

Diseño e implementación de las etapas de adquisición y visualización de datos del sistema  
IoT de una microrred eléctrica experimental

Santiago Peña Meléndez

Estudiante Ingeniería Eléctrica

Gerson Alexander Sanchez Brito

Estudiante Ingeniería Electrónica

Trabajo de Grado para optar por los título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico

Director

Juan Manuel Rey López

Doctor en Ingeniería Electrónica

Codirector

Iván Darío Hernández Rodríguez

Especialista en Automatización Industrial

DAUTOM S.A.S

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

A mi familia, fundamento de mis valores y principal motor en cada etapa de mi vida; a mi mamá, por su amor incondicional y por acompañarme siempre; a mi papá, que en paz descansa, por ser guía e inspiración constante desde el cielo; y a mis hermanos, Cristian y María, y a mi abuela, por su cariño y presencia incondicional.

**Gerson Alexander Sanchez Brito**

A mi mamá y a mi familia, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por ser la fuerza, la guía y el refugio en cada paso de este camino. A mi nona, por sus oraciones constantes, su ternura y por ese amor infinito que siempre sostuvo mi corazón. De manera muy especial, a mi novia Angie Carolina Celis Morales, por caminar a mi lado, por su paciencia, su apoyo constante y por ser mi motivación para alcanzar este sueño. A Sebastián Mendoza y Wilson Olaya, por su amistad sincera, sus consejos y por estar siempre presentes como amigos de vida y de familia.

**Santiago Peña Meléndez**

### **Agradecimientos**

A mi familia, por ser el pilar fundamental de este proceso. A mi mamá, por su amor incondicional y su apoyo constante. A mi papá, que en paz descansa, por ser una fuente permanente de inspiración y guía desde el cielo. A mis hermanos, Cristian y María, y a mi nona, por su cariño y acompañamiento en cada etapa de este camino.

Al profesor Juan Manuel Rey López, por su guía, su disposición y la confianza brindada a través del Laboratorio de Integración Energética, fundamentales para el desarrollo de este proyecto de grado. A Iván y Natalia, y a todo el equipo de DAUTOM, por abrirme las puertas de la empresa, por la confianza depositada en mí y por las valiosas enseñanzas profesionales que aportaron de manera significativa a mi formación.

A mis amigos Santiago, Juliana, Heidy, Sebastián y Carlos, por el apoyo sincero, la amistad y los momentos compartidos que hicieron este proceso más llevadero.

#### **Gerson Alexander Sanchez Brito**

A mi familia, por su amor, paciencia y por ser mi mayor motor en este proceso académico y personal. Al profesor Juan Manuel, por su guía experta, su disposición y por brindarme el acompañamiento necesario para transformar una idea en este proyecto de grado. A Iván y Natalia, por abrirme las puertas de su empresa, por su confianza y por las valiosas enseñanzas profesionales. Asimismo, a mis compañeros de DAUTOM, por el excelente ambiente de trabajo y el apoyo mutuo en cada jornada. A mis grandes amigos Gerson, Nicolás, Johan, César, Michael Areniz, Michael Pérez e Irving, por las jornadas compartidas, la lealtad y por hacer de este camino universitario una experiencia inolvidable.

#### **Santiago Peña Meléndez**

## Índice

	Pág.
<b>1 Introducción</b> . . . . .	<b>11</b>
1.1 Objetivo General . . . . .	12
1.2 Objetivos específicos . . . . .	12
<b>2 Levantamiento del estado actual del proyecto</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 Estado del sistema IoT . . . . .	13
2.2 Condiciones operativas del módulo de cargas . . . . .	14
2.3 Conexión con el tablero de energía . . . . .	15
2.4 Conectividad del controlador con la red de internet de la universidad . . . . .	16
<b>3 Desarrollo de la solución</b> . . . . .	<b>17</b>
3.1 Selección y dimensionamiento de conductores . . . . .	17
3.1.1 Adecuación del tablero de alimentación . . . . .	18
3.1.2 Instalación de los CTs al módulo de cargas . . . . .	20
3.1.3 Adecuación y adquisición de las señales eléctricas . . . . .	21
3.2 Integración de MQTT Sparkplug en el sistema IoT . . . . .	23
3.2.1 Establecer conexión del groov EPIC a internet . . . . .	23
3.2.2 Habilitar las variables a publicar . . . . .	24
3.2.3 Establecer la comunicación de los módulos . . . . .	25
3.2.4 Configurar el cliente MQTT . . . . .	26
3.2.5 Conexión al servidor MQTT de Ignition . . . . .	27
3.3 Creación de la interfaz gráfica . . . . .	29
3.3.1 Panel de navegación . . . . .	29
3.3.2 Vistas a presentar . . . . .	30

<b>4 Pruebas de validación</b> . . . . .	<b>32</b>
4.1 Carga Balanceada . . . . .	32
4.2 Carga Desbalanceada . . . . .	34
<b>5 Conclusiones</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>6 Trabajo futuro</b> . . . . .	<b>38</b>
<b>7 Referencias</b> . . . . .	<b>39</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b>	Estado Actual del Tablero EPIC . . . . .	14
<b>Figura 2.</b>	Módulo de Cargas del LIE . . . . .	14
<b>Figura 3.</b>	Tablero de Energía del LIE . . . . .	15
<b>Figura 4.</b>	Tablero de Alimentación con Elementos de Protección . . . . .	19
<b>Figura 5.</b>	Transformador de corriente midiendo la corriente en una fase . . . . .	21
<b>Figura 6.</b>	Adecuación de las señales eléctricas . . . . .	22
<b>Figura 7.</b>	Adquisición de las primeras variables eléctricas . . . . .	22
<b>Figura 8.</b>	Arquitectura de comunicación . . . . .	23
<b>Figura 9.</b>	Esquema de red implementado para la solución . . . . .	23
<b>Figura 10.</b>	Configuración de la opción public access . . . . .	24
<b>Figura 11.</b>	Scanned device creado para las I/O . . . . .	25
<b>Figura 12.</b>	Parámetros configurados para el cliente MQTT . . . . .	27
<b>Figura 13.</b>	Conexión del módulo MQTT Engine con el broker . . . . .	28
<b>Figura 14.</b>	Variables del sistema recibidas en Ignition a través del módulo MQTT Engine. . . . .	29
<b>Figura 15.</b>	Menú General . . . . .	30
<b>Figura 16.</b>	Submenú para el nodo trifásico . . . . .	30
<b>Figura 17.</b>	Vista del total de potencia y energía . . . . .	30
<b>Figura 18.</b>	Navegación por la vista total . . . . .	31
<b>Figura 19.</b>	Vista por fase de potencia y energía . . . . .	31
<b>Figura 20.</b>	Ícono para navegar a la vista total del sistema trifásico . . . . .	31
<b>Figura 21.</b>	Parámetros de referencia generados por la fuente Chroma (Escenario 1) .	33
<b>Figura 22.</b>	Visualización de datos en la plataforma Ignition (Escenario 1) . . . . .	33
<b>Figura 23.</b>	Parámetros de referencia generados por la fuente Chroma (Escenario 2) .	35
<b>Figura 24.</b>	Visualización de datos en la plataforma Ignition (Escenario 2) . . . . .	35

## Índice de tablas

Tabla 1.	Especificaciones técnicas de los CTs instalados . . . . .	20
Tabla 2.	Comparativa de mediciones - Escenario de Carga Balanceada . . . . .	34
Tabla 3.	Comparativa de mediciones - Escenario de Carga Desbalanceada . . . . .	36

## Lista de Apéndices

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Diseño 3D Tablero Epic . . . . .	41
Apéndice B. Configuración original de los Transformadores de Corriente . . . . .	42
Apéndice C. Diagramas Trifilares . . . . .	43

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de las etapas de adquisición y visualización de datos del sistema IoT de una microrred eléctrica experimental. \*

**Autor:** Santiago Peña Meléndez \*\*

**Autor:** Gerson Alexander Sanchez Brito \*\*

**Palabras clave:** IoT, MQTT, Ignition, Industria 4.0

**Descripción:** Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema IoT para la adquisición y visualización de datos en una microrred eléctrica experimental en el Laboratorio de Integración Energética (LIE) de la Universidad Industrial de Santander. El sistema permite monitorear en tiempo real las variables eléctricas clave como la tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, con el objetivo de habilitar estrategias de optimización para el manejo de la energía en microrredes. Para ello, se utilizó la tecnología MQTT Sparkplug B y la plataforma Ignition, facilitando la supervisión remota y el análisis de datos. El proyecto aborda tanto la adecuación física del laboratorio como la integración de un sistema de comunicación robusto y escalable, lo que permite una supervisión continua y la detección de anomalías en el funcionamiento del sistema.

---

\* Trabajo de Grado para optar por los títulos de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Juan Manuel Rey López. Codirector: Iván Darío Hernández Rodríguez.

