

**DESARROLLO DE UN MÓDULO HARDWARE IN THE LOOP PARA LA  
EMULACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA Y CONSUMO  
ENERGÉTICO**

**JUAN CARLOS ALZATE CASTAÑO  
YULIAN ARLEY CORTÉS CORTÉS  
DANIEL ROMERO ROMERO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN  
2025**

**DESARROLLO DE UN MÓDULO HARDWARE IN THE LOOP PARA LA  
EMULACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA Y CONSUMO  
ENERGÉTICO**

**JUAN CARLOS ALZATE CASTAÑO  
YULIAN ARLEY CORTÉS CORTÉS  
DANIEL ROMERO ROMERO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

**Asesor técnico:**

**Brandon Cortés Caicedo**

**Magister en Gestión energética industrial**

**Asesor metodológico:**

**Jauder Alexander Ocampo Toro**

**Magister en Gestión energética industrial**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MEDELLÍN**

**2025**

# Contenido

	<b>Pág.</b>
Resumen.....	6
Abstract .....	7
Introducción .....	9
1. Planteamiento del problema.....	11
1.1. Descripción .....	11
1.2. Formulación .....	11
2. Justificación .....	12
3. Objetivos.....	13
3.1. Objetivo general .....	13
3.2. Objetivos específicos .....	13
4. Referentes teóricos.....	14
4.1 Hardware in the Loop.....	14
4.2 Redes de distribución eléctrica.....	16
4.3 Relevancia del HIL en sistemas eléctricos.....	16
4.4 Recursos energéticos distribuidos .....	16
4.4.1 <i>Generación Distribuida</i> .....	18
4.5 Emulación de cargas y DERs.....	18
4.6 Control digital en redes eléctricas de distribución .....	18
5. Metodología .....	19
5.1 Tipo de proyecto .....	19
5.2 Método .....	19
5.3 Instrumentos de recolección de información .....	20

<i>Fuentes primarias.</i> .....	20
<i>Fuentes secundarias.</i> .....	20
6. Resultados .....	21
6.1. Primera fase.....	22
6.2. Segunda fase .....	30
6.3. Tercera fase .....	34
7. Conclusiones .....	37
8. Recomendaciones .....	38
9. Referencias bibliográficas.....	39

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Esquema de composición de módulo HIL .....	15
<i>Figura 2.</i> Recursos energéticos distribuidos – DER’s .....	17
<i>Figura 3.</i> Esquema de fases para el desarrollo del módulo HIL .....	21
<i>Figura 4.</i> Placa de desarrollo ST Nucleo-F302R8, panel delantero (izq) y trasero (der) .....	22
<i>Figura 5.</i> Diseño de placa ST Nucleo-F302R8, panel delantero (izq) y trasero (der) .....	23
<i>Figura 6.</i> Módulo STEVAL-IHM023V3 .....	24
<i>Figura 7.</i> Conexiones módulo STEVAL-IHM023V3 .....	25
<i>Figura 8.</i> Medidor ZM194-D9Y .....	26
<i>Figura 9.</i> Transformador 5.4 VA ETE11543 .....	27
<i>Figura 10.</i> Transformador de Corriente.....	28
<i>Figura 11.</i> Planeación de distribución de módulos.....	31
<i>Figura 12.</i> Dimensionamiento de conexiones de módulos.....	32
<i>Figura 13.</i> Conexiones de placas ST Nucleo-F302R8 y medidor multifuncional.....	33
<i>Figura 14.</i> Implementación de pantalla HMI, bornes y medidor multifuncional.....	34
<i>Figura 15.</i> Prueba de pantalla HMI, bornes y medidor multifuncional.....	35
<i>Figura 16.</i> Prueba de módulo HIL implementado .....	36

## Resumen

# DESARROLLO DE UN MÓDULO HARDWARE IN THE LOOP PARA LA EMULACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA Y CONSUMO ENERGÉTICO

JUAN CARLOS ALZATE CASTAÑO  
YULIAN ARLEY CORTÉS CORTÉS  
DANIEL ROMERO ROMERO

En el contexto educativo y experimental, se ha identificado la necesidad de contar con herramientas didácticas que permitan la simulación y validación en tiempo real de sistemas eléctricos, sin comprometer la seguridad ni requerir infraestructura industrial compleja. El objetivo general de este proyecto fue diseñar e implementar un módulo portátil bajo el enfoque Hardware-in-the-Loop (HIL), capaz de emular redes de distribución eléctrica y el comportamiento de cargas reales. Para ello, se aplicó una metodología basada en el diseño por etapas, que incluyó la selección de componentes, el desarrollo estructural y la integración de controladores, sensores y sistemas de comunicación, empleando herramientas como STM32CubeIDE y Arduino IDE.

El prototipo final integra una placa de desarrollo ST Nucleo-F302R8, un módulo inversor STEVAL-IHM023V3, un medidor trifásico ZM194-D9Y, transformadores de corriente y voltaje, así como una interfaz HMI para visualización. La arquitectura permite cerrar el lazo entre simulación digital y sistema físico mediante control embebido y adquisición de datos en tiempo real. Se priorizó un diseño compacto, seguro y fácilmente transportable, con protección de componentes mediante acrílicos. Se logró validar el funcionamiento básico mediante una prueba de comunicación serial usando Arduino. Como proyección futura se plantea la integración de modelos dinámicos complejos y protocolos industriales como Modbus RTU. Este desarrollo representa una herramienta eficaz para la enseñanza de control digital, electrónica de potencia y monitoreo energético.

**Palabras claves:** Hardware in the loop, adquisición de datos, electrónica de potencia, prototipo didáctico, sistemas eléctricos.

## **Abstract**

# **DEVELOPMENT OF A HARDWARE IN THE LOOP MODULE FOR THE EMULATION OF ELECTRICAL DISTRIBUTION GRIDS AND ENERGY CONSUMPTION**

**JUAN CARLOS ALZATE CASTAÑO**  
**YULIAN ARLEY CORTÉS CORTÉS**  
**DANIEL ROMERO ROMERO**

In educational and experimental contexts, there is a growing need for didactic tools that enable real-time simulation and validation of electrical systems without relying on complex industrial infrastructure. The main objective of this project was to design and implement a portable Hardware-in-the-Loop (HIL) module capable of emulating distribution networks and the behavior of real loads. A stage-based methodology was applied, encompassing the selection of components, structural design, and integration of controllers, sensors, and communication systems, using platforms such as STM32CubeIDE and Arduino IDE.

The final prototype integrates a ST Nucleo-F302R8 development board, a STEVAL-IHM023V3 inverter module, a ZM194-D9Y three-phase power meter, current and voltage transformers, and an HMI interface for visualization. The architecture closes the loop between digital simulation and physical systems through embedded control and real-time data acquisition. The design prioritized compactness, safety, and portability, using acrylic covers for component protection. Basic functionality was validated through serial communication tests using Arduino. Future work includes the integration of complex dynamic models and industrial protocols such as Modbus RTU. This development represents an effective educational tool for teaching digital control, power electronics, and energy monitoring.

**Keywords:** Hardware in the loop, data acquisition, power electronics, didactic prototype, electrical systems

## Glosario

**Generación distribuida (GD):** es un modelo de producción de energía eléctrica que consiste en generar la electricidad cerca del lugar donde se consume, en lugar de depender exclusivamente de grandes plantas centrales alejadas que distribuyen la energía a través de largas redes (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2017).

**Hardware In the Loop (HIL):** la simulación HIL es una técnica para desarrollar y probar sistemas embebidos. Consiste en conectar las interfaces reales de entrada y salida (E/S) del hardware del controlador a un entorno virtual que simula el sistema físico (MathWorks, 2025).

