



**DISEÑO DE UN SISTEMA SCADA PARA MONITOREO Y CONTROL DE UN
GENERADOR ELÉCTRICO.**

**JESÚS DAVID CAMPO MIELES
ANDRÉS FELIPE HIGUITA GALEANO
JULIÁN ALBERTO ZAPATA VALLEJO**

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

**DISEÑO DE UN SISTEMA SCADA PARA MONITOREO Y CONTROL DE UN
GENERADOR ELÉCTRICO.**

**JESÚS DAVID CAMPO MIELES
ANDRÉS FELIPE HIGUITA GALEANO
JULIÁN ALBERTO ZAPATA VALLEJO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Eléctrica

Asesor

**Arley Fernando Villa Salazar
Magíster en Ingeniería
Andrés Felipe Romero Maya
Magíster en Energía**

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

Contenido

Resumen.....	7
Glosario.....	9
Introducción	11
1. Planteamiento del problema	12
1.1. Descripción	12
1.2. Formulación.....	13
2. Justificación.....	14
3. Objetivos.....	15
3.1. Objetivo general.....	15
3.2. Objetivos específicos	15
4. Marco teórico.....	16
4.1. Antecedentes	16
4.2. Bases teóricas.....	17
5. Metodología.....	24
5.1. Aplicación detallada de la metodología en el proyecto	26
6. Resultados.....	42
6.1. Desviación entre los valores ideales y los reales	44
6.2. Valoración de la eficiencia.....	46
6.3. Frecuencia y estabilidad del sistema.....	46
7. Conclusiones.....	47
8. Recomendaciones	48
9. Referencias bibliográficas	49
10. Bibliografía	52
11. Anexos	53

Lista de figuras

Figura 1. Gráfica del Crecimiento de la inversión en energías renovables.	20
Figura 2 Partes del Generador Eléctrico Fuente: (Hamill, 2011).	21
Figura 3 Diagrama de Conexión del Banco de Resistencias	27
Figura 4 Comportamiento de la Resistencia del Banco en Cada Paso	34
Figura 5 Comportamiento de la Corriente en Cada Paso.....	35
Figura 6 Comportamiento de la potencia en cada paso	35
Figura 7 Diseño de la Interfaz del HMI.....	36
Figura 8 Programa de Comunicación entre el HMI y el PLC	37
Figura 9 Programa de control para las resistencias.....	38
Figura 10 Baco de resistencias.....	39
Figura 11 Relés de Estado Sólido y Transformador de Corriente	39
Figura 12 Tablero de Control del PLC	40
Figura 13 Analizador de Redes y HMI.....	41
Figura 14 Gráfica del Resultado del Voltaje en la Prueba.....	42
Figura 15 Gráfica del Resultado de la Frecuencia en la Prueba	43
Figura 16 Gráfica del Resultado de la Corriente en la Prueba.....	43
Figura 17 Gráfica del Resultado de la Potencia en la Prueba	44
Figura 18 Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales del Voltaje	45
Figura 19 Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales de la Corriente	45
Figura 20 Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales de la Potencia.....	46

Lista de tablas

Tabla 1 Aplicación de la metodología CDIO.....	25
Tabla 2 Variables Eléctricas de las Resistencia de Forma Individual	29
Tabla 3 Variable Eléctrica en Cada Paso del Banco de Resistencias	34

Lista de anexos

Anexo 1. Plano de las conexiones de control.	54
Anexo 2. Generador Utilizado en las Pruebas.	55

Resumen

Este proyecto se enfoca en diseñar de un sistema Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) que monitorea el proceso de generación de energía eléctrica por medio de un generador, diseñado para su uso en contextos académicos y de investigación. El monitoreo permite la observación y análisis del comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de operación y carga. El módulo, junto con un banco de resistencias variable, facilita el estudio detallado del desempeño del generador cuando se somete a distintas condiciones operativas.

La instalación de sensores en el sistema tiene como objetivo recopilar datos de variables críticas como voltaje, corriente y potencia generada. Estos datos se utilizan para evaluar el rendimiento del generador en cada escenario. Esta metodología proporciona una comprensión más profunda de los principios fundamentales de la generación de energía y apoya el aprendizaje práctico de técnicas de supervisión y control de variables en sistemas de generación.

El proyecto no solo aspira a mejorar la enseñanza de los principios básicos de la generación de energía, sino también a proporcionar una herramienta adaptable que permita experimentar con condiciones operativas variables, semejantes a las que se presentan en la vida real. De esta manera, se favorece el desarrollo profesional de los estudiantes en el ámbito de la ingeniería eléctrica y se facilita la experimentación necesaria para proponer mejoras en los sistemas futuros.

Palabras claves: monitorear, generación de energía, micro generador, control, sistemas de monitoreo, banco de resistencia variable, condiciones de operación y carga, sensores.

Abstract

This project presents the design and implementation of a SCADA system for monitoring and controlling an electric generator, developed for academic and research purposes. The system simulates various load conditions using a stepwise resistive load bank, automatically controlled via a Siemens S7-1500 PLC, with real-time monitoring of electrical variables (voltage, current, and power) through an EBCHQ power analyzer and data visualization on an HMI panel.

The applied methodology is based on the CDIO model (Conceive, Design, Implement, Operate), enabling a structured development process from problem identification to system validation under real operating conditions. Experimental tests were conducted across eight load levels, revealing notable deviations between theoretical and real values, mainly due to the lack of fuel compensation in the generator's motor. The average efficiency reached was 60%, which is consistent with the educational purpose of the prototype.

The results enable analysis of generation system behavior in controlled environments, reinforce students' hands-on learning, and integrate theoretical concepts with real-world observations. This project provides a versatile tool for training in electrical engineering, with potential for expansion into more advanced experimental and research applications.

Keywords: SCADA, monitoring, power generation, PLC, data acquisition, educational system, electrical engineering.

Glosario

Adquisición de datos: proceso mediante el cual se registran y almacenan datos provenientes de sensores o dispositivos de medición en un sistema. En este proyecto, permite capturar variables eléctricas como voltaje, corriente y potencia para su análisis posterior.

Analizador de redes: dispositivo que mide parámetros eléctricos en tiempo real, como tensión, corriente, potencia activa/reactiva y frecuencia. Es esencial para el monitoreo de calidad de energía y diagnóstico de sistemas eléctricos.

Banco de resistencias: conjunto de resistencias conectables de forma escalonada para simular diferentes niveles de carga sobre un generador. Permite reproducir variaciones de consumo en condiciones controladas.

CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar): metodología educativa aplicada en el proyecto que estructura el desarrollo de sistemas de ingeniería en cuatro fases consecutivas: concepción del problema, diseño de la solución, implementación técnica y operación evaluativa del sistema.

Frecuencia eléctrica: número de ciclos por segundo de una señal alterna. En sistemas eléctricos, se mide en hertzios (Hz) y suele ser 60 Hz en Latinoamérica. Una variación indica desbalance en la generación o en la carga.

Generador eléctrico: máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica. En el proyecto, se utilizó un generador acoplado a un motor para simular condiciones reales de generación.

HMI (Interfaz Hombre-Máquina): dispositivo que permite la interacción entre el usuario y el sistema de control. Muestra información en tiempo real y permite ejecutar comandos de forma intuitiva.

Monitoreo eléctrico: proceso de observación y registro continuo de variables eléctricas con el fin de evaluar el desempeño de un sistema de generación, distribución o consumo.

PLC (Controlador Lógico Programable): dispositivo electrónico que ejecuta rutinas lógicas

de control en sistemas industriales. En el proyecto, fue utilizado para automatizar la conexión secuencial de cargas resistivas.

Potencia eléctrica (P): cantidad de energía eléctrica transferida o consumida por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W) y depende del voltaje y la corriente.

Relé de estado sólido (SSR): interruptor electrónico que permite controlar cargas sin partes móviles, activado por señales de bajo voltaje provenientes del PLC. Ideal para sistemas que requieren conmutación rápida y silenciosa.

Resistencia eléctrica: oposición al paso de corriente en un circuito. Se mide en ohmios (Ω) y determina, junto con la tensión, cuánta corriente circula.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): sistema de supervisión y adquisición de datos usado para controlar procesos industriales de forma remota y en tiempo real. En este proyecto, permite la visualización, registro y análisis del comportamiento del generador.

Voltaje (Tensión eléctrica): diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, que impulsa el movimiento de electrones en un circuito. Se mide en voltios (V).

Introducción

Este proyecto se centra en el diseño de un sistema de monitoreo y control para el procedimiento de generación de energía eléctrica mediante un generador eléctrico. Mediante la recreación de las condiciones de funcionamiento de una planta de generación eléctrica, en un ambiente regulado y a pequeña escala, se busca brindar una herramienta que facilite el aprendizaje y el análisis práctico de sistemas de generación en contextos académicos e investigativos, permitiendo la observación y análisis del comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de operación y carga, brindando una comprensión detallada de los principios y retos presentados en los sistemas de generación de energía.

La elaboración del sistema plantea una plataforma donde se produce el movimiento de un generador eléctrico unido a un sistema rotatorio, mientras que una resistencia variable pretende recrear el efecto de distintas cargas en el desempeño del generador midiendo y evaluando las variables eléctricas involucradas en el proceso. Este sistema opera bajo condiciones de operación reales que posibilita la observación de la reacción del sistema y la adquisición de datos de variables esenciales como voltaje, corriente y potencia mediante sensores, los cuales son analizados para evaluar el comportamiento y estabilidad del sistema en cada caso.

El método utilizado en este proyecto es experimental, posibilitando la gestión y control de variables. A través de ensayos regulados bajo diversas condiciones, se consiguen datos que reflejan el comportamiento del sistema en diversos contextos. Además de facilitar el estudio de los principios básicos de la generación de energía, permite el aprendizaje de técnicas de supervisión y control en plantas de generación.

Sin embargo, el proyecto tiene restricciones propias debido a la escala y al ambiente de operación. Como se trata de un sistema a pequeña escala, el comportamiento de ciertos elementos puede variar respecto al de una planta en operación real. Además, los resultados logrados representan las condiciones particulares de este sistema y pueden necesitar modificaciones para su uso en instalaciones de mayor capacidad o bajo condiciones más extensas o complejas. Aunque existen estas restricciones, el sistema proporciona un recurso didáctico útil, versátil y práctico para probar diversos escenarios de generación en el campo de la ingeniería eléctrica.

1. Planteamiento del problema

1.1.Descripción

Uno de los desafíos más significativos en las centrales de generación en Colombia es la ausencia de sistemas de monitoreo y control en tiempo real, lo cual limita la capacidad de respuesta frente a variaciones en el flujo de energía y en la demanda de carga, afectando directamente la eficiencia del sistema y reduciendo la vida útil de los equipos. Esta problemática es especialmente evidente en sectores con usuarios de medianos y bajos consumos, donde el alto costo y la falta de integración de tecnologías de medición dificultan la implementación de soluciones automatizadas. En este contexto, el monitoreo remoto y la gestión energética basada en tecnologías IoT representan una alternativa viable para optimizar recursos, reducir pérdidas y aumentar la competitividad de los usuarios finales (Barragán et al., 2022).

Bajo esa condición, se presenta la necesidad de crear una herramienta experimental que facilite el análisis del proceso de generación de energía eléctrica, replicando las condiciones de operación de una central de generación de energía eléctrica, aplicando un análisis de datos obtenidos con la aplicación de sensores y herramientas de obtención de datos. Con esto se pretende proporcionar un instrumento adecuado para el estudio de sistemas de generación. Esto permitirá analizar el comportamiento de las variaciones, de acuerdo a la carga vinculada, cómo influyen en el desempeño y la estabilidad del sistema, además de proporcionar un recurso útil para la enseñanza y desarrollo de técnicas de monitoreo y control.