## Abstract

**Title:** Design and implementation of the data acquisition and visualization stages of the IoT system of an experimental microgrid.\*

**Author:** Santiago Peña Meléndez \*\*

**Author:** Gerson Alexander Sanchez Brito \*\*

**Keywords:** IoT, MQTT, Ignition, Industria 4.0

**Description:** This project focuses on the design and implementation of an IoT system for data acquisition and visualization in an experimental microgrid at the Laboratory of Energy Integration (LIE) at the Industrial University of Santander. The system enables real-time monitoring of key electrical variables such as voltage, current, active power, reactive power, and apparent power, with the aim of enabling optimization strategies for energy management in microgrids. MQTT Sparkplug B technology and the Ignition platform were employed to facilitate remote monitoring and data analysis. The project addresses both the physical adaptation of the laboratory and the integration of a robust and scalable communication system, enabling continuous supervision and anomaly detection in the system's operation.

---

\* Degree work to opt for the titles of Electrical Engineer and Electronic Engineer

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Juan Manuel Rey López. Co-Director: Iván Darío Hernández Rodríguez.

## 1. Introducción

En los últimos años, la digitalización del sector energético ha impulsado el desarrollo de una infraestructura con mayor capacidad de adaptación, donde las microrredes ocupan un papel clave al aportar resiliencia, flexibilidad y eficiencia al sistema eléctrico Saeed, Fangzong, Kalwar, y Iqbal (2021). Para alcanzar estas capacidades, resulta indispensable contar con mecanismos de supervisión continua que permitan monitorizar el comportamiento operativo de la red en tiempo real.

La transición energética y la evolución de los sistemas eléctricos hacia las redes inteligentes (Smart Grids) han impulsado la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, donde el Internet de las Cosas (IoT) juega un papel fundamental Ullah y cols. (2023). En este nuevo paradigma, la capacidad de adquirir, procesar y visualizar datos en tiempo real no es solo una ventaja operativa, sino una necesidad crítica para la gestión eficiente de la energía, permitiendo una supervisión remota, descentralizada y segura de los activos eléctricos. En este contexto, el Laboratorio de Integración Energética (LIE) de la Universidad Industrial de Santander, se ha consolidado como un entorno de pruebas para validar estas tecnologías Rey y cols. (2025). Actualmente, el laboratorio cuenta con un sistema de control basado en el dispositivo industrial groov EPIC PR2 de Opto 22. Sin embargo, a pesar de sus capacidades avanzadas, este sistema operaba hasta el momento de manera aislada (local), restringiendo la visualización de variables eléctricas al entorno físico del laboratorio y limitando el potencial del nodo para aplicaciones de monitoreo remoto. El presente Trabajo de Grado tiene como objetivo principal diseñar e implementar las etapas de adquisición y visualización de datos de dicho sistema IoT.

El proyecto aborda el problema desde dos frentes: la adecuación física y la integración lógica. En primer lugar, se realiza el dimensionamiento e instalación de los elementos de potencia y medida, incluyendo transformadores de corriente, protecciones eléctricas y cableado estructurado, asegurando el cumplimiento de normas técnicas para garantizar la seguridad operativa. En segundo lugar, se despliega una arquitectura de comunicación basada en el protocolo

MQTT Sparkplug B, conectando el controlador de borde con la red externa mediante un enlace inalámbrico y centralizando la información en un broker en la nube (HiveMQ) para su posterior visualización en la plataforma Ignition. A través de esta implementación, se busca dotar a la microrred experimental de una infraestructura de monitoreo escalable y robusta, capaz de reportar variables críticas como tensión, corriente y potencia en tiempo real.

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar las etapas de adquisición y visualización de datos del sistema IoT de monitorización de la microrred eléctrica experimental del Laboratorio de Integración Energética (LIE)

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Realizar un levantamiento del estado actual del sistema IoT de monitorización de la microrred eléctrica experimental del LIE.
2. Diseñar e implementar la etapa de adecuación de señales eléctricas en un nodo trifásico del LIE.
3. Poner en marcha la etapa de adquisición y visualización de datos del sistema IoT.
4. Validar la correcta funcionalidad del sistema mediante pruebas operativas.

## 2. Levantamiento del estado actual del proyecto

El grupo de investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), en conjunto con la empresa Diseño y Automatización Industrial (DAUTOM), ha desarrollado diversos proyectos que han contribuido al fortalecimiento del sistema IoT del Laboratorio de Integración Energética (LIE). Este laboratorio busca consolidarse en el futuro como un entorno de pruebas y validación de tecnologías orientadas a microrredes y transición energética.

En la actualidad, el LIE cuenta con un sistema IoT en evolución, dentro del cual se han implementado distintos proyectos. Recientemente, se realizaron mejoras en los módulos de carga global y local de la microrred (Díaz Sánchez y López González, 2023). Además, se han adquirido equipos que contribuirán a la mejora del mismo.

Debido al crecimiento que ha tenido el laboratorio, se hace necesario realizar el levantamiento de su estado actual y, para lograr este objetivo, se analizó el sistema IoT, el módulo de cargas y el tablero de control destinado a la alimentación de las cargas.

### 2.1. Estado del sistema IoT

El sistema IoT se diseñó inicialmente como se muestra en el Apéndice A; este se implementó como un proyecto de ingeniería basado en el controlador industrial **groov EPIC PR2** (Opto 22 (2025a)), el cual proporciona capacidades de control, conectividad y operación en el borde de la red. Dicho controlador admite la conexión de módulos adicionales en su rack, lo que garantiza mayor versatilidad y escalabilidad en proyectos futuros.

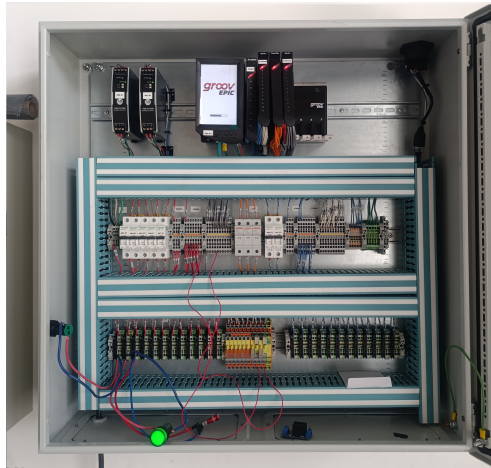
Entre los módulos adquiridos se encuentra el GRV-IVAPM-3 (Opto 22 (2025b)), diseñado para la medición trifásica de tensión, corriente, potencia y energía en sistemas de hasta 400 VCA en configuración estrella y 600 VCA en configuración delta. Además, originalmente se iban a utilizar también los transformadores de corriente de la marca OPTO como se muestra en Apéndice B. Con base en esta configuración preliminar se realizó el montaje inicial del sistema para la adquisición de datos.

Posteriormente, se incorporaron nuevos elementos; entre las adecuaciones más relevantes se encuentran las borneras cortocircuitables WAGO GmbH & Co. KG (2025), de color amarillo

y naranja de la Figura 1, destinadas a garantizar la conexión segura del secundario de los transformadores de corriente. Gracias a la implementación de las borneras cortocircuitables, es posible mantener el secundario en cortocircuito de manera controlada, garantizando así la protección del sistema y de las personas involucradas en las pruebas.

### Figura 1

*Estado Actual del Tablero EPIC*

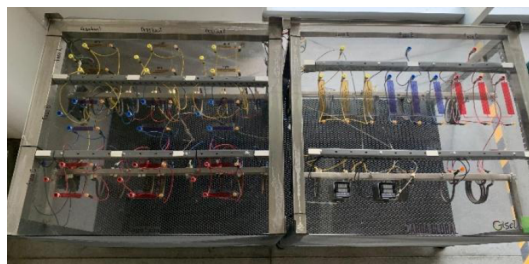


### 2.2. Condiciones operativas del módulo de cargas

La microrred experimental dispone de un módulo de cargas resistivas (Sánchez y Gelvez (2025)) diseñado para emular condiciones controladas de consumo eléctrico. Dicho módulo fue adecuado para cumplir con las normativas vigentes, como se muestra en la figura 2. Este módulo permite seleccionar diferentes niveles de carga en cada fase de manera flexible.

### Figura 2

*Módulo de Cargas del LIE*



La elección de un esquema resistivo obedece a la necesidad de contar con un banco de pruebas

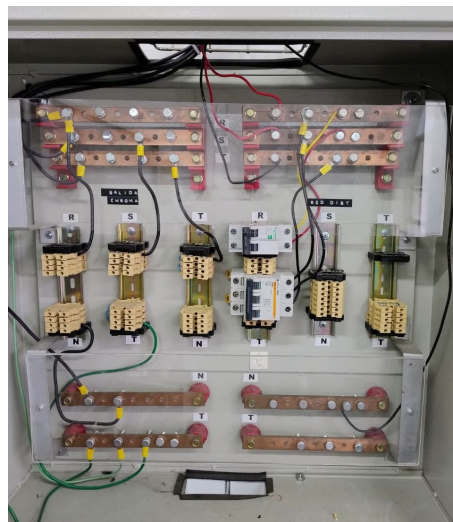
seguro, sencillo de operar y con un comportamiento eléctrico lineal. En el presente proyecto, el módulo será empleado como banco experimental para la integración con el sistema IoT de monitoreo. Concretamente, se conectará al controlador *groov EPIC PR2* y al módulo de medición GRV-IVAPM-3 a través de transformadores de corriente, lo que permitirá la adquisición y visualización en tiempo real de variables eléctricas.