**Transición energética:** es el proceso de cambio del modelo actual de producción y consumo de energía —basado principalmente en fuentes fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural— hacia un sistema energético más sostenible, limpio y eficiente. Este proceso implica cambios grandes como la sustitución de energías fósiles por energías renovables, descarbonización del sistema energético y la electrificación del transporte y la industria (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

## Introducción

La transformación del sistema eléctrico hacia un modelo más descentralizado y sostenible se presenta como necesidad ante el alto consumo de combustibles fósiles, que sumado a la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero conllevan a la integración de recursos energéticos distribuidos (DER, por sus siglas en inglés), en particular los generadores distribuidos (UPME, 2023). Esta transición energética implica desafíos significativos en la operación y planificación de las redes de distribución, pues las fuentes de energía renovables no convencionales (FNCER), el comportamiento de las cargas y el almacenamiento de energía alteran la naturaleza de la demanda eléctrica, introduciendo dinámicas más complejas y menos predecibles en las redes. En este contexto, se hace sumamente importante contar con herramientas avanzadas que permitan evaluar el comportamiento de la red bajo diversas condiciones operativas sin comprometer la infraestructura, la dinámica óptima del sistema y su confiabilidad.

La técnica de Hardware in the Loop (HIL) se ha consolidado como una metodología eficaz para el desarrollo, prueba y validación de sistemas de control en entornos eléctricos. Esta técnica permite la interacción en tiempo real entre modelos simulados y dispositivos físicos, facilitando la evaluación de algoritmos de control, dispositivos electrónicos de potencia y estrategias de gestión energética en un entorno seguro y reproducible (Gómez, 2018). La aplicación de la estrategia HIL es particularmente relevante en las redes de distribución, donde las pruebas en campo pueden ser costosas y riesgosas respecto a la operación y confiabilidad de las redes.

El desarrollo de un módulo HIL orientado a la emulación de consumo energético representa una herramienta valiosa para la experimentación y validación de soluciones tecnológicas adaptadas a las nuevas exigencias del sistema eléctrico. A través de estas plataformas, es posible replicar patrones de carga reales o sintéticos con base en estudios e históricos de consumo, para obtener la respuesta de la red ante eventos transitorios o perturbaciones. Así mismo, identificar la interacción de dispositivos físicos con modelos virtuales en tiempo real.

Diversas investigaciones han abordado el diseño e implementación de módulos HIL para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica. Por ejemplo, en el trabajo de (Gómez, 2018) se presenta el uso de este módulo para emular el proceso de generación de energía eléctrica de un aerogenerador de baja potencia. Por otro lado, (Brito García, Petit, Mantilla Villalobos, & Rey López, 2024) presentan un diseño basado en la técnica Power Hardware in the Loop para integrar dispositivos de hardware reales mediante una interfaz con convertidores electrónicos de potencia, con el objetivo de fortalecer los procesos de investigación y aprendizaje en el campo de las redes eléctricas inteligentes. Asimismo, (Castellanos Parada, Mantilla Villalobos, Rey, & Bautista Porras, 2023). desarrollan un simulador de sistemas fotovoltaicos con conexión a la red utilizando la técnica HIL, permitiendo implementar y estudiar escenarios operativos para evaluar esquemas de control con fines prácticos y experimentales.

En este sentido, este documento presenta el diseño e implementación de un módulo HIL orientado a la emulación de cargas eléctricas y su consumo en redes de distribución. El sistema propuesto combina elementos de electrónica de potencia y sistemas embebidos para ofrecer una herramienta que facilite el análisis del impacto del consumo eléctrico en la estabilidad y eficiencia de la red eléctrica; y así mismo evaluar su rendimiento a través de la conexión de componentes físicos enlazados con simulaciones computacionales en tiempo real.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1. Descripción**

En el contexto de la transición energética, las redes de distribución enfrentan una constante evolución impulsada por cambios tecnológicos, variabilidad en la demanda y la integración de fuentes de energía renovable. Esta complejidad creciente exige herramientas capaces de garantizar el correcto funcionamiento y la eficiencia de dichos sistemas antes de su implementación en entornos reales (UPME, 2023). Sin embargo, probar estos sistemas directamente en la red física presenta riesgos operativos, altos costos y limitaciones para reproducir condiciones extremas o escenarios variables, como picos de demanda, caídas de tensión o desconexiones inesperadas (confiabilidad). Estas condiciones, comunes en la operación real, son difíciles de simular con precisión en un entorno de prueba convencional.

Ante esta situación, los entornos de simulación avanzados cobran especial relevancia. En particular, la estrategia HIL permite emular el comportamiento dinámico de la red eléctrica, validando el rendimiento, la estabilidad y la seguridad del sistema sin comprometer la operación de la red real.

Cabe resaltar que, sin una adecuada replicación de las condiciones reales de operación de la red, no es posible el dimensionamiento de la dinámica del sistema de distribución, lo que implica enfrentar determinada incertidumbre en los escenarios de pruebas. En este contexto, se identifica la necesidad de acudir al desarrollo de un módulo HIL específico para la emulación de consumo energético en redes de distribución eléctrica, que permita replicar escenarios reales de consumo y así evaluar el comportamiento de los sistemas de control.

### **1.2. Formulación**

¿Cómo desarrollar un módulo HIL que emule una red eléctrica de distribución de acuerdo a sus condiciones de operación?

## 2. Justificación

La construcción de un módulo HIL para la emulación de redes eléctricas de consumo es fundamental para avanzar en el desarrollo seguro y eficaz de sistemas de gestión energética. Este proyecto es relevante porque permitirá simular condiciones de consumo eléctrico en entornos variados, proporcionando un sistema confiable para realizar pruebas sin los riesgos asociados a la infraestructura real. Esto facilitará el desarrollo de innovaciones tecnológicas en el campo de la energía, mejorará la eficiencia operativa de los sistemas de prueba, y ofrecerá un medio para evaluar y perfeccionar los sistemas de gestión energética antes de su implementación. Adicionalmente, la simulación controlada mediante el módulo HIL permitirá ajustar parámetros y analizar el comportamiento de los sistemas en situaciones de carga máxima, mejorando la planificación y el diseño de soluciones energéticas avanzadas.

De acuerdo con lo anterior, algunas de las contribuciones que aporta el uso de este tipo de módulos para la simulación de cargas es el óptimo dimensionamiento de una red eléctrica de distribución, proporcionando confiabilidad, estabilidad y la posibilidad de un monitoreo constante de la red.

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo general

Desarrollar un módulo del tipo HIL para la emulación de una red de distribución eléctrica, que permita la validación y prueba de dispositivos de medición IoT, mediante la variación controlada de parámetros eléctricos como tensiones de fase, corrientes y factor de potencia, en un entorno seguro y controlado que reproduzca condiciones reales de operación.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño técnico y físico del módulo HIL que permita la emulación de redes de distribución eléctrica, asegurando que los componentes seleccionados cumplan con los criterios de precisión, robustez y compatibilidad con condiciones operativas reales.
- Implementar el módulo HIL conforme al diseño técnico establecido, integrando los componentes físicos y de simulación necesarios para garantizar su operatividad en la emulación de redes de distribución eléctrica bajo variaciones de variables eléctricas y otras condiciones controladas.
- Evaluar el módulo HIL a través de pruebas funcionales en tiempo real, para así verificar el óptimo funcionamiento del módulo ante escenarios de operación de la red eléctrica de distribución emulada.

## 4. Referentes teóricos

Los conceptos teóricos presentados a continuación permiten comprender el diseño de un módulo HIL para emular redes de distribución eléctrica, facilitando su análisis y validación en entornos controlados.

### 4.1 Hardware in the Loop

El Hardware in the Loop es una técnica de simulación avanzada que permite evaluar el comportamiento de sistemas eléctricos y electrónicos complejos mediante la interacción entre hardware físico real y modelos de simulación ejecutados en tiempo real. Esta tecnología ha sido ampliamente adoptada en el campo de la ingeniería eléctrica por su capacidad para realizar pruebas seguras y precisas en condiciones controladas, lo que evita el uso directo de infraestructura operativa durante la fase de validación (Casellas, Gómez, & León, 2014). El principio fundamental del HIL consiste en conectar un dispositivo físico (por ejemplo, un controlador) a un entorno de simulación que emula las condiciones reales de operación. Esto posibilita realizar pruebas funcionales en situaciones extremas, como sobrecargas o fluctuaciones de voltaje, sin poner en riesgo componentes reales. De esta manera, los desarrolladores pueden identificar fallos, optimizar algoritmos de control y validar diseños antes de su implementación en campo (Brito, Ramírez, & Salcedo, 2024).

