

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA
EL ESTUDIO DE SISTEMAS SCADA PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN”**

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Presentado por:

Michelle Esther Vilema Lazo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

No existe historia de amor más bella de la que pueda ser partícipe que la escrita por ustedes, no hay tratado científico de mayor validez lógica que el histórico de sus argumentos para llamarme a la reflexión, no se ha escrito con sabiduría tan inmensurable como la encerrada por sus consejos, no hay mayor acto de valentía y heroísmo en la historia de la humanidad que se compare con cada una de sus decisiones, no es posible en este mundo una sonrisa más hermosa o una mirada tan tierna, y definitivamente, no es concebible, una alegría más grande y sincera que la de saber que gracias a ustedes yo soy.

Todo lo que logre en esta vida es dedicado para ustedes, porque la única e irrefutable verdad, es que todo lo que tengo y todo lo que soy es gracias a ustedes.

Para Mónica Lazo y Esteban Vilema, mis padres, los amores de mi vida.

Y para mi hermano Saúl, por tu gran esfuerzo y valor, y por tus consejos que han sido una inspiración para no rendirme y seguir luchando, con la ayuda de Dios.

AGRADECIMIENTOS

Las palabras nunca son suficientes para expresar mi gratitud. Todo se lo debo a Dios, que me regaló la bendición infinita de tener a mi familia, que son la razón de todo, que son mi razón de ser. Agradezco profundamente a Mónica por haberle dado la oportunidad a Esteban cuando jóvenes, y por haber luchado juntos por criar una familia tan asombrosa; por haberme regalado a Saúl, Daniel y Santiago, que son mi oxígeno para vivir y continuar en la lucha, en todos los sentidos. A ustedes agradezco por haberme permitido soñar, cuando con sólo 16 años me veía en el futuro como una ingeniera, fuerte como mi padre, sabia como mi madre, rompiendo paradigmas, haciendo historia, y por su confianza y apoyo cuando el mundo industrial me abrió sus puertas por primera vez para empezar a labrar mi destino.

Mis más sinceros agradecimientos para mis profesores de facultad, que guiaron mis pasos en este trayecto profesional, me ayudaron a crecer profesionalmente y dejaron en mí grandes lecciones de vida que me llevarán hacia un futuro brillante. De manera especial, un grato reconocimiento al PhD. Sífifo Falcones, por su valioso aporte como maestro, líder y persona; su firmeza, sabiduría y amabilidad extraordinaria para desafiarme a alcanzar resultados académicos más allá de mis propias expectativas han sido una inspiración para mí y un ejemplo a seguir, gracias por todo el esfuerzo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Michelle Esther Vilema Lazo y doy mi consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Michelle Esther Vilema Lazo

EVALUADORES

Síxifo falcones

PROFESOR DE LA MATERIA

Jimmy Córdova

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto consiste en la implementación de un sistema SCADA para el monitoreo y control de una red de distribución eléctrica virtual sobre la que se realizan ensayos de accionamiento de relés de protección mediante la prueba 'Hardware in The Loop' usando simulación en tiempo real; con el objeto de crear las condiciones para realizar prácticas experimentales en el Laboratorio de Simulación en Tiempo Real, para la formación complementaria de varias materias de formación profesional, maximizando las funcionalidades de los dispositivos de los diferentes laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad mediante el aprovechamiento de los recursos existentes, eliminando así la necesidad de realizar inversión adicional en el desarrollo del nuevo laboratorio. Se diseñó e implementó el sistema SCADA en tres niveles principales de aplicación: control central en la plataforma de ingeniería Labview, red de comunicación con el protocolo Modbus TCP/IP, y finalmente, la instalación de los dispositivos de campo, comprendidos por dos relés digitales de protección del fabricante General Electric, un PLC S7-1200, un motor trifásico de 11kW, un amplificador de señales OMICRON CMS 356 y el simulador en tiempo real OPAL-RT incluyendo el módulo de adquisición de datos OP8660. Se realizaron pruebas de accionamiento en tiempo real de los relés de protección frente a una falla trifásica simulada en la red virtual, y se verificó la correcta operación del sistema de control a 120V, con la habilitación del circuito de fuerza a 440V para la marcha del motor trifásico y su paro por disparo de la protección. Se logró monitorear la operación de todo el sistema desde la interfaz gráfica del SCADA en Labview, mediante la correcta configuración de la red de comunicación, obteniendo así los resultados esperados en una implementación exitosa del sistema SCADA virtual.

Palabras Clave: Hardware in The Loop, simulación en tiempo real, relés de protección, SCADA, comunicación Modbus TCP/IP.