### 2.3. Conexión con el tablero de energía

Para llevar a cabo el proceso de pruebas y mediciones, el laboratorio dispone de un tablero de distribución de energía que actúa como punto central de conexión entre la fuente, las cargas y los sistemas de protección y medición. Este tablero, como se observa en la figura 3, cuenta con barras trifásicas claramente identificadas como R, S y T, junto con las barras de neutro (N) y de protección a tierra (PE), correspondientes a la alimentación proveniente del generador de señales programables Chroma, permitiendo inyectar tensiones controladas y variar parámetros de operación. Además, dispone de rieles DIN sobre los cuales se encuentran montados diversos dispositivos que garantizan la operación segura y ordenada del sistema; entre ellos, interruptores termomagnéticos y bloques de bornes modulares.

#### Figura 3

*Tablero de Energía del LIE*



El proceso de conexión de las cargas se realiza derivando conductores desde las barras hacia

el banco de resistencias configurado en estrella (Y) con neutro. Cada una de las fases (R, S y T) se conecta a una rama del banco de resistencias, mientras que el neutro común del banco se conecta a la barra de neutro del tablero. Esta disposición permite alimentar de manera balanceada las cargas resistivas y simular condiciones reales de operación trifásica.

Para realizar la medición de corrientes, el laboratorio está equipado con transformadores de corriente (CTs) Lovato Electric S.P.A. (2019), secundarios de 5 A, que se instalará en cada una de las líneas de fase que alimentan el banco de resistencias, como se muestra en el Apéndice C.

La conexión de tensiones al GRV-IVAPM-3 se realiza directamente desde las barras de fase hacia los bornes de entrada del módulo mediante fusibles de instrumentación de acción rápida en cada línea de medida. El neutro del tablero también se conecta al módulo para establecer la referencia de las tensiones de línea a neutro (L-N), como se muestra en el Apéndice B;. Esta disposición del tablero permite que las pruebas se realicen de manera segura, organizada y flexible, aprovechando las protecciones integradas, los bornes modulares y la segregación entre potencia y señal de medida. De este modo, el sistema sigue las buenas prácticas de ingeniería eléctrica aplicables en entornos industriales.

#### **2.4. Conectividad del controlador con la red de internet de la universidad**

Uno de los aspectos a solucionar es que el controlador groov EPIC PR2 no se encuentra integrado en la red de internet de la Universidad, sino que opera de forma aislada dentro del laboratorio. Esto restringe su potencial como nodo IIoT, ya que las variables medidas por el módulo GRV-IVAPM-3 solo pueden ser visualizadas localmente. Esta condición impide aprovechar funcionalidades como el monitoreo remoto y la utilización del laboratorio como caso de estudio.

### 3. Desarrollo de la solución

En este capítulo se describe el desarrollo de la solución propuesta para cumplir los objetivos del proyecto, a partir del análisis del estado actual del sistema. Dicho análisis permitió identificar las acciones necesarias para la implementación de la microrred instrumentada, entre las cuales se incluyen: la adecuación del sistema de alimentación eléctrica, la alimentación e instalación de los transformadores de corriente en las cargas, la configuración del controlador groov EPIC PR2 para su integración a la red institucional y el Broker en la nube. Finalmente, el diseño de una interfaz gráfica para la visualización de las variables eléctricas adquiridas.

#### 3.1. Selección y dimensionamiento de conductores

Para realizar la conexión entre la fuente generadora de señales Chroma y el módulo de cargas, se llevó a cabo un proceso de selección de conductores basado en tres criterios fundamentales: la corriente máxima que debe soportar el conductor, la regulación de tensión y la robustez mecánica que garantiza la seguridad.

El primer paso consistió en determinar la corriente máxima que circula por los conductores en el peor escenario de carga. Se consideraron los siguientes parámetros de operación:

- **Potencia máxima de la carga por fase ( $P_{max}$ ):** 1000 W.
- **Tensión nominal de fase ( $V_{LN}$ ):** 120 V.
- **Factor de potencia ( $FP$ ):** 1

Utilizando la fórmula de potencia activa para sistemas trifásicos, se calcula la corriente nominal:

$$I = \frac{P}{3 \cdot V_{LN} \cdot FP} \quad (1)$$

Sustituyendo para la carga de 1000 W en el escenario crítico:

$$I_{max} = \frac{1000 \text{ W}}{3 \cdot 120 \text{ V}} \approx 2,78 \text{ A} \quad (2)$$

Considerando un factor de seguridad del 125 % según lo recomendado por la norma NTC 2050 para salidas de uso continuo, la corriente de diseño se establece en:

$$I_{diseño} = 2,78 \text{ A} \times 1,25 \approx 3,47 \text{ A} \quad (3)$$

Aunque técnicamente un conductor calibre 16 AWG o 18 AWG sería suficiente para soportar una corriente de diseño de 3,47 A, se seleccionó un conductor calibre **12 AWG** por las siguientes razones técnicas orientadas al entorno de laboratorio:

1. **Robustez Mecánica:** En montajes experimentales, los cables están sometidos a manipulación constante. Calibres menores son propensos a rupturas internas o daños en los terminales.
2. **Regulación de Tensión:** Al usar un calibre mayor, se minimiza la resistencia del conductor, garantizando que la caída de tensión desde la fuente Chroma hasta las cargas sea despreciable, lo cual es vital para la precisión de los datos adquiridos.
3. **Seguridad y Protecciones:** Este calibre ofrece un amplio margen de seguridad térmica y coordina adecuadamente con las protecciones estándar de laboratorio.

### ***3.1.1. Adecuación del tablero de alimentación***

En el proceso de levantamiento, se evidencia el estado del tablero de alimentación, el cual cuenta con un barraje que está conectado al generador de señales; esto es importante para el proyecto debido a que este tablero representa un punto cercano para conectar el banco de cargas y el tablero en el que se encuentra el controlador. En la Figura 4 se evidencia que el tablero cuenta con puntos de conexión, pero no tiene protecciones eléctricas, lo cual es importante para proteger el sistema de sobretensiones y cortocircuitos.

Para subsanar esta carencia y garantizar la seguridad operativa tanto de los equipos como del personal, se dimensionó e instaló un interruptor termomagnético trifásico. La selección del interruptor se basó en el criterio de coordinación de protecciones, el cual establece que la corriente nominal del dispositivo ( $I_n$ ) debe ser superior a la corriente de diseño de la carga, pero inferior a la capacidad de corriente (A) del conductor seleccionado (calibre 16 AWG). Basado en la disponibilidad comercial y la estandarización para circuitos ramales cableados en calibre 16 AWG, se seleccionó un interruptor termomagnético de 16 A. Este valor cumple con la inecuación ( $4,1 \text{ A} < 16 \text{ A} < 20 \text{ A}$ ).

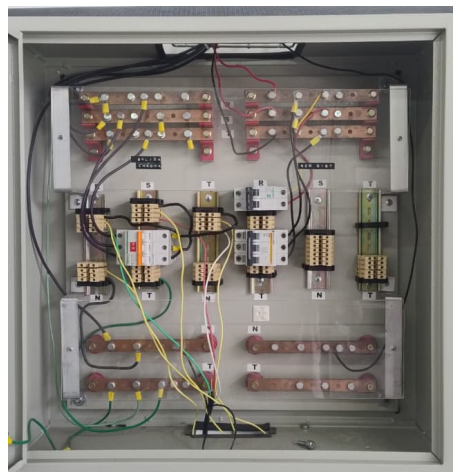
El dispositivo seleccionado para el tablero presenta las siguientes características técnicas:

- **Tipo:** Interruptor termomagnético para montaje en riel DIN.
- **Número de polos:** 3 (Tripolar), para corte simultáneo de las fases A, B y C.
- **Corriente nominal ( $I_n$ ):** 16 A.
- **Curva de disparo:** Tipo C. Esta curva es la adecuada para circuitos generales.

Con la instalación de este elemento en el tablero, como se observa en la Figura 4, se habilita un punto de maniobra seguro para desenergizar el sistema manualmente ante cualquier eventualidad o necesidad de mantenimiento.

#### Figura 4

*Tablero de Alimentación con Elementos de Protección*



### 3.1.2. *Instalación de los CTs al módulo de cargas*

Para la adquisición de las señales de corriente de cada una de las fases del módulo de cargas, se optó por aprovechar la disponibilidad de equipos existentes en el laboratorio. Se implementaron tres transformadores de corriente de la marca Lovato, referencia **DM0TA 0100**.

Estos elementos son del tipo de núcleo sólido (barra pasante) y presentan las características técnicas detalladas en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Especificaciones técnicas de los CTs instalados*

Parámetro	Valor
Marca	Lovato Electric
Referencia	DM0TA 0100
Relación de transformación	100/5 A
Corriente primaria máxima ( $I_{pn}$ )	100 A
Corriente secundaria nominal ( $I_{sn}$ )	5 A
Clase de precisión	1 (Típica en esta serie)
Frecuencia de operación	50/60 Hz

Dado que la corriente máxima de diseño de la microrred es de aproximadamente 3,47 A y la relación de transformación de los CTs es de 100/5, es necesario determinar la magnitud de la señal que será enviada al controlador para verificar que se encuentre dentro del rango de lectura del módulo de adquisición.

