicos del sistema que se desean probar e interactúan con los modelos de software. Este hardware puede corresponder a generadores de energía eléctrica a base de fuentes renovables (Liu et al., 2020), dispositivos de control (Farias et al., 2021) (Maurya et al., 2021), entre otros.

2.2.2. Modelos de software

Estos representan el software de simulación el cual describe el comportamiento del sistema simulado por medio de modelos matemáticos. Como ejemplo, un modelo matemático que describe el comportamiento de un generador eólico (Nath et al., 2022).

2.2.3. Interfaz hardware- software

Esta representa el enlace de interconexión entre el HuT y la plataforma de simulación en donde se ejecutan los modelos de software. Esta interfaz es fundamental para que haya una comunicación bidireccional y continua. Esencialmente, permite que los datos generados por el HuT sean enviados a los modelos de software para alimentar la simulación en tiempo real. A su vez, posibilita que los datos derivados de las simulaciones procesadas por los modelos de software sean retroalimentan al HuT, facilitando así, una interacción constante entre los componentes físicos del sistema y la simulación. La capacidad para lograr esa interacción continua se logra gracias a la implementación eficiente y precisa de un sistema de sensado y adquisición de datos (Shi et al., 2022b) (Gravey et al., 2023). En ciertos casos también es necesario el uso interfaces de amplificación de potencia que permitan la interconexión entre el HUT y la plataforma de simulación, asegurando una correcta adecuación de las señales intercambiadas

entre estos dos sistemas (Han et al., 2020). Estas interfaces son comúnmente empleadas en la técnica PHIL, teniendo en cuenta que el HuT corresponde típicamente a un sistema o equipo real de potencia, por lo que toman el nombre de **interfaces de conexión *virtual-to-power***.

2.2.4. Plataforma de simulación

Esta plataforma representa el entorno en el que se lleva a cabo la ejecución del modelo de software. Esta plataforma puede basarse en un sistema computacional o una herramienta de simulación específica para soportar simulaciones para las implementaciones HIL. Su función principal es ofrecer los recursos de procesamiento necesarios para realizar simulaciones en tiempo real (Mojlish et al., 2017). Algunas de las plataformas más utilizadas para desarrollos HIL son dSPACE, OPAL-RT, y RTDS (Musse et al., 2017a). En esta investigación, se emplea una plataforma de simulación en tiempo real de dSPACE dado su capacidad de procesamiento, su apropiada integración con Matlab/Simulink y la facilidad de implementación en entornos HIL y PHIL.

2.2.4.1. Plataforma de simulación de dSPACE

dSPACE ofrece plataformas compactas y versátiles para implementar simulaciones en tiempo real, están diseñadas especialmente para aplicaciones de control, automatización y pruebas de sistemas de energía eléctrica. estas plataformas están equipadas con potentes procesadores multinúcleos y múltiples interfases de entrada/salida analógicas y digitales, lo que permite la ejecución en tiempo real de modelos complejos con frecuencias de muestreo del orden de los microsegundos (dSPACE, 2025).

2.3. Emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica

Los emuladores de sistemas de distribución de energía eléctrica son de gran importancia, estos representan la dinámica de estos sistemas en un entorno de prueba controlado, ya sea virtual o híbrido (virtual y físico), lo que permite el estudio de fenómenos como variaciones en los flujos de potencia, la

integración de recursos energéticos distribuidos y el impacto que generan las cargas eléctricas, sin representar riesgos para los sistemas reales (Ebeid et al., 2017b)(Huo et al., 2017b).

En la actualidad, las redes de distribución modernas se caracterizan por la creciente penetración de fuentes de energías renovables, sistemas de almacenamiento de energía, entre otras tecnologías. Esta integración presenta nuevos desafíos operativos en la red eléctrica (Cakir et al., 2022). La emulación mediante la técnica PHIL toma gran relevancia, ya que permite la realización de estudios y desarrollos que pueden facilitar el abordaje de esos desafíos.

2.4. Investigaciones relacionadas

En los últimos años, diversos trabajos de investigación han sido abordados mediante la implementación de técnicas de simulación HIL orientados al análisis de redes eléctricas inteligentes, integración de generación distribuida, validación de algoritmos de control, entre otros. A continuación, se presentan algunos desarrollos actuales.

(Sparn et al., 2018) presentan un banco de pruebas utilizando diferentes configuraciones de la técnica HIL para estudiar cómo interactúa una red inteligente con diferentes cargas residenciales. En este trabajo la red eléctrica se simuló en dSPACE y los equipos de control representaron el HuT.

(Musse et al., 2017b) presentan simulaciones de un sistema de distribución adaptado del sistema de pruebas IEEE 13 ante la penetración de un sistema fotovoltaico, utilizando la metodología HIL por medio de simuladores como RTDS y dSPACE. En este trabajo la red eléctrica se simuló en dSPACE y RTDS, y los equipos de control representaron el HuT.

(Du et al., 2018) proponen el desarrollo de un banco de pruebas mediante la metodología CHIL (*Controller Hardware-In-the-Loop*) que permite desarrollar pruebas de control de una Microrred,

utilizando controladores de hardware reales que cumplen con los requisitos definidos en IEEE St. 2030.7.

En este trabajo la red eléctrica se simuló en dSPACE y los equipos de control y convertidores representaron el HuT.

(D. Shi et al., 2017) proponen la implementación de un banco de pruebas de simulación mediante la técnica HIL para una microrred híbrida CA/DC, ante la integración de fuentes de generación distribuida y cargas tanto en CA como en DC. En este trabajo la red eléctrica se simuló en dSPACE y los equipos de control y convertidores representaron el HuT.

2.5. Convertidores electrónicos de potencia

En los sistemas eléctricos modernos, los convertidores electrónicos de potencia están diseñados para transformar y controlar el flujo de la energía eléctrica en diferentes formas de onda, niveles de tensión/corriente, y frecuencia (M, 2023). En las SG son fundamentales ya que permiten la transferencia controlada de energía, por ejemplo, en la integración de recursos energéticos distribuidos a base de generación renovable, sistemas de almacenamiento de energía, entre otros (Sekar et al., 2017).

2.5.1. Tipos y aplicaciones

Los convertidores electrónicos de potencia se clasifican en diferentes tipos según la conversión de energía y su aplicación. A continuación, se describen los principales tipos y algunas aplicaciones:

- **Convertidores AC/DC (Rectificadores):** estos dispositivos convierten corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés) en corriente continua (DC, por sus siglas en inglés). Son muy utilizados en aplicaciones industriales y domésticas. Entre sus aplicaciones se destaca su uso en fuentes de alimentación de equipos electrónicos, cargadores de baterías, entre otros (Amer et al., 2024).

- Convertidores DC/AC (Inversores): se encargan de transformar señales en corriente continua a corriente alterna. En la actualidad su uso es muy amplio, principalmente en sistemas de generación de energía renovable como paneles fotovoltaicos, generación mediante turbinas eólicas, entre otros (Allabakshu & M, 2025). Además, pueden ser requeridos para inyectar energía a la red eléctrica o para alimentar cargas en corriente alterna. Así mismo, estos dispositivos son fundamentales en la red eléctrica, al permitir el control de la potencia activa y reactiva inyectada a la red (Fatima et al., 2024).
- Convertidores DC/DC: estos se encargan de cambiar el nivel de tensión y/o corriente en sistemas de corriente continua. Además, según su función se dividen en elevadores de tensión (*boost converters*), reductores de tensión (*buck converters*) o una combinación de ambos (*buck-boost converters*). Entre sus principales aplicaciones se evidencia su uso en sistemas de almacenamiento de energía, vehículos eléctricos, microrredes eléctricas, entre otros (Lalmalsawmi & Biswas, 2022).
- Convertidores AC/AC: estos dispositivos convierten la corriente alterna en corriente alterna con distinta amplitud, frecuencia, forma de onda, o una combinación de las anteriores. Este tipo de convertidores tiene un amplio uso en la industria, en el arranque y control de velocidad de motores, en la regulación de tensión en redes de transmisión y distribución, entre otros (Mir et al., 2022).

2.5.2. Convertidor bidireccional *back-to-back* (AC/DC/AC)

El convertidor bidireccional *back-to-back* es una configuración muy utilizada debido a su capacidad de manejar flujos de energía en ambas direcciones. Este se compone de dos convertidores electrónicos de potencia que comparten un enlace de corriente continua. Esta configuración consta de dos etapas principales, una etapa de rectificación que convierte la corriente alterna en continua controlada para asegurar una tensión constante, y una etapa de inversión que transforma la corriente continua controlada en corriente alterna con unas características deseadas (Ebrahimian et al., 2021).

En este trabajo de investigación, se propone el uso de una topología bidireccional *back-to-back* trifásica como interfaz de conexión *virtual-to-power* entre el sistema simulado (red de distribución) y el HuT de potencia. La elección de esta topología fue realizada principalmente por su carácter bidireccional, teniendo en cuenta que permite la conexión de dispositivos bajo prueba correspondientes tanto a cargas eléctricas, como a generadores distribuidos, los cuales demandan la capacidad de manejo de flujo de energía en ambas direcciones. Asimismo, al ser una topología totalmente controlada, es decir, las dos etapas de conversión de la energía (rectificación e inversión de la señal) son controladas, es posible demandar o inyectar una corriente eléctrica trifásica balanceada y con bajo contenido armónico a la red de suministro de energía. Cabe destacar que, mediante el control del convertidor, se puede establecer y regular en tiempo real la señal de tensión trifásica suministrada al HuT de potencia.

3. Diseño del sistema

A continuación, se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta para el diseño del módulo basado en la técnica PHIL, el cual permite la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica considerando la integración de dispositivos de hardware reales de potencia (hardware bajo prueba-HuT), como cargas o generadores distribuidos, para un punto de conexión trifásico del sistema emulado. El módulo fue diseñado considerando la conexión de HuT con potencias nominales de operación de hasta 2 [kVA], lo cual se ve reflejado en el diseño de la interfaz *virtual-to-power* implementada a base del convertidor bidireccional *back-to-back*.

3.1. Diseño del módulo basado en la técnica PHIL

El diagrama del módulo propuesto basado en la técnica PHIL se presenta en la figura 3. El módulo permite la integración de dispositivos (HuT), los cuales pueden corresponder a cargas eléctricas o generadores distribuidos (GD), dentro del sistema simulado para un nodo específico de la red de distribución emulada. Esta integración se realiza a través de una interfaz, denominada para este trabajo

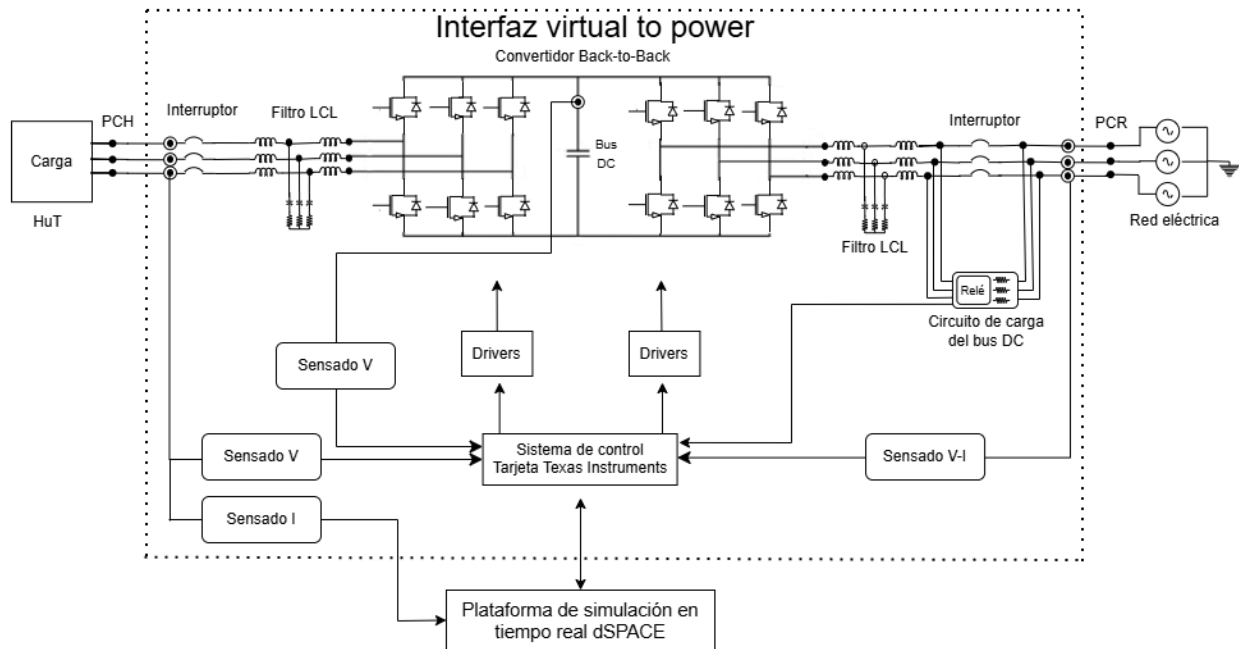
como interfaz de conexión *virtual-to-power*, cuya función es garantizar una interacción precisa entre el entorno simulado y el hardware físico. Esta interfaz se implementa mediante el uso de convertidores electrónicos de potencia (convertidor bidireccional back-to-back), filtros pasivos tipo LCL para la atenuación de armónicos y el mejoramiento de las señales, sensores de tensión y corriente para la adquisición de datos en tiempo real, drivers de aislamiento y acondicionamiento de señal para una adecuada comunicación con el sistema de control, y dispositivos de protección. El control de la interfaz *virtual-to-power* se lleva a cabo mediante la tarjeta de desarrollo TMS320F28379D de Texas Instruments, la cual posee la capacidad de procesamiento adecuada para la implementación de algoritmos de control en tiempo real con una apropiada precisión. En la figura 3, el punto de conexión de la interfaz *virtual-to-power* con la red eléctrica de alimentación se denomina PCR (punto de conexión con la red eléctrica).

Por otro lado, el modelo de la red de distribución de energía eléctrica es ejecutado en tiempo real en una plataforma de dSPACE. Esta plataforma recibe los datos correspondientes a la corriente demandada por el HuT y, a partir de dicha información, resuelve el modelo de la red de distribución para determinar la tensión resultante en el punto de conexión del HuT en el sistema de distribución emulado.

Posteriormente, esta tensión calculada se envía al sistema de control de la interfaz *virtual-to-power*, con el objetivo de reproducir dicha tensión en el punto de conexión del HuT (PCH) a esta interfaz, ver figura 3. Este proceso se repite en cada paso de simulación del sistema.

Figura 3

Configuración del módulo PHIL propuesto para emular sistemas de distribución de energía eléctrica.



3.1.1. Convertidor AC/DC/AC y drivers

El convertidor AC/DC/AC utilizado en este trabajo corresponde a una topología *back-to-back* bidireccional trifásica, posibilitando el intercambio de potencia en ambos sentidos. Para su selección, se priorizaron dispositivos comerciales que ofrecieran flexibilidad y compatibilidad con aplicaciones de PHIL. En función de estos criterios, se seleccionaron dos inversores de potencia trifásicos de referencia SPM-VFD de Taraz Technologies, los cuales emplean transistores de efecto de campo (FET) de carburo de silicio (SiC). Esta tecnología permite alcanzar una mayor eficiencia, reducción de pérdidas por conmutación y operación a frecuencias elevadas, lo que mejora el rendimiento general del sistema. Además, estos inversores incluyen drivers de compuerta para el control de los dispositivos de potencia SiC-FET. La función principal de estos drivers consiste en amplificar las señales de control provenientes

del microcontrolador, proporcionando los niveles de tensión y corriente requeridos para activar o desactivar de manera segura los transistores de potencia. De esta manera, los drivers actúan como una etapa de interfaz entre la electrónica de control y la etapa de potencia, garantizando que las señales de conmutación se apliquen con los tiempos y amplitudes adecuados.

Cada uno de los inversores desempeña un papel fundamental en la configuración *back to back*, y sus especificaciones se encuentran en la referencia (Taraz Technologies, 2025). Sus principales especificaciones técnicas son las siguientes:

Tabla 1

Principales especificaciones del inversor.

Parámetro	Condición de prueba	Valor	Unidad
Voltaje de entrada de DC	25C	600	Vdc
Voltaje de entrada de AC	Monofásico o trifásico	420	Vac
Corriente de salida	@ 2kHz, TA 25C, 600V Entrada DC	9.5	Arms
Potencia de salida	@ 2kHz, TA 25C, 600V Entrada DC	6.1	kW
Potencia de salida	@ 2kHz, 25C, 420V Entrada AC	3.1	kW
Frecuencia de conmutación	Max.	200	kHz

Para la tensión de referencia del bus de continua se determinó un valor de 420 [V] de acuerdo con simulaciones realizadas, para esto se tuvo en cuenta que el valor debe ser mayor a la tensión de línea pico de la red, que corresponde aproximadamente a 294 [V]. En términos de seguridad y protección, el convertidor cuenta con interruptores termomagnéticos en la entrada y salida para la

desconexión ante condiciones de fallas, protegiendo tanto el hardware real como el sistema en general. Además, los inversores de Taraz Technologies incorporan mecanismos de protección internos que resguardan los dispositivos ante condiciones operativas anómalas, aumentando la confiabilidad del sistema.