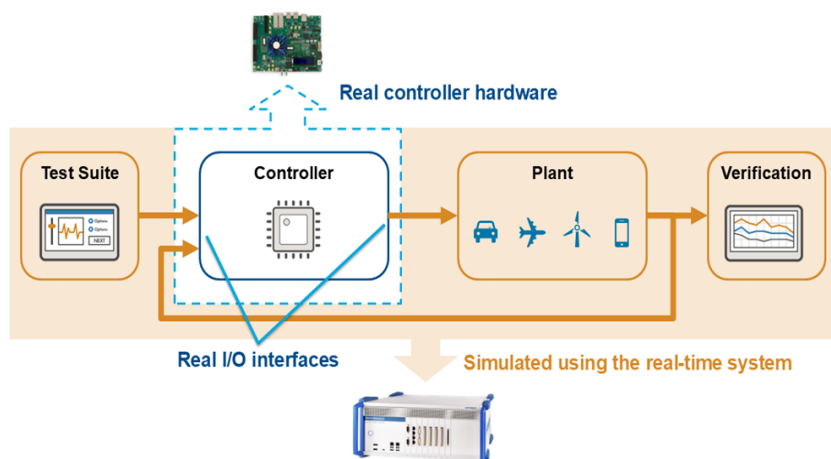
Componentes de un sistema HIL. Un sistema HIL se compone de distintos elementos interconectados, que en conjunto permiten una simulación efectiva:

- **Hardware bajo prueba (HuT):** corresponde a los componentes físicos que se desean evaluar. Estos dispositivos interactúan directamente con los modelos de simulación y pueden incluir controladores, actuadores o sensores.
- **Modelos de software:** permiten representar el comportamiento del sistema mediante ecuaciones matemáticas y algoritmos, emulando fenómenos eléctricos como variaciones de carga, fallos o respuestas del sistema.
- **Interfaz hardware–software:** es el canal de comunicación entre el HuT y la simulación.

Su función es garantizar el intercambio bidireccional de datos en tiempo real.

- **Plataforma de simulación:** proporciona los recursos computacionales necesarios para ejecutar los modelos con precisión temporal, reproduciendo el comportamiento del sistema bajo condiciones reales.
- **Modelos de simulación en gestión energética:** representan dinámicamente variables del sistema eléctrico como demanda, generación, pérdidas o estabilidad, siendo esenciales para prever el comportamiento del sistema y evaluar su desempeño (Brito, Ramírez, & Salcedo, 2024)

En la Figura 1 se presenta un esquema representativo de la estructura y componentes de un módulo HIL (Hardware-in-the-Loop), el cual permite la simulación en tiempo real de sistemas físicos a través de una plataforma computacional. Esta representación resulta clave para comprender la forma en que se integran los elementos de hardware y software durante la validación de sistemas embebidos.



*Figura 1.* Esquema de composición de módulo HIL

Fuente: (MathWorks, 2025)

Esta figura representa la arquitectura funcional de un sistema HIL (Hardware-in-the-Loop), donde el controlador físico interactúa con una planta simulada en tiempo real. El flujo muestra cómo el conjunto de pruebas (Test Suite) alimenta con señales al controlador real, que se conecta mediante interfaces de entrada/salida (I/O) a un entorno virtual que simula el comportamiento del sistema físico (Plant), como un vehículo, turbina o dispositivo móvil. Finalmente, los resultados son verificados y evaluados. Este esquema destaca la utilidad del HIL para validar

controladores de forma segura, precisa y sin necesidad de poner en riesgo un sistema real.

#### **4.2 Redes de distribución eléctrica**

Las redes de distribución eléctrica son el vínculo entre los sistemas de generación y los usuarios finales. Su función principal es transportar la energía eléctrica de forma eficiente y segura, pero enfrentan desafíos constantes relacionados con la variabilidad en la demanda, la integración de fuentes renovables y las perturbaciones en la red. Estas condiciones generan escenarios operativos complejos que pueden comprometer la estabilidad y eficiencia del sistema, por lo cual resulta indispensable contar con herramientas como el HIL que permitan simular, analizar y validar el comportamiento de estas redes antes de implementar nuevas soluciones (Casellas et al., 2014; Brito et al., 2024).

#### **4.3 Relevancia del HIL en sistemas eléctricos**

El uso del HIL en ingeniería eléctrica permite desarrollar y probar sistemas de control sin necesidad de conectarlos directamente a la red eléctrica real. Esto representa una ventaja significativa en términos de seguridad, ahorro de tiempo y costos operativos. Además, al replicar condiciones reales en un entorno de simulación, los ingenieros pueden evaluar la respuesta de sus sistemas ante distintas variables, ajustando parámetros y corrigiendo errores antes de su despliegue definitivo. Según Casellas et al. (2014), el principal beneficio del HIL radica en su capacidad de realizar simulaciones de alto nivel en paralelo con el desarrollo físico del sistema, lo que permite someterlo a diferentes condiciones sin implicación de riesgos.

#### **4.4. Recursos energéticos distribuidos**

Los Recursos Energéticos Distribuidos (DER, por sus siglas en inglés) son recursos energéticos a pequeña escala que se instalan cerca de los centros de consumo y se conectan a la red de distribución. Estos recursos pueden gestionarse de forma automática o manual, y tienen la capacidad de inyectar energía, consumirla o proporcionar servicios complementarios a la red de manera dinámica. Entre los DER se incluyen la Generación Distribuida, los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica, los Vehículos Eléctricos, la Respuesta de la Demanda y la

Autogeneración a Pequeña y Gran Escala conectadas a la red de distribución, entre otros. Su implementación contribuye a un sistema eléctrico más flexible, eficiente y resiliente (Ministerio de Minas y Energía, 2021) (National Association of Regulatory Utility Commissioners , 2016). En la Figura 2 se muestra un esquema de los tipos de DER que pueden estar conectados a una red o microrred eléctrica.



*Figura 2.* Recursos energéticos distribuidos – DER's  
Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

La figura presenta los principales componentes que integran los Recursos Energéticos Distribuidos (DER's), fundamentales para la transición energética y la gestión descentralizada de la electricidad. Se destacan cuatro ejes clave: la *respuesta de la demanda*, que modifica el consumo según señales externas; la *generación distribuida y autogeneración*, basada en fuentes como paneles solares o turbinas eólicas; los *vehículos eléctricos con carga inteligente*, que adaptan su demanda a condiciones del sistema; y el *almacenamiento behind-the-meter*, que permite almacenar energía en el lugar de consumo. Este enfoque permite mayor flexibilidad, eficiencia y participación del usuario final en la gestión energética.

**4.4.1 Generación Distribuida.** La generación distribuida, también conocida como descentralizada, consiste en instalar diferentes fuentes de generación y microgeneración, principalmente renovables cerca de los puntos de consumo, como en el caso de los sistemas solares fotovoltaicos. De esta manera, se evita la dependencia de las centrales convencionales (hidráulicas y térmicas) y se equilibra la generación de energía, pues al estar más cerca se reducen las pérdidas y se ahorran tiempos de transporte. Por otra parte, la generación distribuida beneficia a los usuarios finales, mejorando la calidad del servicio, haciendo que sea más seguro y confiable (CREG, 2023) (Enel, 2023).

#### **4.5 Emulación de cargas y DERs**

La emulación de cargas y DERs consiste en la representación digital o física de dispositivos de consumo eléctrico (cargas) y de recursos energéticos distribuidos mediante modelos computacionales o sistemas de hardware en tiempo real. Su objetivo es recrear el comportamiento dinámico, eléctrico y de control de estos elementos dentro de un entorno de pruebas o investigación. Este proceso permite evaluar, validar y desarrollar tecnologías, estrategias de control y sistemas de gestión de energía sin necesidad de utilizar equipos reales a gran escala, lo cual reduce costos, riesgos y tiempos de implementación (Han, Hong, Feng, & Syed, 2022).

#### **4.6 Control digital en redes eléctricas de distribución**

Se refiere al conjunto de técnicas y sistemas computacionales para gestionar de forma automatizada y en tiempo real el funcionamiento de la red de distribución. Este control permite supervisar variables como tensión, corriente, frecuencia y calidad del servicio, y actuar de manera rápida ante fallas, sobrecargas o variaciones en la demanda. Además, facilita la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos (DERs), como paneles solares, baterías y vehículos eléctricos. En el contexto colombiano, su implementación ha comenzado con iniciativas lideradas por empresas como EPM, Celsia y Enel Colombia, que han desplegado redes inteligentes con medidores avanzados, reconectores automáticos y sistemas SCADA para monitoreo y control (Lozano, 2020).