La corriente en el secundario ( $I_s$ ) se calcula como:

$$I_s = I_p \times \frac{I_{sn}}{I_{pn}} \quad (4)$$

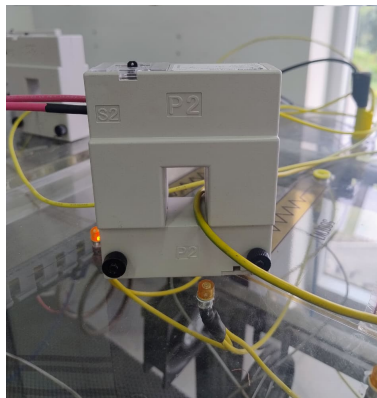
Sustituyendo para la carga máxima esperada:

$$I_s = 3,47 \text{ A} \times \frac{5}{100} = 0,17 \text{ A} \quad (5)$$

Aunque la corriente secundaria resultante (170 mA) es baja en comparación con la escala completa del CT, se encuentra dentro del rango operativo medible por el módulo de entrada de corriente, lo que permite la monitorización de las cargas. La instalación física se realizó pasando los conductores de fase de alimentación a través del orificio central de cada transformador, asegurando la correcta polaridad de la medición (sentido fuente a carga, P1 → P2). Para el circuito secundario, encargado de llevar la señal analógica desde los bornes del CT (s1-s2) hasta el módulo de adquisición del controlador *groov EPIC* se seleccionó un conductor calibre 12 AWG.

### Figura 5

*Transformador de corriente midiendo la corriente en una fase*



#### ***3.1.3. Adecuación y adquisición de las señales eléctricas***

Con el fin de garantizar que tanto el controlador como el usuario final interpreten correctamente las señales medidas por los transformadores de corriente, fue necesario realizar la configuración del módulo de adquisición, tal como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6***Adecuación de las señales eléctricas*

Module 2	
<b>System Type</b>	0-400 Vrms Wye
Voltage range and type used for all phases.	
Current Transformer	
CT Signal Output Type	
Phase A	0-5 Arms CT
Phase B	0-5 Arms CT
Phase C	0-5 Arms CT
CT Rated Current	
The primary or input current to the CT.	
Phase A	100
Phase B	Optional
Phase C	Optional
Leave other phases empty to use the same value as Phase A.	

En primer lugar, se definió el tipo de sistema eléctrico y el rango máximo de tensión a medir. Para este caso, se seleccionó una conexión en estrella (Wye) y un rango de voltaje superior al valor nominal del sistema, con el objetivo de asegurar una medición adecuada ante posibles variaciones de tensión. Posteriormente, se configuró el tipo de transformador de corriente utilizado. Finalmente, se estableció la corriente nominal del primario del transformador, parámetro indispensable para el correcto escalamiento y cálculo de las variables eléctricas.

**Figura 7***Adquisición de las primeras variables eléctricas*

3-Phase Total	
54: True Power	1,414,975 W
55: Reactive Power	468,784 VAR
56: Apparent Power	1,491,202 VA
63: Power Factor	0,949
57: Net Energy	8,159 kWh
58: Unsigned Energy	9,382 kWh
59: Positive Energy	8,591 kWh
60: Negative Energy	-0,432 kWh
61: Net Reactive Energy	20,731 kVArh
62: Net Apparent Energy	25,800 kVAh

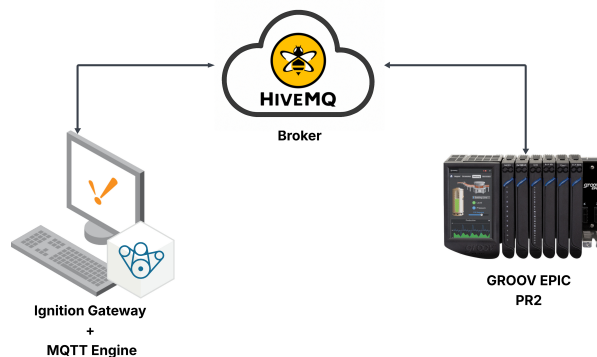
Una vez completada la configuración del módulo, fue posible visualizar las primeras señales eléctricas adquiridas directamente en la pantalla del controlador **groov EPIC PR2**, tal como se presenta en la Figura 7.

### 3.2. Integración de MQTT Sparkplug en el sistema IoT

La arquitectura de comunicación se organizó en torno al controlador y al módulo de medición como capa de adquisición. Sin embargo para poder compartir los datos por el broker es necesario en primer lugar conectar el groov EPIC a internet y, posteriormente, su conexión con el broker en la nube. A partir de allí, el cliente **MQTT Sparkplug** del EPIC publica los datos hacia el broker mediante una conexión cifrada por TLS siguiendo la arquitectura de la Figura 8.

**Figura 8**

*Arquitectura de comunicación*

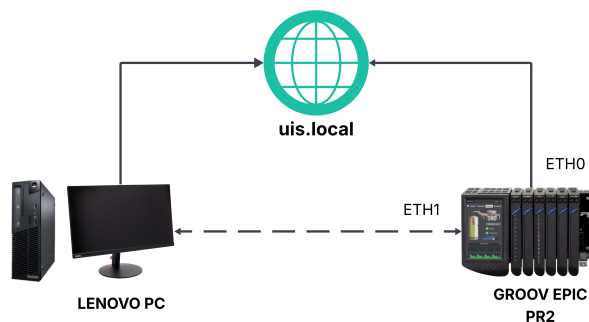


#### 3.2.1. Establecer conexión del groov EPIC a internet

Con el fin de aprovechar que el controlador groov EPIC dispone de dos puertos Ethernet con interfaces de red independientes, se definió el esquema de conexión mostrado en la Figura 9.

**Figura 9**

*Esquema de red implementado para la solución*



En la implementación se utilizaron los puertos Ethernet del groov EPIC de la siguiente manera:

- **ETH0:** Se conectó directamente a la red de la universidad. Esta interfaz se utiliza para la integración local del controlador con los dispositivos del laboratorio y para el intercambio de datos dentro de la red interna.
- **ETH1:** Se conectó a una antena WiFi Anybus Wireless Bolt, encargada de establecer el enlace inalámbrico con la red externa. A través de esta interfaz se habilita el acceso de manera local con computador que se tiene en guatigurá.

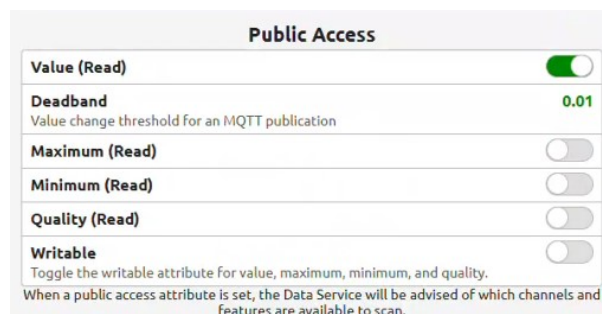
Esta configuración permite que el groov EPIC funcione como un dispositivo de borde, actuando como puente entre la red de equipos del laboratorio y la red inalámbrica externa. De este modo se facilita el envío seguro de datos eléctricos hacia sistemas de supervisión.

### 3.2.2. *Habilitar las variables a publicar*

Para hacer accesibles los valores de cualquier canal de entrada o salida, debe habilitarse la opción Public Access desde la configuración del canal dentro del menú I/O. Una vez habilitada, los valores podrán ser leídos o escritos por los servicios locales del EPIC.

#### Figura 10

*Configuración de la opción public access*



Luego de identificar el módulo y el canal con la señales eléctricas que se están midiendo se habilitó el valor actual como se muestra en la figura 10. Sin embargo, también es posible

habilitar los valores máximo y mínimo, así como la calidad de la señal medida. Las variables habilitadas pueden publicarse mediante MQTT u OPC UA.

### 3.2.3. Establecer la comunicación de los módulos

El **Scanned Device** se encarga de administrar la comunicación de las entradas y salidas con la memoria interna del dispositivo con brokers MQTT o clientes OPC UA como se muestra en la Figura 11. Para habilitar esta función del dispositivo se realizó desde la opción Data Service.

**Figura 11**

*Scanned device creado para las I/O*

Device Configuration	
This device can access I/O Channels, PID Loops, and Scratch Pad values that have Public Access enabled.	
Device Type	Local I/O System
Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
Device ID	<b>Microred OptoMMP</b>
Used to identify this device in MQTT topics and OPC UA node IDs.	
Host TCP Port	2001
Communication Timeout (ms)	<b>5000</b>
Must be at least 250 ms.	
Scan Time (ms)	<b>1000</b>
Must be at least 250 ms.	
Metrics Update Rate (ms)	<b>10000</b>
0 to disable, or equal to or greater than the Scan Time.	
Protocols	
MQTT String	<input checked="" type="checkbox"/>
MQTT Sparkplug	<input checked="" type="checkbox"/>
OPC UA Server	<input type="checkbox"/>
This device will be available from the selected protocols.	
<a href="#">Delete Configuration</a>	

Se creó el Scanned Device como se muestra en la Figura 11 teniendo en cuenta los siguientes parámetros para la comunicación:

- **Device Type:** Indica que el dispositivo que se está configurando es un sistema de I/O local, como un dispositivo de Opto22, que accede a entradas/salidas locales.
- **Enable:** Aquí se habilitó para que el dispositivo pueda empezar a operar e iniciar la comunicación.