La importancia de este proyecto reside en su capacidad para suplir necesidades académicas en el campo de la ingeniería eléctrica, sin la necesidad de una infraestructura de gran magnitud. El sistema proporcionará un ambiente controlado en el que alumnos e investigadores tendrán la posibilidad de observar, evaluar y examinar el funcionamiento de un sistema de generación eléctrica bajo condiciones específicas. Mediante los sensores se recolectarán datos de factores fundamentales como el voltaje, corriente y potencia generada, permitiendo evaluar el comportamiento y estabilidad del sistema en diversas condiciones de carga (Ramírez, 2019).

Desde una perspectiva tecnológica, el desarrollo de un sistema con capacidad de monitoreo constituye un aporte importante en la formación de ingenieros y técnicos especializados, (W. Zhang & Feng, 2023). En términos prácticos, el proyecto promueve el aprendizaje de los principios

de la generación eléctrica, proporcionando una herramienta que podría ajustarse para estudios y/o optimizar prácticas en entornos reales. Con el aumento en la demanda energética y el interés por recursos renovables, este sistema puede funcionar como un recurso valioso para educar a profesionales capaces de diseñar y manejar sistemas de generación eficiente y sostenible.

1.2. Formulación.

¿Cómo diseñar un sistema automatizado de monitoreo y control para el proceso de generación eléctrica en pro de estudiar y analizar el comportamiento de las variables eléctricas de acuerdo a los diferentes estados de carga?

2. Justificación

La necesidad de desarrollar este proyecto se fundamenta en el compromiso de las instituciones de educación superior de buscar alternativas para la sociedad, crear herramientas académicas que permitan evaluar el proceso de generación de energía eléctrica. Con este proyecto se busca proporcionar soluciones energéticas sostenibles y eficientes con la aplicación del monitoreo de generadores eléctricos. La implementación de sistemas de monitoreo y control en tiempo real mejora significativamente la eficiencia y confiabilidad de estos generadores, permitiendo un uso óptimo de los recursos naturales disponibles.

El proyecto busca promover el aprendizaje práctico, proporcionando una herramienta en la cual se puede observar, evaluar y cuantificar el comportamiento de un generador eléctrico, usando tecnologías y herramientas computacionales avanzadas, lo cual posiciona a la institución en la vanguardia del desarrollo tecnológico y potencia la preparación de los estudiantes en el ámbito laboral e investigaciones aplicadas en el sector eléctrico. Esto no solo beneficia a la comunidad local, sino que también eleva el perfil académico y tecnológico de la institución.

Además, existe una necesidad crítica de formar ingenieros altamente capacitados y competitivos en el sector eléctrico. La industria eléctrica es dinámica y en constante evolución, requiriendo profesionales que posean una formación integral y que sean capaces de adaptarse rápidamente a los cambios tecnológicos. Este proyecto proporciona una plataforma práctica para que los estudiantes adquieran habilidades y conocimientos aplicables en el mundo real, fortaleciendo su preparación para enfrentar los desafíos del mercado laboral.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo y control para un generador eléctrico aplicando diferentes estados de carga.

3.2.Objetivos específicos

- Implementar un sistema de adquisición de datos que registre las variables críticas durante la operación del generador para su posterior análisis.
- Evaluar el desempeño del generador bajo diferentes condiciones, estudiando su comportamiento y su uso en el sistema de generación.
- Analizar los datos de las variables adquiridas por medio de herramientas en Python, que permitan la toma de decisiones en pro al sistema diseñado.

4. Marco teórico

4.1. Antecedentes

Se presenta el trabajo presentando por Leiton y Pazmiño. (2020) El cual tiene como título desarrollo de un sistema SCADA basado en algoritmo predictivo de fallas en generadores eléctricos, es bien sabido que el mantenimiento puede prolongar la vida útil de los motores eléctricos, pero identificar condiciones anormales en los generadores es difícil. Si no se corrigen, estas condiciones causarán daños y pueden ser costosas debido a la falta de un conocimiento continuo de su comportamiento. Esto nos motiva a desarrollar planes de mantenimiento más efectivos que puedan predecir estas fallas y detectarlas de forma automática e instantánea, logrando así el mantenimiento predictivo. Para desarrollar este mantenimiento predictivo, diseñamos un algoritmo basado en el diagrama de funcionamiento del generador y sus ecuaciones de estabilidad para el par electromagnético, el par mecánico y la velocidad. Todas estas variables y sus componentes fueron analizadas con líneas de código y diagramas lógicos de bloques con la herramienta de Simulink en Matlab.

Estos análisis ofrecen numerosas ventajas, como la predicción de fallos y la detección del desgaste de los rodamientos causado por las vibraciones generadas por los armónicos de la red. Estas anomalías o distorsiones deben eliminarse para evitar diversos daños predecibles. Estos avances no solo ahorran en repuestos, sino que también reducen el tiempo y el coste del mantenimiento correctivo, evitando largos periodos de inactividad o emergencias inesperadas. Por lo tanto, este programa no solo permite predecir los daños del generador, sino que también ahorra dinero a largo plazo para repararlos y reinvertir estos fondos en mejoras del sistema para ofrecer a los clientes fiabilidad y productos de alta calidad.

Por su parte, Rodríguez, (2018) en su propuesta de automatización del sistema de transferencia de energía eléctrica en planta PIEMME, presenta como objetivo principal, realizar la propuesta de automatización del sistema de transferencia de energía eléctrica en planta piemme. Para desarrollar esta propuesta, evaluamos las condiciones actuales del sistema para buscar mejoras que optimizaran el método de transmisión actual. Con esto en mente, y considerando los equipos, instrumentos y variables en operación, seleccionamos el equipo de nuevo diseño con base en diversos criterios. El diseño del sistema de transmisión de energía propuesto proporcionará las capacidades de automatización y monitoreo necesarias para garantizar su operación.

De igual modo, Madrid, (2017) realiza un diseño e implementación de un SCADA para la monitorización de una central térmica, el cual se centra en la monitorización de una pequeña parte de un proceso industrial de una Central Térmica Convencional, para ello se diseñaron un sistema SCADA mediante el software LabVIEW, con su correspondiente programación, el cual esta interconexionado mediante Ethernet a un PLC de National Instruments. El programa creado tiene la facilidad de que puede ser fácilmente configurable por el usuario sin necesidad de tener conocimientos de LabVIEW.

De esta forma el sistema SCADA que estará presente, en una o varias pantallas, será de gran ayuda para ver de forma rápida e intuitiva el estado de la Central. En estas pantallas se reflejarán los parámetros más significativos y poder así, seguir en todo momento su funcionamiento aun sin estar en la propia central. Además, dicho SCADA estará preparado para enfrentarse a posibles anomalías de funcionamiento. Se controlarán los estados de temperatura y presión de las turbinas con el objetivo de mantener unos límites y crear unas alarmas si es necesario.

En el caso de que se produzca algún defecto o alarma, se registrarán los detalles de la anomalía en un archivo Excel y se enviará un correo electrónico al usuario o encargado de la instalación, con el fin de agilizar lo máximo posible su resolución o su posible estudio.

Los estudios antes mencionados, representan una fuente de información teórica y metodológica que permite dirigir el trabajo hacia los resultados y conclusiones, además, proporcionan el contexto histórico, teórico y empírico necesario para comprender el problema que se investiga, así como para situar el estudio actual en relación con investigaciones previas.

4.2. Bases teóricas

4.2.1. Micro generación

La Comisión de Regulación de Energía y Gas -CREG- (2024) define la micro generación como la actividad de personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente para satisfacer sus propias necesidades. Esta producción suele estar limitada a 1 MW para ser considerada autogeneración a pequeña escala. El marco regulatorio de la CREG para la micro generación incluye la promoción de las comunidades energéticas, que son grupos que cooperan para la generación, comercialización y uso eficiente de energía, teniendo en cuenta que la potencia

nominal máxima de un sistema autogenerado no debe exceder su capacidad instalada ni su capacidad nominal. El reglamento prevé un procedimiento de compensación energética que permite que la electricidad generada se utilice para otras cuentas del mismo usuario. La electricidad generada puede comercializarse de diversas maneras, incluyendo la venta directa a comercializadores o la participación en el despacho central (para centrales eléctricas con capacidad superior a 1 MW). Por lo tanto, el reglamento CREG busca mejorar la eficiencia energética, promover la participación de los usuarios en el mercado y lograr una transición energética más inclusiva y participativa. usuario.

4.2.2. PCH (pequeñas centrales hidráulicas)

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son centrales hidroeléctricas de menor tamaño, con capacidades que van desde 0.2 kW hasta 500 kW, según definiciones comunes. Estas PCH se distinguen de las grandes centrales hidroeléctricas por su menor impacto ambiental y social, lo que las convierte en una opción más sostenible para la generación de energía. En Colombia, según el Ministerio de Minas y Energía, una PCH (pequeña central hidroeléctrica) es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la fuerza del agua, pero con capacidad instalada entre 0,5 y 500 kW.

Estas, se definen como centrales hidroeléctricas con capacidad instalada entre 0,5 y 500 kW, y se clasifican en: Pico centrales (0,5 - 5 kW), Micro centrales (5 - 50 kW), Minicentrales (50 - 500 kW), las mismas consideran una fuente de energía limpia y renovable. Se puede mencionar que, las PCH contribuyen significativamente a la matriz energética colombiana, especialmente en zonas rurales, según el Ministerio de Minas y Energía.

4.2.3. Generación de Energía Eléctrica

La generación de energía eléctrica es un campo fundamental en la ingeniería y la tecnología, con un impacto significativo en el desarrollo económico y social. La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) regula la generación de energía eléctrica en Colombia, incluyendo la autogeneración y la generación distribuida, con normas como la Resolución 174 de 2021. Esta normativa permite a hogares e industrias autogenerar energía y vender los excedentes al Sistema Interconectado Nacional (SIN). La CREG también regula la comercialización de energía proveniente de plantas de autogeneración y generadores distribuidos en Zonas No Interconectadas

(ZNI), con normas como la Resolución 038 de 2018. Sobre la regulación de la CREG para la generación de energía eléctrica, se puede mencionar:

- **Autogeneración y Generación Distribuida:**

La CREG establece la regulación para la autogeneración a pequeña escala (AGPE) y la generación distribuida (GD) en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), a través de la Resolución 174 de 2021.

- **Zonas No Interconectadas (ZNI):**

La CREG establece normas específicas para la generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en las ZNI, incluyendo la Resolución CREG 091 de 2007.

- **Comercialización de Excedentes:**

La CREG regula la comercialización de energía proveniente de plantas de autogeneración y generadores distribuidos en ZNI, con reglas definidas en la Resolución CREG 038 de 2018.

- **Comunidades Energéticas:**

La CREG ha aprobado una resolución que permite a las comunidades generar y vender energía eléctrica, facilitando la participación en proyectos de autogeneración colectiva.

4.2.4. Formas de Generación de Energía Convencionales.

- **Generación con Combustibles Fósiles:** la generación de energía eléctrica convencional incluye el uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Estas fuentes han sido predominantes debido a su alta densidad energética y disponibilidad. Sin embargo, presentan desafíos ambientales significativos, como la emisión de gases de efecto invernadero. (ENERGY, 2023)
- **Generación Nuclear:** la energía nuclear utiliza la fisión de átomos de uranio o plutonio para generar calor, que luego se convierte en electricidad. Esta tecnología ofrece una alta capacidad de generación con bajas emisiones de carbono, pero enfrenta desafíos relacionados con la seguridad y la gestión de residuos radiactivos. (ENERGY, 2023)
- **Generación Hidroeléctrica:** la energía hidroeléctrica aprovecha la energía cinética del

agua en movimiento para generar electricidad. Es una fuente renovable y limpia, pero su implementación puede tener impactos ambientales y sociales significativos, como la alteración de ecosistemas y el desplazamiento de comunidades. (ENERGY, 2023)

4.2.5. Generación por medio de Energías Renovables

Dentro de estas se pueden mencionar la fotovoltaica, eólica y geotérmica; aunque, por medio de la *figura 1* se puede observar el crecimiento en la inversión de estas energías en América latina en los últimos años:

- **Energía Solar fotovoltaica:** de acuerdo con López (2019) es la energía solar fotovoltaica convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el uso de células solares. Esta tecnología ha experimentado un rápido crecimiento y una reducción significativa en los costos, lo que la hace cada vez más competitiva.
- **Energía Eólica:** la energía eólica utiliza aerogeneradores para convertir la energía cinética del viento en electricidad. Es una fuente de energía limpia y renovable, con un potencial significativo en muchas regiones del mundo. (López, 2019)
- **Energía Geotérmica:** se trata de la energía geotérmica aprovecha el calor del interior de la Tierra para generar electricidad. (López, 2019) Es una fuente de energía renovable y constante, pero su implementación está limitada a regiones con actividad geotérmica significativa.