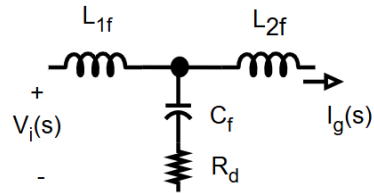
3.1.2. Filtros de conexión

El módulo cuenta con dos filtros LCL trifásicos amortiguados, uno en su entrada para la interconexión con la red de alimentación en el punto PCR (ver figura 1), minimizando el impacto de los armónicos generados por la conmutación del inversor en la red eléctrica, y el segundo filtro en la salida, asegurando una adecuada calidad de la señal para la tensión proporcionada al HuT en el punto de conexión PCH. La función principal de ambos filtros es mitigar los armónicos de alta frecuencia introducidos por la conmutación de los convertidores de potencia, mejorando así la calidad de las señales de corriente y tensión. En la figura 4 se observa el esquema del filtro para una de las fases. Para el diseño se tienen en cuenta las siguientes especificaciones:

- Tensión nominal de fase de la red eléctrica: 120 [Vrms].
- Frecuencia angular de la red eléctrica: 120π [rad/s].
- Potencia activa máxima: 2000 [W].
- Tensión del bus de DC: 420 [V].
- Frecuencia de conmutación: 10 [kHz].
- Rizo pico-pico máximo para la corriente por L_{1f} (ΔI): 40% de la corriente pico máxima inyectada.

Figura 4

Esquema por fase del filtro LCL.



Se parte de la función de transferencia que representa la relación entre la corriente de salida y la tensión de entrada del filtro:

$$H(s) = \frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{R_d C_f s + 1}{s^3 (L_{1f} L_{2f} C_f) + (L_{1f} + L_{2f}) R_d C_f s + (L_{1f} + L_{2f}) s} \quad (1)$$

El diseño del filtro se realizó de acuerdo con la referencia (Wehmuth et al., 2021), los resultados de los cálculos son los siguientes:

$$C_f \leq 6.14 [\mu F] \quad (2)$$

$$L_{1f} = L_{2f} = 2,22 [mH] \quad (3)$$

$$R_d = 5,44 [\Omega] \quad (4)$$

Estos resultados se ajustaron posteriormente a valores de componentes comerciales. Los valores finales seleccionados para los filtros LCL son los siguientes:

- Inductores: 2.5 [mH]
- Capacitores: 4.7 [μ F]
- Resistencias de amortiguamiento: 5 [Ω]

3.1.3. Sistema de control de la interfaz *virtual-to-power*

El sistema de control del convertidor *back-to-back* se implementa en el microcontrolador TMS320F28379D C2000 de Texas Instruments, el cual ejecuta los algoritmos en tiempo real con la capacidad de procesamiento necesaria para este tipo de implementación. El sistema de control está compuesto por tres lazos: control de la tensión en el PCH, control de corriente en el PCR, y control de la tensión del bus de continua del convertidor.

El primero de los lazos es empleado para controlar la tensión en el punto de conexión del HuT (PCH), la cual debe seguir la señal de referencia de tensión para un nodo del sistema de distribución emulado (nodo de conexión del HuT). La señal de referencia de tensión es calculada por la plataforma dSPACE, que ejecuta el modelo en tiempo real de la red de distribución. Para el control de la tensión en el PCH se implementa una estrategia de control proporcional-resonante (PR).

Para el segundo lazo se emplea otro controlador PR el cual se encarga de regular la corriente inyectada o demandada por la interfaz *virtual-to-power* en el punto de conexión con la red eléctrica (PCR). Ambos controladores PR incluyen en su salida una técnica de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), la cual se encarga de generar los pulsos de disparo para la conmutación de los convertidores, sintetizando la tensión de salida de los controladores PR.

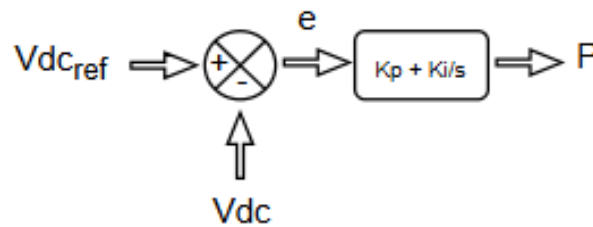
Finalmente, el tercer lazo de control incluye un controlador proporcional-integral (PI) encargado de regular la tensión del bus de DC del convertidor *back-to-back*. Este control tiene un papel importante en el balance de potencia activa entre las dos etapas de conversión, asegurando que la tensión del bus de DC del convertidor se mantenga dentro de los límites establecidos. De esa forma, se evita el desequilibrio de potencia. Esta estrategia de control va acompañada de un algoritmo que permite calcular la corriente de referencia a inyectar o demandar por la interfaz *virtual-to-power* de la red de alimentación. El algoritmo se basa en la teoría de la potencia instantánea y determina la corriente de

referencia empleada por el control de corriente en el PCR según la potencia activa a inyectar o demandar de la red de suministro.

3.1.3.1 Controlador de la tensión del bus de corriente directa. El bus de DC del convertidor back-to-back requiere un control preciso de la tensión para garantizar un equilibrio energético entre sus etapas de conversión AC/DC y DC/AC y así mantener la estabilidad del sistema. Se implementa un control proporcional integral usando como variable de control la potencia activa intercambiada con la red eléctrica. En la figura 5 se muestra el esquema del controlador PI.

Figura 5

Diagrama de bloques del controlador PI del bus de DC.



El diseño se fundamenta en el balance de la energía almacenada en el capacitor del bus de DC, cuya capacitancia corresponde al valor integrado en el inversor, el cual es de:

$$C = 940 [\mu F] \quad (5)$$

La energía almacenada en el capacitor se calcula mediante:

$$E = \frac{1}{2} V_{dc}^2 \quad (6)$$

Donde V_{dc} es la tensión del bus de DC; para una tensión nominal de 420 [V] se obtiene:

$$E = 82.87 [J] \quad (7)$$

Para el cálculo de la potencia asociada con el cambio de energía en el bus, se considera un intervalo de cinco periodos de la red eléctrica. Con la frecuencia de 60 [Hz], el periodo es:

$$T = \frac{1}{60} s = \frac{5}{60} = 0.0833 [s] \quad (8)$$

La potencia es:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{82.87}{0.0833} = 994.896 [W] \quad (9)$$

Esta potencia es utilizada como la variable que debe ajustar el control para mantener constante la tensión del bus de DC ante perturbaciones o cambios de operación del sistema.

Seguidamente se toma la formula estándar del controlador PI:

$$P(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (10)$$

Donde:

- $e(t) = V_{dc_{ref}} - V_{dc}$, es el error
- $P(t)$ es la potencia activa de referencia.
- K_p es la ganancia proporcional.
- K_i es la ganancia integral.

Se define la ganancia proporcional como:

$$K_p = \frac{P}{e(t)} \quad (11)$$

Tomando un error elevado de 130, $K_p = 8$. Esta ganancia asegura la respuesta proporcional efectiva.

La ganancia integral K_i se selecciona con base en el tiempo deseado para la eliminación del error, si se desea que se elimine en cinco periodos de la red, se tiene:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{8}{0.0833} = 96 \quad (12)$$

Finalmente, es importante resaltar que el control de la tensión del bus (DC) no solo tiene como finalidad mantener la tensión del bus en el valor de referencia establecido, sino que además establece el mecanismo mediante el cual se define el flujo de potencia activa entre el convertidor y la red. En esta etapa, el controlador de tensión del bus DC genera una potencia activa de referencia P , la cual es utilizada para calcular las corrientes de referencia trifásicas que deben ser inyectadas en el punto de conexión a la red (PCR) por el convertidor.

A partir de la tensión trifásica en el PCR en el sistema de coordenadas abc , denotada como:

$$v_{abc}^{ref} = [v_a \ v_b \ v_c]^T \quad (13)$$

Se realiza la transformación al sistema de coordenadas estacionarias $\alpha\beta$ mediante la transformación de Clarke, dada por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} v_{abc}^{ref} \quad (14)$$

Una vez obtenidas las componentes de tensiones en el plano $\alpha\beta$, se calculan las corrientes de referencia en dicho sistema de coordenadas a partir de la potencia activa P y la potencia reactiva Q .

Estas corrientes se determinan como:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

En este trabajo, la potencia reactiva de referencia puede fijarse según los requerimientos del sistema, en este estudio se asigna un valor de cero $Q = 0$. De esta manera, la corriente de referencia queda directamente asociada a la potencia activa para mantener el balance energético del bus DC.

Finalmente, las corrientes de referencia en el sistema $\alpha\beta$ son transformadas nuevamente a los ejes coordenados abc mediante la transformada inversa de Clarke, obteniendo las referencias de corriente utilizadas por el controlador de corriente:

$$\begin{bmatrix} i_a^{ref} \\ i_b^{ref} \\ i_c^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.1.3.2 Control de corriente en el PCR. Para garantizar el seguimiento preciso de las señales de corriente de referencia en el PCR, se implementaron controladores de tipo proporcional resonante (PR) amortiguado. Este controlador se selecciona debido a su capacidad para seguir ondas senoidales. Su estructura está dada por la siguiente ecuación (Zmood & Holmes, 1999) en el dominio s :

$$G_{PR}(s) = k_{pr} + \frac{K_{ir}s}{s^2 + \omega_\alpha s + \omega_0^2} \quad (17)$$

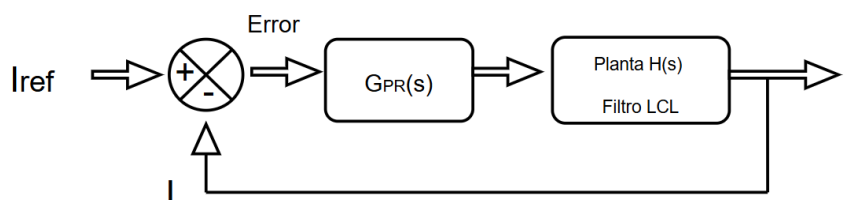
Donde:

- K_{pr} es la ganancia proporcional.
- K_{ir} es la ganancia resonante.
- $\omega_0 = 2\pi f_0$ es la frecuencia de resonancia ($f_0 = 60$ [Hz] para el caso de estudio).
- ω_α es el ancho de la campana de resonancia ($\omega_\alpha = 2\pi$ [rad/s]).

Como etapa inicial para la sintonización de los controladores PR, se optó por el método de Ziegler-Nichols, el cual permite obtener valores aproximados de las ganancias a partir del comportamiento del sistema en lazo cerrado de un control proporcional integral. Este enfoque es muy utilizado debido a su eficiencia y calidad en procesos de control (Ogata, 2009). En la figura 6 se muestra el esquema del controlador PR.

Figura 6

Diagrama de bloques del controlador PR para el seguimiento de corriente.



Luego se determina la función de transferencia en lazo cerrado teniendo en cuenta la función de transferencia del filtro LCL indicado anteriormente en (1). Se considera un controlador proporcional para determinar la ganancia crítica, haciendo $G_{PR}(s) = K_{cr}$ se obtiene:

$$\frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{K_{cr}(R_d C_f s + 1)}{s^3(L_{1f}L_{2f}C_f) + (L_{1f} + L_{2f})R_d C_f s^2 + (L_{1f} + L_{2f})s + K_{cr}(R_d C_f s + 1)} \quad (18)$$

Al denominador de esta función de transferencia se le conoce como ecuación característica y se le aplica el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz (Ogata, 2009). Esto permite obtener el valor de la ganancia crítica:

$$K_{cr} = \frac{-(L_{1f} + L_{2f})^2 R_d C_f}{(L_{1f} + L_{2f})(R_d C_f)^2 - L_{1f}L_{2f}C_f} \quad (19)$$

Al reemplazar los valores del filtro LCL diseñado anteriormente se obtiene:

$$K_{cr} = 22.075 \quad (20)$$

Luego es necesario hallar la frecuencia de oscilación sostenida con la ecuación característica, para esto se reemplaza el término s por $j\omega$ y se tiene lo siguiente:

$$j\omega(-\omega^2 L_{1f} L_{2f} C_f + L_{1f} + L_{2f} + K_{cr} R_d C_f) + K_{cr} - (L_{1f} + L_{2f}) R_d C_f j\omega^2 \quad (21)$$

Esta ecuación tiene una parte real y una imaginaria, las cuales deben igualarse a cero y despejarse ω^2 de la siguiente manera:

$$\omega^2 = \frac{L_{1f} + L_{2f} + K_{cr} R_d C_f}{L_{1f} L_{2f} C_f} \quad (22)$$

$$\omega^2 = \frac{K_{cr}}{(L_{1f} + L_{2f}) R_d C_f} \quad (23)$$

El siguiente paso consiste en reemplazar el valor de K_{cr} en una de las dos ecuaciones dado que ambas dan el mismo resultado, y se obtiene:

$$\omega = 13706.67 \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (24)$$

Por último, se halla la ganancia proporcional y la ganancia integral de la siguiente manera:

$$K_{pr} = 0.45 * K_{cr} = 9.9337 \quad (25)$$

$$K_{ir} = \frac{K_{pr}}{\frac{2\pi}{13706.67 * 1.2}} = 26004.44 \quad (26)$$

3.1.3.3 Control de la tensión en el PCH. Para el control de la tensión en el PCH también se utilizan controladores PR, su esquema se muestra en la figura 7 y estructura como se presenta en la ecuación (17). Luego se determina la función de transferencia en lazo cerrado partiendo de la función de transferencia del filtro LCL indicado en (1). Se considera un controlador proporcional para determinar la ganancia crítica, haciendo $G_{PR}(s) = K_{cr}$ se obtiene:

$$\frac{Vac(s)}{Vac_{ref}(s)} = \frac{K_{cr} L_2 (R_d C_f s + 1)}{s^2 (L_{1f} L_{2f} C_f) + (L_{1f} + L_{2f}) R_d C_f s + (L_{1f} + L_{2f}) s} \quad (27)$$

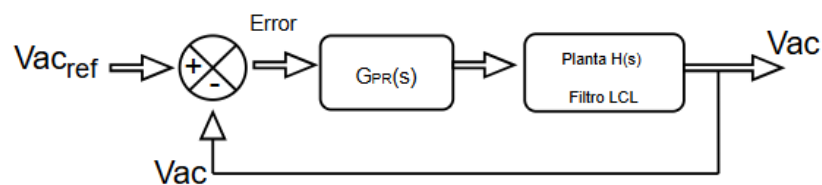
Siguiendo la misma metodología utilizada para el cálculo de las ganancias proporcional y resonante del controlador de corriente, se calculan las ganancias para el controlador de tensión. De estos cálculos se obtuvieron los siguientes valores:

$$K_{pr} = 1.423 \quad (28)$$

$$K_{ir} = 1409.9 \quad (29)$$

Figura 7

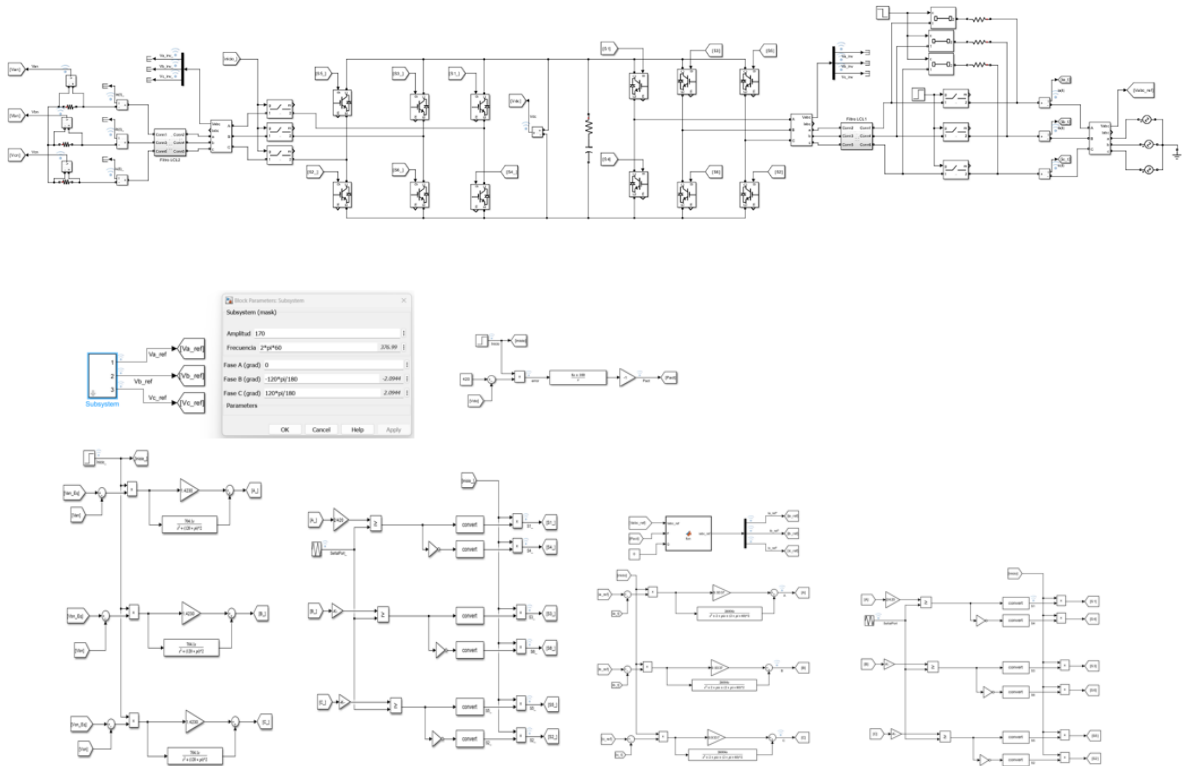
Diagrama de bloques del controlador PR para el seguimiento de tensión.