- **Device ID:** Se utilizó para identificar al dispositivo dentro de los mensajes MQTT.
- **Host TCP Port:** 2001 es el puerto de comunicación por defecto para el protocolo para la comunicación entre los módulos y el EPIC.
- **Communication Timeout (ms):** Este parámetro define el tiempo máximo que el dispositivo esperará antes de considerar que una comunicación ha fallado.
- **Scan Time (ms):** Define cada cuánto tiempo el sistema escaneará los datos del dispositivo.
- **Metrics Update Rate (ms):** Es el intervalo de tiempo con el que se actualizarán las métricas, como el estado de la comunicación y otros indicadores del dispositivo.
- **Protocols:** Permite la publicación de datos en formato **MQTT String** con payload tipo texto JSON o similares, o **MQTT Sparkplug** que permite la integración con sistemas como Ignition o plataformas MQTT que soportan Sparkplug o **OPC UA Server**.

#### *3.2.4. Configurar el cliente MQTT*

Por ultimo, desde el Data Service se configuró el cliente MQTT. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó la versión **MQTT Sparkplug**. Se utilizaron los siguientes parámetros para su configuración:

- **Group ID:** se definió UIS como identificador del grupo lógico de nodos asociado a la microrred.
- **Edge Node ID:** se asignó Guatiguará para identificar de forma única al controlador groov EPIC PR2 dentro de dicho grupo.
- **Primary Host State:** se seleccionó la opción 3.0 Spec, compatible con la versión más reciente de la especificación Sparkplug B utilizada en el proyecto.

- **Connect On Demand:** se habilitó para permitir que el nodo gestione la conexión con el broker bajo demanda, de acuerdo con las necesidades de publicación.
- **Tag Aliases:** se activó con el fin de reducir el tamaño de los mensajes cuando el host Sparkplug soporta el uso de alias para las métricas.
- **Allow Writes:** se habilitó para permitir escrituras remotas sobre las variables expuestas cuando sea requerido por aplicaciones externas.

**Figura 12**

*Parámetros configurados para el cliente MQTT*

MQTT Sparkplug	
Using MQTT with Sparkplug payloads provides improved state awareness, performance, and interoperability, plus other advanced features. It is usable from MQTT clients with Sparkplug support.	
Configuration	
Protocol	MQTT Sparkplug
Enable	<input checked="" type="checkbox"/>
Group ID ID for creating logical groups of nodes.	UIS
Edge Node ID ID to uniquely identify this node.	Guatiguara
Primary Host Topic	Optional
Primary Host State The STATE message was improved in the Sparkplug v3.0.0 specification.	3.0 Spec
Compression	None
Connect On Demand Controls the connection behavior to the broker if only the local PAC Controller device is being scanned and Connection Demand Tags are defined in the strategy.	<input checked="" type="checkbox"/>
Tag Aliases Helps reduce the size of data packets, when supported by the Sparkplug host.	<input checked="" type="checkbox"/>
Allow Writes	<input checked="" type="checkbox"/>

Estos parámetros se configuraron como se muestra en la Figura 12. Finalmente, se agregó el broker creado en HiveMQ Cloud al cual se conecta el cliente Sparkplug del EPIC para publicar las mediciones eléctricas de la microrred.

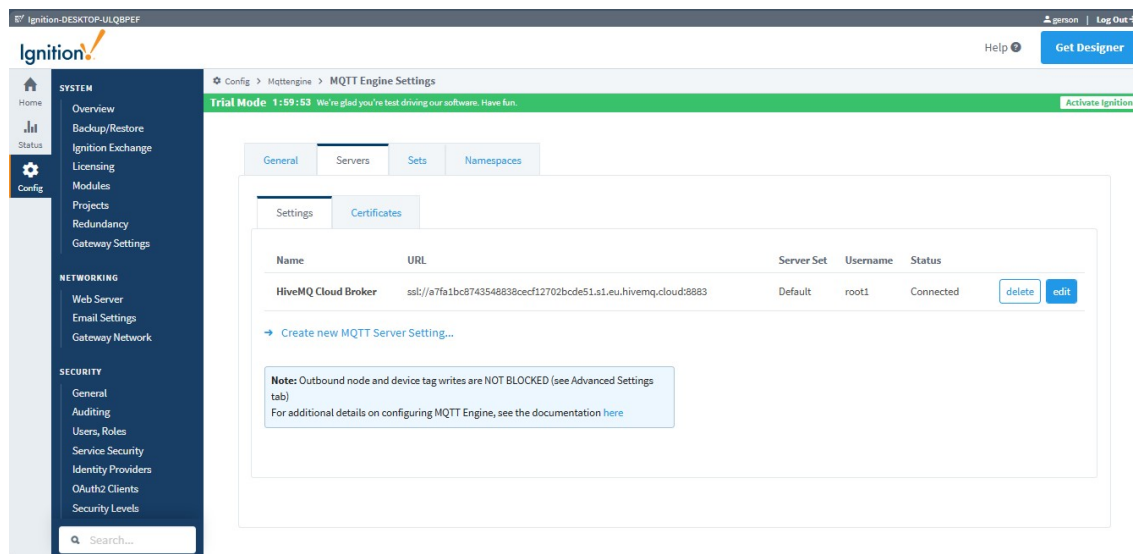
### **3.2.5. Conexión al servidor MQTT de Ignition**

En el gateway de Ignition se instaló el módulo **MQTT Engine** de Cirrus Link Solutions, el cual habilita la comunicación bidireccional mediante MQTT con dispositivos compatibles.

Una vez instalado el módulo, se creó una nueva conexión de servidor MQTT en el gateway, como se muestra en la Figura 13.

**Figura 13**

*Conexión del módulo MQTT Engine con el broker*



Esta conexión se configuró para enlazarse con el broker MQTT desplegado en HiveMQ Cloud, utilizando una conexión cifrada mediante TLS y las siguientes credenciales:

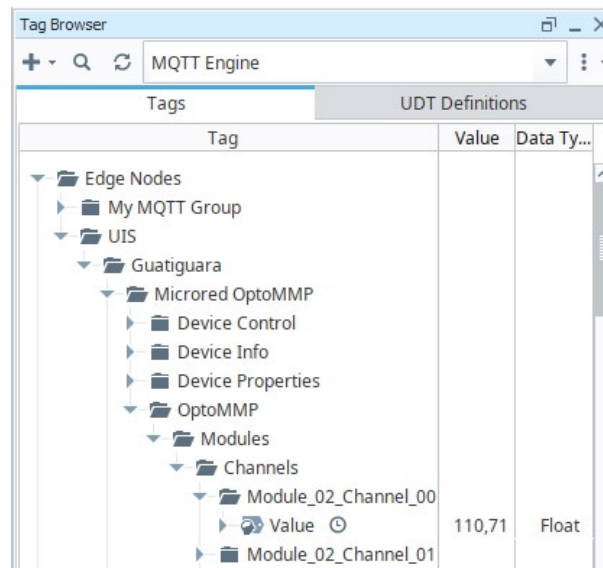
- **URL:** `ssl://a7fa1bc8743548838cecf12702bcde51.s1.eu.hivemq.cloud:8883`
- **Username:** rootIoT
- **Password:** r00T2025

Finalmente, se verificó la llegada de las variables como tags en Ignition. Para ello, se accedió al entorno de desarrollo mediante el Designer Launcher, herramienta que permite seleccionar el gateway y abrir el proyecto.

Dentro del Tag Browser del Designer, el panel que muestra de forma jerárquica todos los proveedores y tags disponibles en el gateway, fue posible observar cómo las variables publicadas por el groov EPIC se registran automáticamente, tal como se muestra en la Figura 14.

**Figura 14**

*Variables del sistema recibidas en Ignition a través del módulo MQTT Engine.*



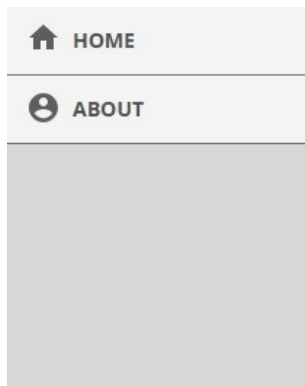
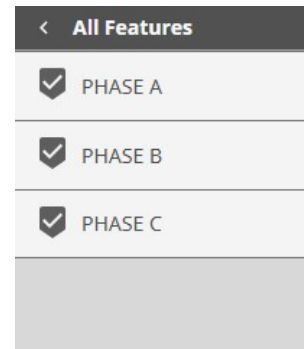
Tag	Value	Data Ty...
Edge Nodes		
My MQTT Group		
UIS		
Guatiguara		
Microred OptoMMP		
Device Control		
Device Info		
Device Properties		
OptoMMP		
Modules		
Channels		
Module_02_Channel_00		
Value	110,71	Float
Module_02_Channel_01		

### 3.3. Creación de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica constituye el principal punto de interacción entre el usuario y el sistema IoT de monitoreo de la microrred, por lo que su diseño permite la visualización y seguimiento de las variables eléctricas más relevantes del nodo de carga, garantizando una interpretación intuitiva y confiable de la información. En este contexto, las variables seleccionadas resultan fundamentales para evaluar el desempeño operativo y la eficiencia energética del sistema, incorporando criterios de usabilidad y buenas prácticas de visualización industrial.