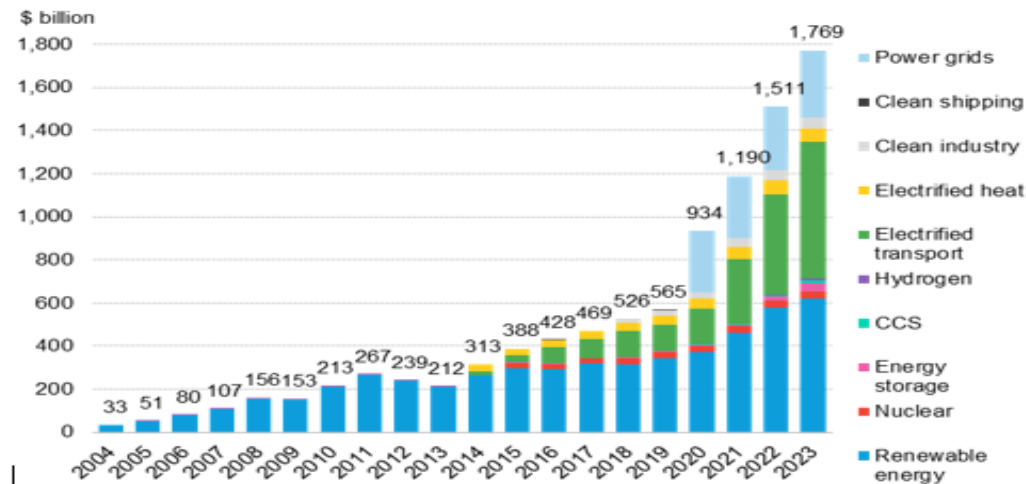


Figura 1.
Gráfica del Crecimiento de la inversión en energías renovables
Fuente: BloombergNEF.

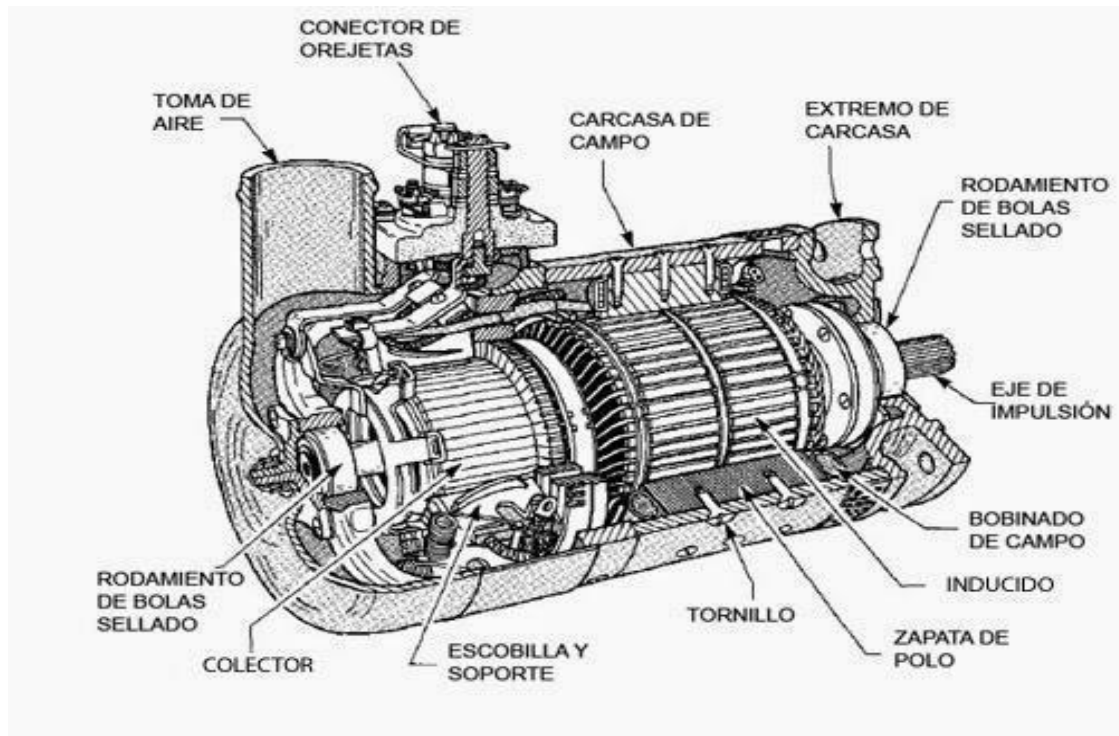


Figura 2
Partes del Generador Eléctrico
 Fuente: (Hamill, 2011).

4.2.6. Componentes principales de los generadores eléctricos

Los principales componentes de un generador como se observa en la *figura 2*, son:

- **Rotor:** es la parte móvil que genera el campo magnético al girar.
- **Estator:** es la parte fija que contiene las bobinas donde se induce la corriente.
- **Sistema de excitación:** suministra la corriente necesaria para crear el campo magnético en el rotor.
- **Regulador de voltaje:** Controla la salida de voltaje del generador para mantenerlo constante.
- **Sistema de enfriamiento y lubricación:** Mantiene temperaturas operativas seguras y reduce el desgaste de las partes móviles.

Cabe mencionar que, los generadores eléctricos se utilizan desde la generación de energía en grandes centrales hasta dispositivos portátiles para usos puntuales o emergencias. Su uso es fundamental en sectores industriales, agricultura, medicina y tecnología, adecuadas para proporcionar energía eléctrica confiable en situaciones donde el suministro de energía eléctrica del operador de red es inadecuado o inexistente. (Hamill, 2011)

Por ello, la generación de energía eléctrica es un campo en constante evolución, impulsado por avances tecnológicos y la necesidad de reducir el impacto ambiental. Las fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, están ganando terreno frente a las fuentes convencionales debido a sus beneficios ambientales y económicos. Sin embargo, la transición hacia un sistema energético más sostenible requiere superar desafíos técnicos, económicos y sociales.

4.2.7. Monitoreo y Control de Variables Eléctricas

Según Santos, (2021) El monitoreo y control de variables eléctricas es esencial para optimizar el rendimiento de los generadores eléctricos. Variables como la tensión, corriente, frecuencia y potencia deben ser continuamente monitoreadas para garantizar la operación eficiente y segura del sistema. Los sistemas de control son componentes críticos en la generación de energía hidroeléctrica moderna.

El Control Automático es clave para la regulación de variables en sistemas de generación, permitiendo la programación de ciclos de aceleración y desaceleración en el variador de velocidad que simulan condiciones naturales de caudal fluctuante (Zhao et al., 2018). La configuración del PLC permite la automatización de estos ciclos, imitando el comportamiento del agua y proporcionando datos sobre la eficiencia y estabilidad del sistema bajo condiciones cambiantes.

4.2.8. Adquisición de Datos y Análisis de Variables

El sistema de adquisición de datos permite registrar información crucial como voltaje y potencia generada. Estos datos son esenciales para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema y se utilizan para realizar ajustes que optimicen el uso del módulo de simulación. La precisión en la adquisición de datos facilita el análisis y la toma de decisiones en sistemas de generación real

(García, 2021).

La Adquisición de Datos en sistemas de generación de energía implica el uso de sensores que registran variables en tiempo real, brindando información crítica para el control y ajuste del sistema. Estos datos no solo permiten optimizar el sistema, sino que también sirven como base para el análisis de la eficiencia bajo diferentes condiciones operativas (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2020).

El control y análisis de las variables de generación en sistemas de ingeniería eléctrica es un campo de estudio crucial para la optimización y eficiencia de los sistemas de generación de energía. En esta rama se revisa las metodologías y tecnologías más recientes utilizadas en este ámbito, con un enfoque en la predicción y control de variables mediante técnicas avanzadas.

4.2.9. Evolución de Los Sistemas SCADA

Desde su creación en la década del sesenta, los sistemas SCADA han sufrido una gran transformación. En su versión original, son concebidos solo para la supervisión más simple de las operaciones de las plantas industriales. Sin embargo, a medida que la computación y las telecomunicaciones progresaban, el umbral de su funcionalidad creció de manera notable. Hoy en día, las nuevas implementaciones de estos sistemas no solo pueden recoger data en tiempo real, sino también manejarla, anticipar su desarrollo, conectarse a redes neuronales para perfeccionar la eficiencia y seguridad de recordados especialistas en varias áreas. (Bailey & Wright, 2003)

En sus inicios, los sistemas SCADA se fundamentaban en arquitecturas centralizadas que utilizaban protocolos de comunicación propietarios. Sin embargo, con la llegada de redes industriales como Ethernet y el desarrollo de estándares abiertos como OPC-UA, la interoperabilidad ha dado un gran salto, permitiendo que dispositivos de diferentes marcas se conecten entre sí. A medida que el Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube han ido avanzando, los sistemas SCADA han evolucionado hacia soluciones más flexibles y escalables, lo que ha llevado a una reducción de costos y a un aumento en la capacidad de procesamiento de datos. (Bailey & Wright, 2003)

5. Metodología

Para la ejecución del proyecto se aplicó la metodología CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar, Operar), enfocada en el diseño y desarrollo de sistemas de ingeniería, esta fue implementada inicialmente por Massachusetts Institute of Technology (MIT), entre otras instituciones que se vieron en la necesidad de formar ingenieros con competencias técnicas y profesionales que integren teoría y práctica desde una perspectiva sistémica (Crawley et al., 2014).

El modelo CDIO se estructura en las siguientes etapas:

1. **Concebir:** en esta etapa se identifican las necesidades, problemas u oportunidades, implica un análisis del entorno a intervenir, definir los requisitos, establecer los objetivos del sistema y delimitar las restricciones del proyecto. Es una etapa destinada a la planificación estratégica inicial, con la cual se busca fomentar el pensamiento crítico, la formulación de problemas, la toma de decisiones y el análisis del impacto del diseño. (Crawley et al, 2014)
2. **Diseñar:** en esta etapa se desarrollan las especificaciones detalladas del sistema, incluyendo modelos conceptuales, esquemas de conexión, diagramas de control, entre otros. También se seleccionan materiales, componentes y herramientas a usar y su interacción entre sí; en esta fase se promueve habilidades de modelado, diseño experimental y razonamiento lógico. (Crawley et al., 2014)
3. **Implementar:** en esta etapa se lleva a cabo la construcción, ya sea física o digital, del sistema diseñado; el cual se realiza con la verificación del funcionamiento de cada componente, las pruebas y los ajustes requeridos, permitiendo la aplicación de conocimientos prácticos, la resolución de problemas y gestión del proyecto. (Crawley et al., 2014)
4. **Operar:** en esta etapa se lleva a cabo la puesta en servicio del sistema bajo condiciones reales o simuladas, se evalúa el comportamiento, la estabilidad y cumplimiento de los requisitos establecidos en las etapas anteriores; en ésta se realizan pruebas de operaciones continuas, el análisis de fallas y la adquisición de datos para un análisis posteriormente.(Crawley et al, 2014)

Esta metodología promueve una formación basada en proyectos, aprendizaje activo y trabajo

colaborativo que permite desarrollar habilidades de resolución de problemas, comunicación y razonamiento crítico y lógico.