ABSTRACT

This project involves the design and implementation of a SCADA system for monitoring and control of a virtual electrical distribution grid, for performing protective relays testing by using the 'Hardware in the loop' configuration. The SCADA system was designed to apply three different application layers, starting by the central control performed by Labview, then communicated with a Modbus TCP/IP network among all devices of the system, and finally by the set up and run of the field instruments, which are two protective relays, a PLC S7-1200, an electrical motor, and the whole real time simulator OPAL-RT including the OP8660 data acquisition target. This, in order to create the conditions for experimenting and practicing with electrical devices available in the Real Time Simulation Lab, which are the same of different Electrical Engineering labs. The main goal of the project was achieved, by performing multiple tests on the grid, causing a simulated three-phase fault in three different locations of the grid, and both the monitoring and control interface, as well as the electrical installation, did performed successfully, allowing the conditions for start working on the lab.

Keywords: *Real time simulation, hardware in the loop, Modbus TCP/IP network, SCADA, protective relays.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS | IV |
| SIMBOLOGÍA | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS | VII |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Descripción del problema | 4 |
| 1.2 Justificación | 5 |
| 1.3 Propuesta | 5 |
| 1.4 Objetivos | 8 |
| 1.4.1 Objetivo General | 8 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 8 |
| 1.5 Marco teórico | 9 |
| 1.5.1 Sistema SCADA | 10 |
| 1.5.2 Modelo OSI | 9 |
| 1.5.3 Modbus TCP/IP | 11 |
| 1.5.4 OP5607 | 13 |
| 1.5.5 OP8660 | 13 |
| 1.5.6 ARTEMIS-SSN | 14 |
| 1.5.7 Relé L90 Line Differential Protection Relay | 14 |
| CAPÍTULO 2 | 15 |
| 2. Metodología | 15 |
| 2.1 Descripción de la metodología de investigación e implementación | 15 |
| 2.2 Definición de etapas en la implementación | 16 |

| | | |
|------------------|---|----|
| 2.2.1 | Red de comunicación | 16 |
| 2.2.2 | Hardware in the Loop | 17 |
| 2.2.3 | Sistema SCADA | 17 |
| 2.3 | Etapas de implementación del sistema SCADA | 18 |
| 2.3.1 | Red de comunicación | 18 |
| 2.3.1.1 | Diseño de la arquitectura de la red Modbus TCP/IP | 18 |
| 2.3.1.2 | Comunicación Modbus OPAL-RT y Simulador QMODMASTER | 20 |
| 2.3.1.3 | Comunicación Modbus TCP/IP en Labview | 23 |
| 2.3.1.4 | Comunicación Labview y OPAL-RT | 24 |
| 2.3.1.5 | Comunicación PLC S7-1200 y Labiew | 25 |
| 2.3.1.6 | Comunicación Modbus TCP/IP del Relé de protección L90 | 26 |
| 2.3.1.7 | Habilitación de puerto ethernet adicional para red de comunicación en la tarjeta OP5607 del simulador OPAL-RT | 28 |
| 2.3.1.8 | Configuración final de la red de comunicación | 30 |
| 2.3.2 | Hardware in the Loop | 32 |
| 2.3.2.1 | Red eléctrica de distribución | 32 |
| 2.3.2.2 | Operación de la red | 33 |
| 2.3.2.3 | Estudio de protecciones | 34 |
| 2.3.2.4 | Consideraciones al cargar y compilar el modelo en RT-Lab | 39 |
| 2.3.2.5 | Señales del modelo hacia el exterior | 41 |
| 2.3.2.6 | Amplificador de señales | 43 |
| 2.3.3 | Sistema SCADA | 44 |
| 2.3.3.1 | Comunicación en la red eléctrica simulada | 45 |
| 2.3.3.2 | Lógica de habilitación la protección en la red | 48 |
| CAPÍTULO 3 | | 49 |
| 3. | Resultados Y ANÁLISIS | 49 |
| 3.1 | Arquitectura del sistema SCADA | 49 |
| 3.2 | Procedimiento para implementar el sistema SCADA | 51 |
| 3.2.1 | Carga del modelo en el simulador en tiempo real desde RT-Lat | 51 |
| 3.2.2 | Comprobación de la salida de señales del simulador hacia el exterior | 52 |
| 3.2.3 | Configuración del amplificador de señales CMS 35t | 53 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| 3.2.4 | Conexión del relé de protección diferencial de línea L | 55 |
| 3.2.5 | Conexión del relé de protección de motores 469 | 56 |
| 3.2.6 | Conexión del motor trifásico | 59 |
| 3.2.7 | Circuito de control de la señal de retorno al simulador | 62 |
| 3.2.8 | Interfaz gráfica en Labview | 64 |
| 3.2.9 | Disparo de los relés de protección por falla en la red simulada | 65 |
| CAPÍTULO 4 | | 67 |
| 4. | Conclusiones y recomendaciones | 67 |
| 4.1 | Conclusiones | 67 |
| 4.2 | Recomendaciones | 68 |
| Bibliografía | | 69 |
| ANEXOS | | 71 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| SCADA | Supervisory Control and Data Acquisition |
| HIL | Hardware in The Loop |
| IED | Intelligent Electronic Device |
| HMI | Human Machine Interface |
| SSN | State Space Nodal |
| OSI | Open System Interconnection |
| DSC | Data logging Supervisory Control |
| E/S | Entradas y Salidas |
| TIA | Totally Integrated Automation |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronic Engineers |
| CT | Current Transformer |
| RTC | Relación de transformación del CT |
| TDM | Time Dial Multiplier |