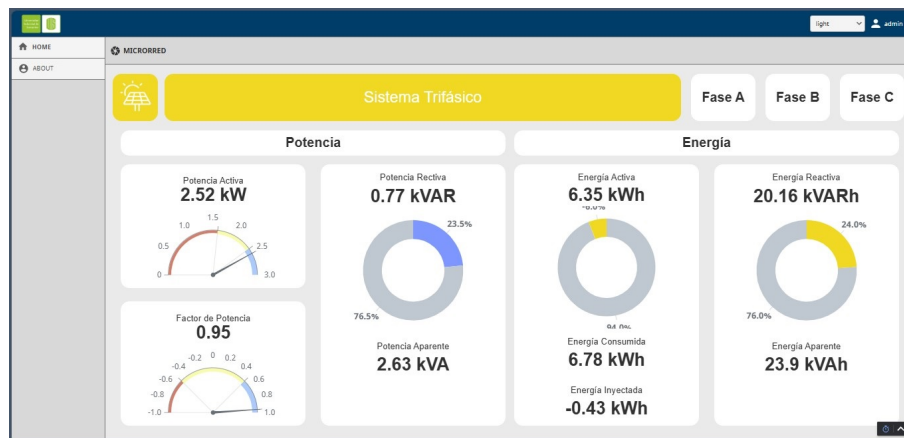
#### 3.3.1. Panel de navegación

La navegación entre las vistas se realiza de manera dinámica. Una de las opciones disponibles es el panel lateral derecho, como se muestra en la Figura 15, desde donde se puede acceder a las vistas que presentan la información de las variables eléctricas, así como una vista general del proyecto. La segunda opción es navegar entre las fases del sistema trifásico mediante un submenú que se habilita al presionar 'ABOUT', como se ilustra en la Figura 16.

**Figura 15***Menú General***Figura 16***Submenú para el nodo trifásico*

### 3.3.2. *Vistas a presentar*

En primer lugar, se tiene la vista con la información general del sistema trifásico donde se presentan las variables de potencia y energía mas importantes como se muestra en la figura 17. Esta vista esta disponible desde la opcion 'HOME' del panel lateral derecho.

**Figura 17***Vista del total de potencia y energía*

Desde la vista principal que muestra la información total del sistema trifásico, también es posible navegar entre cada una de las fases presionando los recuadros que aparecen a la derecha, como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**

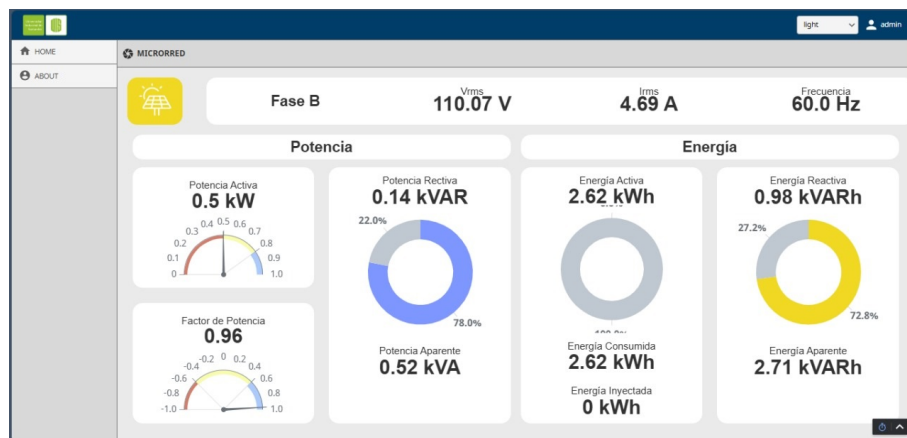
*Navegación por la vista total*



Por otro lado, se tienen las vistas para cada una de las fases del nodo trifásico, como se muestra en la Figura 19, donde se pueden observar las variables eléctricas más importantes.

**Figura 19**

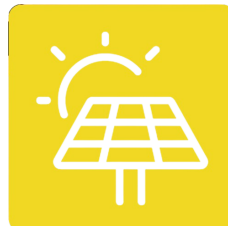
*Vista por fase de potencia y energía*



Además, desde cualquier fase, se puede regresar a la vista total del sistema trifásico presionando el icono que aparece en la Figura 20, el cual está presente en todas las vistas con información de variables eléctricas.

**Figura 20**

*Ícono para navegar a la vista total del sistema trifásico*



#### 4. Pruebas de validación

Una vez finalizadas las etapas de adecuación física, dimensionamiento de conductores, instalación de sensores y configuración de la arquitectura de comunicación IoT, se procedió a realizar la validación experimental del sistema completo.

El objetivo principal de esta fase es verificar la fiabilidad, precisión y consistencia de los datos adquiridos en la microrred, asegurando que la información visualizada en la interfaz gráfica corresponde a los parámetros eléctricos reales suministrados por la fuente de generación.

Para evaluar el desempeño del sistema de adquisición y visualización, se diseñó un protocolo de pruebas basado en la comparación directa entre los valores de referencia generados por la Chroma y los valores registrados por el controlador *groov EPIC* y los visualizados en la plataforma Ignition.

El proceso de validación se estructuró en dos escenarios operativos diseñados para estresar el sistema bajo condiciones de carga típicas y atípicas:

1. **Escenario 1: Carga Balanceada.** Se configuró una demanda de potencia simétrica de 500 W en cada una de las tres fases. Este escenario permite verificar la linealidad de los transformadores de corriente y la calibración general de los canales de adquisición bajo condiciones ideales de operación.
2. **Escenario 2: Carga Desbalanceada.** Se introdujo una asimetría intencional en el sistema, configurando dos fases con una carga de 500 W y reduciendo la tercera fase a una carga de 200 W. Este escenario tiene como fin validar la capacidad del sistema para detectar variaciones individuales por fase y evaluar el comportamiento de la monitorización ante desequilibrios de red.

##### 4.1. Carga Balanceada

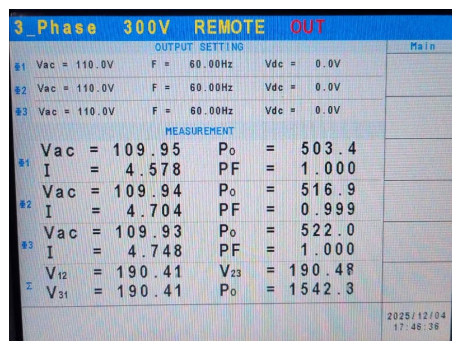
En esta primera prueba se configuró el generador de señales Chroma para simular un sistema trifásico equilibrado, estableciendo una tensión de fase de 110 V y una carga nominal de 500

W por fase. El objetivo es validar la precisión de la adquisición de datos en condiciones de operación simétrica.

En la Figura 21 se observan los parámetros del generador durante la prueba. Simultáneamente, el sistema de adquisición basado en el controlador *groov EPIC* capturó las variables eléctricas, las cuales fueron transmitidas y visualizadas en la interfaz de Ignition de la Figura 22.

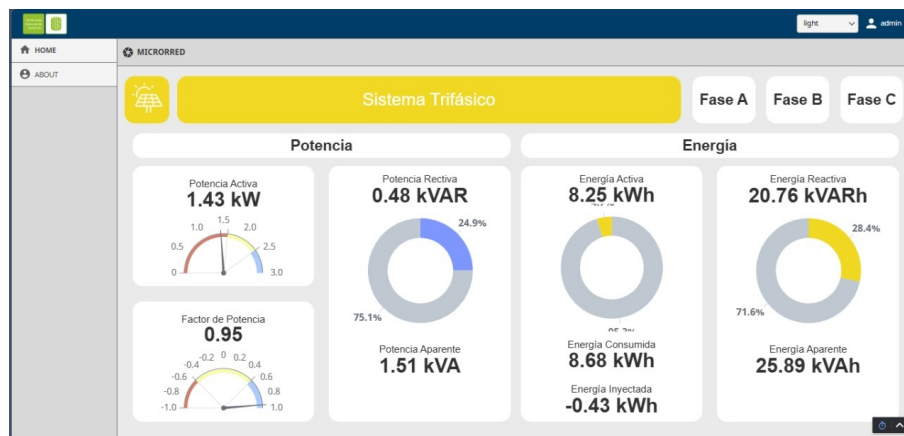
**Figura 21**

*Parámetros de referencia generados por la fuente Chroma (Escenario 1)*



**Figura 22**

*Visualización de datos en la plataforma Ignition (Escenario 1)*



Para cuantificar el desempeño del sistema, se consolidaron los valores de tensión ( $V_{rms}$ ), corriente ( $I_{rms}$ ) y potencia activa ( $P$ ) de las tres fases en la Tabla 2, comparando los datos del generador con el valor visualizado.