3.1.3.4. Verificación preliminar del diseño de los controladores mediante simulación. Con los valores de diseño especificados en el presente capítulo, se llevó a cabo la verificación preliminar del desempeño del sistema de control mediante simulaciones en Matlab/Simulink. En estas simulaciones, los componentes eléctricos y electrónicos fueron representados mediante sus respectivos bloques funcionales, con el fin de emular el comportamiento de los convertidores, la etapa de filtrado, el bus de DC, la carga conectada en el PCH, un equivalente de la red eléctrica y los lazos de control implementados. El objetivo principal de esta etapa fue evaluar la capacidad del convertidor AC/DC/AC y las estrategias de control implementadas para reproducir las condiciones de operación esperadas en el entorno PHIL. En la figura 8 se muestra el esquema general del modelo en simulink correspondiente a la interfaz virtual-to-power.

Figura 8

Modelo en simulink de la interfaz virtual-to-power.



Para la simulación se consideró la conexión de una carga trifásica resistiva balanceada equivalente de 2 kW en el punto de conexión del hardware bajo prueba (HuT), denominado PCH. La carga fue representada mediante resistencias conectadas en estrella, lo cual facilita la evaluación de la estabilidad y el adecuado funcionamiento del sistema de control.

Previo a la simulación, se establecieron los parámetros operativos del convertidor, que incluyen:

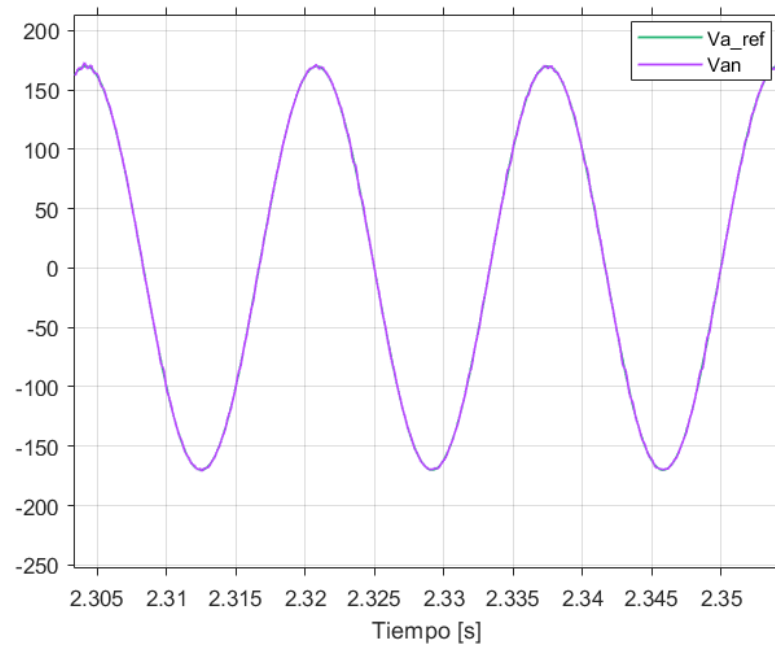
- **Tensión de referencia del bus DC:** 420 V
- **Frecuencia de conmutación (PWM):** 10 kHz
- **Frecuencia fundamental:** 60 Hz

- **Capacitancia del bus DC:** 940 [μF], valor integrado en el inversor (según especificación del fabricante).
- **Estrategia de modulación:** PWM sinusoidal trifásica con señal portadora triangular.
- **Controladores implementados:** lazo de control PR de corriente en el lado de la red (PCR), lazo de control PR de tensión en el lado del PCH, y control PI de la tensión del bus de DC.

En la figura 9 se presenta la comparación entre la tensión de salida de una fase en el punto de conexión del HuT (PCH) y la tensión de referencia correspondiente. Esta comparación permite verificar la capacidad del lazo de control para seguir la señal de referencia establecida. De igual manera se muestra en la figura 10 la comparación entre la corriente de salida en el punto de conexión a la red (PCR) y la corriente de referencia que se espera en dicho punto de conexión. Este análisis es fundamental para validar el desempeño del controlador de corriente, asegurando que la inyección de corriente a la red se realice adecuadamente. Adicionalmente, en la figura 11 se muestra el comportamiento de la tensión en el bus de DC durante la prueba, donde se compara la tensión medida en el capacitor del enlace de continua con la tensión de referencia establecida en 420 [V]. El objetivo de este controlador es mantener constante el valor de tensión, compensando las variaciones energéticas entre los convertidores del lado de la red y del lado del PCH. En esta figura se puede evidenciar la presencia de un transitorio que inicia a los dos segundos de la prueba, este se debe a la conexión de la carga en ese instante de tiempo.

Figura 9

Resultados del control de tensión en el PCH: tensión de referencia vs. tensión medida en el PCH para la fase a.

**Figura 10**

Resultados del control de corriente en el PCR: corriente de referencia vs. corriente medida en el PCR para la fase a.

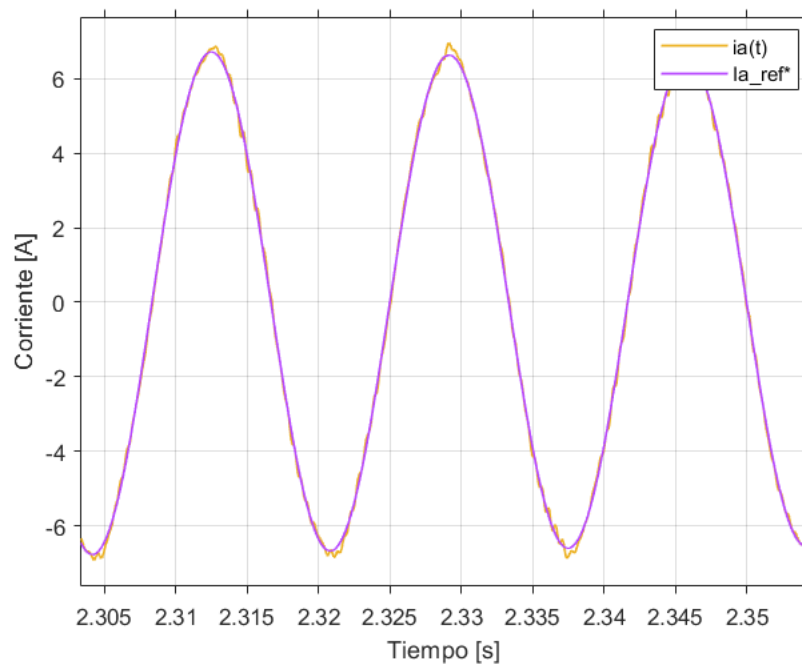
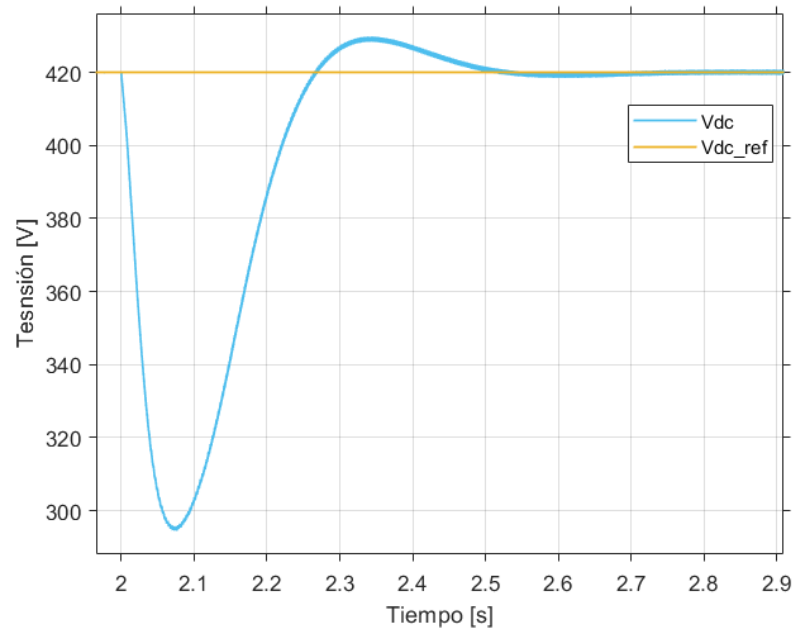


Figura 11

Resultados del control del bus de DC: tensión de referencia vs. tensión medida en el bus de DC.



3.1.4. Sistema de sensado

Para la etapa de sensado de las señales de tensión y corriente del módulo, tal como se observa en la figura 3, se emplean tres módulos de referencia USM-3IV de Taraz Technologies, los cuales cumplen una función fundamental en la adquisición de señales eléctricas para la correcta operación del sistema de control. Cada módulo de sensado cuenta con tres sensores de tensión y corriente. Estos sensores proporcionan la retroalimentación necesaria para el sistema de control. Además, las señales de corriente demandadas por el HuT son realimentadas a la plataforma dSPACE, donde se ejecuta el modelo en tiempo real de la red de distribución. Este proceso permite actualizar dinámicamente el estado de las variables del sistema de distribución.

El módulo de sensado utilizado en el desarrollo de este trabajo es el USM-3IV de Taraz Technologies y cuenta con las siguientes especificaciones principales:

- Rango de tensión seleccionable de 10X ($\pm 100V$) y 100X ($\pm 1000V$).
- Rango de detección de corriente de $\pm 100A$.
- Salida BNC bipolar de $\pm 10V$ para osciloscopio y dSPACE.
- Salida unipolar seleccionable de 3V/5V para FPGA y DSP.
- Ancho de banda aislado de 100kHz para tensión y 200kHz para corriente.

3.1.5. Plataforma dSPACE DS1104

La plataforma dSPACE DS1104 es una tarjeta de procesamiento en tiempo real utilizada en investigación, desarrollo y validación de algoritmos o modelos para sistemas eléctricos y electrónicos. Esta tarjeta permite la implementación y prueba de controladores o modelos de sistemas, bajo esquemas HIL y PHIL, garantizando una interacción precisa entre el modelo de software y los componentes reales del sistema (dSPACE, 2025).

La tarjeta DS1104 se integra fácilmente con el entorno de desarrollo MATLAB/Simulink mediante el paquete dSPACE Real-Time Interface (RTI), esto representa una de las principales ventajas de la plataforma. Este entorno permite diseñar, validar e implementar modelos de sistemas bajo estudio o algoritmos de control mediante una interfaz gráfica orientada en bloques.

4. Pruebas experimentales preliminares para la interfaz *virtual-to-power*

En este capítulo se presentan las pruebas experimentales preliminares realizadas sobre la interfaz *virtual-to-power* del módulo basado en la técnica Power Hardware-in-the-Loop (PHIL). El propósito principal de estas pruebas es evaluar el desempeño funcional de la interfaz, del sistema de

control y del sistema de sensado, en un entorno controlado y seguro, previo a la ejecución de pruebas en tiempo real con el hardware completo.

El *hardware* bajo prueba en estas pruebas experimentales corresponde a una carga resistiva trifásica y balanceada de 600 W, la cual se conecta al PCH. Previo al desarrollo de las pruebas de la interfaz *virtual-to-power* completa, fue necesario implementar y verificar de forma independiente el correcto funcionamiento de los controladores de tensión y corriente de los inversores del sistema, los cuales se describen a continuación.

4.1. Descripción de la prueba experimental preliminar del control de tensión

El objetivo de esta prueba es verificar la estabilidad y el desempeño del controlador de tensión implementado en el inversor del módulo, asegurando el correcto seguimiento de la referencia en el punto de conexión del HuT (PCH). Se emplea uno de los inversores del módulo, al cual se le aplicó una tensión DC fija en su bus de continua. El sistema de control implementa la estrategia proporcional resonante (PR) amortiguada, diseñado para mantener las tensiones de salida trifásicas dentro de los valores de referencia. La generación de las señales de referencia se realiza mediante un bloque de generación de señales en Matlab/Simulink, configurado para producir ondas senoidales trifásicas balanceadas a 60 Hz de 35 Vrms por fase. En la tabla 2 se muestran los parámetros de configuración para la prueba preliminar de control de tensión.

Tabla 2

Parámetros para la prueba experimental de control de tensión.

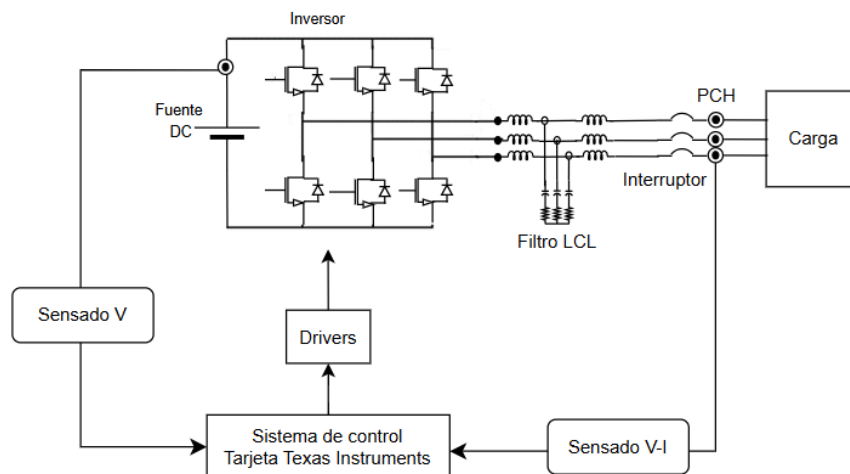
Parámetro	Valor
Control de tensión (PR amortiguado)	--
Frecuencia de conmutación del inversor	10 [kHz]
Tensión del bus DC	120 [V]

Tensión AC de referencia	35 [V rms]
Frecuencia de salida de la señal AC de referencia	60 [Hz]
Carga resistiva trifásica balanceada	600 [W]

En la figura 12 se muestra el esquema del sistema implementado para la validación del control de tensión.

Figura 12

Esquema para verificar el funcionamiento del control de tensión en AC en el PCH.



4.2. Descripción de la prueba experimental preliminar del control de corriente

El objetivo de esta prueba es validar el correcto funcionamiento del control de corriente del inversor y la capacidad del sistema para regular la corriente inyectada hacia la red bajo condiciones de tensión controladas. Para esta configuración, el inversor se conectó entre una fuente DC fija (en el bus de continua) y una fuente AC programable (en el lado de alterna). La fuente AC programable desempeñó el papel de la red, proporcionando una tensión trifásica controlada.

Los valores de tensión aplicados al inversor en ambos lados (DC y AC) se ajustaron de manera coherente con las condiciones de operación del inversor. En esta prueba se conecta una carga resistiva trifásica balanceada de baja potencia entre el inversor y la fuente AC programable. Esta configuración permitió evaluar la respuesta del controlador al regular la corriente inyectada por el inversor. En la tabla 3 se muestran los parámetros de configuración para la prueba preliminar de control de corriente.

Tabla 3

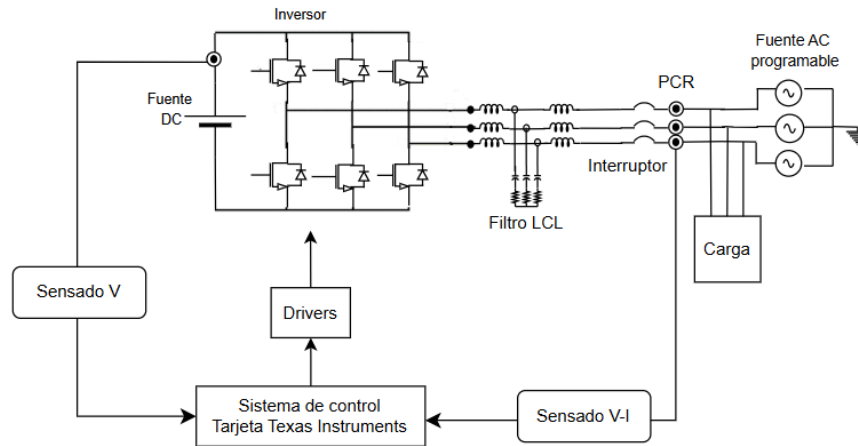
Parámetros para la prueba experimental de control de corriente.

Parámetro	Valor
Control de corriente (PR amortiguado)	—
Tensión fija aplicada al bus de continua	60 [V]
Tensión por fase de la fuente AC programable	26 V [pico]
Frecuencia de operación del sistema	60 [Hz]
Carga resistiva trifásica balanceada	25 [W]

En la figura 13 se muestra el esquema del sistema implementado para la verificación del control de corriente.

Figura 13

Esquema para verificar el funcionamiento del control de corriente en AC en el PCR.