SIMBOLOGÍA

| | |
|----|--|
| A | Amperios |
| kA | Kiloamperios |
| V | Voltios |
| s | Segundos |
| 50 | Relé de protección de sobrecorriente instantáneo |
| 51 | Relé de protección de sobrecorriente de tiempo inverso |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Arquitectura de redes inteligentes para las islas Galápagos | 3 |
| Figura 1.2. Etapas de la implementación del proyecto | 6 |
| Figura 1.3. Diagrama esquemático de la propuesta de implementación | 7 |
| Figura 1.4. Operadores del sistema SCADA en una industria | 9 |
| Figura 1.5. Ejemplo de arquitectura de red Modbus | 11 |
| Figura 1.6. Módulo OP5607 | 13 |
| Figura 1.7. Módulo OP8660 | 13 |
| Figura 1.8. Relé de protección L90 | 14 |
| Figura 2.1. Red de comunicación Modbus TCP/IP para el sistema SCADA..... | 19 |
| Figura 2.2. Consola del proyecto “Modbus_slave” de comunicación Modbus | 20 |
| Figura 2.3. Consola del proyecto “Modbus_example”..... | 21 |
| Figura 2.4. QMODMASTER accediendo a los registros tipo ‘coils’..... | 22 |
| Figura 2.5. Registros de la consola del simulador | 22 |
| Figura 2.6. Librería NI Modbus | 23 |
| Figura 2.7. Comunicación Labview (maestro) – OPAL-RT (esclavo)..... | 24 |
| Figura 2.8. Configuración del PLC mediante el software TIA Portal | 25 |
| Figura 2.9. Comunicación Labview – PLC S7-1200..... | 25 |
| Figura 2.10. Prueba de comunicación Labview – PLC S7-1200. (a): Prueba de interruptores físicos y (b): prueba de interruptores simulados | 26 |
| Figura 2.11. Comunicación relé L90 con software Enervista Setup..... | 27 |
| Figura 2.12. Dirección de la configuración de seguridad en relé | 27 |
| Figura 2.13. Acceso al ambiente Linux del simulador..... | 28 |
| Figura 2.14. Fotos de las conexiones físicas del puerto eth0 y eth1..... | 29 |
| Figura 2.15. Red de comunicación Modbus TCP/IP para el sistema SCADA..... | 31 |
| Figura 2.16. Red de distribución utilizada en la simulación | 33 |
| Figura 2.17. Flujo de carga de la red simulada en ETAP..... | 34 |
| Figura 2.18. Bloque ‘AnalogOut’ en la simulación..... | 41 |
| Figura 2.19. Archivos requeridos para la adquisición de datos..... | 42 |
| Figura 2.20. Software online del amplificador CMS 356 | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.21. Interconexión de subsistemas por comunicación Modbus..... | 45 |
| Figura 2.22. Red eléctrica simulada con bloques de comunicación Modbus..... | 46 |
| Figura 2.23. Configuración de datos Modbus desde consola | 47 |
| Figura 2.24. Archivos .opal para comunicación Modbus cargados desde la pestaña Files en RT-Lab | 47 |
| Figura 2.25. Archivos .opal para comunicación Modbus en el directorio del modelo. | 48 |
| Figura 3.1. Arquitectura de las conexiones del sistema SCADA..... | 50 |
| Figura 3.2. Directorio del proyecto en la computadora principal | 51 |
| Figura 3.3. Conexión de osciloscopio a procesador OP5607 | 53 |
| Figura 3.4. Fases a y b de la señal de voltaje de la barra BUS0 | 53 |
| Figura 3.5. Adaptador para conexión del amplificador CMS 356 | 54 |
| Figura 3.6. Conexiones del amplificador CMS 356 | 54 |
| Figura 3.7. Conexiones del relé L90 | 55 |
| Figura 3.8. Salidas de corriente y voltaje del amplificador CMS 356 | 56 |
| Figura 3.9. Conexión del relé 469 | 56 |
| Figura 3.10. Conexiones del tablero del relé L90..... | 57 |
| Figura 3.11. Conexiones del tablero del relé 469..... | 58 |
| Figura 3.12. Conexión de relés de protección en paralelo..... | 59 |
| Figura 3.13. Medición de aislamiento en bobinas del motor trifásico..... | 59 |
| Figura 3.14. Alimentación 440V para motor trifásico | 60 |
| Figura 3.15. Motor trifásico en el tablero de prueba..... | 60 |
| Figura 3.16. Conexión del motor trifásico desde el tablero | 61 |
| Figura 3.17. Arrancador del motor trifásico..... | 61 |
| Figura 3.18. Circuito de control para la señal de retorno al simulador | 63 |
| Figura 3.19. Circuito de control para el retorno de señal al simulador | 64 |
| Figura 3.20. Ventanas de control del sistema SCADA..... | 64 |
| Figura 3.21. Disparo del relé L90..... | 65 |
| Figura 3.22. Disparo del relé 469..... | 65 |
| Figura 3.23. Disparo del interruptor del motor..... | 65 |
| Figura 3.24. Sistema SCADA implementado | 66 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Modelo OSI | 10 |
| Tabla 1.2. Modelo de organización de la información según Modbus | 12 |
| Tabla 1.3. Códigos de función Modbus..... | 12 |
| Tabla 2.1. Etapas de la implementación de la red de comunicación | 16 |
| Tabla 2.2. Etapas de la implementación de Hardware in the Loop..... | 17 |
| Tabla 2.3. Ubicación de archivos para comunicación Modbus | 20 |
| Tabla 2.4. Configuración del relé L90 para comunicación Modbus..... | 28 |
| Tabla 2.5. Parámetros del puerto ethernet eth1..... | 29 |
| Tabla 2.6. Resultados de la simulación en ETAP para barra BUS0 | 34 |
| Tabla 2.7. Especificaciones de la protección de sobrecorriente de tiempo inverso ... | 35 |
| Tabla 2.8. Constantes de curvas IEEE de tiempo inverso | 36 |
| Tabla 2.9. Tiempos de desconexión de curvas IEEE, en segundos | 36 |
| Tabla 2.10. Tiempos de operación considerados para el cálculo | 38 |
| Tabla 2.11. Especificaciones de la protección de sobrecorriente instantánea | 39 |
| Tabla 2.12. Condiciones para la carga y compilación del modelo | 40 |
| Tabla 3.1. Ubicación del proyecto en la computadora principal..... | 52 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo está atravesando por una fuerte renovación tecnológica, que viene de la mano con una creciente tendencia de conciencia ecológica y cuidado de los recursos ambientales en la satisfacción de las necesidades de vida de la población, que cada vez son más exigentes en cuanto a la calidad y confiabilidad del abastecimiento de soluciones para las distintas necesidades de la población. En este contexto, el desarrollo de una solución tecnológica para el abastecimiento de la energía eléctrica de una manera más eficiente, confiable y segura, además de ser ecológicamente amigable, es la incorporación del concepto de Red Inteligente en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