- La metodología CDIO es aplicable en este proyecto de la siguiente manera:
 - En la **concepción** del proyecto se identifica la necesidad de un sistema que permita visualizar y analizar el comportamiento de un generador eléctrico de cualquier tipo bajo condiciones de carga variables para su estudio a nivel académico.
 - Para el **diseño** se elabora un sistema y se definen los componentes a usar de acuerdo a la necesidad y que permitan desarrollar un sistema funcional para el monitoreo del generador.
 - En la **implementación** se lleva a cabo la construcción de un sistema experimental que incluye un sistema que permite el control, la visualización, monitoreo y adquisición de datos del sistema. De acuerdo con lo anterior, presenta la siguiente tabla.

Tabla 1
Aplicación de la metodología CDIO
Fuente: Diseño propio

Etapa CDIO	Aplicación en el Proyecto
Concebir	Identificación del problema: necesidad de un sistema educativo para simular la generación de energía. Justificación académica y técnica expuesta en el informe.
Diseñar	Desarrollo un sistema de control con PLC, diseño del sistema de adquisición de datos, planificación del módulo experimental. Ya descrito en la metodología y objetivos específicos.
Implementar	Construcción física del sistema de control, conexión de sensores y actuadores, programación del PLC, integración del sistema SCADA.

Operar Pruebas en diferentes estados de carga, recolección de datos, análisis de resultados y ajustes del sistema según comportamiento observados.

De esta manera se pretende alcanzar los objetivos propuestos y fortalecer las competencias transversales de acuerdo con las necesidades institucionales en la evaluación de los sistemas de generación de energía y los principios de formación integral que propone la metodología CDIO en la *tabla 1*. (CDIO Initiative, 2024).

5.1. Aplicación detallada de la metodología en el proyecto

La metodología CDIO fue aplicada de manera estructurada en el desarrollo del proyecto integrando cada una de las fases en el proceso paso a paso de la siguiente manera:

5.1.1. Concebir

Se identificó una necesidad académica: la carencia de herramientas prácticas para que los estudiantes de la institución comprendan el comportamiento real de los sistemas de generación bajo diferentes condiciones de carga. En este caso específico, aplicado al proyecto de maestría de la institución titulado: *“Hidrógeno como vector energético: Evaluación teórica y experimental de la producción de hidrógeno con captura de carbono a partir del uso de biomasa residual para aplicaciones domésticas e industriales”*, el cual presentaba la necesidad de una herramienta que permitiera realizar pruebas al sistema de generación, monitorear su comportamiento y almacenar los datos para su posterior análisis, tal y como lo puede hacer el uso de un sistema SCADA, que justamente es el que se plantea en este trabajo de grado.

Se realizó una búsqueda de información requerida y relevante para ejecutar el equipo requerido como: generación de energía eléctrica, monitoreo de variables eléctricas y sistemas de monitoreo y control, lo que permitió contextualizar el problema y justificar la viabilidad del sistema.

Se definieron los requisitos funcionales del sistema de acuerdo con lo solicitado: crear una herramienta con fines didácticos, segura, intuitiva, que permita controlar la carga, monitorear su comportamiento y almacenar los datos adquiridos.

Tomando como base lo descrito anteriormente se procedió a definir los objetivos del proyecto, establecieron condiciones de acuerdo con los recursos presentes en la institución como el uso de

equipos existentes en el laboratorio y la necesidad de mantener costos razonables.

5.1.2. Diseñar

Se realizó el diseño del sistema tomando como base los requerimientos del proyecto:

Se propuso diseñar un sistema que permita realizar pruebas bajo condiciones controladas de la carga al conectar las resistencias al generador de forma escalonada, medir las variables eléctricas para observar su comportamiento, almacenar los datos medidos y exportarlos para su posterior análisis, compuesto esencialmente por elementos existentes en la institución como: un banco de resistencias para la conexión de la carga al generador, un PLC Siemens S7-1500 para realizar y ejecutar el sistema de control de la carga paso a paso, un analizador de redes EBCHQ-54110PD76-E4E-WFF con sus correspondientes sensores de voltaje y corriente para realizar la medición de las variables eléctricas del sistema y un panel HMI EBCHQ TouchWin TG765-ET que permite interactuar con el sistema, controlar de forma manual la carga, monitorear y almacenar los datos obtenidos durante las pruebas.

Para variar la carga conectada al generador se plantea un diagrama de conexión del banco de resistencias de la siguiente manera:

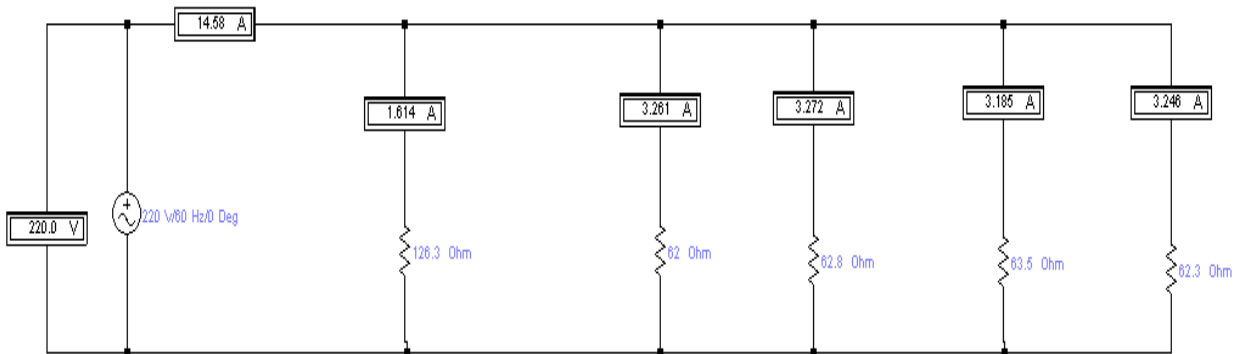


Figura 3
Diagrama de Conexión del Banco de Resistencias
Fuente: Diseño propio

Se plantea controlar la conexión de cada una de las resistencias como se ilustra en la *figura 3*, usando relés de estado sólido, los cuales serán controlados paso a paso usando el PLC Siemens S7-1500.

Debido a que las resistencias están conectadas en paralelo al generador, se toma el voltaje del generador para el cálculo de cada una de las resistencias, así:

$$V_T \approx 220 V$$

Donde V_T es el voltaje generado.

Los valores de resistencias fueron medidos con una pinza voltiamperimétrica obteniendo los siguientes valores:

$$R_1 \approx 126.3 \Omega$$

$$R_2 \approx 62 \Omega$$

$$R_3 \approx 62.8 \Omega$$

$$R_4 \approx 63.5 \Omega$$

$$R_5 \approx 62.3 \Omega$$

Con los datos obtenidos se procede a calcular la corriente de cada una de las resistencias, usando la Ley de Ohm como se observa en las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5:

$$I_1 = \frac{V_T}{R_1} \rightarrow I_1 \approx \frac{220 V}{126.3 \Omega} \rightarrow I_1 \approx 1.741 A \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{V_T}{R_2} \rightarrow I_2 \approx \frac{220 V}{62 \Omega} \rightarrow I_2 \approx 3.548 A \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{V_T}{R_3} \rightarrow I_3 \approx \frac{220 V}{62.8 \Omega} \rightarrow I_3 \approx 3.503 A \quad (3)$$

$$I_4 = \frac{V_T}{R_4} \rightarrow I_4 \approx \frac{220 V}{63.5 \Omega} \rightarrow I_4 \approx 3.464 A \quad (4)$$

$$I_5 = \frac{V_T}{R_5} \rightarrow I_5 \approx \frac{220 V}{62.3 \Omega} \rightarrow I_5 \approx 3.531 A \quad (5)$$

Luego se procede con el cálculo de la potencia consumida por cada una de las resistencias, de acuerdo con la Ley de Watt, como se observa en las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10:

$$P_1 = V_T \cdot I_1 \rightarrow P_1 \approx 220 V \cdot 1.741 A \rightarrow P_1 \approx 383.02 W \quad (6)$$

$$P_2 = V_T \cdot I_2 \rightarrow P_2 \approx 220 V \cdot 3.548 A \rightarrow P_2 \approx 780.56 W \quad (7)$$

$$P_3 = V_T \cdot I_3 \rightarrow P_3 \approx 220 V \cdot 3.503 A \rightarrow P_3 \approx 770.66 W \quad (8)$$

$$P_4 = V_T \cdot I_4 \rightarrow P_4 \approx 220 V \cdot 3.464 A \rightarrow P_4 \approx 762.08 W \quad (9)$$

$$P_5 = V_T \cdot I_5 \rightarrow P_5 \approx 220 V \cdot 3.531 A \rightarrow P_5 \approx 776.82 W \quad (10)$$

Tabla 2

Variables Eléctricas de las Resistencia de Forma Individual

Fuente: Diseño propio

Resistencia	Valor medido (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
R1	126,3	220	1,742	383,21
R2	62	220	3,548	780,65
R3	62,8	220	3,503	770,70
R4	63,5	220	3,465	762,20
R5	62,3	220	3,531	776,89

Nota: estos valores son ideales y sirven como guía comparativa para entender el funcionamiento del sistema

Los valores que se observan la *tabla 2* son ideales y sirven como guía comparativa para entender el funcionamiento del sistema, ya que en la operación real del sistema las variables eléctricas como voltaje, corriente y potencia pueden variar de acuerdo con la inyección de combustible, el comportamiento del motor y generador, la temperatura y la cantidad de carga conectada.

De acuerdo con el sistema planteado, R1 está compuesto por dos resistencias en serie y es usado como un paso intermedio que permite aumentar la carga de una forma más “suavizada” con la mitad de la resistencia comparado con cada una de las resistencias del banco.

En el paso 1 se tienen todas las resistencias apagadas, por lo que no hay carga conectada al generador, de forma que:

$$R_{p1} = 0 \Omega$$

$$I_{p1} = 0 \text{ A}$$

$$P_{p1} = 0 \text{ W}$$

Dónde:

R_{p1} , I_{p1} y P_{p1} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 1.

En el paso 2 se enciende R1, por lo cual:

$$R_{p2} = R_1 \rightarrow R_{p2} \approx 126.3 \Omega$$

$$I_{p2} = I_1 \rightarrow I_{p2} \approx 1.741 \text{ A}$$

$$P_{p2} = P_1 \rightarrow P_{p2} \approx 383.02 \text{ W}$$

Dónde

R_{p2} , I_{p2} y P_{p2} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 2.

En el paso 3 se apaga R1 y se enciende R2, por lo cual:

$$R_{p3} = R_2 \rightarrow R_{p3} \approx 62 \Omega$$

$$I_{p3} = I_2 \rightarrow I_{p3} \approx 3.548 \text{ A}$$

$$P_{p3} = P_2 \rightarrow P_{p3} \approx 780.56 \text{ W}$$

Dónde:

R_{p3} , I_{p3} y P_{p3} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 3.

En el paso 4 se enciende R1 y R2 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p4} = R_1 \parallel R_2 \rightarrow R_{p4} \approx \frac{1}{\frac{1}{126.3 \Omega} + \frac{1}{62 \Omega}} \quad (11)$$

$$R_{p4} \approx 41.586 \Omega$$

$$I_{p4} = I_1 + I_2 \rightarrow I_{p4} \approx 1.741 \text{ A} + 3.548 \text{ A} \quad (12)$$

$$I_{p4} \approx 5.281 \text{ A}$$

$$P_{p4} = P_1 + P_2 \rightarrow P_{p4} \approx 383.02 \text{ W} + 780.56 \text{ W} \quad (13)$$

$$P_{p4} \approx 1163.58 W$$

Dónde:

R_{p4} , I_{p4} y P_{p4} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 4, que se observan en las ecuaciones 11, 12 y 13.

En el paso 5 se apaga R1 y se enciende R2 y R3 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p5} = R_2 \parallel R_3 \rightarrow R_{p5} \approx \frac{1}{\frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega}} \quad (14)$$

$$R_{p5} \approx 31.199 \Omega$$

$$I_{p5} = I_2 + I_3 \rightarrow I_{p5} \approx 3.548 A + 3.503 A \quad (15)$$

$$I_{p5} \approx 7.051 A$$

$$P_{p5} = P_2 + P_3 \rightarrow P_{p5} \approx 780.56 W + 770.66 W \quad (16)$$

$$P_{p5} \approx 1551.22 W$$

Dónde:

R_{p5} , I_{p5} y P_{p5} corresponden a las variables a medir del generador en el 5, que se observan en las ecuaciones 14, 15 y 16.