Luego de la verificación del correcto funcionamiento de cada control de manera independiente, se procedió a implementar la interfaz *virtual-to-power* realizando la conexión de los dos convertidores en su bus de DC para conformar la topología *back-to-back* de la figura 3. La interfaz incluye un circuito de inicialización que tiene la función de cargar el bus DC a la tensión adecuada para su implementación.

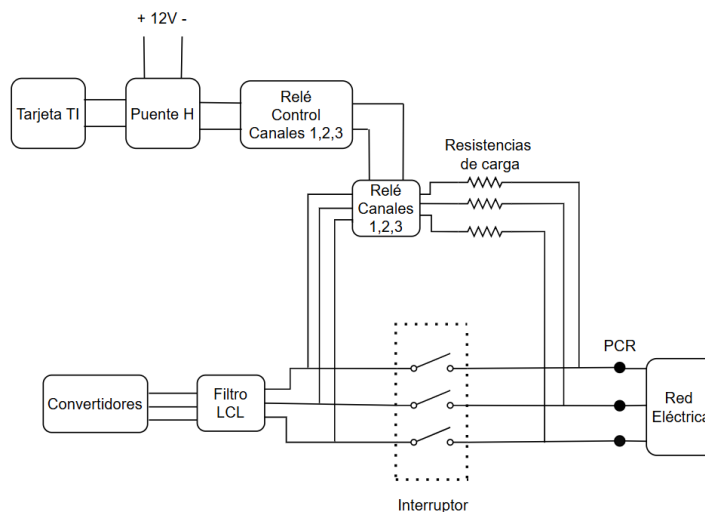
4.3. Circuito de inicialización y carga del bus DC de la interfaz *virtual-to-power*

Para ejecutar adecuadamente la prueba experimental de la interfaz *virtual-to-power*, es necesario implementar un circuito de inicialización del bus de DC, como se muestra en la figura 14. Su propósito es evitar sobre picos de corriente y cargar de manera gradual el capacitor del bus DC de los inversores hasta un valor cercano a la tensión pico de línea de la red eléctrica, valor definido durante el diseño del módulo. Este circuito incorpora, por cada fase, una resistencia de 1000 Ω , denominadas resistencias de carga. Su función es limitar la corriente inicial y permitir que el capacitor del bus DC se cargue de manera gradual a una tensión inferior al valor pico de la tensión AC de la red. Esto evita picos de corriente que podrían comprometer la integridad de los dispositivos del sistema. Una vez realizada la etapa de carga inicial, las resistencias son derivadas mediante un interruptor controlado, permitiendo que el bus DC alcance un nivel de tensión final suministrado por la fuente AC programable

correspondiente a la tensión pico de línea de la red. Este procedimiento garantiza una energización segura del sistema y permite la correcta inicialización de los algoritmos de control. Para ejecutar adecuadamente la etapa de inicialización y carga del bus DC se deben seguir los pasos descritos en la sección 11.3. de los Anexos.

Figura 14

Esquema del circuito de inicialización y carga del bus DC.



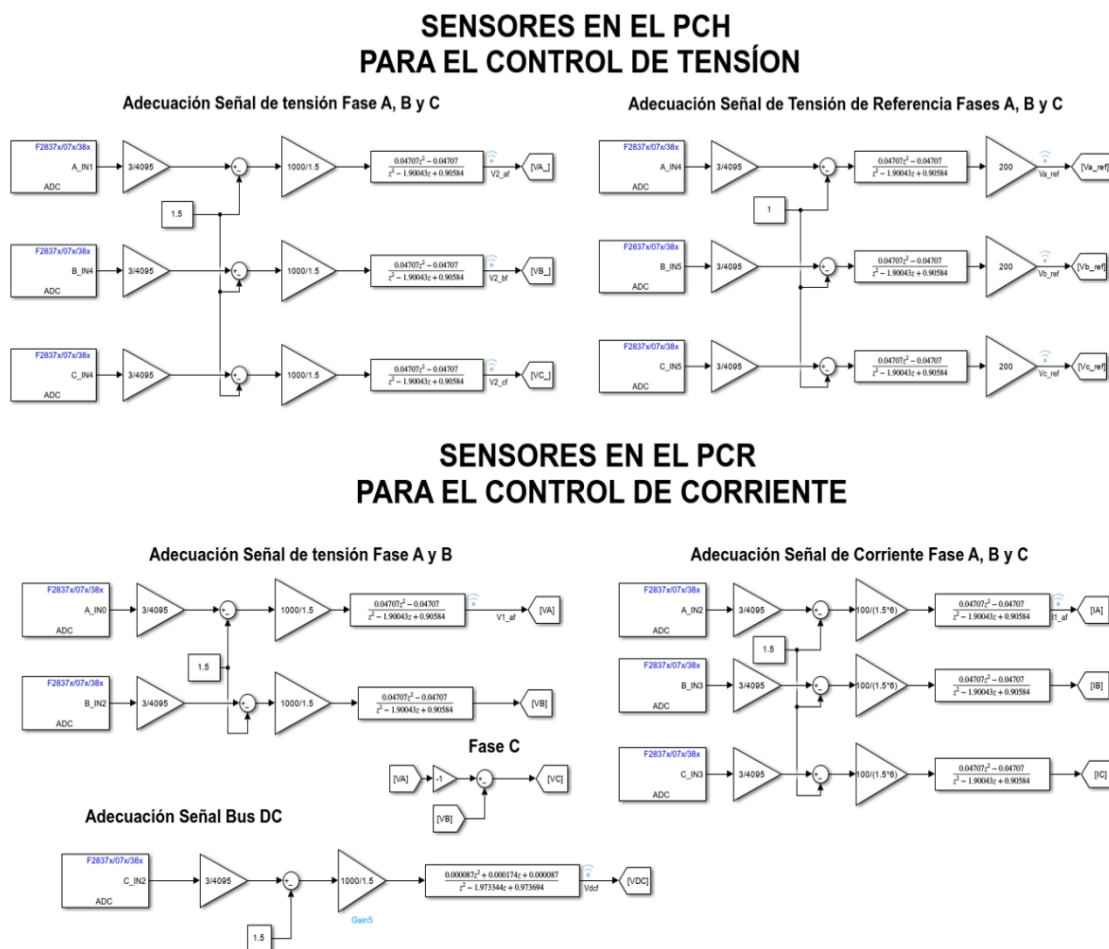
4.4. Interfaz gráfica Matlab/Simulink de la plataforma *virtual-to-power*

La interfaz gráfica desarrollada en Matlab/Simulink cumple la función de facilitar la interacción entre el usuario y el módulo PHIL. Esta interfaz se enlaza con la tarjeta de control de TI, entre sus funciones principales está el monitoreo en tiempo real de las señales de tensión y corriente en los puntos de conexión PCH y PCR, y la tensión del bus de DC. Además del monitoreo de las señales, también permite el registro de datos para su posterior análisis. Otra función que cumple es la de permitir el ajuste dinámico de los parámetros de los controladores PR y PI. Por último, también permite habilitar o deshabilitar los controladores del sistema de forma segura.

En la figura 15 se muestra el acondicionamiento de las señales que reciben los módulos ADC de la tarjeta de TI, estas señales provienen de los sensores en un rango de 0 a 3 [V]. Los módulos ADC entregan las señales en un rango de 0 a 4096, por esta razón deben transformarse a valores que coincidan con los reales en ese instante de tiempo. Esta adecuación es necesaria para el correcto funcionamiento del sistema de control.

Figura 15

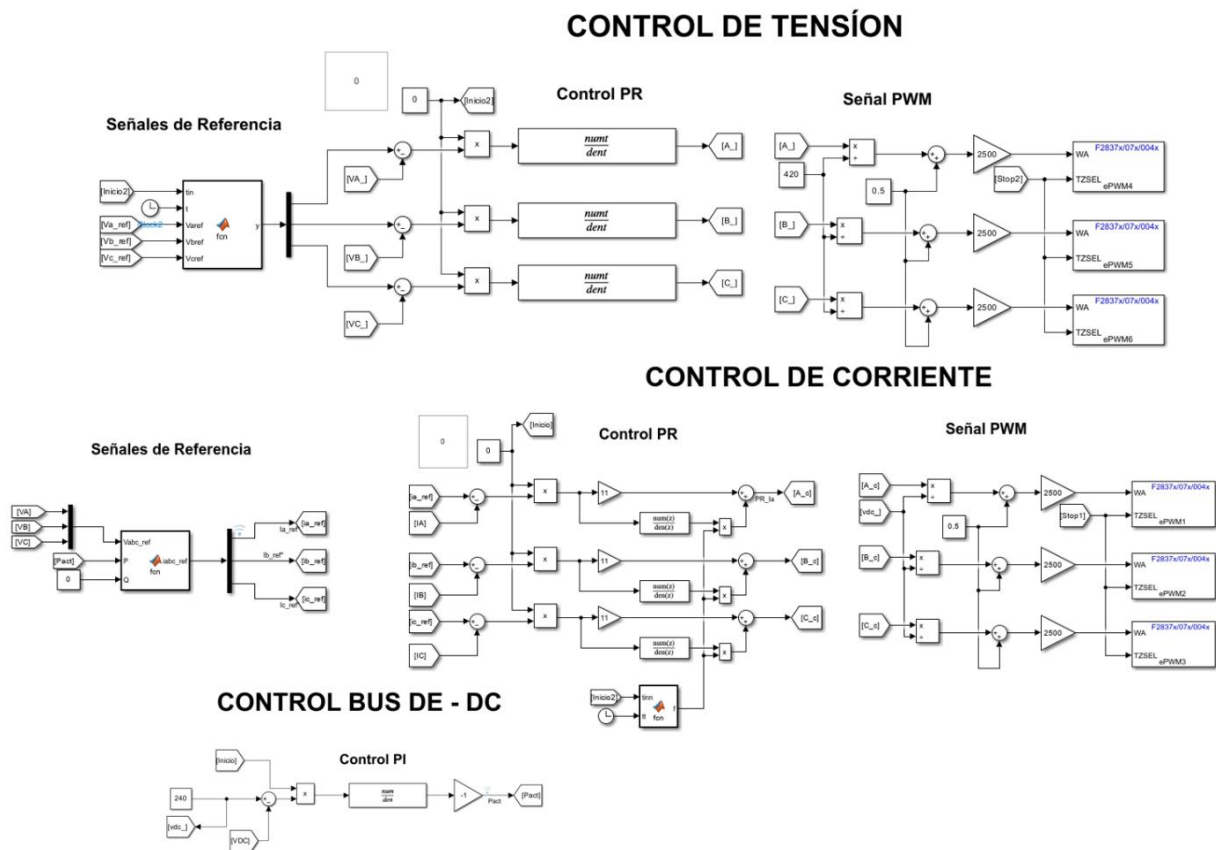
Interfaz gráfica para el acondicionamiento de señales.



En la figura 16 se muestran los modelos en Matlab/Simulink para los controladores PR tanto del control de tensión en el PCH, como del control de la corriente inyectada en el PCR, junto con la generación de las señales PWM. También se muestra el controlador PI del bus de DC.

Figura 16

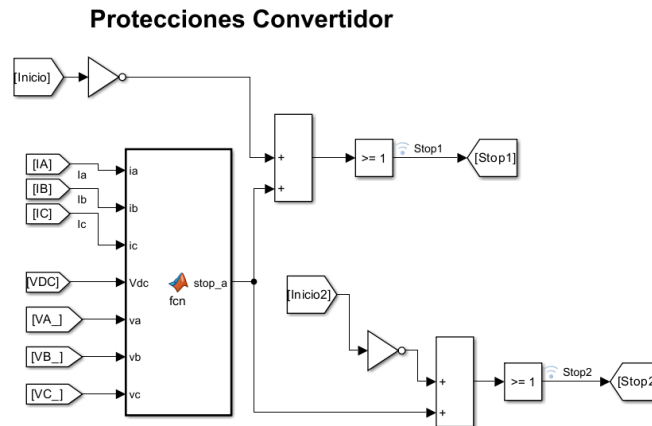
Interfaz gráfica del sistema de control.



En la figura 17 se muestra el algoritmo de protecciones digitales para el módulo PHIL, estas son las encargadas de abrir los transistores del convertidor *back-to-back* en caso de que los valores de las señales de tensión o corrientes sensadas se encuentren por fuera de los rangos de operación. También se muestran los bloques para controlar el encendido del relé para el circuito de carga del capacitor del bus de DC.

Figura 17

Interfaz gráfica de las protecciones digitales para el módulo PHIL.



4.5. Ejecución de la prueba experimental de la interfaz *virtual-to-power*

Para la adecuada inicialización de la interfaz *virtual-to-power* es necesario realizar los pasos descritos en la sección 9.4. de los Anexos, a excepción de los pasos 2 y 9 debido a que en esta prueba no se implementa la plataforma dSPACE 1104.

4.6. Desafíos y soluciones en la implementación

En la implementación y ejecución de las pruebas experimentales preliminares del módulo diseñado, se presentaron varios desafíos que debieron ser abordados y solucionados para un adecuado funcionamiento del sistema. A continuación, se presentan los desafíos y las soluciones adoptadas.

Uno de los principales retos durante este desarrollo fue la presencia de ruido en las señales al ser leídas por los puertos analógico-digital (ADC) de la tarjeta TI, específicamente las señales de tensión y corriente provenientes de los sensores. Esta presencia de ruido afectó el correcto funcionamiento de los

sistemas de control. Después del análisis del posible origen de este ruido, se optó por implementar dos soluciones. La primera consiste en la conexión de capacitores cerámicos de 10 [nF] entre las entradas de los ADC y la tierra (GND) de la tarjeta TI. La segunda consiste en el uso de filtros digitales aplicados en las señales leídas por el ADC, el filtro utilizado es el *Peaking* de segundo orden presentado en la sección 11.1 en el apartado de Anexos de este documento. Con estas soluciones se pudo reducir sustancialmente el nivel de ruido de las señales sin afectar el desfase de estas, esto permitió una operación estable y adecuada de los sistemas de control.

Otro desafío en la implementación se relaciona con la fuente AC programable de referencia Chroma 61511 y el sistema de control de la interfaz *virtual-to-power*. La fuente programable tiene 4 [A] como límite de corriente de operación, por lo tanto, si este se ve superado, el equipo activa su sistema de protección y detiene su operación. En la realización de las pruebas preliminares, la fuente programable activaba su sistema de protección debido a picos de corriente que excedían los 4 [A], esto ocurría al momento de encender el sistema de control de corriente y bus de DC. Luego del análisis de esta situación, como solución a este problema se optó por realizar ajustes a los parámetros del sistema de control que habían sido calculados previamente en el diseño del módulo, estos ajustes permitieron ejecutar las pruebas preliminares experimentales de la interfaz *virtual-to-power*.

4.7. Ajustes de los parámetros del sistema de control

En esta etapa de implementación de pruebas experimentales del módulo, se realizaron distintas pruebas para verificar el funcionamiento de todos los equipos. Los valores de las ganancias calculadas inicialmente en el diseño sirvieron como punto de partida, las cuales se fueron ajustando durante cada prueba experimental con el fin de reducir errores y mejorar el rendimiento del sistema.

Inicialmente se redujeron las ganancias k_p y k_i del control PI del bus de DC y las ganancias k_{pr} y k_{ir} del control PR de corriente en el punto de conexión PCR debido a que estos dos controles están

diseñados para iniciar al mismo tiempo. La reducción de estos valores sirvió para reducir picos de corrientes que activaban el sistema de control de la fuente programable.

Luego de asegurar el funcionamiento del control de corriente y control del bus DC con los nuevos valores de ganancias, se procedió a probar el control de tensión en el PCH, estas pruebas efectivamente hacían que se activaran las protecciones de la fuente programable. Luego del análisis se procedió a realizar un ajuste, reduciendo las ganancias del control de tensión.

Con la reducción en los valores de las ganancias de los sistemas de control se evitó sobrepasar el límite de corriente de la fuente programable y que los sistemas de control trabajaran adecuadamente en estado estable. Adicionalmente, se redujo la frecuencia de conmutación de los convertidores a 5 [kHz] por limitaciones de la tarjeta TI. A continuación, se presentan los valores de las ganancias inicialmente calculados en el diseño y los valores finalmente ajustados.

Tabla 4

Ajustes de ganancias del sistema de control.

Sistema De Control	Valor Inicial	Valor Final
Control de tensión del bus DC.	$K_p = 8$	$K_p = 1$
	$K_i = 96$	$K_i = 3.5$
Control de tensión en el PCH	$K_{pr} = 1.423$	$K_{pr} = 0.5$
	$K_{ir} = 1409.9$	$K_{ir} = 350$
Control de corriente en el PCR	$K_{pr} = 9.9337$	$K_{pr} = 11$
	$K_{ir} = 26004.4$	$K_{ir} = 4400$

4.8. Resultados de las pruebas experimentales de la interfaz *virtual-to-power*

En esta prueba se realizó la verificación del funcionamiento de la *interfaz virtual to power* completa del módulo basado en la técnica (PHIL), incluyendo la conexión del HuT correspondiente a una carga resistiva trifásica balanceada. En la tabla 5 se presentan los parámetros de la prueba experimental desarrollada.