En el modelo tradicional de abastecimiento de energía eléctrica en los sistemas de potencia, la generación se concentra en una sola fuente y se transporta hacia los diferentes consumidores de manera unidireccional, sin ningún mecanismo de supervisión o monitoreo de los posibles eventos de falla en los centros de distribución, causantes de problemas mayores que van desde reacciones de falla en cadena en varios elementos de la red, hasta detonar en apagones que provocan grandes pérdidas por interrupción del servicio energético. Por otro lado, las Redes Inteligentes, conocidas en inglés como Smart Grids, conciben un modelo de abastecimiento energético altamente diferenciado del modelo tradicional, en el que existe una comunicación bidireccional entre los centros de generación y distribución, con la transmisión de energía y recepción de información; realizando una integración inteligente de los diferentes elementos conectados a la red, que incluyen centros de generación distribuida que aprovechan fuentes de energía renovable, para satisfacer las necesidades de demanda energética de la población de acuerdo al consumo eléctrico en tiempo real, optimizando los recursos al máximo, sacando el máximo provecho de los activos de la red e incrementando los niveles de confiabilidad en el suministro de la energía eléctrica hacia los diferentes consumidores, de una manera sostenible, inteligente y segura. [1]

Un componente esencial de las redes inteligentes es el sistema de supervisión y control con adquisición de datos conocido como SCADA (por sus siglas en inglés, Supervisory Control and Data Acquisition), mediante el cual se realiza la operación y control de los elementos conectados a la red, aún a varios kilómetros de distancia, en el que el operador del sistema eléctrico puede visualizar en tiempo real todos los eventos producidos en la red, permitiéndole detectar a tiempo los detonantes de falla y reducir al mínimo el tiempo de respuesta ante esos eventos, así como minimizar los costos de operación y mantenimiento, repercutiendo en una producción energética más eficiente, económica y confiable para el consumidor y para la empresa eléctrica.

En el Ecuador, existe un avance significativo en cuanto a la implementación de redes inteligentes para la producción de energía eléctrica, impulsado y desarrollado por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, a través de su programa “Redes Inteligentes en el Ecuador REDIE”, cuyo objetivo es el mejoramiento de la gestión del sistema eléctrico mediante la implementación de tecnologías usadas en las Redes Inteligentes [2].

Las iniciativas más importantes que se han puesto en marcha en el país tras este objetivo son el cambio de la matriz energética con la incorporación a la red de fuentes de energía renovables como las hidroeléctricas, la nueva infraestructura de transmisión a 500kV, la migración y estandarización de la comunicación hacia el protocolo IEC 61850, la automatización de subestaciones de distribución, la implementación de programas de eficiencia energética, entre otros.