## 5. Metodología

### 5.1 Tipo de proyecto

El presente proyecto se enmarca en una investigación aplicada orientada al desarrollo de un prototipo funcional de un módulo HIL, diseñado para emular redes de distribución eléctrica en condiciones controladas. La propuesta metodológica se enmarca dentro de un enfoque de investigación interactiva, que permite comprender el funcionamiento a través del diseño e implementación del módulo HIL.

### 5.2 Método

Este proyecto requiere una serie de procedimientos que permitan a los investigadores abordar la necesidad de simular y validar de forma segura las condiciones reales de una red de distribución eléctrica, mediante el desarrollo de un prototipo funcional de un módulo HIL. La metodología contempla tanto el diseño del módulo como su validación técnica. El desarrollo del módulo HIL se estructura en las siguientes fases:

**Diseño del Módulo HIL:** Incluye la selección de componentes electrónicos, el diseño físico y la definición de especificaciones técnicas que permitan replicar con precisión las condiciones de carga y generación de una red de distribución eléctrica.

**Montaje del Sistema:** Implementación del módulo según criterios de diseño, con los componentes seleccionados, integrándolos con cargas para permitir la interacción entre el hardware real y un emulador de la red.

**Validación y Pruebas:** Se implementan pruebas experimentales para validar el funcionamiento del módulo HIL. Estas pruebas se enfocan en el ajuste de parámetros, comparando los resultados de simulación con datos reales, con el fin de afinar la precisión del sistema y asegurar su confiabilidad en diferentes escenarios de operación.

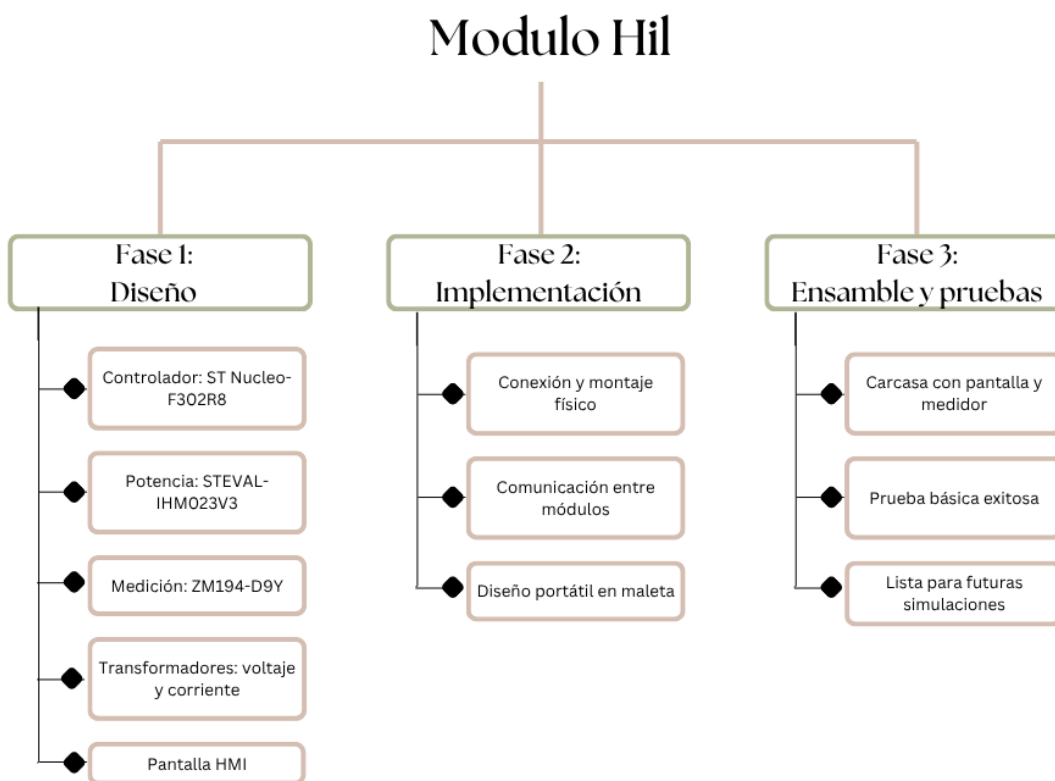
### 5.3 Instrumentos de recolección de información

**5.3.1 Fuentes primarias.** Las fuentes primarias utilizadas en este proyecto incluyen documentos investigación originales, informes técnicos especializados y estudios experimentales relacionados con la simulación de redes eléctricas y la validación de sistemas de gestión energética. Estos insumos permitieron obtener información directa sobre metodologías de diseño, selección de componentes y esquemas de integración entre hardware y software en entornos de simulación en tiempo real, esenciales para el desarrollo de un prototipo funcional del módulo HIL.

**5.3.2 Fuentes secundarias.** Complementariamente, se emplearon fuentes secundarias como artículos de revisión científica, publicaciones en revistas especializadas en automatización eléctrica, y contenidos de portales institucionales relacionados con estándares y normativas aplicables a sistemas de simulación eléctrica. Estas fuentes ofrecieron una perspectiva más amplia sobre las tendencias actuales en tecnologías HIL, buenas prácticas en la implementación de sistemas de prueba, y criterios de validación para asegurar la confiabilidad del módulo desarrollado.

## 6. Resultados

Esta propuesta investigativa se desarrolla bajo un proceso sistemático y planeado con el fin de alcanzar los objetivos planteados, por lo tanto, se configuraron tres fases actividades que atienden a las necesidades que subyacen en este proyecto de creación y ejecución. Para garantizar la operatividad del sistema HIL (Hardware-in-the-Loop), fue necesario estructurar el proyecto en tres fases principales: diseño, implementación y ensamble con pruebas. Esta organización permite comprender de manera visual cómo se integran los componentes físicos, electrónicos y de comunicación, asegurando un desarrollo progresivo y coherente del módulo. En la Figura 3, se ilustra esta secuencia y la distribución de tareas técnicas que permitieron consolidar el prototipo funcional.



*Figura 3.* Esquema de fases para el desarrollo del módulo HIL

Fuente: Elaboración propia basada en documentación técnica de MathWorks

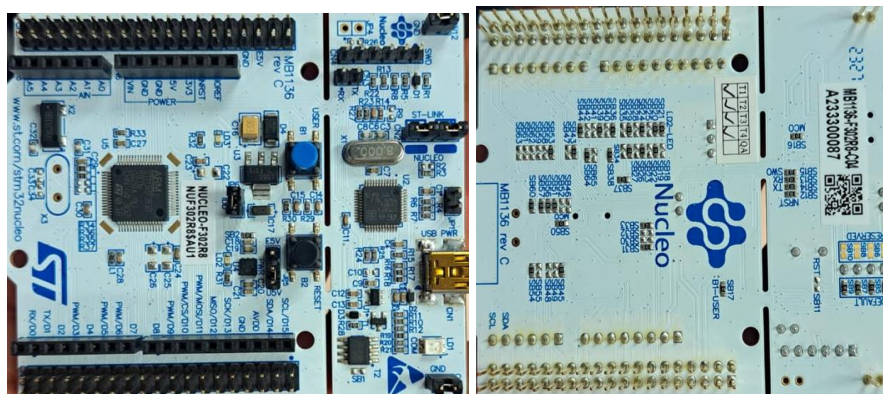
La figura ilustra de manera clara y progresiva el proceso de creación del Módulo HIL,

desde la concepción hasta su validación final. En la primera fase, centrada en el diseño, se aprecia una selección cuidadosa de componentes tecnológicos que no solo aseguran funcionalidad, sino que permiten una futura integración fluida: desde el controlador hasta la interfaz HMI, todo apunta a una arquitectura pensada con precisión. La segunda fase, de implementación, traduce ese diseño en realidad tangible: se ensamblan físicamente los módulos, se establecen canales de comunicación entre ellos y se garantiza la portabilidad del sistema, un aspecto clave para su uso en entornos educativos o de prueba. Finalmente, la tercera fase representa no solo el cierre técnico, sino también un hito simbólico: la validación del módulo, la verificación de su operatividad y su disposición para nuevas simulaciones, dejan ver un proceso de innovación que no termina, sino que se proyecta hacia el futuro. Esta imagen no solo resume un procedimiento técnico, sino que revela una metodología ordenada y con visión sistémica.