**Tabla 2***Comparativa de mediciones - Escenario de Carga Balanceada*

Fase	Variable	Valor Patrón (Chroma)	Valor Visualizado (Ignition)	Error Relativo (%)
A	Tensión (V)	109.95	111.24	1.17%
	Corriente (A)	4.57	4.32	5.47%
	Potencia (W)	503.4	447.17	11.1%
B	Tensión (V)	109.94	109.14	0.73%
	Corriente (A)	4.70	4.66	0.85%
	Potencia (W)	516.9	489.62	5.27%
C	Tensión (V)	109.93	108.08	1.68%
	Corriente (A)	4.74	4.60	2.95%
	Potencia (W)	522.0	470.81	9.80%

Con esto se puede observar que el sistema es capaz de realizar el seguimiento de las variables eléctricas con una precisión aceptable en cuanto a tensión y corriente, presentando errores relativos inferiores al 1.7% y 5.5% respectivamente. Sin embargo, se evidencia un error relativo mayor en la medición de potencia activa, el cual oscila entre el 5.27% y el 11.1%. Este comportamiento se atribuye a las características técnicas de los transformadores de corriente (CTs) seleccionados (relación 100/5 A). Dado que la corriente de carga nominal en este escenario es de aproximadamente 4.5 A, los sensores están operando por debajo del 5% de su capacidad nominal primaria (100 A). En este rango inferior de operación, la linealidad de los CTs disminuye y el error de ángulo de fase aumenta significativamente, lo que impacta directamente en el cálculo de la potencia activa, introduciendo una desviación mayor que la observada en las variables individuales de tensión o corriente.

#### 4.2. Carga Desbalanceada

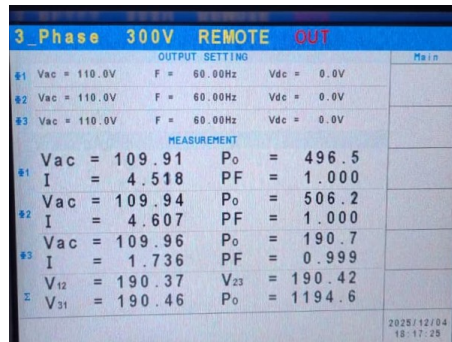
En esta segunda prueba se sometió al sistema a una condición de asimetría de carga, un fenómeno común en microrredes debido a la conexión aleatoria de dispositivos monofásicos. Se configuró el generador Chroma manteniendo la tensión nominal, pero cambiando la potencia de la fase C por 200 W. El objetivo principal de este escenario es validar la capacidad del sistema para discriminar variaciones individuales por fase y evaluar la sensibilidad de los

sensores en el extremo inferior de su rango operativo.

La Figura 23 evidencia la configuración del patrón, donde se observan corrientes cercanas a 4.5 A en las fases A y B, mientras que la fase C presenta una corriente reducida de 1.73 A.

**Figura 23**

*Parámetros de referencia generados por la fuente Chroma (Escenario 2)*



**Figura 24**

*Visualización de datos en la plataforma Ignition (Escenario 2)*



A continuación, se presenta la Tabla 3 con la consolidación de las mediciones y el cálculo del error relativo para este escenario crítico.

**Tabla 3***Comparativa de mediciones - Escenario de Carga Desbalanceada*

Fase	Variable	Valor Patrón (Chroma)	Valor Medido (Sistema)	Error Relativo (%)
<b>A (500 W)</b>	Tensión ( <i>V</i> )	109.91	110.86	0.86 %
	Corriente ( <i>A</i> )	4.51	4.28	5.10 %
	Potencia ( <i>W</i> )	496.5	444.88	10.4 %
<b>B (500 W)</b>	Tensión ( <i>V</i> )	109.94	109.43	0.46 %
	Corriente ( <i>A</i> )	4.60	4.66	1.30 %
	Potencia ( <i>W</i> )	506.2	489.91	3.22 %
<b>C (200 W)</b>	Tensión ( <i>V</i> )	109.96	109.65	0.28 %
	Corriente ( <i>A</i> )	<b>1.73</b>	<b>1.77</b>	<b>2.31 %</b>
	Potencia ( <i>W</i> )	<b>190.7</b>	<b>177.56</b>	<b>6.89 %</b>

Los resultados presentados en la Tabla 3 confirman la capacidad del sistema IoT para detectar asimetrías en la red en tiempo real. Se observa cómo el sistema registra correctamente la disminución de corriente en la Fase C (aprox. 1.77 A) frente a las fases A y B. Al igual que en el escenario anterior, el error relativo en la potencia activa se mantiene en un rango del 3% al 10%. Es importante destacar que, en la Fase C, al reducir la carga a 200 W, la corriente circulante representa menos del 2% de la escala nominal del transformador de corriente. A pesar de operar en el extremo inferior de la curva de sensibilidad del sensor, el sistema logró cuantificar el desbalance, validando la lógica de adquisición y transmisión de datos ante variaciones operativas, aunque la precisión absoluta de la potencia se vea limitada por el sobredimensionamiento de los sensores disponibles.

## 5. Conclusiones

- El sistema IoT del LIE, presenta una infraestructura base sólida para su expansión, con módulos de medición que permiten la adquisición de variables eléctricas críticas como la tensión, corriente y potencia. Las condiciones operativas del sistema y su conexión con la red interna del laboratorio fueron adecuadas para iniciar el desarrollo del proyecto de monitoreo en tiempo real de los datos de la microrred.
- A partir de los hallazgos descritos, se concluye que el sistema desarrollado valida exitosamente la arquitectura de comunicación IoT y la lógica de procesamiento en el controlador. La coincidencia exacta entre los datos del *groov EPIC* y la interfaz *Ignition* demuestra una integración robusta y libre de pérdidas de información, identificando que el error porcentual en la potencia activa (entre 5 % y 11 %) no es atribuible a defectos en el módulo de adquisición, sino al sobredimensionamiento de los sensores de corriente disponibles. Este fenómeno físico introduce una distorsión en la lectura del ángulo de fase, afectando el cálculo del factor de potencia y, consecuentemente, la potencia activa. Por lo tanto, el sistema es totalmente funcional para propósitos de monitorización de estado, tendencias y supervisión remota.
- Adicionalmente, se demostró la alta sensibilidad del sistema de adquisición para detectar y visualizar condiciones de desequilibrio de carga en la microrred. Las pruebas validaron que, aún operando en el límite inferior de los sensores, el sistema fue capaz de replicar el perfil de consumo asimétrico con un error de potencia inferior al 7 %. Esto confirma que la solución implementada es robusta para la identificación de anomalías y fallas en fases individuales, manteniendo la estabilidad en la referencia de tensión independientemente de las variaciones de corriente.
- El sistema ha demostrado ser robusto para el monitoreo continuo de las variables eléctricas, permitiendo no solo la supervisión en tiempo real. Esta capacidad es esencial para la gestión eficiente de la microrred.

## 6. Trabajo futuro

El desarrollo del sistema de adquisición y visualización de datos de la microrred ha logrado establecer una infraestructura sólida para el monitoreo remoto, sin embargo, existen diversas áreas de mejora y expansión que podrían aprovechar el potencial de la tecnología implementada.

- **Implementación de un UNS (Unified Namespace):** Para mejorar la interoperabilidad entre los diversos dispositivos y sistemas involucrados, se propone la implementación de un Unified Namespace (UNS). Este enfoque permitiría consolidar todos los datos y variables del sistema IoT en una única fuente de verdad, facilitando la gestión y el análisis de los datos a lo largo del tiempo.
- **Ampliación de la infraestructura de generación distribuida:** Esta integración proporcionaría un enfoque más completo para evaluar los flujos de energía bidireccionales, permitiendo una mejor gestión de la energía dentro de la microrred.
- **Adopción de protocolos de comunicación estándares:** Para asegurar la interoperabilidad con equipos de otros fabricantes y adaptarse a las tendencias del sector eléctrico, se recomienda la integración de protocolos de comunicación estandarizados como IEC 61850.
- **Implementación de algoritmos avanzados de análisis y control:** Utilizando los datos adquiridos por el sistema, se podrían desarrollar algoritmos de control predictivo o de optimización que permitan maximizar la eficiencia energética de la microrred.

Estas líneas de investigación y desarrollo podrían transformar el laboratorio en un entorno de pruebas aún más completo, con capacidades ampliadas para monitoreo y gestión activa de la microrred, posicionándose como un referente para la investigación y el desarrollo de sistemas de energía inteligente.