La figura 1.1 muestra la arquitectura del sistema SCADA para el control y monitoreo de la producción energética en las Islas Galápagos; en este sistema ya se ha incursionado en la generación distribuida con el aprovechamiento de las energías renovables, con las centrales de generación eólicas y solares existentes en las islas.

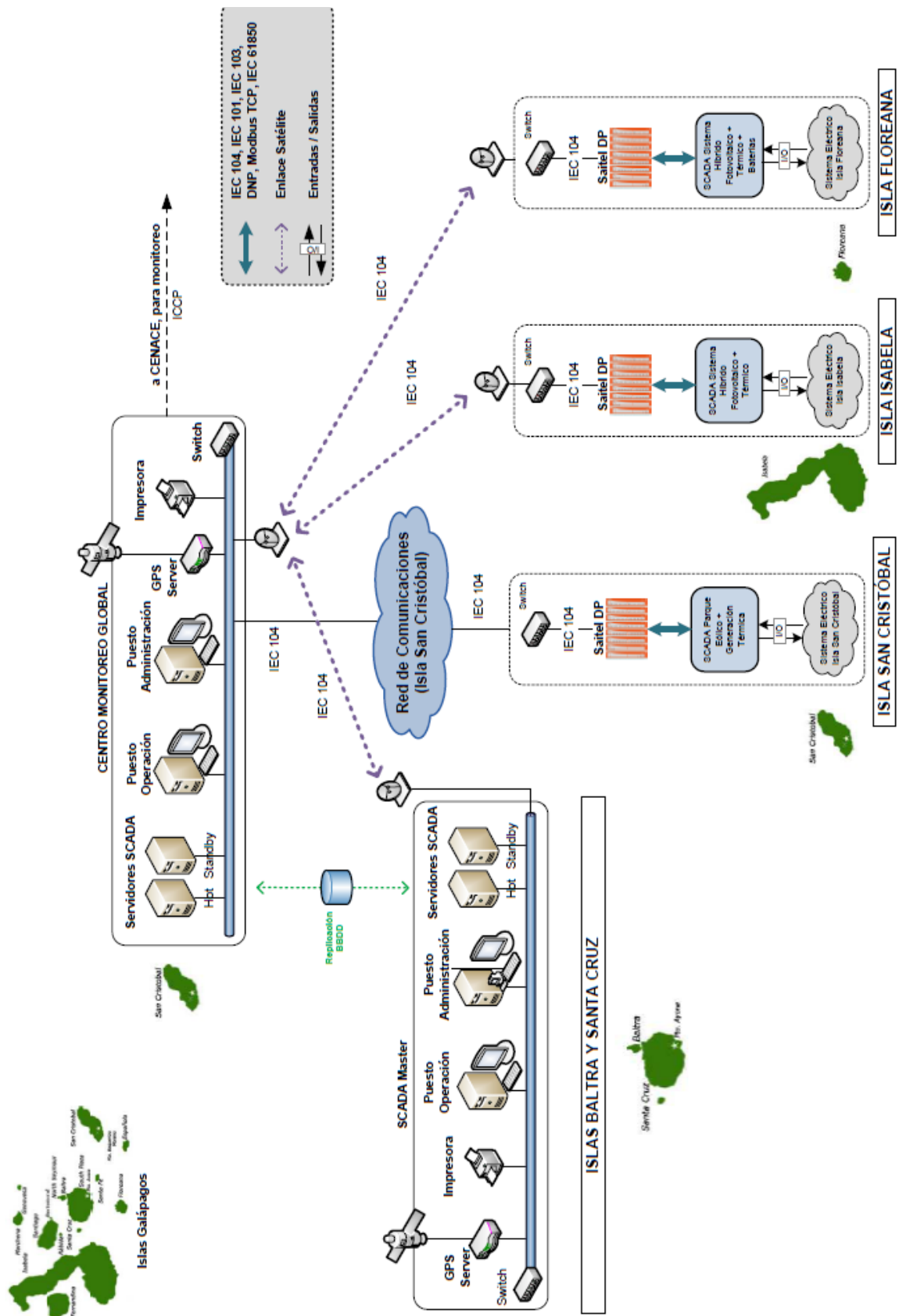


Figura 1.1 Arquitectura de redes inteligentes para las islas Galápagos [2]

La facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral cuenta con sofisticados laboratorios donde los estudiantes de las diferentes carreras complementan su aprendizaje teórico con la realización de prácticas experimentales, donde ponen a prueba y en práctica los conocimientos adquiridos siguiendo procedimientos y metodologías establecidas a partir de estándares y de las mejores prácticas que ha dejado la experiencia profesional en campo. Ante una creciente renovación tecnológica, en el estudio de las ingenierías, y en particular, de la Ingeniería en Electricidad, la presencia de dispositivos electrónicos inteligentes IEDs (por sus siglas en inglés, Intelligent Electronic Devices), es ahora imprescindible e inevitable en la experimentación para el aprendizaje; bajo este fundamento, la carrera de Ingeniería en Electricidad, en un enfoque de mejora continua e innovación tecnológica, busca desarrollar e implementar laboratorios nuevos y mejorados donde sea posible la interacción con dispositivos inteligentes y nuevas tecnologías de comunicación que están incursionando en la industria y en el campo laboral de acción de las carreras de la facultad. Por esto, la carrera de Ingeniería en Electricidad propone, bajo la modalidad de proyectos de la materia integradora, la implementación de un laboratorio virtual donde la mayoría de los dispositivos, así como la red eléctrica de estudio, sean todos simulados, para el estudio de los sistemas SCADA con aplicaciones a los sistemas de potencia.