Para esta prueba no se incluyó la plataforma de simulación en tiempo real dSPACE, por lo que las señales de referencia de tensión en el PCH fueron generadas en la tarjeta TI y corresponden a señales sinusoidales trifásicas de secuencia positiva a 60Hz con valor RMS de fase de 120 [V], configuradas mediante bloques en Simulink.

En la figura 18 se presenta la comparación entre las señales de tensión en el PCH y las señales de referencia que se esperan en dicho punto. Además, en la figura 19 se presenta la comparación entre la corriente en el PCR y la corriente de referencia que espera inyectar. Así mismo, en la figura 20 se observa que la tensión del bus DC sigue su valor de referencia de 420 [V]. Este análisis permite verificar el funcionamiento de los dispositivos que componen la interfaz *virtual-to-power* y el desempeño de los sistemas de control y su viabilidad de implementación real.

Tabla 5

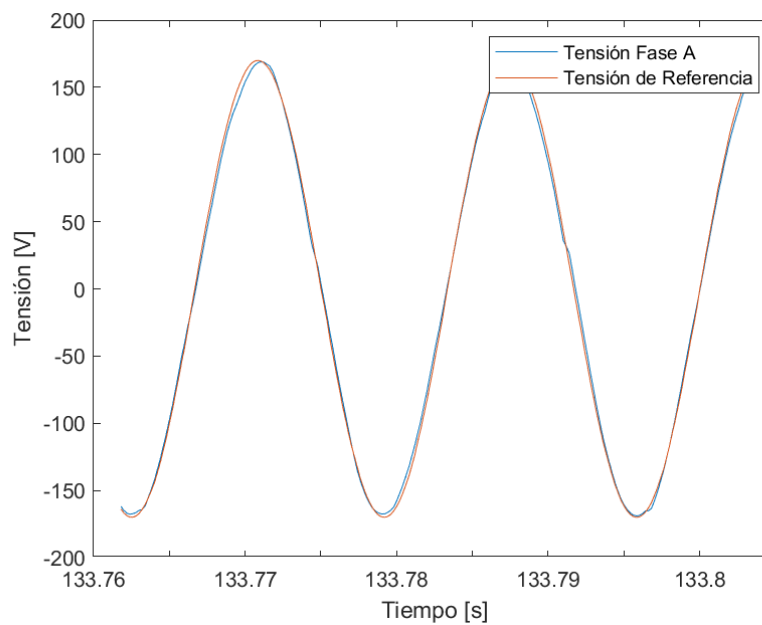
Parámetros de las pruebas experimentales.

PARÁMETRO	VALOR
Control de tensión en el PCH (Control PR amortiguado)	$K_{pr} = 0.5$
	$K_{ir} = 350$
Control de corriente en el PCR (Control PR amortiguado)	$K_{pr} = 11$
	$K_{ir} = 4400$
Control de tensión del bus DC (Control PI)	$K_p = 1$
	$K_i = 3.5$

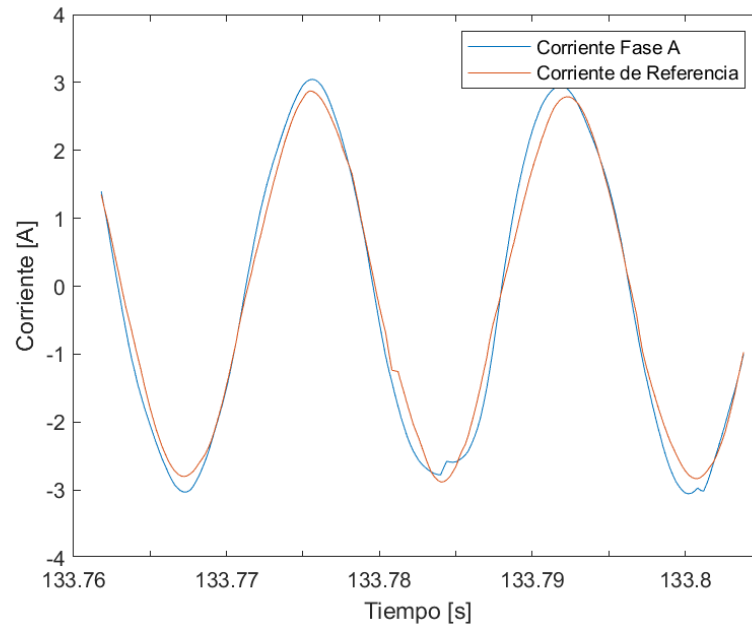
Frecuencia de conmutación de los inversores	5 [kHz]
Tensión de referencia del bus de DC	420 [V]
Tensión AC trifásica de referencia en el PCH	120 [Vrms] - Fase
Frecuencia de la señal AC de referencia en el PCH	60 [Hz]
Carga resistiva trifásica balanceada conectada en el PCH	600 [W]

Figura 18

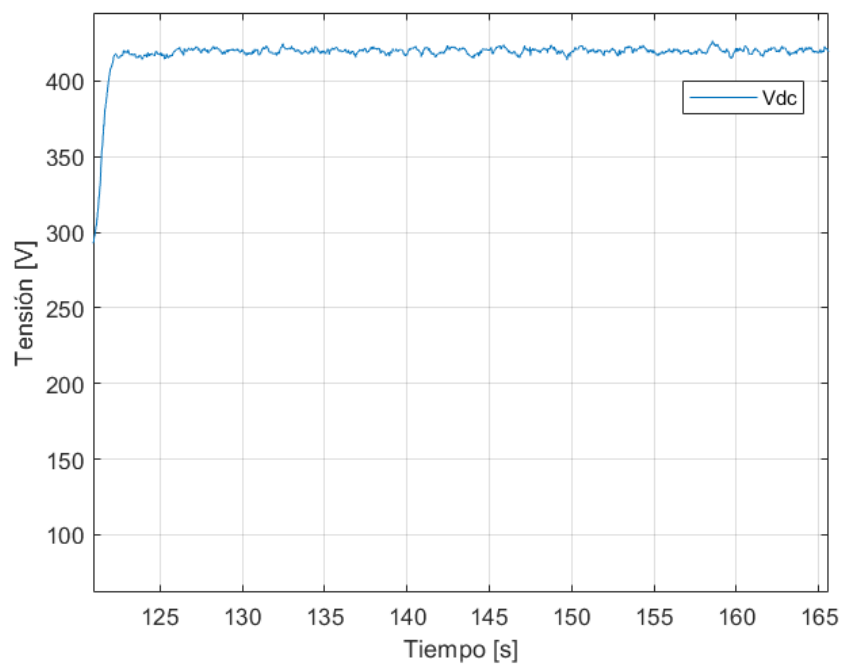
Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase a.

**Figura 19**

Comparación de resultados de la corriente en el PCR y la corriente de referencia para la fase a.

**Figura 20**

Resultado de la tensión del bus DC del convertidor back-to-back.



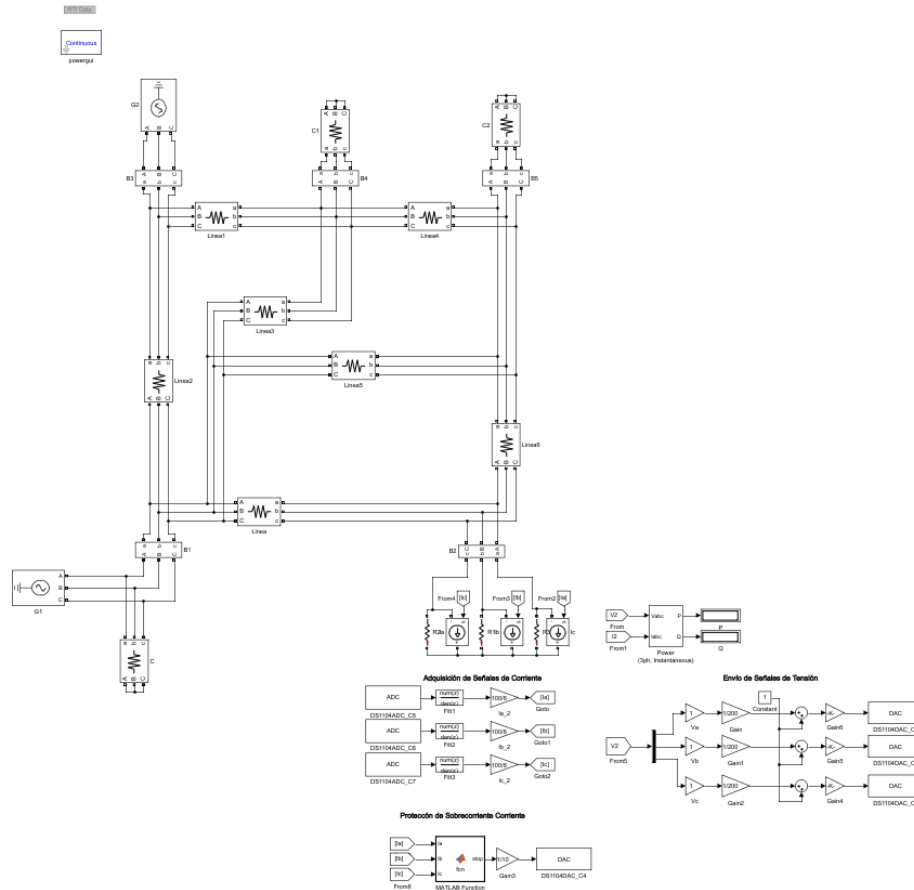
5. Modelos del sistema de distribución de energía eléctrica e implementación en dSPACE 1104

En esta investigación se desarrollaron e implementaron modelos de sistemas de distribución de energía eléctrica trifásicos de baja tensión, con el propósito de evaluar su ejecución en tiempo real dentro de la plataforma dSPACE 1104 y su aplicación en un entorno Power Hardware-in-the-Loop (PHIL). Los modelos de red fueron construidos en el entorno MATLAB/Simulink, empleando bloques compatibles con la arquitectura de la dSPACE 1104, lo que permite su correcta compilación y ejecución en tiempo real.

Como caso base, se seleccionó una red trifásica de baja tensión adaptada del modelo IEEE de 5 barras, la cual se muestra en la Figura 21. Este modelo fue modificado para incluir un nodo específico de conexión del hardware bajo prueba (HuT), permitiendo la interacción directa entre la red virtual y el módulo físico del sistema PHIL. La red incorpora fuentes de tensión trifásicas balanceadas, elementos RLC que representan las líneas de distribución de baja tensión y cargas distribuidas modeladas como impedancias constantes, lo que permite reproducir de manera adecuada el comportamiento dinámico del sistema de distribución.

Figura 21

Interfaz del modelo del sistema de distribución implementado en la plataforma dSPACE.



Posteriormente, con el fin de evaluar la capacidad de procesamiento de la plataforma dSPACE 1104 y verificar su desempeño ante modelos de distinta complejidad, se implementaron versiones adaptadas de redes eléctricas estándar definidas por IEEE con 5, 9 y 30 nodos. En la sección 9.5. de los Anexos se presentan los modelos de las redes eléctricas de 9 y 30 nodos. El incremento progresivo en el número de nodos permitió analizar el impacto de la complejidad del modelo sobre los tiempos de ejecución en tiempo real, así como identificar el límite operativo de la plataforma sin comprometer la estabilidad ni la sincronización del sistema PHIL. Los modelos de los sistemas IEEE se encuentran en el enlace de documentos anexos.

Para cada uno de los modelos de red implementados se evaluó el parámetro *turnaround time*, el cual corresponde al tiempo requerido por la tarjeta dSPACE para completar un ciclo de ejecución del

modelo en tiempo real. Este parámetro fue medido mediante la herramienta ControlDesk, la cual permite la supervisión, adquisición de datos y monitoreo del desempeño del sistema en tiempo real. La herramienta ControlDesk fue utilizada no solo para la medición del *turnaround time*, sino también para el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario que facilita la visualización de variables eléctricas clave del sistema, tales como tensiones nodales, corrientes de línea y estados operativos del modelo de red.

En la implementación del módulo PHIL, el hardware físico opera a una frecuencia de 5 kHz, correspondiente a un tiempo de muestreo de 200 μs . En consecuencia, para garantizar una correcta sincronización entre la red virtual y el hardware físico, el *turnaround time* del modelo ejecutado en la dSPACE 1104 debe ser inferior a este intervalo. En la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos del parámetro *turnaround time* para cada uno de los modelos de red evaluados, permitiendo verificar la viabilidad de su ejecución en tiempo real dentro del esquema propuesto.

Tabla 6

Tiempo de ejecución de acuerdo con el modelo de red eléctrica emulado.

Modelo IEEE adaptado	Turnaround Time [μs]
IEEE 5 nodos	30.1533 [μs]
IEEE 9 nodos	54.6115 [μs]
IEEE 30 nodos	114.2 [μs]

Los resultados de las pruebas muestran que los modelos de red fueron ejecutados adecuadamente en la plataforma dSPACE 1104, manteniendo el parámetro *turnaround time* por debajo de 200 [μs], límite crítico de saturación del sistema. Esto valida que dSPACE 1104 tiene la capacidad de ejecutar en tiempo real distintos modelos de redes de distribución, con una cantidad de nodos razonable para la investigación, manteniendo la precisión en las simulaciones y estabilidad apropiada para la

implementación PHIL. Esta validación es fundamental, también permite prever el comportamiento de la plataforma ante estudios más complejos.

6. Pruebas experimentales del módulo PHIL

En este capítulo se presenta el desarrollo de pruebas experimentales para la simulación en tiempo real del módulo PHIL diseñado. El objetivo de estas pruebas es validar la operación del módulo completo, el cual integra la plataforma de simulación y el hardware de prueba de potencia real o HuT, interconectados mediante la interfaz *virtual-to-power* propuesta. Para ello, se utilizó la plataforma de simulación en tiempo real dSPACE 1104, la cual ejecuta en tiempo real los modelos de la red de distribución de energía eléctrica desarrollados en Matlab/Simulink.

Para la implementación de estas pruebas se emplearon los parámetros definidos en la tabla 5.

Tabla 7

Parámetros de las pruebas experimentales.

PARÁMETRO	VALOR
Control de tensión en el PCH (Control PR amortiguado)	$K_{pr} = 0.5$
	$K_{ir} = 350$
Control de corriente en el PCR (Control PR amortiguado)	$K_{pr} = 11$
	$K_{ir} = 4400$
Control de tensión del bus DC (Control PI)	$K_p = 1$
	$K_i = 3.5$
Frecuencia de conmutación de los inversores	5 [kHz]
Tensión de referencia del bus de DC	420 [V]
Tensión AC trifásica de referencia en el PCH	120 [Vrms] - Fase
Frecuencia de la señal AC de referencia en el PCH	60 [Hz]
Carga resistiva trifásica balanceada conectada en el PCH	600 [W]

6.1. Modelo en Matlab/Simulink implementado en la plataforma dSPACE 1104

En la Figura 21 se presenta la interfaz gráfica en Matlab/Simulink del modelo implementado en la plataforma dSPACE 1104. Esta interfaz incluye el modelo de la red de distribución que se ejecuta en tiempo real. Además, la interfaz contiene los bloques ADC encargados de convertir a digital las señales de corriente sensadas en el PCH. Estas señales de corriente se ajustan a valores que corresponden a la escala real de medición.

El sistema de distribución corresponde a una red trifásica de baja tensión adaptada del modelo IEEE de 5 nodos, balaceada, operando a una frecuencia de 60 [Hz] y con un nivel de tensión de 120 [Vrms] por fase. Incluye un nodo específico de interconexión del hardware bajo prueba (HuT). Este nodo permite la interacción directa entre la red virtual y el sistema físico.

El HuT se integra en el sistema de distribución emulado mediante un modelo compuesto por tres fuentes de corriente controladas, una por cada fase, tal como se observa en la Figura 21. Estas fuentes están conectadas a un nodo trifásico de la red de distribución emulada. La señal de control de estas tres fuentes corresponde a las corrientes sensadas y ajustadas a través de los bloques ADC. De esta manera, el comportamiento del hardware físico se refleja de forma dinámica en el modelo de la red virtual.

En cada ciclo de ejecución del algoritmo en tiempo real, la dSPACE 1104 utiliza los valores de corriente sensados en el PCH para resolver el modelo matemático del sistema de distribución. Como resultado de este proceso, se calculan las tensiones trifásicas de referencia correspondientes al punto de conexión del HuT, las cuales representan la respuesta eléctrica de la red bajo las condiciones impuestas por el hardware físico.

Luego del cálculo de las señales de referencia, estas se transforman en los rangos de tensión requeridos por la tarjeta TI, y posteriormente las señales son enviadas por los módulos de conversión digital-analógica (DAC) de la dSPACE hacia la tarjeta TI para la retroalimentación del control PR de

tensión. Estas señales sirven como referencias de tensión para la interfaz *virtual-to-power*, que reproduce físicamente estas señales en los terminales del HuT en el PCH. La interfaz convierte las señales analógicas de referencia en señales de potencia, replicando las condiciones eléctricas de un entorno controlado.