### **6.1. Primera fase**

Presenta el dimensionamiento de diseño del módulo HIL, contemplando aspectos técnico-económico de los equipos y componentes requeridos. El módulo HIL estará comprendido por una etapa de control y/o adquisición de datos, una planta o proceso que a su vez servirá como carga del sistema, y, por último, la etapa de medición de variables.

Como controlador del sistema se seleccionó la tarjeta ST Nucleo-F302R8, una placa de desarrollo basada en el microcontrolador STM32F302R8 de 32 bits con arquitectura ARM Cortex-M4, como se muestra en la Figura 4. Está diseñada para el desarrollo ágil de aplicaciones embebidas en áreas como control industrial, automatización, electrónica de potencia y entornos HIL. Permite programar firmware con herramientas como STM32CubeIDE, facilitando el control de convertidores (inversores, rectificadores), también permite la implementación de algoritmos de control en tiempo real (PID, PWM) y la lectura de señales analógicas y digitales. En contextos como la emulación de DERs, esta tarjeta actúa como controlador digital, estimador o modelador de cargas, lo que permite validar el sistema en tiempo real dentro de entornos simulados.



*Figura 4.* Placa de desarrollo ST Nucleo-F302R8, panel delantero (izq) y trasero (der)  
Fuente: Registro propio

La imagen muestra la placa de desarrollo **ST Nucleo-F302R8**, utilizada como cerebro del sistema en la fase de diseño del Módulo HIL. Su estructura compacta, con múltiples pines de entrada/salida, conectividad USB y soporte para depuración, la convierte en una herramienta ideal para aplicaciones de control en tiempo real. Esta placa permite integrar fácilmente sensores, módulos de potencia y pantallas, siendo clave para garantizar una comunicación fluida entre los componentes y la estabilidad del sistema durante las simulaciones.

La Figura 5 presenta dos vistas de la placa de desarrollo ST Nucleo-F302R8. A la izquierda se observa el panel delantero, donde se destacan los pines de conexión hembra en los bordes, el microcontrolador STM32 al centro, el puerto USB mini-B en la parte superior izquierda, el botón de reinicio y los LED indicadores de estado. A la derecha se muestra el panel trasero, en el que se observan las pistas del circuito impreso, los puntos de soldadura y la serigrafía con información técnica de los pines, lo que permite visualizar la distribución interna y conexiones del hardware.

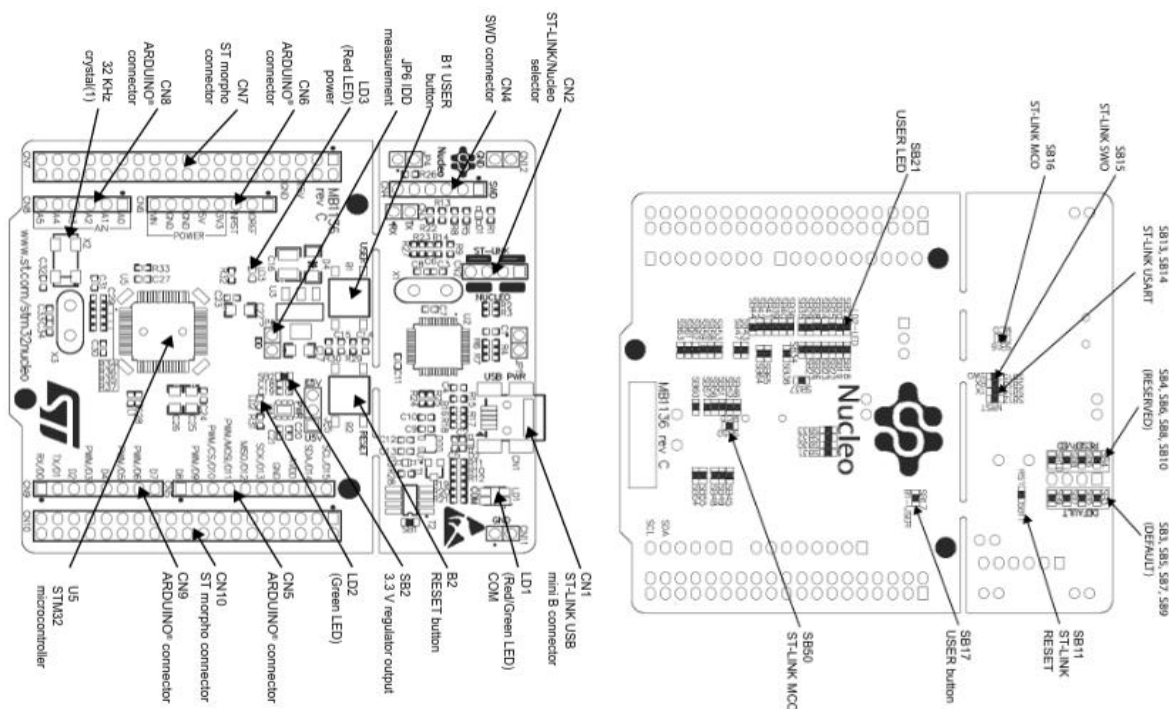


Figura 5. Diseño de placa ST Nucleo-F302R8, panel delantero (izq) y trasero (der)  
Fuente: (ST Microelectronics, s.f.)

La figura presenta el diagrama detallado de la placa ST Nucleo-F302R8, resaltando la ubicación y función de cada uno de sus componentes clave. Desde los conectores compatibles con Arduino™, hasta los indicadores LED, reguladores de voltaje y el microcontrolador STM32F302, el esquema permite comprender cómo se organiza el hardware para facilitar tanto el desarrollo como la integración de sistemas embebidos. Este nivel de visualización resulta esencial para quienes necesitan realizar conexiones precisas y aprovechar al máximo las capacidades de la placa en proyectos como el Módulo HIL.

El sistema físico que se controlará en el módulo HIL recibe el nombre de Planta. La conexión de diferentes tipos de cargas al sistema permitirá caracterizar su funcionamiento por separado y respuesta ante el control de variables. Cabe anotar que, para el caso de pruebas con una carga trifásica como un motor de inducción, se requiere de un módulo de potencia que permita ejecutar el control sobre dicha carga dinámica.

Se seleccionó el módulo STEVAL-IHM023V3, una tarjeta de diseño universal totalmente evaluada, que integra un puente inversor trifásico basado en IGBTs de 600 V (STGP10H60DF) y

el controlador L6390, que incluye protección por hardware (sobrecorriente y sobretensión) y un amplificador operacional para medición avanzada de corriente. Esta tarjeta permite un acondicionamiento rápido y preciso de la retroalimentación de corriente, ideal para control orientado al campo. Es compatible con alimentación monofásica (90–285 VAC o 125–400 VDC) y puede adaptarse a aplicaciones de baja tensión hasta 35 VDC. Esta placa también permite el control de un motor trifásico de hasta 1 kW, usando el driver L6390 y el IGBT STGP10H60DF. Funciona como un inversor AC-DC capaz de generar una señal trifásica para controlar motores de inducción o motores síncronos de imanes permanentes (PMSM), con o sin sensores, en configuraciones de dos o tres fases, partiendo de una alimentación monofásica. Uno de los componentes fundamentales para el control de motores en este proyecto HIL es el módulo STEVAL-IHM023V3, desarrollado por STMicroelectronics. Este dispositivo actúa como una etapa de potencia diseñada específicamente para aplicaciones de motor trifásico, permitiendo una interfaz eficiente entre el microcontrolador y la carga motriz. Su diseño compacto y su integración de protecciones lo convierten en una solución ideal para entornos de prueba en tiempo real. Figura 6 ilustra la estructura física del módulo y sus principales conexiones.



*Figura 6.* Módulo STEVAL-IHM023V3

Fuente: (ST Microelectronics, s.f.)