En el paso 6 se enciende R1, R2 y R3 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p6} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \rightarrow R_{p6} \approx \frac{1}{\frac{1}{126.3 \Omega} + \frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega}} \quad (17)$$

$$R_{p6} \approx 25.019 \Omega$$

$$I_{p6} = I_1 + I_2 + I_3 \rightarrow I_{p6} \approx 1.741 A + 3.548 A + 3.503 A \quad (18)$$

$$I_{p6} \approx 8.792 A$$

$$P_{p6} = P_1 + P_2 + P_3 \rightarrow P_{p6} \approx 383.02 W + 780.56 W + 770.66 W \quad (19)$$

$$P_{p6} \approx 1934.24 W$$

Dónde:

R_{p6} , I_{p6} y P_{p6} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 6 que se observan en las ecuaciones 17, 18 y 19.

En el paso 7 se apaga R1 y se enciende R2, R3 y R4 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p7} = R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \rightarrow R_{p7} \approx \frac{1}{\frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega} + \frac{1}{63.5 \Omega}} \quad (20)$$

$$R_{p7} \approx 20.92 \Omega$$

$$I_{p7} = I_2 + I_3 + I_4 \rightarrow I_{p7} \approx 3.548 A + 3.503 A + 3.464 A \quad (21)$$

$$I_{p7} \approx 10.515 A$$

$$P_{p7} = P_2 + P_3 + P_4 \rightarrow P_{p7} \approx 780.56 W + 770.66 W + 762.08 W \quad (22)$$

$$P_{p7} \approx 2313.03 W$$

Dónde:

R_{p7} , I_{p7} y P_{p7} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 7, que se observan en las ecuaciones 20, 21 y 22.

En el paso 8 se enciende R1, R2, R3 y R4 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p8} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \rightarrow R_{p8} \approx \frac{1}{\frac{1}{126.3 \Omega} + \frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega} + \frac{1}{63.5 \Omega}} \quad (23)$$

$$R_{p8} \approx 17.947 \Omega$$

$$I_{p8} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \rightarrow I_{p8} \approx 1.741 A + 3.548 A + 3.503 A + 3.464 A \quad (24)$$

$$I_{p8} \approx 12.256 A$$

$$P_{p8} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \rightarrow P_{p8} \approx 383.02 W + 780.56 W + 770.66 W + 762.08 W \quad (25)$$

$$P_{p8} \approx 2696.32 W$$

Dónde:

R_{p8} , I_{p8} y P_{p8} corresponden a las variables a medir del generador en el 8, que se observan en las ecuaciones 23, 24 y 25.

En el paso 9 se apaga R1 y se enciende R2, R3, R4 y R5 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p9} = R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \rightarrow R_{p9} \approx \frac{1}{\frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega} + \frac{1}{63.5 \Omega} + \frac{1}{62.3 \Omega}} \quad (26)$$

$$R_{p9} \approx 15.661 \Omega$$

$$I_{p9} = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 \rightarrow I_{p9} \approx 3.548 A + 3.503 A + 3.464 A + 3.531 A \quad (27)$$

$$I_{p9} \approx 14.046 A$$

$$P_{p9} = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \rightarrow P_{p9} \approx 780.56 W + 770.66 W + 762.08 W + 776.82 W \quad (28)$$

$$P_{p9} \approx 3090.12 W$$

Dónde:

R_{p9} , I_{p9} y P_{p9} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 9, que se observan en las ecuaciones 26, 27 y 28.

Por último, en el paso 10 se enciende R1, R2, R3, R4 y R5 en paralelo, por lo cual:

$$R_{p10} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 \rightarrow R_{p10} \approx \frac{1}{\frac{1}{126.3 \Omega} + \frac{1}{62 \Omega} + \frac{1}{62.8 \Omega} + \frac{1}{63.5 \Omega} + \frac{1}{62.3 \Omega}} \quad (29)$$

$$R_{p10} \approx 13.933 \Omega$$

$$I_{p10} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 \rightarrow I_{p10} \approx 1.741A + 3.548A + 3.503A + 3.464A + 3.531A \quad (30)$$

$$I_{p10} \approx 15.787 A$$

$$P_{p10} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$$

$$P_{p10} \approx 383.02 W + 780.56 W + 770.66 W + 762.08 W + 776.82 W \quad (31)$$

$$P_{p10} \approx 3473.14 W$$

Dónde:

R_{p10} , I_{p10} y P_{p10} corresponden a las variables a medir del generador en el paso 10, que se observan en las ecuaciones 29, 30 y 31.

En la *tabla 3* se resume el comportamiento del sistema en cada uno de los pasos definidos en el banco de resistencias.

Tabla 3

Variable Eléctrica en Cada Paso del Banco de Resistencias

Fuente: Diseño propio

Paso	Resistencias conectadas	Valor calculado (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	0	0,000	220	0,000	0,000
2	R1	126,300	220	1,742	383,215
3	R2	62,000	220	3,548	780,645
4	R1 - R2	41,586	220	5,290	1163,860
5	R2 - R3	31,199	220	7,052	1551,346
6	R1 - R2 - R3	25,019	220	8,793	1934,560
7	R2 - R3 - R4	20,920	220	10,516	2313,551
8	R1 - R2 - R3 - R4	17,947	220	12,258	2696,765
9	R2 - R3 - R4 - R5	15,661	220	14,047	3090,437
10	R1 - R2 - R3 - R4 - R5	13,933	220	15,789	3473,651

Nota: estos valores son ideales y sirven como guía comparativa para entender el funcionamiento del sistema

Con los datos de la *tabla 3* se realizan las siguientes gráficas, donde se observa el comportamiento de cada una de las variables paso a paso.

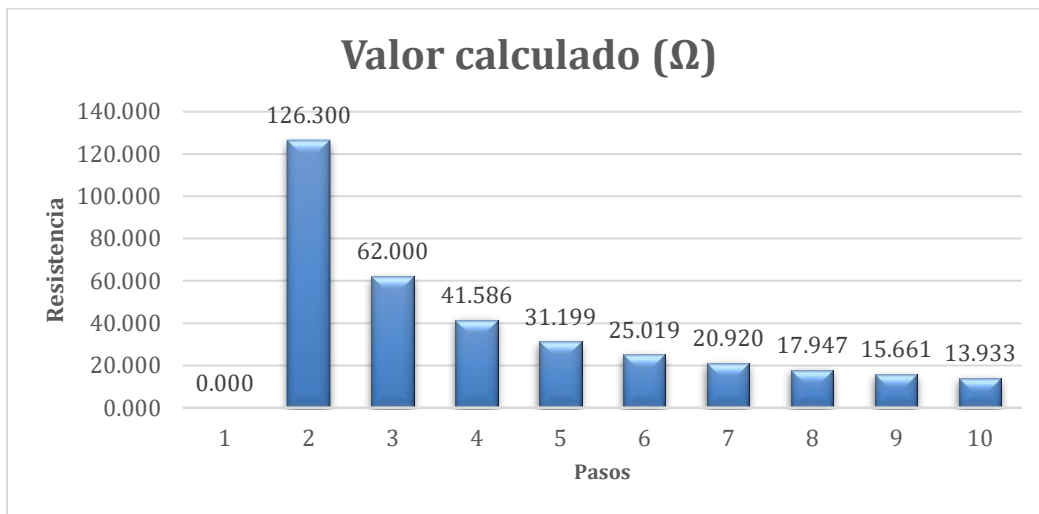


Figura 4

Comportamiento de la Resistencia del Banco en Cada Paso
Fuente: Diseño propio

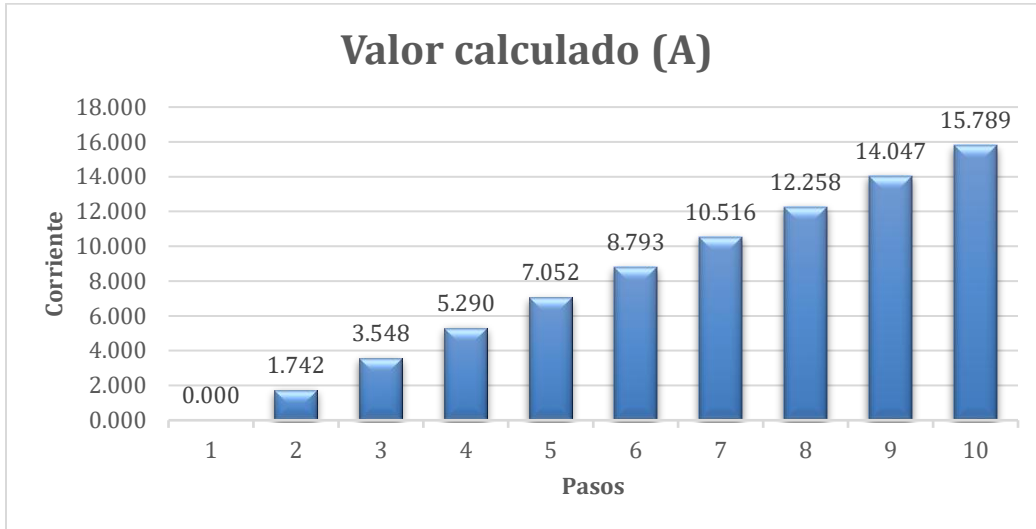


Figura 5
Comportamiento de la Corriente en Cada Paso
Fuente: Diseño propio

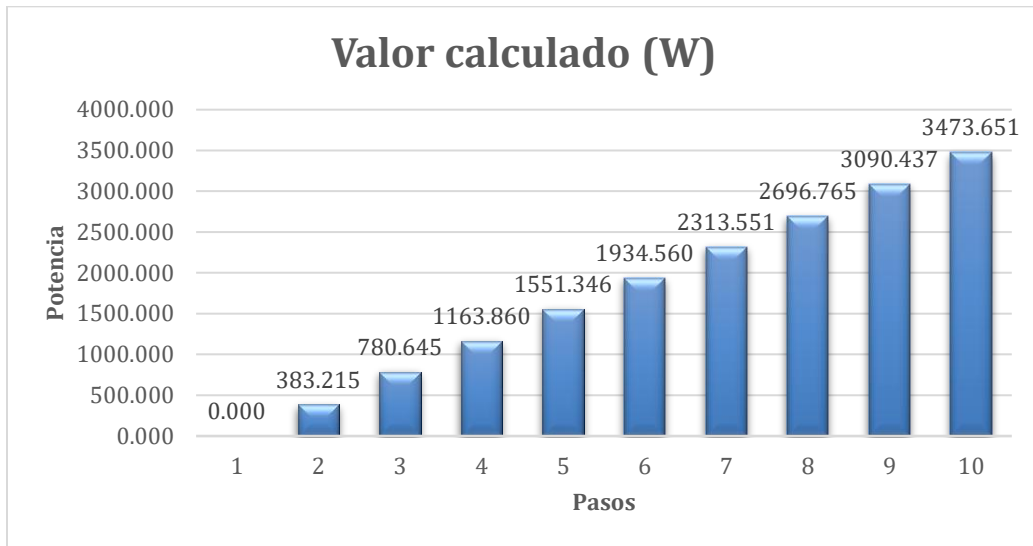


Figura 6
Comportamiento de la potencia en cada paso
Fuente: Diseño propio

Como se puede observar en la *figura 4*, el comportamiento de la resistencia tiende a ser

inversamente proporcional, puesto que, al aumentar paso a paso las resistencias conectadas en paralelo, la resistencia total tiende a disminuir. Asimismo, debido a esta disminución de la resistencia, la corriente y la potencia tienden a aumentar paso a paso de forma lineal, como se observa en las *figuras 5 y 6*.