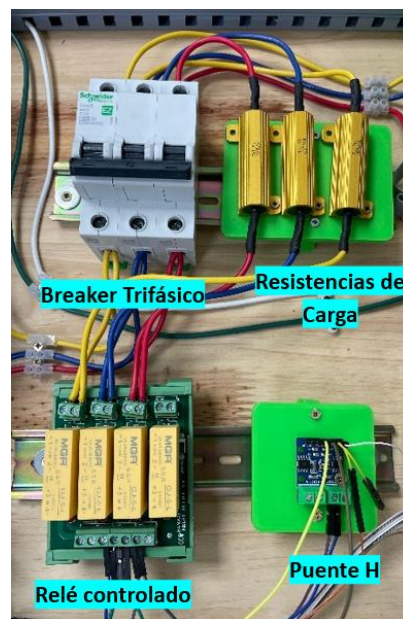
6.2. Montaje final del módulo

En esta sección se presentan las imágenes de los componentes del módulo final implementado.

En la Figura 22 se observa el circuito de inicialización del módulo, este es el encargado del proceso de carga inicial de los capacitores del bus DC del convertidor AC/DC/AC.

Figura 22

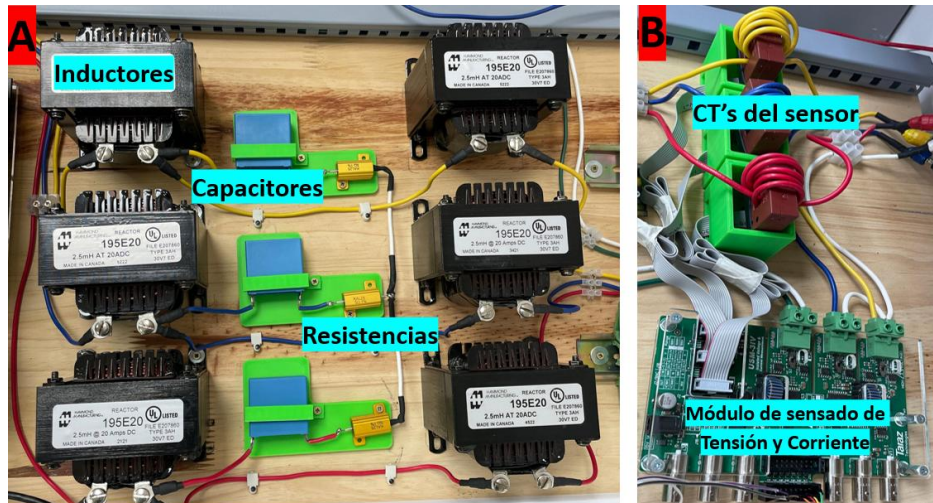
Circuitos de inicialización para carga de capacitores del bus DC del convertidor AC/DC/AC del módulo PHIL.



En la Figura 23 se observa el montaje del filtro LCL y el módulo USM-3IV de Taraz Technologies para el sensado de las señales de tensión y corriente del módulo PHIL.

Figura 23

Filtro LCL y módulo de sensado de señales de tensión y corriente.



En la Figura 24 se observa el panel de conexión de la plataforma de simulación dSPACE 1104 y la fuente AC programable Chroma 61701.

Figura 24

Panel de conexión de la plataforma dSPACE 1104 y fuente Chroma programable AC 61701



En la Figura 25 se muestran los convertidores electrónicos de potencia SPM-VFD-KIT de Taraz Technologies, estos emplean transistores de efecto de campo (FET) de carburo de silicio (SiC) como semiconductores. En la Figura 26 se observa la tarjeta de control de la interfaz virtual-to-power, de

referencia TMS03XF3F04JD de Texas Instruments. En la Figura 27 se presenta la carga trifásica empleada en las pruebas, esta carga se compone de bombillos incandescentes de 100W/120Vrms cada uno, los cuales se conectan en paralelo por pares para cada fase logrando una carga total trifásica de 600 [W].

Figura 25

Convertidores SPM-VFD-KIT de Taraz Technologies



Figura 26

Tarjeta de control de Texas Instruments

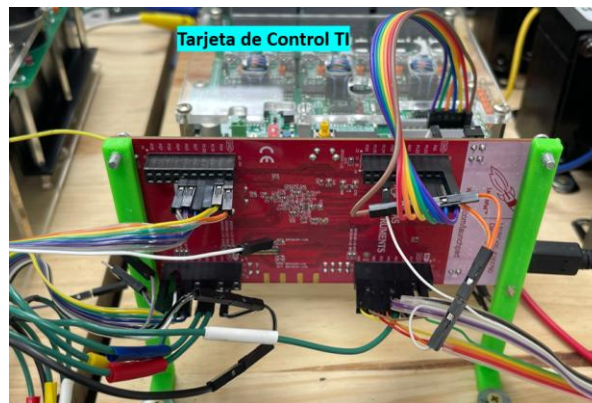


Figura 27

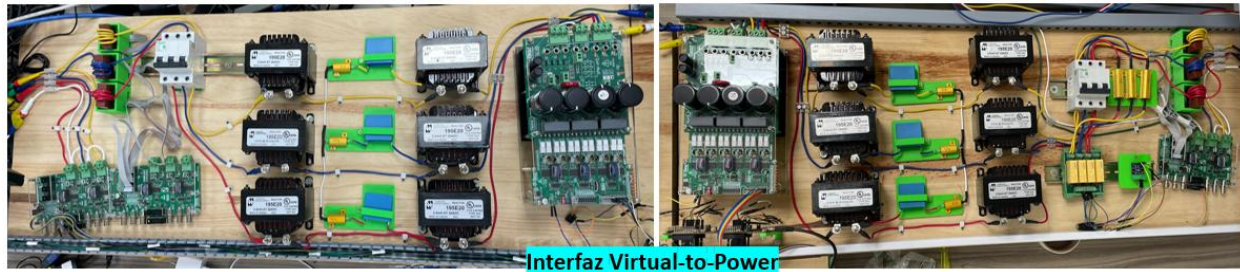
Carga trifásica balanceada de 600 [W]



Finalmente, en la Figura 28 se muestra el montaje completo de la interfaz *virtual-to-power*, en donde se pueden observar los distintos componentes tales como los módulos de sensado, interruptores, los dos filtros LCL, los convertidores que emplean la topología *back-to-back* y el circuito de carga del capacitor del bus DC de los convertidores. Esta interfaz es modular, lo cual posibilita separar y reemplazar fácilmente distintos componentes. Además, el módulo permite separarse en el bus DC en dos mitades, y ser empleados cada uno como inversor o rectificador, ampliando así la capacidad de funcionamiento del módulo según lo requerido.

Figura 28

Módulo completo de la interfaz virtual-to-power para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica.



6.3. Inicialización y ejecución de simulaciones en tiempo real del módulo PHIL

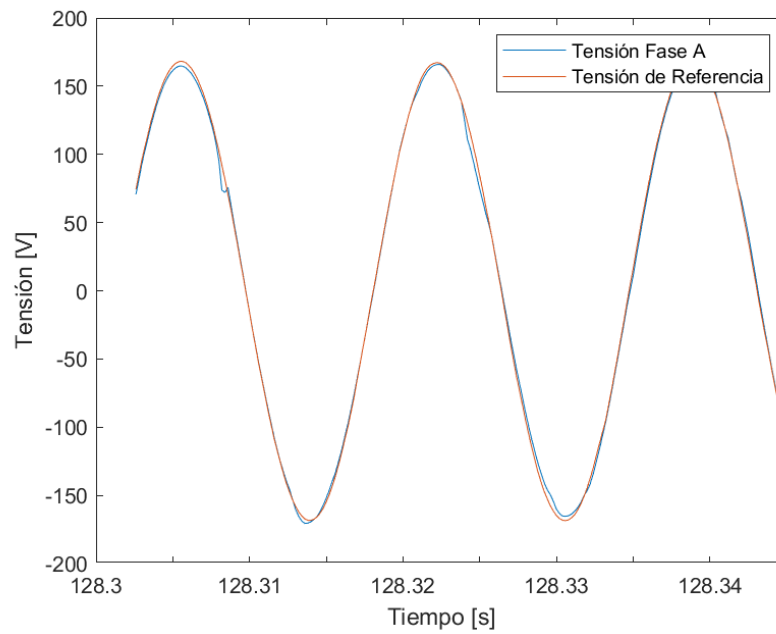
Para una adecuada inicialización y ejecución de las pruebas experimentales del módulo PHIL completo, es necesario realizar los pasos descritos en la sección 9.4. de los Anexos.

6.4. Resultados de la simulación en tiempo real para una carga de 600 [W]

En esta prueba se consideró la conexión de una carga real trifásica balanceada de 600 W en el PCH. Los resultados obtenidos al implementar la simulación en tiempo real del módulo PHIL son satisfactorios, el sistema de control diseñado se comporta de manera adecuada y estable al operar en tiempo real. En las figuras 29, 30 y 31 se observa la tensión para cada una de las fases en el punto de conexión del HuT (PCH), las cuales logran seguir las señales de referencia calculadas mediante la solución del modelo de red de distribución en la dSPACE. Lo mismo ocurre con la corriente inyectada en el punto de conexión con la red (PCR), como se evidencia en la Figura 32. Así mismo, la tensión del bus DC se mantuvo estable, siguiendo su valor de referencia de 420 [V] como se puede observar en la Figura 33.

Figura 29

Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase A.

**Figura 30**

Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase B.

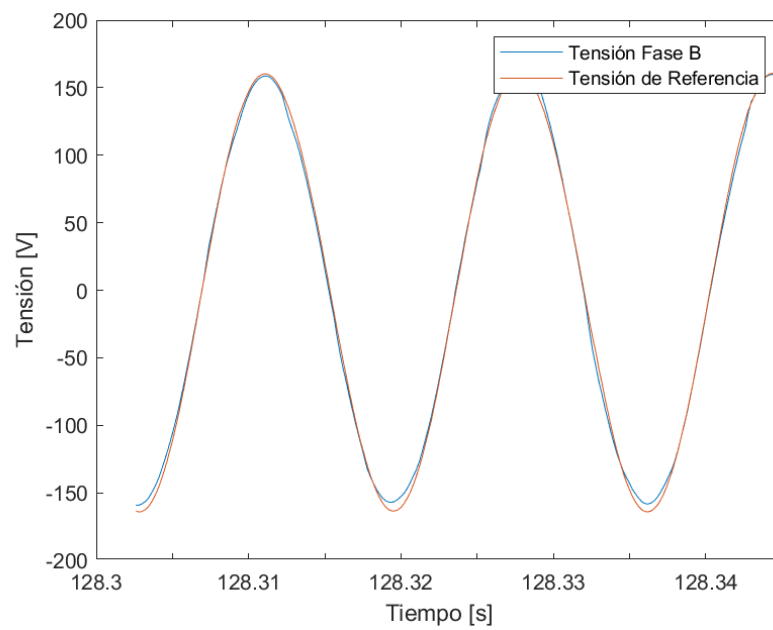
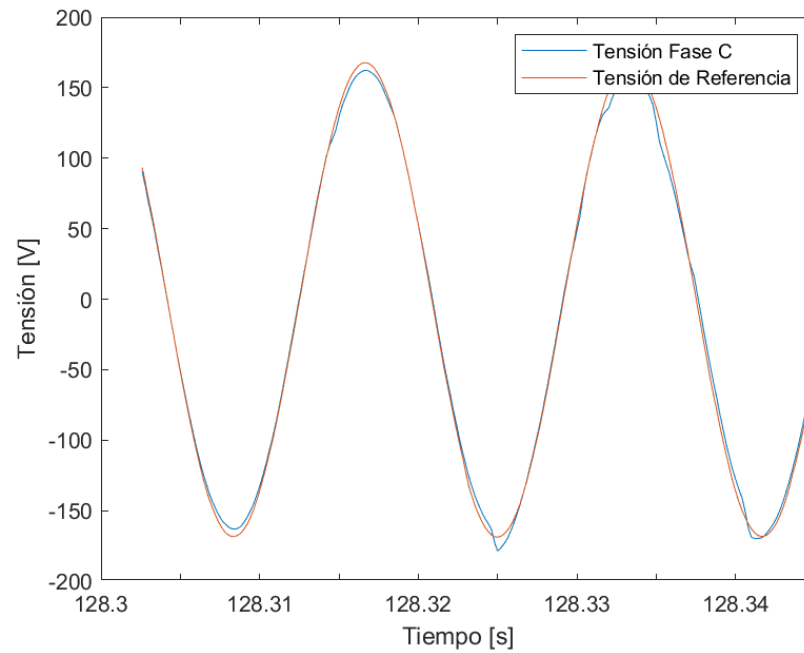


Figura 31

Comparación de resultados de la tensión en el PCH y la tensión de referencia para la fase C.

**Figura 32**

Comparación de resultados de la corriente en el PCR y la corriente de referencia para la fase A.

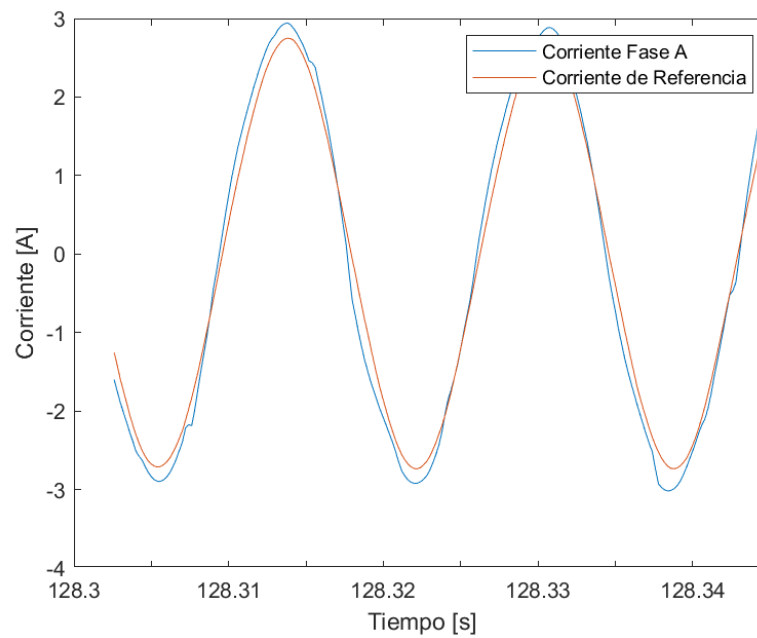
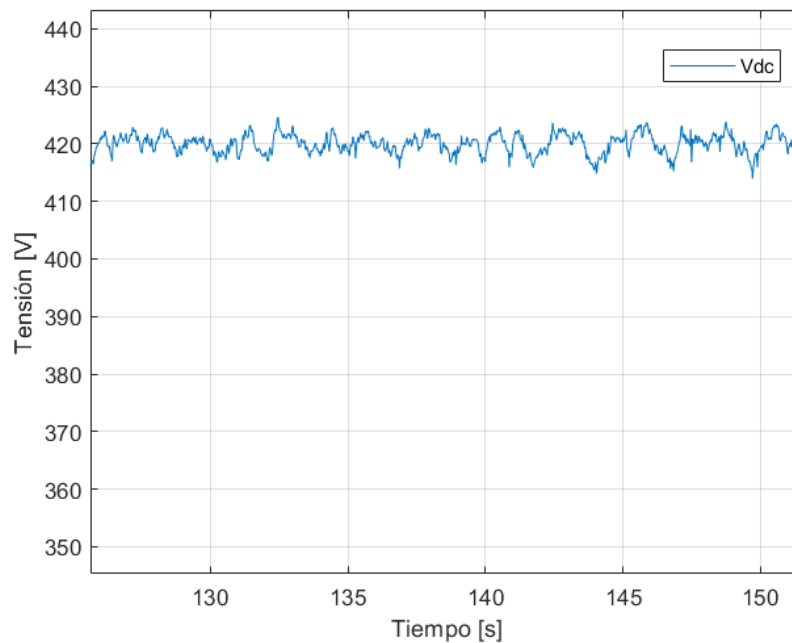


Figura 33

Resultado de la tensión del bus DC del convertidor back-to-back.



6.5. Análisis de resultados

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del módulo PHIL implementado, con el objetivo de evaluar el desempeño y fidelidad en la emulación de los parámetros eléctricos de la red de distribución eléctrica considerando la integración de la carga bajo prueba en un nodo del sistema. Se analizan las señales de tensión en el PCH y la corriente en el PCR, comparándolas con sus respectivas referencias. Como criterio de evaluación se consideró el Error Absoluto Medio (MAE).

6.5.1. Análisis de resultados experimentales de la simulación en tiempo real

Para estos análisis se considera el MAE, el cual permite cuantificar o medir el error promedio entre datos previstos y datos observados. En este se consideran las señales de referencia y las señales sensadas. El MAE es definido por la siguiente expresión:

$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i,ref} - x_i) \quad (25)$$

Donde:

- x_i es el valor de la señal sensada
- $x_{i,ref}$ es el valor de la señal de referencia
- N es el número total de muestras

Además, para tener otra idea del desempeño del módulo se realiza una comparación de los cálculos del MAE como porcentaje respecto al valor RMS de la señal sensada, con el fin de determinar una medida normalizada del error. Estos cálculos se desarrollan mediante la siguiente expresión:

$$MAE_{\%} = \frac{MAE}{V_{rms}} \times 100 \quad (26)$$

Las estimaciones del MAE se realizan sobre varios ciclos estables de las señales para tener una visión global del comportamiento. Los resultados obtenidos, para la prueba experimental presentada en la sección 6.4, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8

Resultados del MAE para las señales de tensión y corriente en la prueba con carga balanceada de 600W.