## 7. Referencias

- Díaz Sánchez, O., y López González, B. J. (2023). *Diseño de un sistema iot para la monitorización de una microrred eléctrica experimental* (Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia). Descargado de <https://noesis.uis.edu.co/items/bec6accb-9846-4341-b299-4f8aadebb8b1> (Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas)
- Lovato Electric S.P.A. (2019, aug). Trasformatori di corrente - tipo apribile (dm...ta) [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.lovatoelectric.com> (Data Sheet 31100267)
- Opto 22. (2025a, jul). groov epic user's guide (Manual de software informático n.º Form 2267 (2104-250724)). (Para modelos GRV-EPIC-PR1 y GRV-EPIC-PR2)
- Opto 22. (2025b). groov power monitoring module data sheet (grv-ivapm-3) (Manual de software informático n.º Form 2351-250528). Descargado de <https://www.opto22.com> ([Accedido 25-05-2025])
- Rey, J. M., Gómez, J., Duarte, N., Hernández, I., Mantilla, M. A. A., y Quiroga, O. (2025, January). Design and validation of an iot system for an experimental laboratory microgrid. *IEEE Latin America Transactions*, *23*(1), 25–35. doi: 10.1109/TLA.2025.10810485
- Saeed, M. H., Fangzong, W., Kalwar, B. A., y Iqbal, S. (2021). A review on microgrids challenges & perspectives. *IEEE Access*, *9*, 166502-166517. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135083
- Sánchez, M. Y., y Gelvez, C. L. (2025). *Implementación y verificación de la operación de un módulo configurable de cargas para una microrred experimental* (Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia). Descargado de <https://noesis.uis.edu.co/items/b5d519ee-e092-4dc8-bc26-0ce544a6622f> (Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Oscar Alexis Galvis Díaz. Codirector: Juan Manuel Rey Ló-

pez)

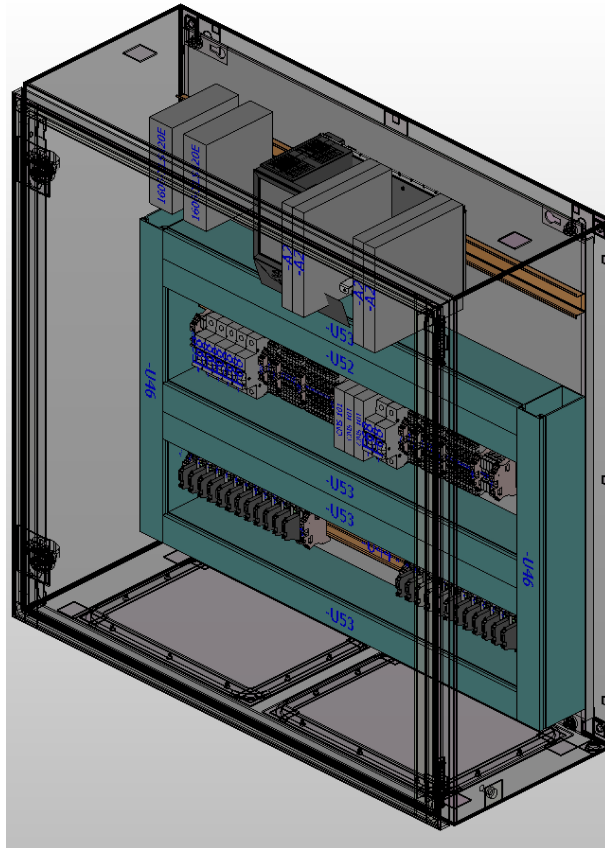
Ullah, Z., Rehman, A. U., Wang, S., Hasanien, H. M., Luo, P., Elkadeem, M. R., y Abido, M. A. (2023). Iot-based monitoring and control of substations and smart grids with renewables and electric vehicles integration. *Energy*, 282, 128924. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223023186> doi: 10.1016/j.energy.2023.128924

WAGO GmbH & Co. KG. (2025, sep). Data sheet | item number: 2007-8873: Compact terminal block for current and voltage transformers [Manual de software informático]. Descargado de <https://www.wago.com/2007-8873> (Version 03.09.2025)

## Apéndice A. Diseño 3D Tablero Epic

Figura A1

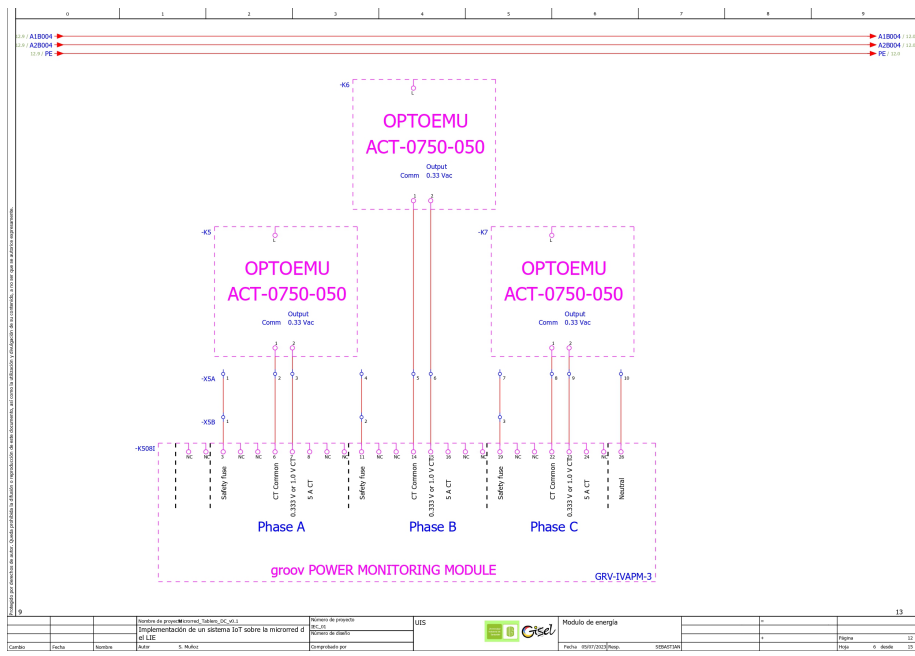
*Diseño Inicial del Tablero EPIC*



## Apéndice B. Configuración original de los Transformadores de Corriente

**Figura B1**

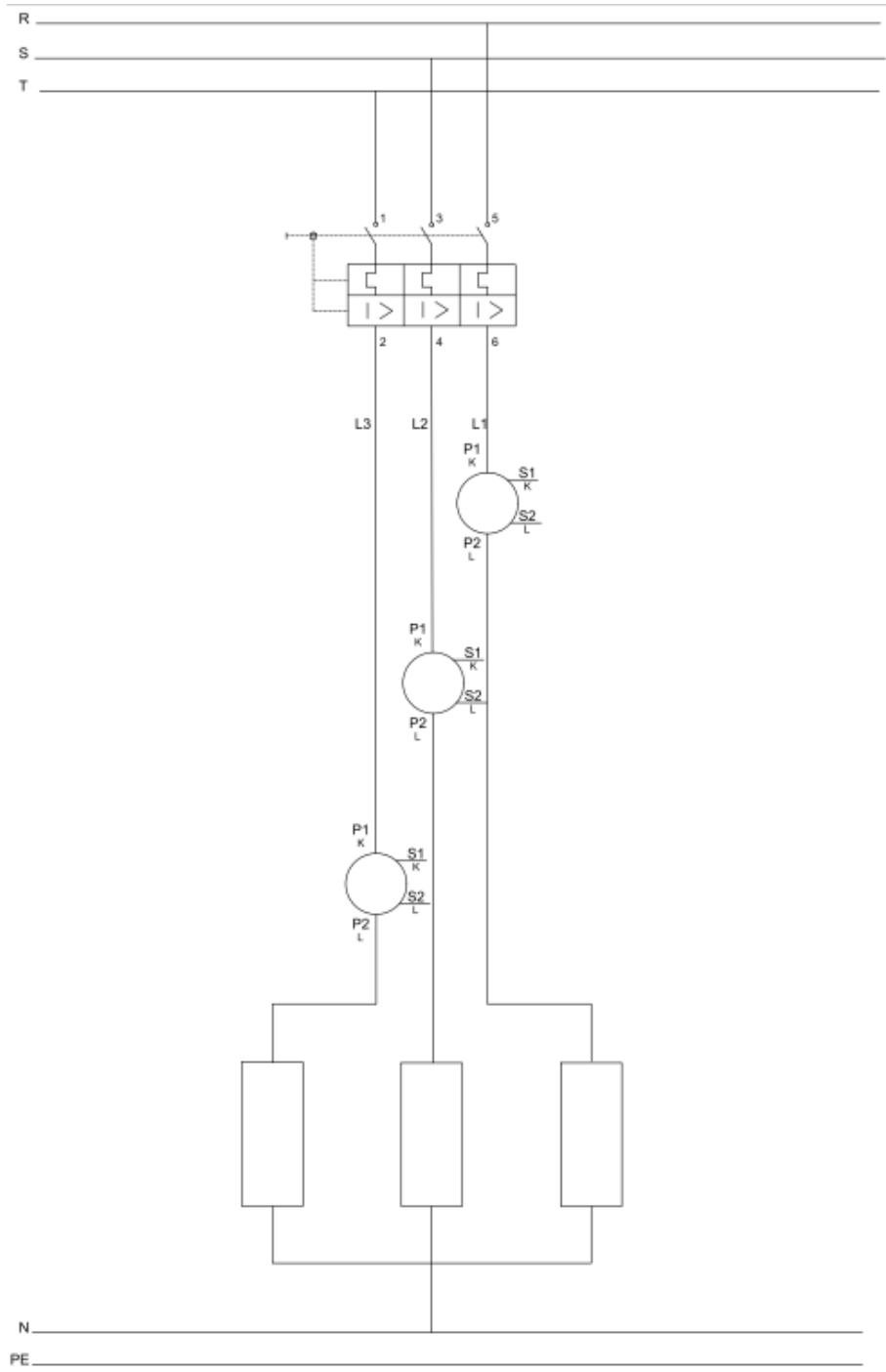
*Conexión Inicial de los Transformadores de Corriente*



### Apéndice C. Diagramas Trifilares

Figura C1

*Diagrama Unifilar Conexión Cargas Globales*



**Figura C2**

*Diagrama Unifilar Conexión Módulo*