La imagen muestra la placa STEVAL-IHM023V3, un módulo de potencia diseñado por STMicroelectronics, ideal para controlar motores eléctricos en aplicaciones industriales o académicas. Su diseño robusto, con disipador térmico, relés de conmutación y condensadores de alto voltaje, permite manejar cargas importantes de manera eficiente. En el contexto del Módulo HIL, esta tarjeta cumple una función clave al suministrar y controlar la energía eléctrica hacia los

componentes, garantizando seguridad, estabilidad y precisión en la simulación de sistemas electromecánicos. Las ventajas de emplear este módulo son la integración completa de electrónica de potencia, protecciones, y acondicionamiento de señales en una sola placa. Estas características posibilitan el uso de la placa en múltiples estrategias de control de motores, que se pueden usar en pequeños vehículos eléctricos, microrredes con generación distribuida, bombeo solar, entre otras aplicaciones.

En la siguiente Figura 7, se muestra las conexiones principales del módulo STEVAL-IHM023V3, utilizadas para el control y monitoreo del motor dentro del sistema HIL.

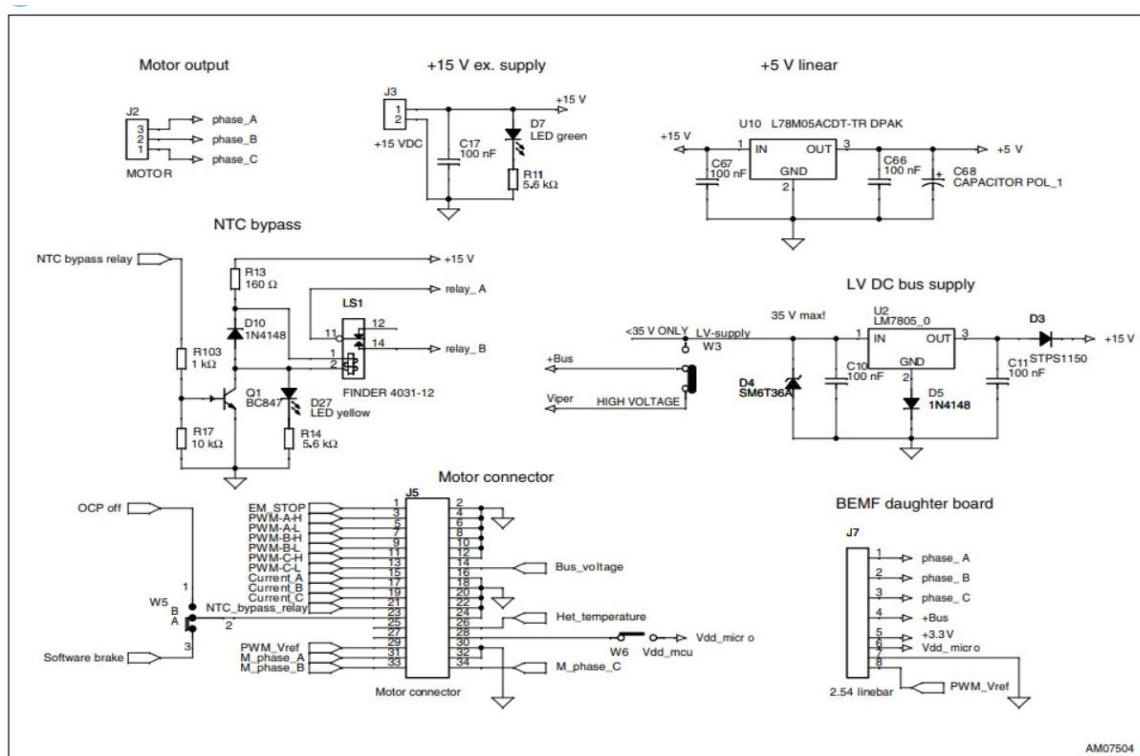


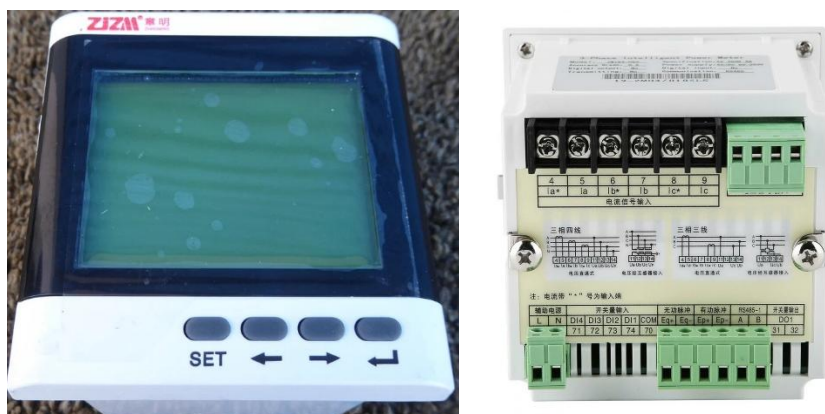
Figura 7. Conexiones módulo STEVAL-IHM023V3

Fuente: (ST Microelectronics, s.f.)

El diagrama muestra el esquema eléctrico del sistema de potencia basado en la placa STEVAL-IHM023V3. Se evidencian los módulos clave para la operación del motor, incluyendo la salida trifásica (J2), la fuente de alimentación externa de +15 V, la regulación lineal a +5 V, y el bypass NTC que protege ante sobrecorrientes en el arranque. Además, se observa la conexión al microcontrolador a través del conector J5, que permite monitorear variables críticas como temperatura, corriente y voltaje del bus. Este esquema no solo organiza las funciones de control

y protección, sino que también permite integrar de manera modular el control PWM y la retroalimentación de BEMF (Back Electromotive Force), fundamentales para aplicaciones de simulación HIL con motores.

Para el registro de variables eléctricas se empleará el medidor multifuncional ZM194-D9Y, del fabricante Zhejiang Zhangming Electrical. Es un medidor de energía inteligente trifásico que ofrece una alta precisión de clase 0.5, adecuado para aplicaciones que requieren mediciones confiables. Está diseñado para operar con sistemas de 380 V AC y 5 A, y cuenta con una amplia compatibilidad de alimentación, aceptando voltajes entre 85 y 265 V AC/DC. Aunque no dispone de entradas o salidas digitales ni analógicas, incorpora comunicación RS485, lo que lo hace ideal para su integración en redes industriales bajo el protocolo Modbus, permitiendo su uso en sistemas de monitoreo remoto y control energético. La Figura 8 muestra el medidor ZM194-D9Y, utilizado en el sistema HIL para monitorear parámetros eléctricos en tiempo real.



*Figura 8.* Medidor ZM194-D9Y  
Fuente: (Zhejiang Zhangming Electrical, s.f.)

El medidor ZM194-D9Y, representado en las imágenes frontal y posterior, es un dispositivo multifuncional diseñado para el monitoreo de variables eléctricas en sistemas trifásicos. Su interfaz de usuario, con botones y pantalla LCD, facilita la configuración y visualización de datos. En la parte posterior, se observan los terminales de conexión para voltajes, corrientes, salidas digitales y comunicación RS485, lo que permite integrarlo fácilmente a sistemas de automatización o módulos HIL. Su uso resulta clave para la medición precisa en entornos de prueba y simulación eléctrica.

El medidor de potencia trifásico ZM194-D9Y será integrado en el módulo HIL como un dispositivo de medición en tiempo real para registrar parámetros eléctricos clave del sistema físico bajo prueba, como voltajes, corrientes y potencias. Su salida de comunicación RS485 facilita su conexión con plataformas SCADA o interfaces de supervisión para análisis remoto. En el contexto HIL, sus datos se usan para validar modelos simulados, verificar el comportamiento del controlador digital y reforzar la seguridad mediante la detección de condiciones anómalas o fuera de rango.

Como equipos complementarios para el monitoreo de datos de variables eléctricas, se implementarán transformadores de tensión y corriente para el acondicionamiento de las señales eléctricas, y que de tal forma también sea posible el monitoreo por el medidor ZM194-D9Y.