Una vez definido el diagrama de conexión de las resistencias y su secuencia se procede con el diseño del programa del PLC, el esquema lógico de control y la interfaz gráfica para el operador (HMI), considerando los estados de carga y parámetros eléctricos a mostrar.

Proceso de elaboración del diseño SCADA.

1. Diseño del programa del HMI: Se diseña un programa en software TouchWin Edit Tool utilizando una pantalla HMI EBCHQ TouchWin TG765-ET; en esta pantalla se configuraron dos puertos de comunicación uno modbus RTU RS485 para la comunicación el analizador de redes marca EBCHQ-54110PD76-E4E-WFF, y otro puerto ethernet con protocolo modbus TCP/IP para la comunicación con el PLC siemens S7 1500. Se emplea la función “SAMPLE EXPORT” para el registrar y exportar los datos leídos por el analizador en tiempo real a una hoja de datos, luego se procedió a crear una interfaz para la visualización de los datos en tiempo real y para maniobrar los estados de carga como se visualiza en la *figura 7*.

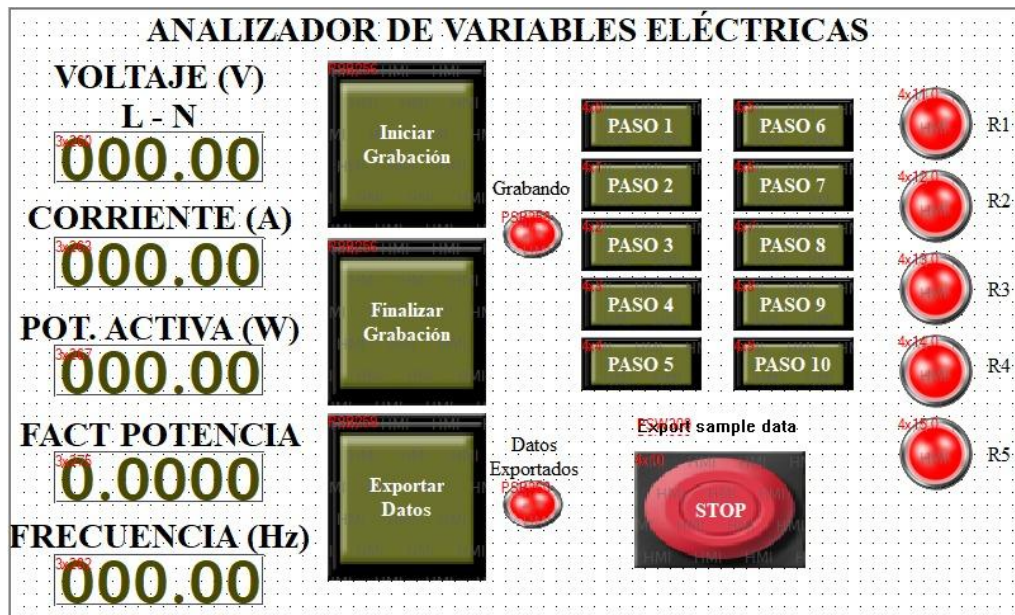


Figura 7

Diseño de la Interfaz del HMI
Fuente: Diseño propio

2. Programación del PLC: por medio del software TIA PORTAL V19 se crea un programa general en el cual se aplican diferentes fusiones

- Comunicación: se utiliza un bloque “MB_server” para configurar y establecer la comunicación con el HMI como se ilustra en la *figura 8*.
- Control de las salidas del PLC: se utiliza una función llamada “Resistencia” donde se desarrolla el código presentado en la *figura 9* para la activación de las resistencias siguiendo la secuencia de pasos explicada anteriormente; en este también se emplea la lectura de los estados de las salidas para reflejar en la pantalla mediante pilotos la activación y desactivación de cada resistencia.

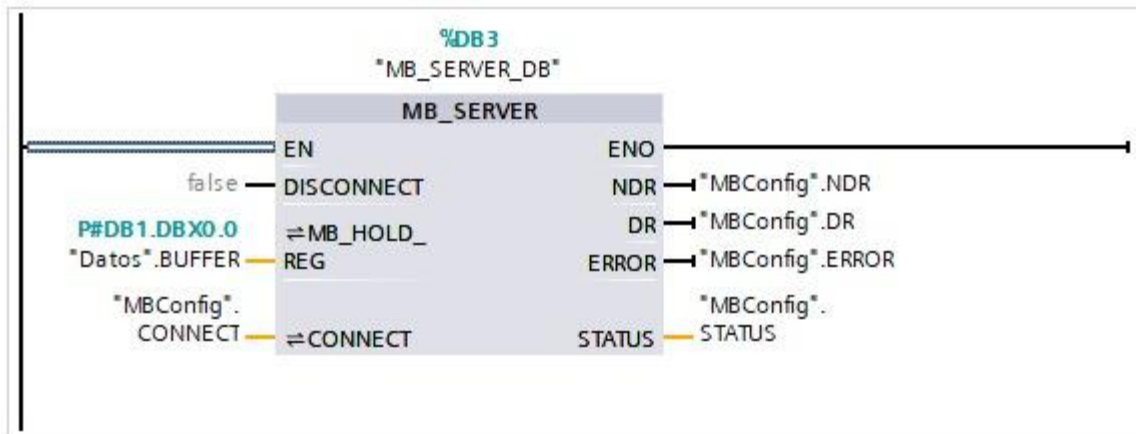


Figura 8
Programa de Comunicación entre el HMI y el PLC
Fuente: Diseño propio

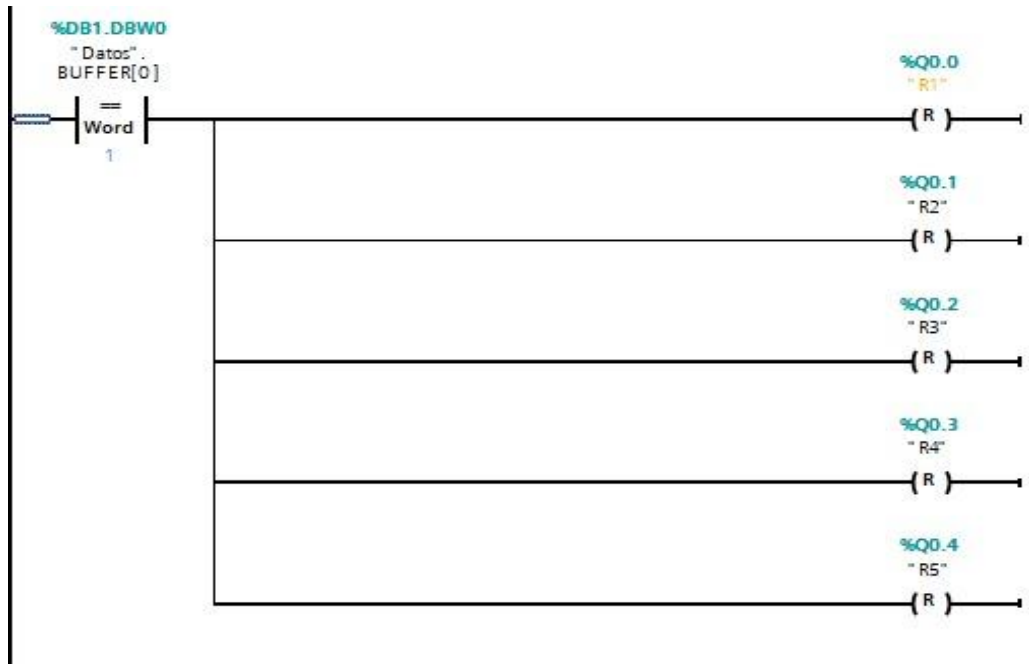


Figura 9
Programa de control para las resistencias
 Fuente: Diseño Propio

5.1.3. Implementar

Se procedió con el montaje y la conexión del sistema de acuerdo con lo diseñado, se construyó un tablero siguiendo las conexiones, empleando resistencias de potencia conectadas en paralelo, relés de estado sólido para controlar su conexión y desconexión como se ilustra en las *figuras 10 y 11*.



Figura 10
Banco de resistencias
Fuente: Imagen propia



Figura 11
Relés de Estado Sólido y Transformador de Corriente
Fuente: Imagen propia

Se realizó la integración del HMI con el PLC y el analizador de redes, como se visualiza en la *figura 12*.



Figura 12
Tablero de Control del PLC
Fuente: Imagen propia

Se cargó el programa al PLC y se realizó la configuración de los parámetros en el analizador.

Se validó cada etapa del sistema mediante pruebas unitarias: verificación de activación de cargas, lectura de sensores, visualización de variables y respuesta ante fallos.

5.1.4. Operar

Se ejecutaron diez ciclos de prueba en condiciones de carga variables, controlados paso a paso mediante el PLC. En cada ciclo, se analizaron las variaciones de voltaje, corriente y potencia como se puede observar en la *figura 13*.

Los datos fueron registrados automáticamente desde el analizador de redes y visualizados en el HMI, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema en tiempo real.



Figura 13
Analizador de Redes y HMI
Fuente: Imagen propia

Se identificaron patrones de comportamiento eléctrico, como el aumento progresivo de la corriente y potencia a medida que se conectaban más resistencias (tal como se plantea en la *tabla 3* y *figuras 4, 5 y 6* del informe).

Se realizaron ajustes al programa de control corrigiendo los errores presentados.

El sistema fue operado por los integrantes del proyecto y validado con acompañamiento docente, garantizando su funcionalidad como recurso didáctico experimental.

6. Resultados

Una vez realizadas las pruebas del sistema en operación y con los datos almacenados en una hoja de cálculo, que se puede visualizar en la bibliografía, se procedió con su análisis:

Por medio de un código que se creó utilizando herramientas en Python, el cual se puede observar en la bibliografía, se pudo analizar los datos exportados del sistema obteniendo los datos reflejados en las *figuras 14, 15, 16 y 17*:

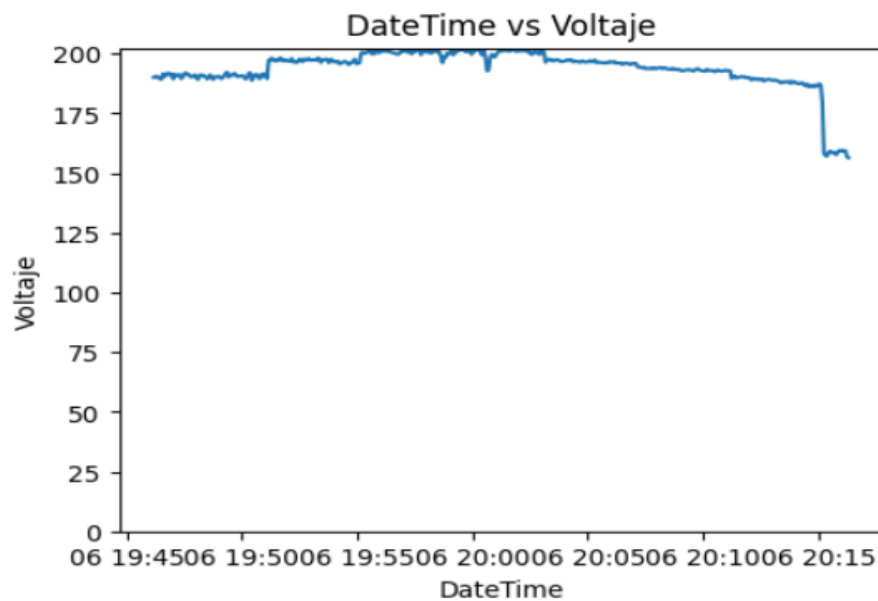


Figura 14

Gráfica del Resultado del Voltaje en la Prueba

Fuente: Diseño propio

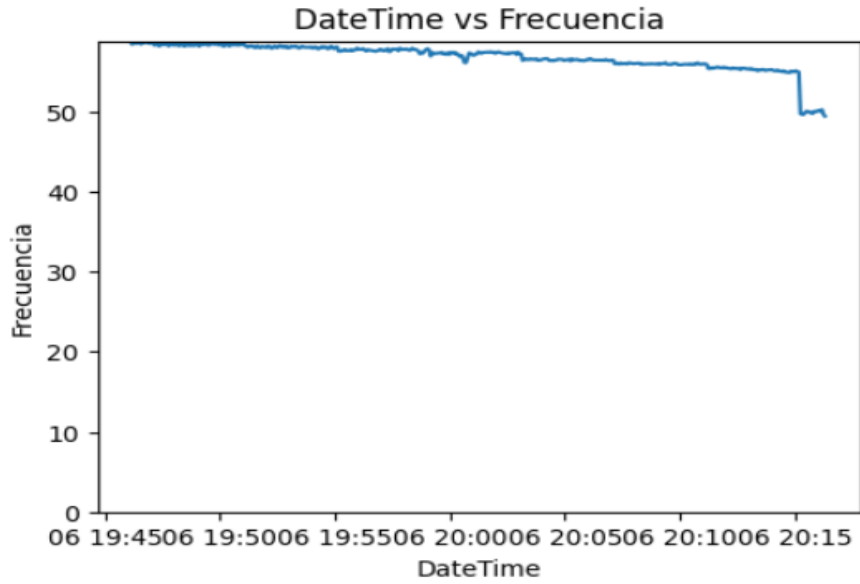


Figura 15
Gráfica del Resultado de la Frecuencia en la Prueba
Fuente: Diseño propio