En el presente proyecto se exponen los resultados del estudio y desarrollo de una propuesta de implementación de un sistema SCADA que cuenta con una interfaz gráfica o HMI (en inglés, Human Machine Interface) realizada en la plataforma de desarrollo y programación Labview, para la supervisión y control de un sistema eléctrico de distribución modelado en el software Matlab/Simulink, implementando una red de comunicación con el protocolo industrial Modbus TCP/IP y aplicando la tecnología HIL (en inglés, Hardware in The Loop) para la prueba de un dispositivo inteligente, que para este estudio es un relé de protección digital; todo esto, implementado virtualmente a través del simulador en tiempo real OPAL RT.

1.1 Descripción del problema

La carrera de Ingeniería en Electricidad, para el estudio de varias materias de formación profesional, requiere de la implementación de un laboratorio virtual para el análisis de los sistemas SCADA con aplicaciones a los sistemas de potencia, dado que no cuenta con la totalidad de recursos necesarios para la instalación de un laboratorio real. De esta manera, se realiza el modelamiento y simulación de los dispositivos requeridos para la supervisión y control de una red eléctrica de potencia operando en tiempo real, en diferentes escenarios de operación, utilizando plataformas de desarrollo y programas de ingeniería que cuenten con las funcionalidades requeridas para resolver el problema.

1.2 Justificación del problema

La implementación de un sistema SCADA involucra la adquisición de diversos dispositivos inteligentes, instalación de software especializado, programación e integración entre diferentes protocolos de comunicación, servidores con grandes capacidades de almacenamiento, controladores, actuadores y demás elementos de control y accionamiento que conforman un sistema SCADA real; lo que representaría una fuerte inversión económica para la facultad, con una repercusión negativa directa sobre los estudiantes que se encuentran cursando las materias de la carrera, puesto que pasarían varias promociones de estudiantes, en términos de tiempo, hasta que el laboratorio se encuentre totalmente implementado y listo para ser utilizado. Por estas razones, se propone el desarrollo de un laboratorio virtual, aprovechando los recursos tecnológicos que actualmente se encuentran disponibles en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad; y principalmente, aplicando la tecnología del simulador en tiempo real OPAL-RT, maximizando sus funcionalidades para el estudio de su propia plataforma de desarrollo, y logrando su integración con otros softwares de ingeniería que permitan eliminar las limitaciones de adquisición de recursos mediante la simulación de dispositivos, de las redes eléctricas de estudio y minimizando los riesgos en seguridad asociados a la experimentación para el aprendizaje.

1.3 Propuesta

Se propone desarrollar e implementar un sistema SCADA para el laboratorio de simulación en tiempo real, para el monitoreo y control de una red de distribución modelada en Simulink y compilada y cargada en la plataforma RT-LAB para su operación en tiempo real a través del simulador OPAL-RT. La red de distribución es sujeta a dos escenarios diferentes de operación: en condiciones normales de operación y en condiciones de falla. En la figura 1.2 se define de manera visual la visión global de la propuesta de implementación del sistema SCADA que se describe en este apartado.