El transformador de voltaje a implementar en el módulo es el modelo ETE11543. Con una potencia de 5.4 VA podrá utilizarse en el módulo HIL como fuente de alimentación aislada para circuitos de control y medición, aportando seguridad al sistema al evitar interferencias o sobrecargas desde la red eléctrica. También permite acondicionar señales de voltaje reduciendo 115 VAC a valores seguros desde 6 V hasta 18 V AC para su monitoreo o muestreo por microcontroladores y medidores en general. Además, puede emplearse en la emulación de condiciones de red y en la validación de respuestas del controlador en tiempo real. A continuación, se presenta la Figura 9 donde se muestra el transformador ETE11543, empleado para el acondicionamiento de señales de corriente en el módulo HIL.



*Figura 9.* Transformador 5.4 VA ETE11543  
Fuente: Registro propio

El transformador mostrado en la Figura 9 corresponde al modelo **ETE11543**, el cual forma parte del sistema de alimentación auxiliar del módulo HIL. Este dispositivo, con una potencia de 5.4 VA, está diseñado para recibir una entrada de 115 V AC a 50/60 Hz y entregar salidas de 6 V y 9 V en configuraciones simétricas. Su inclusión permite obtener niveles de voltaje seguros y aislados para el funcionamiento de circuitos electrónicos como módulos de control, pantallas o sistemas de comunicación. Complementando este acondicionamiento de señales, se integran tres transformadores de corriente **MSQ-30 5419**, de clase 0.5 y relación 100/5 A, que permiten medir la corriente real circulante en una carga física sin intervenir directamente el circuito. De esta manera, se garantiza una lectura precisa y segura, fundamental para el monitoreo en tiempo real y la protección de los elementos del sistema ante condiciones anómalas como sobrecorrientes. La Figura 10 muestra el transformador de corriente utilizado para reducir y adaptar las señales eléctricas a niveles seguros en el sistema HIL.



*Figura 10.* Transformador de corriente  
Fuente: Registro propio

La imagen muestra un transformador de corriente tipo toroidal, con una relación de transformación de 30 A en el primario a 5 A en el secundario, diseñado para operar en sistemas de 50/60 Hz hasta 660 V. Este tipo de componente es esencial para el monitoreo seguro de corriente en circuitos de potencia, ya que permite reducir la intensidad a niveles medibles por instrumentos electrónicos sin comprometer la integridad del sistema. En el contexto del módulo HIL, cumple una función crítica en la recolección de datos eléctricos con precisión y aislamiento adecuado. Adicionalmente a los elementos anteriormente descritos, el módulo HIL contará con una pantalla como recurso para visualizar el entorno de simulación.

## 6.2.Segunda fase

El proceso consta de la implementación del módulo HIL de acuerdo al diseño preliminar. Se realizan todas las debidas conexiones en los componentes físicos de medición y control, para garantizar la operatividad del sistema. La Figura 11 presenta la planeación de la distribución interna de los módulos que conforman el sistema HIL dentro de un case portátil.



*Figura 3.* Planeación de distribución de módulos

Fuente: Registro propio

La imagen muestra el módulo HIL completamente ensamblado y dispuesto dentro de una maleta portátil. Se observan los componentes principales: dos placas de potencia STEVAL-IHM023V3, un medidor multifuncional y la pantalla HMI. La disposición ordenada y la conexión mediante buses planos reflejan un diseño orientado a la facilidad de transporte, protección del hardware y operación eficiente en entornos de prueba. Este montaje final permite realizar simulaciones de sistemas eléctricos de forma segura, flexible y reproducible, cumpliendo con los objetivos de implementación y validación del proyecto.

En esta implementación HIL, la tarjeta STM32 Nucleo-F302R8 actúa como controlador digital que genera señales PWM para manejar un motor de inducción trifásico mediante el módulo STEVAL-IHM023V3, el cual funciona como etapa de potencia. Este último recibe las señales de control y alimenta el motor, mientras que sensores envían retroalimentación al microcontrolador. El módulo HIL será portátil, por ende, se empleará una maleta tipo case para la distribución en su interior de los elementos. La Figura 12 muestra el dimensionamiento general de las conexiones eléctricas y de comunicación entre los módulos que integran el sistema HIL



*Figura 4.* Dimensionamiento de conexiones de módulos  
Fuente: Registro propio

La Figura 12 muestra el diseño interno del módulo HIL, donde se observa la distribución organizada de todos los componentes principales. En la parte inferior de la maleta se ubican las dos placas de potencia STEVAL-IHM023V3, conectadas entre sí mediante buses planos y alimentadas desde una toma externa monofásica de 110 V (Fase-Neutro-Tierra). A la izquierda se aprecian claramente los transformadores de corriente tipo MSQ, encargados del acondicionamiento de las señales eléctricas, mientras que en el centro se encuentra la placa controladora ST Nucleo-F302R8, encargada de ejecutar los algoritmos de control y gestionar la retroalimentación del sistema. Los cables azules y negros evidencian el ruteo eléctrico de las señales de potencia y control, mientras que las conexiones de datos permiten la comunicación USB con el PC y la interfaz Modbus RTU con el medidor ZM194-D9Y. La organización física que se presenta en la imagen garantiza seguridad, accesibilidad y eficiencia en la simulación en tiempo real, consolidando un entorno confiable para pruebas de sistemas eléctricos.

En cuanto a mediciones, el sistema incluye transformadores de corriente instalados en serie en las fases A, B y C para monitorear las corrientes de carga, cuyas señales se acondicionan para ser leídas por los conversores análogo - digitales del microcontrolador.

Asimismo, los transformadores de voltaje son usados para reducir y aislar eléctricamente los niveles de tensión de línea, permitiendo la alimentación de sensores o el acondicionamiento de señales. El medidor ZM194-D9Y realiza mediciones de parámetros eléctricos en tiempo real y

transmite los datos al microcontrolador mediante RS485. En conjunto, estos componentes permiten cerrar el lazo HIL, habilitando una interacción dinámica entre el modelo simulado y el sistema físico real para validación de controladores y análisis en tiempo real. La Figura 13 detalla las conexiones entre la placa ST Nucleo-F302R8 y el medidor multifuncional, elementos clave para la lectura y supervisión del sistema en tiempo real.



*Figura 5.* Conexiones de placas ST Nucleo-F302R8 y medidor multifuncional  
Fuente: Registro propio

La Figura 13 muestra el detalle de las conexiones entre la placa ST Nucleo-F302R8 y el medidor multifuncional, elementos clave en la operación y monitoreo del módulo HIL. En la imagen se puede observar cómo los cables de datos y señales se disponen cuidadosamente para garantizar una comunicación estable entre los módulos de control y medición. Esta configuración permite la lectura en tiempo real de variables eléctricas del sistema mediante protocolo Modbus RTU, y su posterior procesamiento por parte del microcontrolador. Esta integración entre medición, control y visualización fue diseñada para ofrecer un sistema portátil, compacto y seguro, donde la distribución física de los elementos internos no solo respeta criterios de aislamiento eléctrico y ventilación, sino que también facilita el mantenimiento y mejora la estética del equipo. La interfaz de usuario está compuesta por una pantalla HMI y un medidor multifuncional, los cuales brindan acceso visual inmediato a los datos de operación y resultados

de simulación en tiempo real. La Figura 14 presenta la implementación de la pantalla HMI junto con los bornes de conexión y el medidor multifuncional, componentes esenciales para la interacción y supervisión del sistema HIL.



*Figura 6.* Implementación de pantalla HMI, bornes y medidor multifuncional  
Fuente: Registro propio

La Figura 14 evidencia la disposición final de los elementos visibles del módulo HIL, destacándose la instalación de la pantalla HMI, los bornes de conexión y el medidor multifuncional. En la imagen se observa cómo estos componentes fueron ubicados de manera accesible y ergonómica, permitiendo al usuario interactuar directamente con el sistema para observar variables críticas y realizar ajustes o mediciones sin necesidad de intervenir el interior del equipo. Esta disposición no solo facilita la integración entre los distintos módulos, sino que también optimiza el uso del espacio dentro de la maleta portátil, permitiendo una operación segura, intuitiva y fácilmente replicable. La visibilidad y accesibilidad de los elementos refuerzan el enfoque pedagógico y didáctico del módulo HIL, haciendo posible su uso en entornos educativos, de investigación o entrenamiento técnico, donde se requiere una comprensión práctica del comportamiento de sistemas eléctricos en tiempo real.