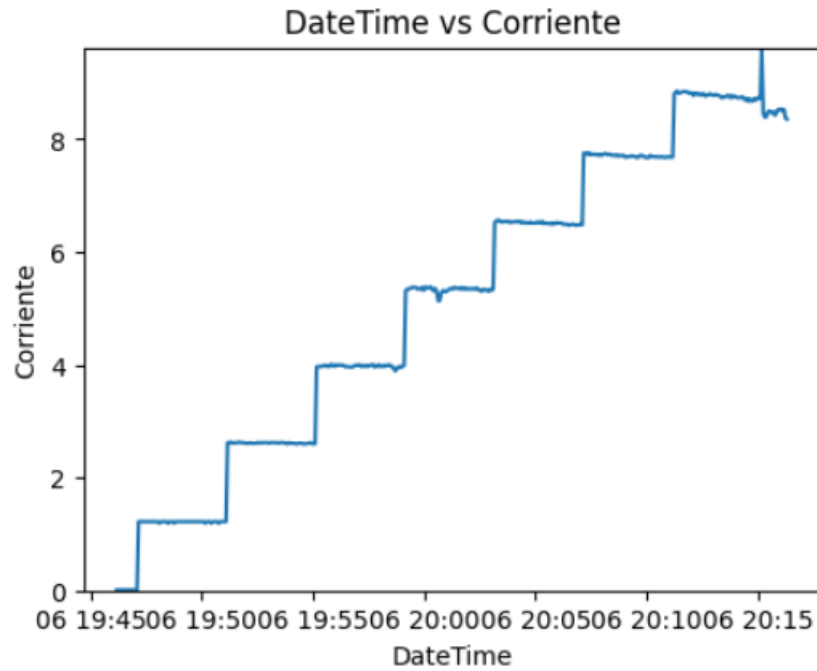


Figura 16
Gráfica del Resultado de la Corriente en la Prueba
Fuente: Diseño Propio

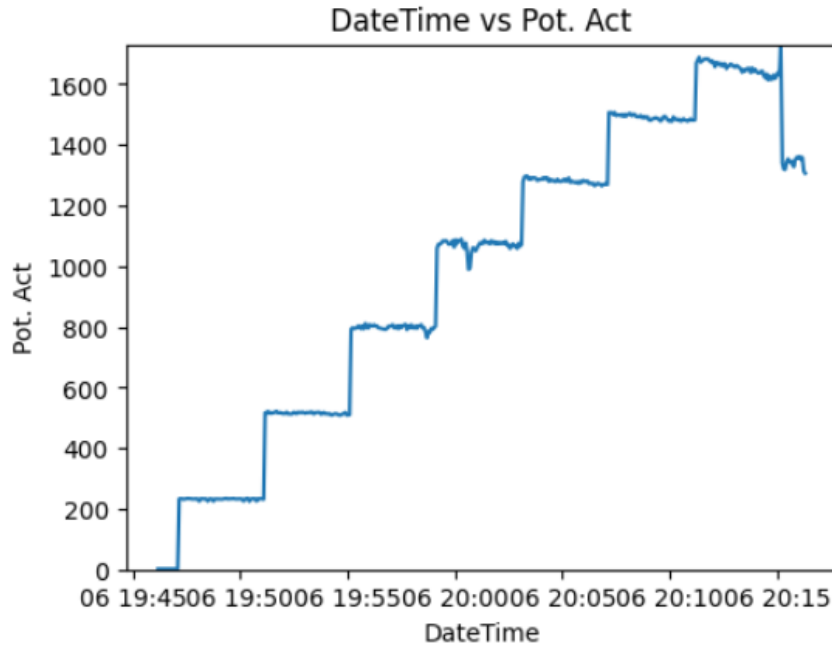


Figura 17
Gráfica del Resultado de la Potencia en la Prueba
Fuente: Diseño propio

6.1. Comparación entre los valores ideales y los reales.

Los datos reales muestran variaciones en comparación con los valores ideales, tanto en voltaje y corriente como en potencia, esto se puede observar a continuación:

- Voltaje: En todas las etapas, el voltaje real es inferior al ideal. Por ejemplo, como se refleja en la *figura 18*, en el paso 1, el ideal es 220V, mientras que el real oscila entre 189V y 191V.

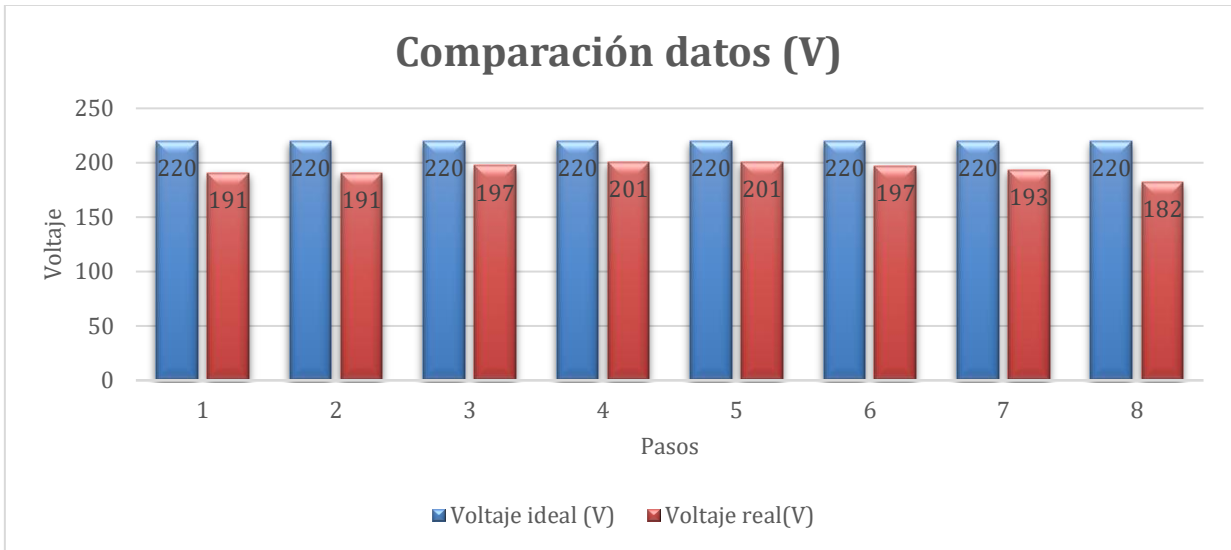


Figura 18
Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales del Voltaje
 Fuente: Diseño propio

- Corriente: De acuerdo con la *figura 19*, la corriente real generalmente sigue la tendencia esperada, aunque presenta ligeras fluctuaciones. En el paso 3, el ideal es 3.5A, pero los valores reales varían entre 2.6A y 2.63A.

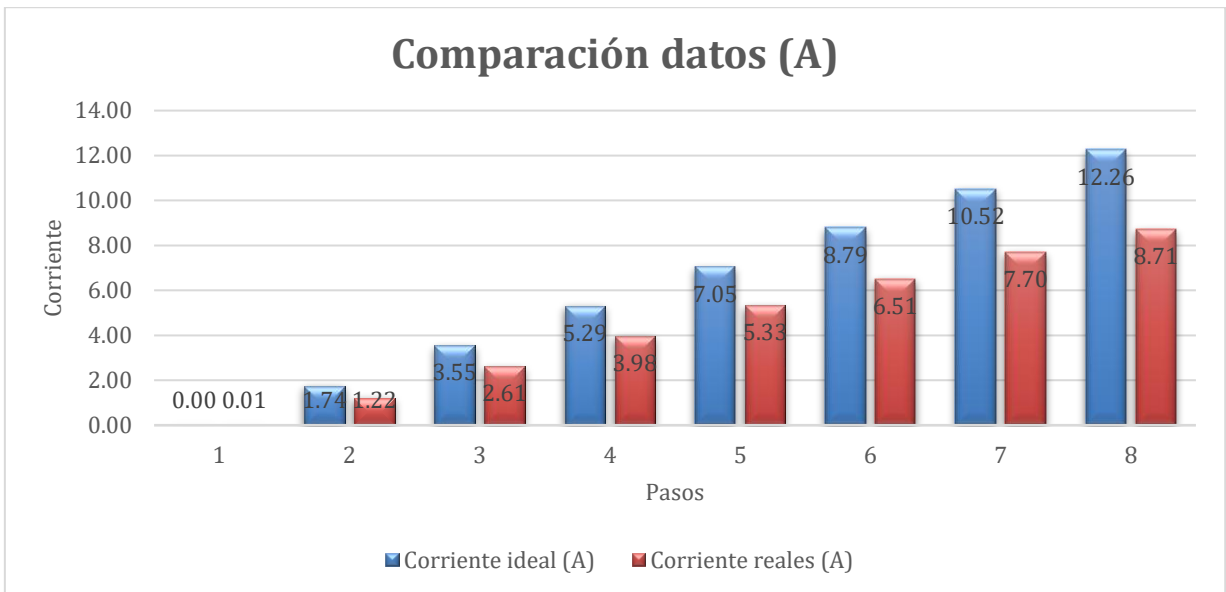


Figura 19
Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales de la Corriente
 Fuente: Diseño propio

- Potencia: como se observa en la *figura 20*, en todos los pasos, la potencia real es menor que la ideal a causa de las fluctuaciones de voltaje y corriente, lo que refleja pérdidas o ineficiencias. Aunque se observa el mismo comportamiento, indicando que el sistema actúa acorde a lo planteado.

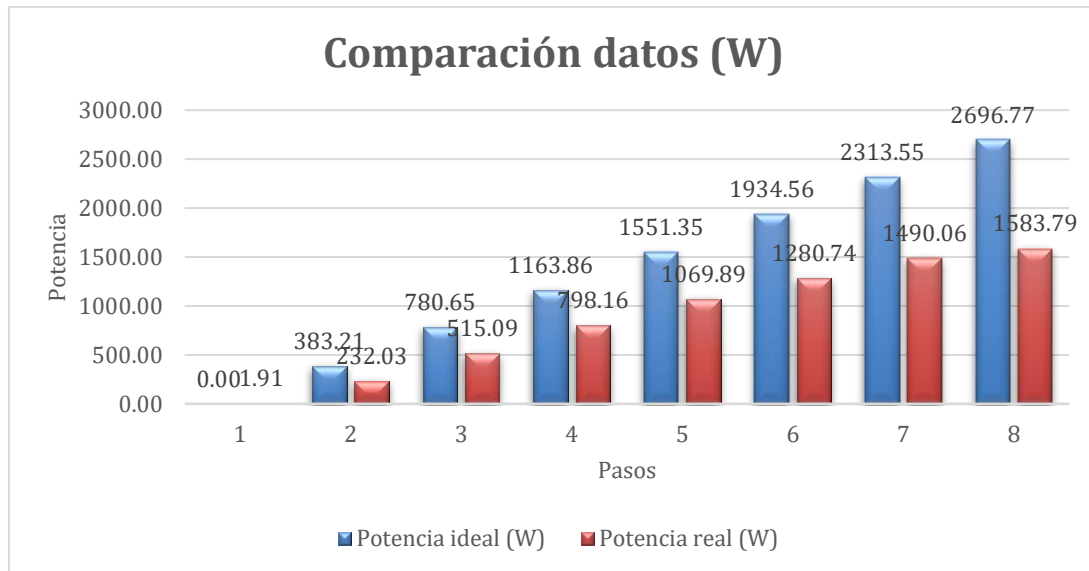


Figura 20
Gráfica Comparativa entre los Resultados Ideales y Reales de la Potencia
 Fuente: Diseño Propio

6.2. Valoración de la eficiencia

La diferencia entre los valores ideales y reales podría deberse a:

- Caídas de tensión por resistencia en los conductores y elementos eléctricos.
- Variación de la carga y con ella la estabilidad del sistema mecánico del generador al requerir más inyección de combustible a medida que aumenta la carga a modo de compensación.
- Efectos térmicos que ayudan a variar la resistencia de los elementos internos.