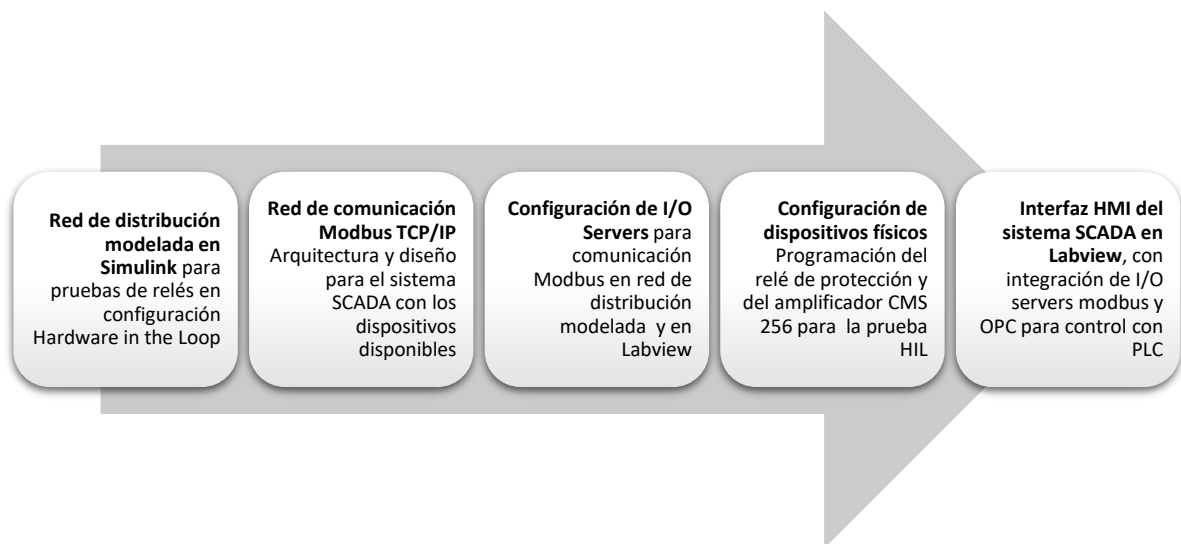


Figura 1.2 Etapas de la implementación del proyecto

Para lograr la operación de la red en tiempo real, en condiciones de falla y sin retardos artificiales de tiempo, se implementa la función especializada ARTEMIS-SSN (ver sección 1.5.6) en el modelo de Simulink, que permiten la solución matemática del problema mediante el uso de diferentes procesadores del simulador en paralelo. Esto es necesario dado que la red debe reunir las condiciones necesarias para ejecutar pruebas de dispositivo en el lazo, HIL, de IEDs, que para este estudio son dos relés de protección digitales.

Durante la operación, el relé de protección recibe las señales de voltaje y corriente de una barra de la red, que han pasado por un amplificador de señales, en la configuración y con las funciones de protección que el usuario debe programar, y actúa frente a condiciones de falla para sus parámetros mínimos de operación. La operación de la red de distribución y los parámetros de operación y configuración del

relé de protección, son monitoreados y controlados desde la interfaz gráfica o HMI desarrollada en Labview, y serán almacenados en una base de datos para el registro de históricos de operación, tendencias y eventos sucedidos en las variables de control. Para lograr esto, es necesario definir servidores de entradas y salidas (I/O Servers) en la programación de Labview, por lo que se establece una red de comunicación basada en el protocolo Modbus TCP/IP, que comunica el simulador OPAL-RT, el relé de protección digital y un controlador PLC como clientes Modbus para reportar o responder a los requerimientos del servidor Modbus definido en la programación de Labview. Así mismo, se realiza la incorporación de una base de datos basada en una librería SQL [3] especialmente diseñada para ser compatible con las funcionalidades de Labview; para el acceso libre a sus registros en cualquier momento en que el usuario del sistema SCADA considere revisarlos.

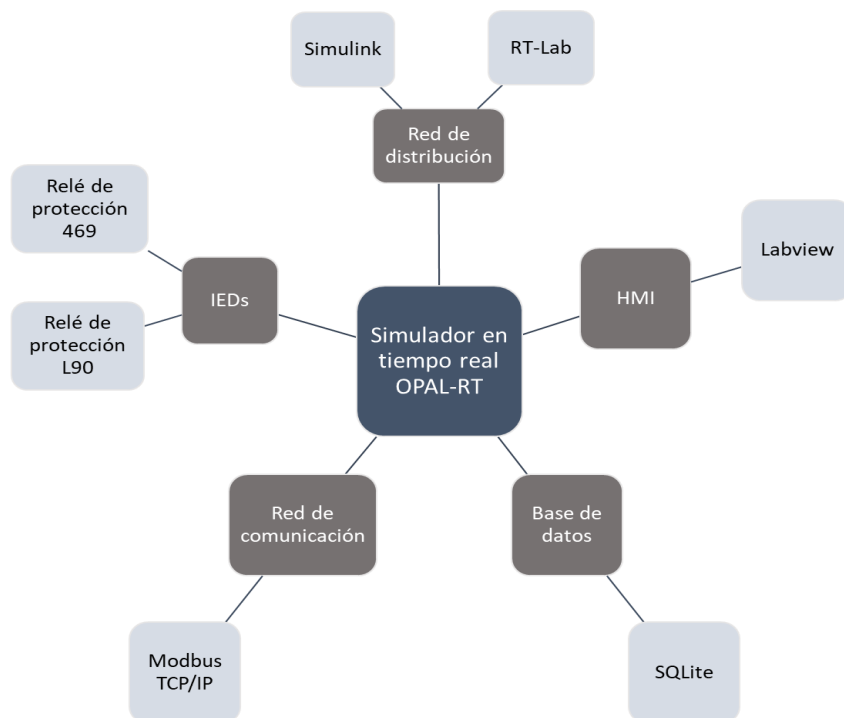


Figura 1.3 Diagrama esquemático de la propuesta de implementación

El PLC S7-1200 permite el control de la entrada o salida de los relés de protección a la red de distribución a través del HMI, comandando un interruptor que es comunicado hacia la lógica del PLC por el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP, donde el PLC se define como cliente y Labview como servidor.