### **6.3.Tercera fase**

En la fase final de ensamblaje del módulo HIL, se diseñó una estructura portátil y ergonómica

con una carcasa rígida que incluye una pantalla LCD y un medidor ZM194-D9Y para visualización y monitoreo. En la base se instalaron bornes externos organizados para conexiones seguras. Los componentes internos se ubicaron detrás de paneles acrílicos azules, protegiendo el hardware y ofreciendo un acabado profesional. Este diseño facilita la interacción intuitiva y segura del usuario, ideal para simulaciones y pruebas didácticas de sistemas de control embebido. Durante la etapa de validación funcional del sistema HIL, se realizaron pruebas de visualización utilizando una interfaz HMI conectada a los bornes del sistema y al medidor multifuncional. Estas pruebas permitieron verificar la correcta lectura de variables eléctricas esenciales, así como la interacción visual con el usuario final. Figura 15 muestra el resultado de estas pruebas, evidenciando el funcionamiento integrado entre los dispositivos.



*Figura 7.* Prueba de pantalla HMI, bornes y medidor multifuncional

Fuente: Registro propio

La Figura 15 muestra el sistema HIL durante la fase de prueba, en la que se verifica el funcionamiento conjunto de la pantalla HMI, los bornes de conexión y el medidor multifuncional. En esta imagen se observa el módulo completamente ensamblado y energizado, con los dispositivos principales en operación. Esta etapa corresponde a la tercera fase del proyecto, en la cual se realizó una prueba funcional básica utilizando un código de prueba cargado en un microcontrolador Arduino. El propósito fue validar la correcta conexión entre los componentes y confirmar la operatividad mínima del sistema. Aunque no se efectuaron simulaciones complejas debido a limitaciones de tiempo, la prueba permitió constatar el encendido estable de los dispositivos, la visualización de datos en la pantalla y la comunicación

entre el medidor y el controlador. Esta verificación preliminar constituye un paso esencial para garantizar que el sistema se encuentra en condiciones operativas adecuadas para ensayos posteriores de control embebido y simulaciones en tiempo real. Esta etapa permitió evaluar la respuesta del sistema ante condiciones reales de operación y confirmar la estabilidad de la comunicación entre el controlador, la interfaz de usuario y los dispositivos de salida. Figura 16 presenta el montaje final y su comportamiento durante la simulación.



*Figura 8.* Prueba de módulo HIL implementado

Fuente: Registro propio

La Figura 16 muestra el módulo HIL completamente ensamblado y en funcionamiento durante su prueba final. En la imagen se evidencia la conexión integral de todos los subsistemas: placas de potencia, microcontrolador, transformadores, medidor multifuncional y pantalla HMI, trabajando de forma coordinada dentro de una estructura compacta y portátil. Esta implementación representa un avance significativo en la validación de sistemas de control en tiempo real, al permitir una interacción segura y directa entre el hardware físico y las simulaciones digitales. El diseño modular y la correcta integración de dispositivos de medición, junto con la funcionalidad de la interfaz de usuario, reafirman la viabilidad y aplicabilidad del módulo HIL como herramienta educativa, de investigación o industrial.

## 7. Conclusiones

La implementación del módulo HIL permitió la integración efectiva de los distintos componentes del sistema, utilizando placas ST con Nucleo-F302R8 para el procesamiento y control, módulos STEVAL-IHM023V3 para la etapa de potencia, y el medidor multifuncional ZM194-D9Y junto con transformadores de corriente y voltaje para la medición y acondicionamiento de señales. La incorporación de una pantalla LCD como medio de visualización complementó la funcionalidad del sistema. Gracias a esta configuración, se logró un prototipo compacto, ergonómico y apropiado para fines didácticos y de experimentación en control.

El uso de una carcasa portátil con paneles acrílicos permitió una instalación ordenada, segura y con aislamiento adecuado, garantizando la protección de los componentes internos y facilitando el acceso a las conexiones externas. Aunque no se realizaron todas las pruebas funcionales deseadas, la verificación inicial con un código Arduino básico evidenció el funcionamiento correcto de las interfaces clave, pantalla, medidor multifuncional y comunicación con el microcontrolador, lo que indica una correcta implementación, sentando las bases para futuras pruebas más complejas.

## 8. Recomendaciones

A partir de la implementación del módulo HIL, se recomienda aprovechar su potencial como herramienta educativa y experimental, dado que su diseño portátil y la integración de componentes de control, medición y visualización lo hacen ideal para prácticas en tiempo real de simulación y control embebido. Para maximizar su funcionalidad, se sugiere realizar pruebas adicionales con modelos de simulación más complejos que permitan validar su comportamiento en distintos escenarios. Asimismo, es recomendable integrar protocolos de comunicación industrial como Modbus RTU mediante la interfaz RS485, ampliando así su aplicabilidad en entornos reales. También se propone mejorar la interfaz HMI con visualizaciones más intuitivas en la pantalla LCD y desarrollar una guía de usuario que facilite su operación y mantenimiento.

## 9. Referencias bibliográficas

- Brito García, S. M., Petit, J., Mantilla Villalobos, M. A., & Rey López, J. M. (2024). *Diseño de un módulo basado en la técnica power hardware-in-the loop para la emulación de sistemas de distribución de energía eléctrica*. Bucaramanga: ACOFI.
- Brito, C., Ramírez, L., & Salcedo, J. (2024). *Diseño y validación de un módulo HIL para redes eléctricas de distribución*. Bucaramanga: Universidad Distrital de Santander.
- Casellas, A., Gómez, M., & León, D. (2014). Aplicación del Hardware-in-the-Loop en entornos eléctricos de prueba. *Revista de Ingeniería y Tecnología Aplicada*, 55-63.
- Castellanos Parada, T. V., Mantilla Villalobos, M. A., Rey, J. M., & Bautista Porras, M. (2023). *Diseño de un simulador de sistemas fotovoltaicos con conexión a la red usando la técnica de*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2017). *Generación distribuida y su impacto en la planificación energética*. Bogotá.
- CREG. (2023). *Conceptos*. Bogotá: Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Enel . (2023). *¿Cómo se beneficia Colombia con la generación distribuida?* Obtenido de Enel: <https://www.enel.com.co/es/historias/a202309-generacion-distribuida-beneficios-para-colombia.html>
- Gómez, L. F. (2018). *Emulación del proceso de generación de energía eléctrica de un generador de baja potencia usando hardware -in-the-loop*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Han, J., Hong, Q., Feng, Z., & Syed, M. H. (2022). Design and Implementation of a Real-Time Hardware-in-the-Loop Platform for Prototyping and Testing Digital Twins of Distributed Energy Resources. *Energies*.
- IRENA. (2019). *Market integration of distributed energy resources*. Obtenido de The International Renewable Energy Agency: [https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA\\_Market\\_integration\\_distributed\\_system\\_2019.pdf?la=en&hash=2A67D3A224F1443D529935DF471D5EA1E23C774A](https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Feb/IRENA_Market_integration_distributed_system_2019.pdf?la=en&hash=2A67D3A224F1443D529935DF471D5EA1E23C774A)
- Lozano, C. A. (2020). Revisión crítica del uso de las técnicas de control distribuido aplicadas en

- la operación de redes eléctricas de distribución. *Universidad del Valle*.
- MathWorks. (2025). *What Is Hardware-in-the-Loop (HIL)?* Obtenido de <https://la.mathworks.com/discovery/hardware-in-the-loop-hil.html>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Lineamientos de política de recursos energéticos distribuidos*. Bogotá DC.: Min Minas.
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Bogotá.
- National Association of Regulatory Utility Commissioners . (2016). *Distributed Energy Resources Rate Design and Compensation*. Obtenido de NARUC: <https://pubs.naruc.org/pub/19FDF48B-AA57-5160-DBA1-BE2E9C2F7EA0>
- ST Microelectronics. (s.f.). *Placa de desarrollo STM32 Nucleo-64 con MCU STM32F302R8*. Obtenido de ST: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f302r8.html>
- UPME. (2023). *Actualización Plan Energético Nacional -PEN- 2022-2052*. Bogotá D.C., Colombia: UPME. Recuperado el Abril de 2025
- Zhejiang Zhangming Electrical. (s.f.). *ZM194-D9Y*. Obtenido de ZM194-D9Y.