Señal	MAE (V) o (A)	MAE _%
Tensión en PCH (fase A)	2.8050 V	2.3935
Tensión en PCH (fase B)	3.4277 V	3.0082

Tensión en PCH (fase C)	4.1102 V	3.5660
Corriente en PCR (fase A)	0.2068 A	9.9423

Los valores de MAE muestran un adecuado seguimiento de las señales de referencia, con errores bajos en condiciones estacionarias para las señales de tensión. Esto valida del desempeño del sistema de control implementado.

6.6. Resultados de la simulación en tiempo real ante variación de carga en el PCH

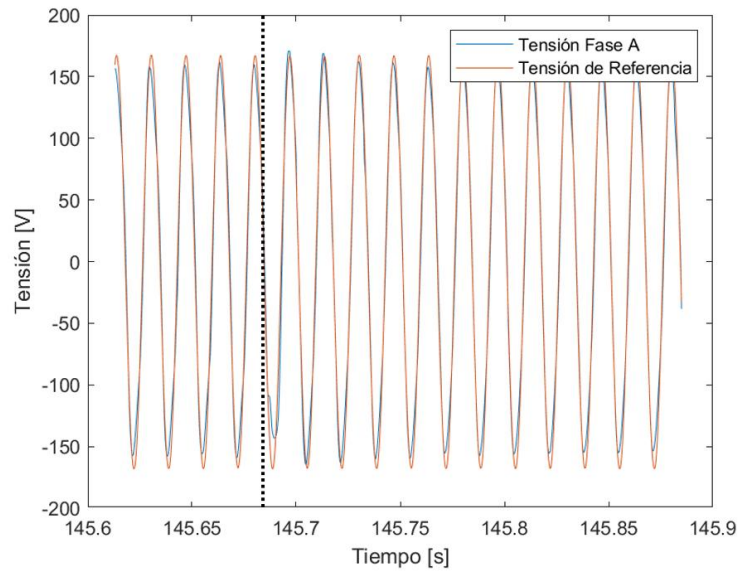
Para validar el desempeño del sistema de control, se realizaron pruebas ante variaciones de carga en el PCH. Las pruebas consistieron en un aumento de carga. Inicialmente se ejecutó la prueba considerando una carga trifásica balanceada de 300 [W], y posteriormente, después de que el sistema alcanzó operación en régimen permanente, se añadió otra carga en el PCH para aumentarla a un total de 600 [W]. La incorporación de la carga adicional se realizó mediante la activación de un interruptor trifásico que permitió su energización.

Se monitoreó la capacidad del sistema de control para seguir la tensión de referencia ante el incremento de la carga, como se muestra en la Figura 34. Así mismo, se comparó la corriente inyectada y su respectiva referencia, tal como se presenta en la Figura 35. De acuerdo con la Figura 35, en la línea vertical punteada se logra evidenciar el instante de tiempo aproximado en el cual se activó el interruptor para aumentar la carga, siendo este alrededor de los 145,68 [s].

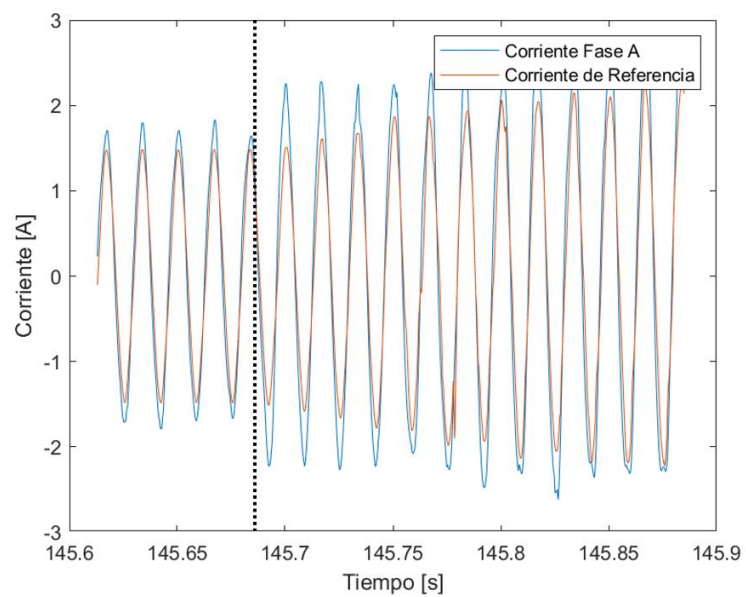
Estos resultados muestran un buen desempeño del sistema de control ante el incremento de carga, el controlador de tensión logra seguir la referencia y estabilizarse. El controlador de corriente logra seguir de manera estable su referencia, pero en un tiempo de establecimiento mayor comparado con el controlador de tensión.

Figura 34

Comparación de resultados de la tensión de la fase A en el PCH y la tensión de referencia ante variación de carga.

**Figura 35**

Comparación de resultados de la corriente de la fase A en el PCR y la corriente de referencia ante variación de carga.



7. Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

El desarrollo e implementación del módulo de simulación basado en la técnica Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) permitió emular la operación de un sistema de distribución eléctrica ante la conexión de cargas reales. El módulo propuesto integró una plataforma de simulación en tiempo real dSPACE 1104 y una interfaz *virtual-to-power* compuesta por convertidores electrónicos de potencia en topología *back-to-back* con filtros LCL, un sistema de control desarrollado en el microcontrolador de Texas Instruments TMS320F28379D, y un sistema de sensado.

Los resultados obtenidos en las pruebas fuera de línea y en tiempo real confirmaron que la interfaz *virtual-to-power* propuesta es capaz de reproducir fielmente los parámetros eléctricos para un nodo de la red simulada. Además, los controladores PR y PI implementados permitieron una respuesta dinámica estable y precisa para la correcta operación del módulo en el entorno PHIL.

Así mismo, con los resultados se evidencia que el módulo responde adecuadamente ante variaciones de carga, lo que permite verificar el correcto funcionamiento las estrategias de control implementadas.

7.2. Síntesis del cumplimiento de los objetivos

Se diseñó e implemento un módulo PHIL para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica, en el diseño se consideró el uso de convertidores electrónicos de potencia en una topología *back-to-back* que permite la conexión de hardware real como cargas a un modelo de red simulada en tiempo real, además, se incluyeron sistemas de sensado y control.

Se implementaron modelos de sistemas de distribución basados en topologías IEEE de 5, 9 y 30 nodos. Aunque inicialmente se planteó la ejecución en la plataforma MicroLabBox, por razones de

disponibilidad se utilizó la dSPACE 1104. En esta los modelos fueron simulados en tiempo real sin presentar saturación del hardware y permitieron evaluar el comportamiento del nodo de conexión del HuT.

Se realizaron una serie de pruebas en las que se conectaron cargas balanceadas al nodo emulado y se evaluó el desempeño mediante el error absoluto medio, y se analizó la respuesta ante variaciones de carga validando la capacidad de operación del módulo.

7.3. Hallazgos Principales

El proceso de diseño, implementación y validación del módulo PHIL permitió identificar hallazgos técnicos importantes como los desafíos superados en las pruebas fuera de línea. Estos desafíos superados aseguraron el adecuado desempeño del módulo en las pruebas en tiempo real.

Un hallazgo importante fue la presencia de ruido en las señales sensadas, durante la implementación se detectó ruido considerable en las señales de corriente y tensión captadas por los sensores del módulo USM-3IV. Este ruido afectaba la calidad de la realimentación enviada al sistema de control y la precisión del módulo PHIL. Para solucionar este problema, se incorporaron filtros digitales tipo Peaking en la interfaz de Simulink ejecutada en la TI, específicamente en la etapa de procesamiento y adecuación de las señales leídas por los convertidores ADC. Esto permitió mejorar la calidad de las señales sensadas sin introducir desfases significativos, además ayudó a mantener una respuesta rápida y precisa del sistema de control.

Otro hallazgo importante está relacionado con la saturación del microcontrolador Texas Instrumens. Debido a la integración del sistema completo que incluye control, sensado, filtros digitales y la generación de los PWM, se presentó saturación del microcontrolador producto de la alta carga computacional. Esto generaba latencias en la ejecución del sistema de control, lo que afectaba la estabilidad y no convergencia del sistema. Para resolver la saturación, fue necesario reducir la frecuencia

de operación del sistema de control de 10 [kHz] a 5 [kHz], esto permitió al microcontrolador ejecutar de manera estable todas las tareas sin errores.

7.4. Limitaciones

Durante el desarrollo e implementación del módulo PHIL se identificaron ciertas limitaciones que condicionaron el alcance de las pruebas experimentales. Entre ellas la más importante estuvo relacionada con las restricciones operativas de las fuentes del laboratorio. La fuente programable Chroma presenta limitaciones en su capacidad de suministro de corriente. Este equipo no permitió realizar pruebas con corrientes nominales o cercana a la considerada en el diseño del módulo. Por lo tanto, algunas pruebas fueron interrumpidas por la activación de protecciones propias del equipo ante las demandas de corrientes superiores a su umbral máximo.

Aunque las pruebas se realizaron bajo condiciones reducidas de potencia y corriente, se pudo validar la funcionalidad del módulo. Sin embargo, no permitió explorar su funcionamiento bajo condiciones de operación cercanas a su límite de diseño. En consecuencia, la validación del módulo ante escenarios a mayor potencia queda como una tarea pendiente a desarrollarse en futuras fases del proyecto con una fuente de alimentación que permita mayor capacidad de corriente.

7.5. Líneas de investigación futuras

Como resultado del desarrollo de este trabajo de grado, se identifican varias oportunidades de investigación que permiten profundizar en la implementación del módulo PHIL. A continuación, se proponen líneas de investigación para el presente trabajo:

- Una de las principales líneas de investigación consiste en implementar eventos del sistema eléctrico que se presentan en su operación real, como variaciones de carga, fallas, desconexiones de equipos, entre otros. Estas pruebas permitirían evaluar la capacidad de operar ante estas situaciones.

- Debido a las limitaciones técnicas relacionadas con la fuente de alimentación utilizada, se plantea como línea futura la utilización de equipos de mayor capacidad que permita operar el módulo en condiciones cercanas a su potencia nominal.
- Otra línea de investigación es la integración de generación distribuida como HuT. En este trabajo se validó el módulo con cargas resistivas como HuT. En futuras investigaciones se propone incorporar sistemas reales de generación distribuida, como inversores fotovoltaicos o turbinas eólicas, permitiendo evaluar el impacto de estos elementos sobre la operación de la red simulada, así mismo, validar estrategias de integración y control.
- Otra línea de interés consiste en diversificar los tipos de cargas empleados como HuT. Se plantea la inclusión de cargas inductivas, capacitivas y no lineales; con el fin de realizar estudios de calidad de la energía, flujos de potencia, y estabilidad del sistema eléctrico.
- Una posible expansión del módulo consiste en la réplica de la interfaz *virtual-to-power* para otros nodos del sistema de distribución, de tal manera que se permita la interconexión de varios HuT en diferentes nodos. Lo anterior podría permitir estudios con otras tecnologías emergentes en redes eléctricas inteligentes, como sistemas de medición avanzados, y tecnologías de la información y comunicación, entre otros.
- Por último, se propone explorar la integración del módulo con otras plataformas de simulación en tiempo real como OPAL-RT, RTDS y otras versiones de dSPACE, esto permitiría validar la portabilidad y flexibilidad del módulo desarrollado.

8. Referencias bibliográficas

- Allabakshu, S., & M, V. P. (2025). Enhancing Renewable Energy Integration: An Analysis of Bidirectional Converters And Multilevel Inverter Technologies. *2025 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCEECS64059.2025.10940918>
- Amer, O. A. A., Abdelsalam, I., & Marei, M. I. (2024). An EV On-Board Charger Based on Dual-Boost AC-DC Converter. *2024 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, 263–268. <https://doi.org/10.1109/ITC-Egypt61547.2024.10620552>
- Archetti, J. A. G., Musse, B. F., Fernandes, M. d. C., Silva, D. C., Oliveira, L. W. de, & Oliveira, J. G. de. (2018). Simulation and analysis of a distribution system with PV penetration using RTDS. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395762>
- Bansal, P., & Singh, A. (2016). Smart metering in smart grid framework: A review. *2016 Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, 174–176. <https://doi.org/10.1109/PDGC.2016.7913139>
- Bayindir, R., Hossain, E., & Vadi, S. (2016a). The path of the smart grid -the new and improved power grid. *2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISGWCP.2016.7548270>
- Bayindir, R., Hossain, E., & Vadi, S. (2016b). The path of the smart grid -the new and improved power grid. *2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISGWCP.2016.7548270>
- Cai, H., Guo, Q., Su, M., Liu, S., Wu, W., & Huang, L. (2021). Research on Hybrid Real-time Simulation Interface of RTDS Digital and Physical Model. *2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/CICED50259.2021.9556823>
- Cakir, M., Cankaya, I., Garip, I., & Colak, I. (2022). Advantages of Using Renewable Energy Sources in Smart Grids. *2022 10th International Conference on Smart Grid (IcSmartGrid)*, 436–439. <https://doi.org/10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848612>
- Diaz, I. U., Justino, G. L., Zat, G., Motter, D., Godoy, P. T. de, Ferreira, L. R. A., & Jahn, T. G. (2024). Development of PHIL Testing for Evaluation of Photovoltaic Inverter at the Itaipu Technological Park. *2024 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 597–602. <https://doi.org/10.1109/DCECE59415.2024.10667075>
- Du, Y., Tu, H., Lukic, S., Lubkeman, D., Dubey, A., & Karsai, G. (2018). Development of a Controller Hardware-in-the-Loop Platform for Microgrid Distributed Control Applications. *2018 IEEE Electronic Power Grid (EGrid)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/eGRID.2018.8598696>

- Ebeid, E., Jacobsen, R. H., Stefanni, F., & Quaglia, D. (2017a). Scalable open source smart grid simulator (SGSim). *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8085966>
- Ebeid, E., Jacobsen, R. H., Stefanni, F., & Quaglia, D. (2017b). Scalable open source smart grid simulator (SGSim). *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8085966>
- Ebrahimian, A., Vahid, S., Weise, N., & EL-Refai, A. (2021). Two Level AC-DC-AC Converter Design with a New Approach to Implement Finite Control Set Model Predictive Control. *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1, 514–520. <https://doi.org/10.1109/ICIT46573.2021.9453659>
- Farias, V., Cavalieri, C., & Kabalan, M. (2021). Microgrid Protection Testing Using a Relay-Hardware-in-the-Loop Testbed. *2021 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NAPS52732.2021.9654656>
- Fatima, M., Siddiqui, A. S., & Sinha, S. K. (2024). Utilising Feedforward Compensation, Active and Reactive Power Control of a Grid-Tied Three-Phase Inverter. *2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT)*, 5, 802–806. <https://doi.org/10.1109/IC2PCT60090.2024.10486684>
- Genić, A., Gartner, P., Medjo, D., & Dinić, M. (2016). Multi-layer hardware-in-the-loop testbed for microgrids. *2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, 95–102. <https://doi.org/10.1109/SST.2016.7765640>
- Gravey, T., Meddah, K., Robert, T., Rutovic, E., Monthéard, R., & Ould-Bachir, T. (2023). A PYNQ-Based Data Acquisition System for HIL Simulations on Low-Cost FPGAs. *2023 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIT58465.2023.10143138>
- Han, L., Li, B., Wang, S., Mao, S., Xu, Z., & Xu, D. (2020). Design of a Power Hardware-in-the-loop System for Modular Multilevel Converter. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, 1435–1440. <https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367959>
- Heo, H.-J., Park, C.-H., & Kim, J.-M. (2020). Modified Interface Algorithm of PHIL Simulator to Improve Harmonic Current Accuracy. *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, 304–308. <https://doi.org/10.1109/WoW47795.2020.9291318>
- Huo, Y., Gruosso, G., & Piegari, L. (2017a). Power hardware in the loop simulator of photovoltaic plant for smart grid interaction analysis. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2017.7977629>
- Lalmalsawmi, & Biswas, P. K. (2022). Full-Bridge DC-DC Converter and Boost DC-DC Converter with Resonant Circuit For Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *2022 International Conference on Intelligent*

- Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICICCSP53532.2022.9862426>
- Liu, Z., Li, T., Shu, M., Sun, Y., & Ma, L. (2020). Using Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for Empirical Testing of Photovoltaic System. *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET)*, 452–456. <https://doi.org/10.1109/ICET49382.2020.9119505>
- Lucero-Tenorio, M., Mariscal, W., & Espinoza-Ortiz, J. (2024). Optimising the Design and Control of an Ultra-Fast Charger for Electric Vehicles. *2024 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/COLCOM62950.2024.10720300>
- M, C. (2023). An Overview of the Importance of Power Electronic Converters in Electric Vehicle Technologies. *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 1, 199–204. <https://doi.org/10.1109/ICACCS57279.2023.10113067>
- Magnago, H., Figueira, H., Gagrira, O., & Majstorovic, D. (2021). HIL-based certification for converter controllers: Advantages, challenges and outlooks (Invited Paper). *2021 21st International Symposium on Power Electronics (Ee)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/Ee53374.2021.9628196>
- Maurya, S., Binod, S., Srivastava, A., Baluni, A., Poddar, S., & Mathew, L. (2021). Controller Hardware in Loop Simulation (C-HIL) for Grid-Connected Photovoltaic System. *2021 IEEE 2nd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/STPEC52385.2021.9718750>
- Meyers, T., Prabakar, K., Pratt, A., Tiwari, S., & Fossum, J. (2023). PHIL Interface Design for Use with a Voltage-Regulated Amplifier. *2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA)*, 370–374. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA56058.2023.10328333>
- Mir, T. N., Singh, B., & Bhat, A. H. (2022). Single-Phase to Three-Phase AC-AC Converter Fed Low Speed Induction Motor Drive With Encoderless Control. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/PESGRE52268.2022.9715941>
- Mojlish, S., Erdogan, N., Levine, D., & Davoudi, A. (2017). Review of Hardware Platforms for Real-Time Simulation of Electric Machines. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), 130–146.
<https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2656141>
- Musse, B. F., Silva, N. L., Silva, D. C., de Oliveira, L. W., & de Oliveira, J. G. (2017a). Controller-hardware-in-the-loop simulation of a distribution system with PV penetration using RTDS and dSPACE. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257399>
- Nath, S. R., Bose, K., & Purkait, P. (2022). Real Time Hardware in Loop (HIL) Implementation and Control of Wind Generator. *2022 IEEE 6th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 171–176. <https://doi.org/10.1109/CATCON56237.2022.10077647>

- Nguyen, H. T., Yang, G., Nielsen, A. H., & Jensen, P. H. (2019). Hardware- and Software-in-the-Loop Simulation for Parameterizing the Model and Control of Synchronous Condensers. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(3), 1593–1602. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2913471>
- Ogata, K. (2009). *Modern control engineering*. Prentice Hall India.
- Ruhe, S., Fechner, M., Nicolai, S., & Bretschneider, P. (2020). Simulation of Coupled Components within Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Test Bench. *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPEC49904.2020.9209844>
- Sanchez-Acevedo, S., & D'Arco, S. (2021). Towards a Versatile Cyber Physical Power System Testbed: Design and Operation Experience. *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope52324.2021.9640082>
- Sekar, R., Suresh, D. S., & Naganagouda, H. (2017). A review on power electronic converters suitable for renewable energy sources. *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECOT)*, 501–506. <https://doi.org/10.1109/ICEECOT.2017.8284556>
- Shi, D., Jin, C., Zhang, Z., Choo, F. H., Hai, K. L., & Wang, P. (2017). Implementation of hardware-in-the-loop simulation workbench for a hybrid AC/DC microgrid. *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8086052>
- Shi, J., Cai, H., Wang, M., & Ding, G. (2022a). Application of Hardware in Loop Simulation Technology in Maintenance Training of Complex Systems. *2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)*, 608–612. <https://doi.org/10.1109/IAECST57965.2022.10062209>
- Shi, J., Cai, H., Wang, M., & Ding, G. (2022b). Application of Hardware in Loop Simulation Technology in Maintenance Training of Complex Systems. *2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)*, 608–612. <https://doi.org/10.1109/IAECST57965.2022.10062209>
- Silva, L. I., & Solano, J. (2018). Energy-Based Model for Simulating and Control the Traction System of Electric Bikes. *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/AADECA.2018.8577426>
- Sparn, B., Krishnamurthy, D., Pratt, A., Ruth, M., & Wu, H. (2018). Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulations for Smart Grid Impact Studies. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586357>
- Ullah, Z., Asghar, R., Khan, I., Ullah, K., Waseem, A., Wahab, F., Haider, A., Ali, S. M., & Jan, K. U. (2020). Renewable Energy Resources Penetration within Smart Grid: An Overview. *2020 International*

Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179317>

Villamarín-Jácome, A., Moreno, R., Panteli, M., Noebels, M., Ceseña, E. A. M., & Preece, R. (2025). Optimizing Network Expansion and Battery Storage to Mitigate Cascading Outages via Detailed System Failures Simulations. *IEEE Access*, *13*, 81462–81473.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3567436>

Wehmuth, G. R., Curi Busarello, T. D., & Péres, A. (2021). Step-by-Step Design Procedure for LCL-Type Single-Phase Grid Connected Inverter Using Digital Proportional-Resonant Controller With Capacitor-Current Feedback. *2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 448–454.
<https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00076>

Yee Chong, A. T., Mahmoud, M. A., Lim, F.-C., & Kasim, H. (2020). A review of Smart Grid Technology, Components, and Implementation. *2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU)*, 166–169. <https://doi.org/10.1109/ICIMU49871.2020.9243430>

Zhang, T., She, X., Wang, L., Wang, L., Yang, Y., & Wang, S. (2024). A High-Precision Real-Time Distributed Simulation System Architecture Design. *2024 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, 244–248. <https://doi.org/10.1109/ICCSSE63803.2024.10823748>

Zmood, D. N., & Holmes, D. G. (1999). Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady state error. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321)*, *2*, 1185–1190 vol.2. <https://doi.org/10.1109/PESC.1999.785662>

dSPACE. (17 de 06 de 2025). *dSPACE*. Obtenido de dSPACE: <https://www.dspace.com/en/pub/home.cfm>

Hao, B., Chen, L., Dusan, M., & Fei, G. (2023). *Real-Time Simulation Technology For Modern Power Electronics*. Elsevier.

Taraz Technologies. (Octubre de 2025). Obtenido de <https://www.taraztechnologies.com/product/power-electronics-modules/power/3-phase-inverter-development-kit/>

Apéndices

Apéndice A. Filtro digital

El filtro digital empleado fue de tipo *Peaking* de segundo orden, diseñado mediante la herramienta *Filters Designer* de Matlab. Este filtro tiene la capacidad de modificar la ganancia de una señal a una frecuencia central específica sin afectar significativamente el resto del espectro de frecuencia. Para este caso la frecuencia central es de 60 [Hz] y un ancho de banda de 40 [Hz]. En Matlab es posible controlar que tan estrecha es la banda afectada lo que lo hace fundamental para este trabajo. El filtro diseñado es el siguiente:

$$F(s) = \frac{0.04707z^2 - 0.04707}{z^2 - 1.90043z + 0.90584} \quad (30)$$

Apéndice B. Sensores de tensión y corriente

El módulo de sensado utilizado en el desarrollo de este trabajo es el USM-3IV de Taraz Technologies y cuenta con las siguientes especificaciones principales:

- Rango de tensión seleccionable 10X ($\pm 100V$) y 100X ($\pm 1000V$).
- Rango de detección de corriente de $\pm 100A$.
- Salida BNC bipolar de $\pm 10V$ para osciloscopio y dSPACE.
- Salida unipolar seleccionable de 3V/5V para FPGA y DSP.
- Ancho de banda aislado de 100kHz para tensión y 200kHz para corriente.

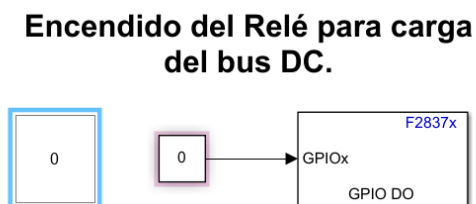
Apéndice C. Pasos para ejecutar el circuito de inicialización y carga del bus DC

A continuación, se presentan los pasos para ejecutar la etapa de inicialización y carga del bus DC de la interfaz:

1. Con el modelo de Matlab/Simulink ejecutado en la tarjeta TI se enciende el relé (normalmente abierto - NA) del circuito de carga, la orden de encendido se da mediante los bloques de la figura 14. El encendido de este se realiza con la ayuda de un puente H debido a que la tensión de activación del relé es de 5 a 12V y la tarjeta TI proporciona tensiones en un rango de 0 a 3,3 [V].

Figura 36

Bloques en Matlab/Simulink para el encendido/apagado del relé NA de carga del bus DC.



2. En este paso, se enciende la fuente AC programable a una tensión menor a la tensión nominal, por ejemplo, 68 [Vrms].
3. Luego se cortocircuitan las resistencias de carga activando manualmente el interruptor de protección de sobre corriente en el lado del PCR y posteriormente se da la orden de desactivar el relé para sacar completamente de operación las resistencias de carga.
4. Se aumenta la tensión de la fuente AC programable a la tensión nominal de 120 [Vrms] para cargar el bus DC aproximadamente a la tensión pico de línea de la red de 293.93 [V].

Apéndice D. Pasos para la ejecución de simulaciones de la interfaz virtual-to-power

Para la ejecución de la simulación de la interfaz es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Verificar la correcta conexión de los dispositivos de la interfaz (sin cables sueltos o haciendo mal contacto). Así mismo, verificar que los sensores, los drivers de los convertidores y puente H estén energizados para el desarrollo de la prueba experimental.
2. Compilar y ejecutar el modelo de la red eléctrica en la plataforma dSPACE 1104 mediante Matlab/Simulink.
3. Compilar y ejecutar el modelo de la interfaz gráfica de Matlab/Simulink en la tarjeta Texas Instruments.
4. Ejecutar el circuito de inicialización y carga del bus DC descrito en el numeral 4.3.
5. En el modelo ejecutado en la TI se enciende el algoritmo de control de corriente y control del bus DC.
6. Luego se debe activar el breaker ubicado en el lado del PCH y se enciende el algoritmo de control de tensión en la TI.

Con estos pasos se logra ejecutar correctamente la simulación de la interfaz *virtual-to-power*.

Para finalizar la simulación del módulo es necesario continuar con los siguientes pasos:

7. Primero se apagan los sistemas de control, inicialmente control de tensión, el control de corriente y bus de DC. Seguidamente se detiene la ejecución del modelo de Matlab/Simulink en la tarjeta Texas Instruments (TI).
8. En este paso, se apaga la fuente AC programable y seguidamente se desactivan los breakers del PCH y PCR.

9. En caso de ser necesario se puede detener la ejecución del modelo de la red eléctrica en la dSPACE. Para ello, se ejecuta el software dSPACE ControlDesk y en la interfaz seleccionar el botón (Stop). De lo contrario, si no se detiene la ejecución del modelo, este no afectaría en la implementación, incluso ya estaría el modelo compilado en la plataforma para el desarrollo de más pruebas.

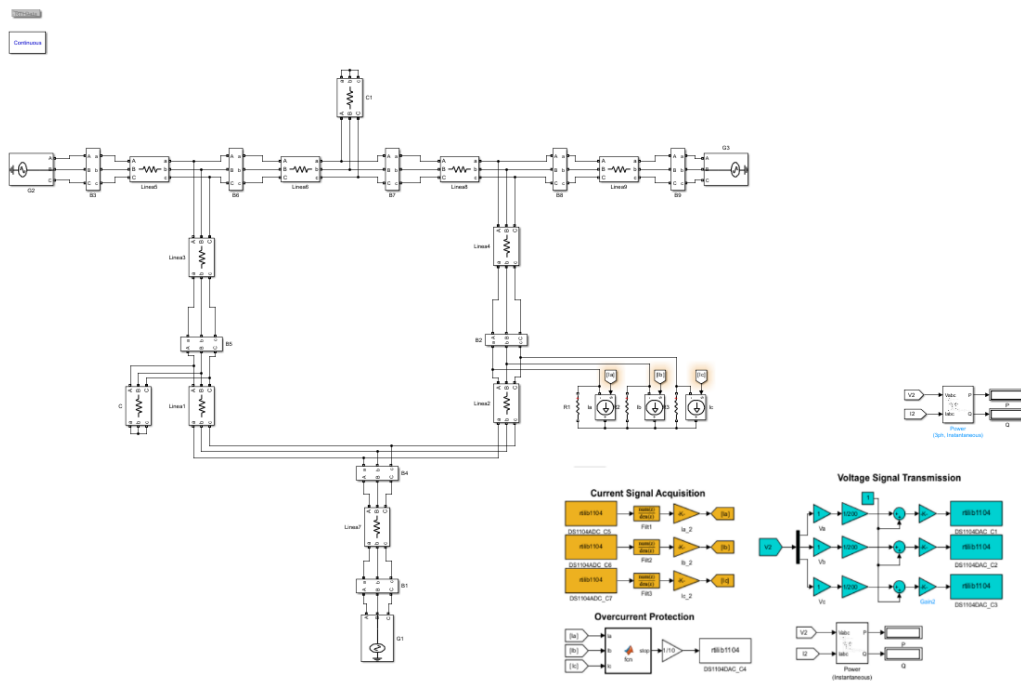
En casos de falla en la implementación de pruebas, como la inadecuada respuesta de los algoritmos de control o del programa que controla el funcionamiento de la fuente programable, es necesario abrir los interruptores de protección en el PCH y PCR, y por último cerrar los programas.

Apéndice E. Modelos de las redes eléctricas adaptadas de la IEEE

- Red de 9 Nodos

Figura 37

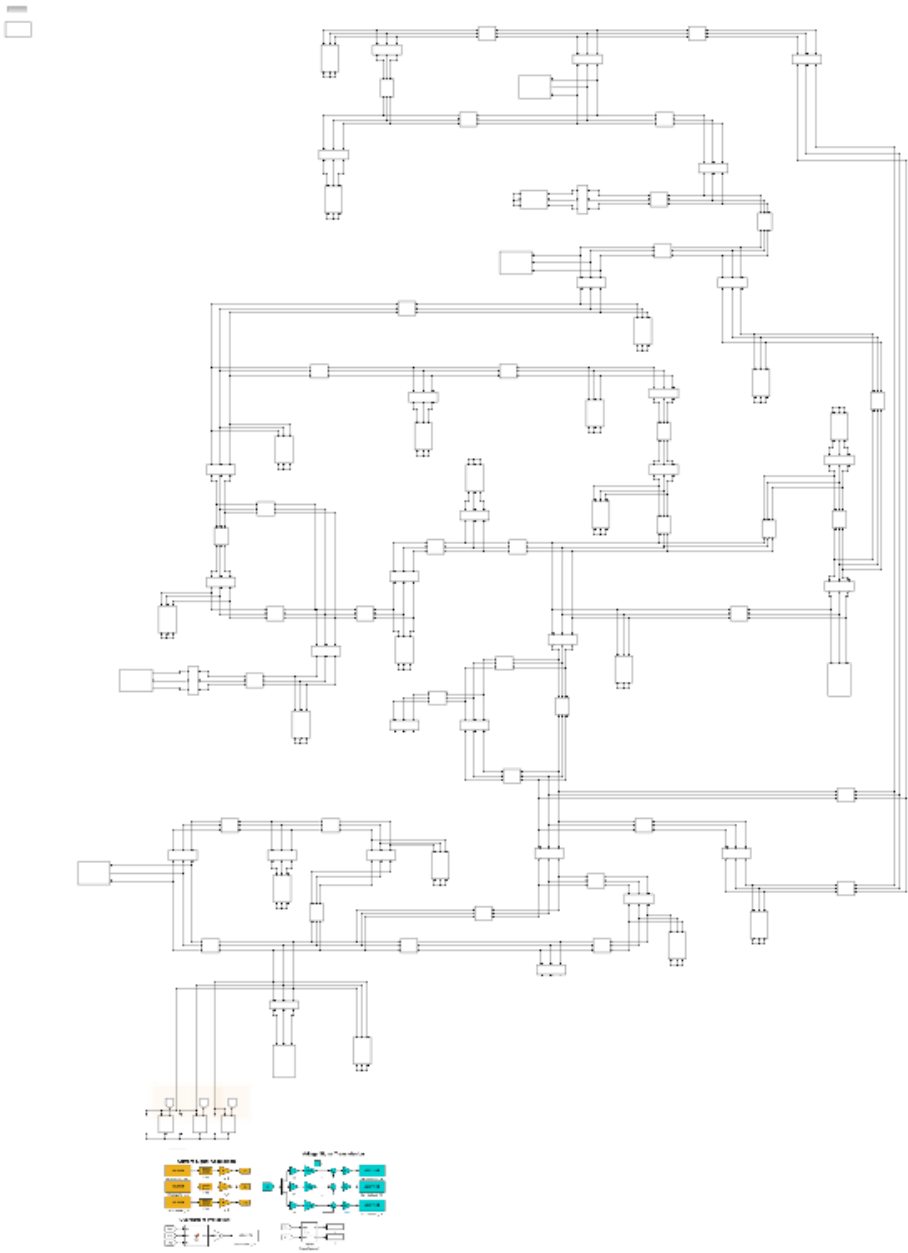
Modelo del sistema de distribución de 9 nodos.



- Red de 30 Nodos

Figura 38

Modelo del sistema de distribución de 30 nodos.



Apéndice F. Documentos

En el siguiente enlace se encuentran los algoritmos e interfaces de Matlab/Simulink implementados en la TI y la dSPACE: https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1Tk5DoD-fW-l7K_a52_ynd9jJrRnkXC1b. Este incluye los archivos del módulo completo, que corresponden a la interfaz gráfica de Simulink y el archivo *ParamControl120_.m* que debe ser ejecutado primero. Adicionalmente, se incluyen los modelos de red eléctrica adaptados de estándares IEEE.