6.3. Frecuencia y estabilidad del sistema

La frecuencia del generador varía levemente entre 57.8 Hz y 55.3 Hz, lo que parece indicar cambios de carga y una posible necesidad de ajustes en el generador a la hora de controlar su velocidad.

7. Conclusiones

De acuerdo con lo propuesto se pudo diseñar, implementar y operar un sistema automatizado de monitoreo y control para el proceso de generación eléctrica, mediante la aplicación de los diferentes estados de carga. Gracias al cual se logra observar y analizar el comportamiento de un generador real a través de la aplicación con un enfoque progresivo de cargas resistivas, visualización de variables en tiempo real y registro de datos, obteniendo una propuesta de solución funcional, segura y didáctica, que es capaz de simular condiciones reales de operación de una central de generación eléctrica en un ambiente controlado, dispuesto para fines de enseñanza continua.

Con el sistema implementado, se pudo observar el comportamiento del generador bajo diferentes niveles de carga, y, sin control sobre el suministro de combustible, la tensión y la frecuencia tenderán a reducirse de forma continua, lo cual se ve reflejado en el rendimiento del generador. Por lo tanto, el análisis permite simular cómo se comportarán los sistemas de generación sin ninguna retroalimentación si se presenta una variación de carga, recreando escenarios que se podrían presentar en condiciones reales de funcionamiento.

Con la implementación de un sistema que permite llevar un control automático de la carga, el monitoreo continuo de las variables eléctricas y la posibilidad de exportar los registros en tiempo real, se consiguió facilitar su posterior análisis, aspecto fundamental para el análisis y trazabilidad de las pruebas realizadas.

Se llevó a cabo un análisis crítico de los datos reales obtenidos durante la prueba, comparándolos con el valor estimado en la teoría. Los principios fundamentales de la ley de Ohm y la ley de Watt forman la base de estos resultados ya que, a partir de los datos ofrecidos, se logró acoplar y comparar con la teoría; en el voltaje real se observó una diferencia de 12% menor comparado con el ideal, en la corriente real se observó una diferencia de 27% menor comparado con el ideal, y en la potencia real se observó una diferencia de 45% menor comparado con el ideal; en base a estos resultados se observa la aplicación de los conocimientos teóricos y prácticos que fortalecen los conceptos clave sobre la electricidad y la generación de energía, al igual que respaldan el hecho de que el sistema es un recurso efectivo y de conocimiento científico confiable.

8. Recomendaciones

Se recomienda tomar las siguientes acciones de mejora en pro de contribuir en la ejecución, operatividad y estabilidad del sistema:

Incorporar un controlador electrónico usando las herramientas existentes e implementar sensores y actuadores que permitan, mediante la lógica del PLC, asegurar una inyección de combustible acorde al aumento de la carga del sistema para estabilizar el voltaje y la frecuencia, tal y como se aplica en sistemas de generación existentes como las centrales hidroeléctricas.

Agregar sensores con mayor precisión y recopilación de datos más rápida, particularmente para factores importantes como voltaje, corriente, potencia y frecuencia.

Mejorar la configuración con el almacenamiento en la nube o una base de datos cercana, lo que permite un examen más amplio y un acceso distante a registros pasados.

Aumentar las capacidades de la interfaz visual para presentar alertas, imágenes en vivo, registros de eventos y verificaciones del sistema.

Sugerir desarrollar el sistema como un tema para los próximos estudios académicos, ideas iniciales de proyectos o áreas de investigación dentro de la organización

Motivar la mejora continua del modelo con la participación de otros estudiantes y educadores.

9. Referencias

- Barragán, J., Silva, J. J., Garcés, C. S., Jaramillo, O. C., Hoyos, F., & Bravo, L. C. (2022). Sistema de monitoreo de señales eléctricas y control automático para eficiencia energética con integración IoT. *Revista Producción + Limpia*, 17(2), 53–71. <https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/3100>
- Bailey, D., & Wright, E. (2003). *Practical SCADA for Industry*. Elsevier. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/5004/Practical_SCADA_for_Industry-1-110.pdf;jsessionid=2D3862E386456EC52437E78E57E12276?sequence=1
- CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas). (2024). Gestor normativo. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/concepto_creg_0005747_2024.htm
- CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas). (2024). Portal CREG. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/concepto_creg_0001875_2024.htm#:~:text=Finalmente%2C%20se%20aclara%20que%20el,Resoluci%C3%B3n%20CREG%20038%20de%202018.
- Crawley, E. F., Malmqvist, J., Östlund, S., Brodeur, D. R., & Edström, K. (2014). *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05561-9>
- García, M. (2021). Sistemas de adquisición de datos en generación de energía. *Revista de Energía Renovable*, 18(2), 245-260. <https://doi.org/10.1016/j.renener.2021.05.016>
- Gómez, L. (2021). Small-Scale Hydroelectric Power Plants as a Sustainable Energy Source. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100921. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.100921>
- Hamill, J. (2011). *Principios de generación eléctrica*. Editorial Científica.
- Jiménez, R. (2021). Efficiency Analysis of Pelton Turbines in High Head Applications. *Journal of Hydraulic Research*, 59(5), 729-744. <https://doi.org/10.1080/00221686.2021.1890494>
- Fundación Endesa. (2025). El generador eléctrico.

[https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generador-electrico#:~:text=Lo%20consigue%20gracias%20a%20la,electricidad%20\(act%C3%BAa%20como%20inducido\).](https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generador-electrico#:~:text=Lo%20consigue%20gracias%20a%20la,electricidad%20(act%C3%BAa%20como%20inducido).)

Leiton Mendoza, K. I.; Pazmiño Tenecela, M. D. (2020). Desarrollo de un sistema SCADA basado en algoritmo predictivo de fallas en generadores eléctricos. [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral

Sandmaier, P. Meusburger, & Benigni, H. (2022). Transient 3D CFD Simulation of a Pelton Turbine—A State-of-the-Art Approach for Pelton Development and Optimisation. *18th Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'22)*.

Madrid, R. (2017). Diseño e implementación de un SCADA para la monitorización de una central térmica. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/26701/TFG-P-711.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ministerio de Minas y Energía. Pequeñas centrales hidroeléctricas. <https://www.minenergia.gov.co/>

Navarro, J. (2020). Conservation Laws in Renewable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>

Ramírez, L. (2019). Desgaste y fabricación en la industria hidroeléctrica. *Revista de Ingeniería Energética*, 15(2), 123-135.

Rodríguez, A. (2018). Propuesta de automatización del sistema de transferencia de energía eléctrica en planta PIEMME. <https://riujap.ujap.edu.ve/server/api/core/bitstreams/43171398-7ece-4afd-bd7f-f915bc98f053/content>

CDIO Initiative. (2024). *CDIO Standards 3.0*. <http://cdio.org>

Santos, P. (2021). PLC-Based Automation Systems in Renewable Energy Applications. *Energy Reports*, 7, 4951-4958. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.019>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). *Matriz energética de Colombia*.

https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Paginas/energia-electrica.aspx

W. Zhang, L. Dai, & Feng, W. (2023). Annual Energy Production Design Optimization for PM Generators Considering Maximum Power Point Trajectory of Wind Turbines. *Journal of Renewable Energy*.

10. Bibliografía

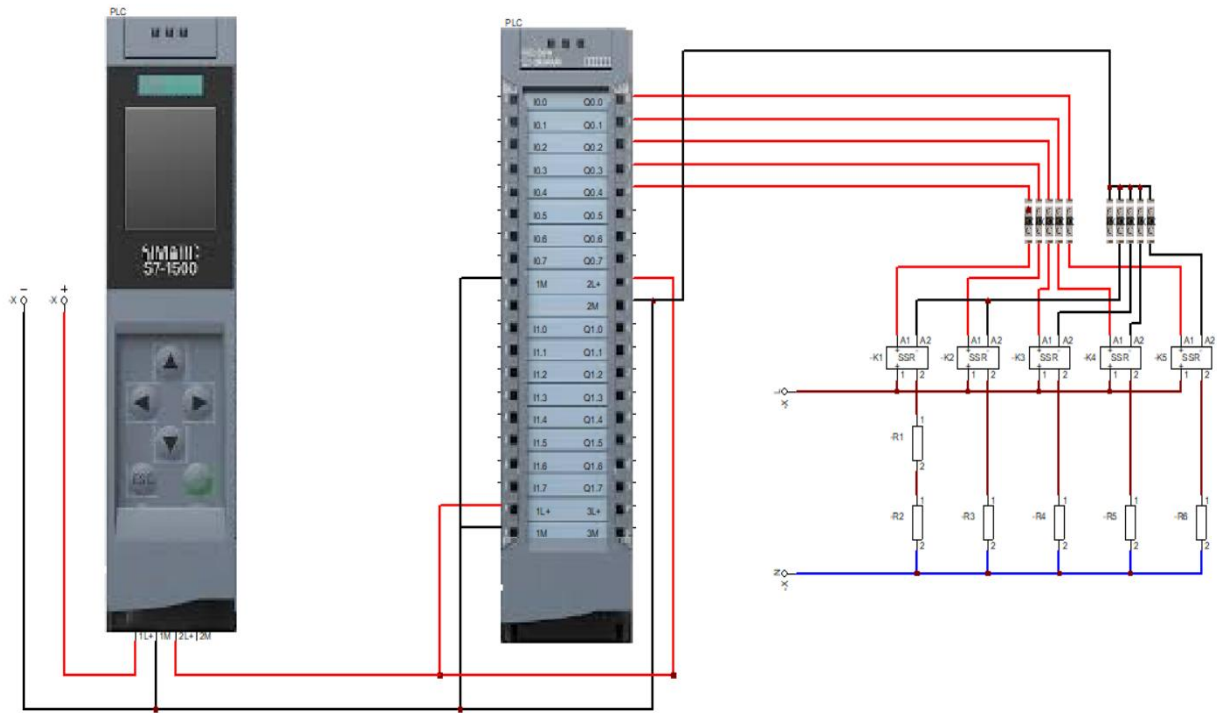
EBCHQ Digital Panel Meter 54110/PD76-E4E-WFF Manual.
https://mazcr.com/img/imagenes/54110_PD76-E4E-WFF.pdf

SIEMENS SICMATIC S7-1500 Getting Started.
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/272/71704272/att_92235/v1/s71500_getting_started_en-US_en-US.pdf.

https://drive.google.com/file/d/1nzB1zktutZR1C7dzOOHWFmTezeL2F0dy/view?usp=drive_link

https://colab.research.google.com/drive/16hkRHp6NnEukX-bj77kiopbUx1FAX4Yv?usp=drive_link

11. Anexos



Anexo 1.

Plano de las conexiones de control.

Fuente: Diseño propio.



Anexo 2.
Generador Utilizado en las Pruebas.
Fuente: Imagen propio.