El usuario del SCADA podrá visualizar desde la computadora central del laboratorio, las diferentes pantallas del HMI en Labview, donde se presentan las variables de control con sus valores de operación en tiempo real, así como los controles que comandarán las funciones de protección y demás parámetros de la simulación y del relé digital.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar e implementar un sistema SCADA virtual para el monitoreo y control de pruebas en un relé de protección en configuración Hardware in The Loop sobre una red eléctrica de distribución utilizando los recursos disponibles en los laboratorios de Ingeniería en Electricidad y aplicando la tecnología del simulador en tiempo real OPAL-RT.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar y simular una red eléctrica de distribución con capacidad de falla para pruebas de relés de protección en Simulink.
- Diseñar la arquitectura de la red de comunicación basada en el protocolo Modbus TCP/IP utilizando dispositivos físicos y virtuales
- Implementar la comunicación del modelo de red virtual mediante el protocolo Modbus TCP/IP en el simulador OPAL-RT.
- Implementar una protección eléctrica real en una barra del modelo virtual mediante la conexión Hardware in The Loop de un relé de protección digital.
- Implementar la lógica de control de las funciones de protección real y simulada en el modelo virtual a través de un PLC.
- Diseñar e implementar la interfaz gráfica o HMI en Labview para la visualización de las variables de control comunicadas de los diferentes dispositivos de la red.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Sistema SCADA

Por sus siglas en inglés, Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA es un sistema de supervisión y control de los dispositivos controladores y actuadores que interactúan y determinan el proceso de una planta, con adquisición de datos de estos dispositivos en tiempo real. A través de una interfaz gráfica o HMI (Human Machine Interface), permite al usuario monitorear las variables de control provenientes de los dispositivos actuadores en campo, que transmiten sus señales por medio de sensores o controladores, y que son comunicadas en tiempo real a través de una red de comunicación. Una de las ventajas más importantes de los sistemas SCADA es que permite la visualización de las tendencias de operación de las variables que están siendo monitoreadas, así como los eventos sucedidos en la operación, alarmas e indicadores, que son programables a partir de la información recopilada en la base de datos del sistema SCADA. En la actualidad, la mayoría de los procesos industriales ya tienen incorporado en sus operaciones sistemas de supervisión y control para el manejo de la producción desde una cabina de control central, y el alcance de la arquitectura y principios de SCADA ha incursionado en aplicaciones de mayor magnitud como los sistemas eléctricos de potencia de transmisión y generación, además del ya utilizado en distribución. [4], [5]



Figura 1.4 Operadores del sistema SCADA en una industria[5]

1.5.2 Modelo OSI

Básicamente, OSI (por sus siglas en inglés, Open System Interconnection), es un modelo lógico para definir cómo se establece la comunicación entre sistemas de red, dividiendo los diferentes componentes de una red de comunicación en capas, con el fin de proporcionar una referencia de la funcionalidad de la comunicación definiendo tareas específicas para cada capa, de manera que cada una de las capas se desarrollen en función de la capa inmediata inferior. La tabla 1.1 hace una breve descripción de la división de capas del modelo OSI, así como la denominación de las capas dentro del estándar de red TCP/IP, que será necesario entender para la aplicación del protocolo de comunicación Modbus sobre el estándar TCP/IP. [6], [7]

Tabla 1.1 Modelo OSI [6]

| Capa | Nombre | Descripción | Estándar TCP/IP |
|------|-----------------|--|---|
| 7 | Aplicación | Usada por aplicaciones de software para definir la forma de transmitir y receptor información. | Capa de aplicación |
| 6 | Presentación | Representación de datos, codificación y definición de caracteres. Realiza la compresión y encriptación de datos. | |
| 5 | Sesión | Responsable de establecer y manejar la comunicación entre dispositivos de la red. | |
| 4 | Transporte | Conexión de extremo a extremo y confiabilidad de la comunicación | Capa de Transporte |
| 3 | Red | Establece y mantiene las conexiones en una red, además de proveer direccionamiento | Capa de red de internet |
| 2 | Enlace de datos | Responsable de asegurar la entrega confiable en los niveles más bajos del direccionamiento físico. | Capa de acceso a la red o Host-to-Network |
| 1 | Físico | Define los medios eléctricos, mecánicos, funcionales y procedimentales usados para acceder y enviar secuencias de datos binarios sobre un medio físico | |

1.5.3 Modbus TCP/IP

Modbus es un protocolo de comunicación abierto ampliamente utilizado en redes industriales, que permite establecer una comunicación de tipo solicitud-respuesta entre un dispositivo maestro o servidor y uno o varios dispositivos esclavos o clientes conectados a diferentes redes o buses de datos. El protocolo Modbus TCP/IP se encuentra posicionado en el nivel 7 del modelo OSI [8], como una capa de aplicación, en la que se define la forma en que la información del dispositivo será transmitida y receptada, independiente de los medios de transmisión. Para un dispositivo Modbus, la información es almacenada como registros, que se organizan de acuerdo a códigos de función para definir el tipo de dato que se transmite y la forma en que se recibe la información.

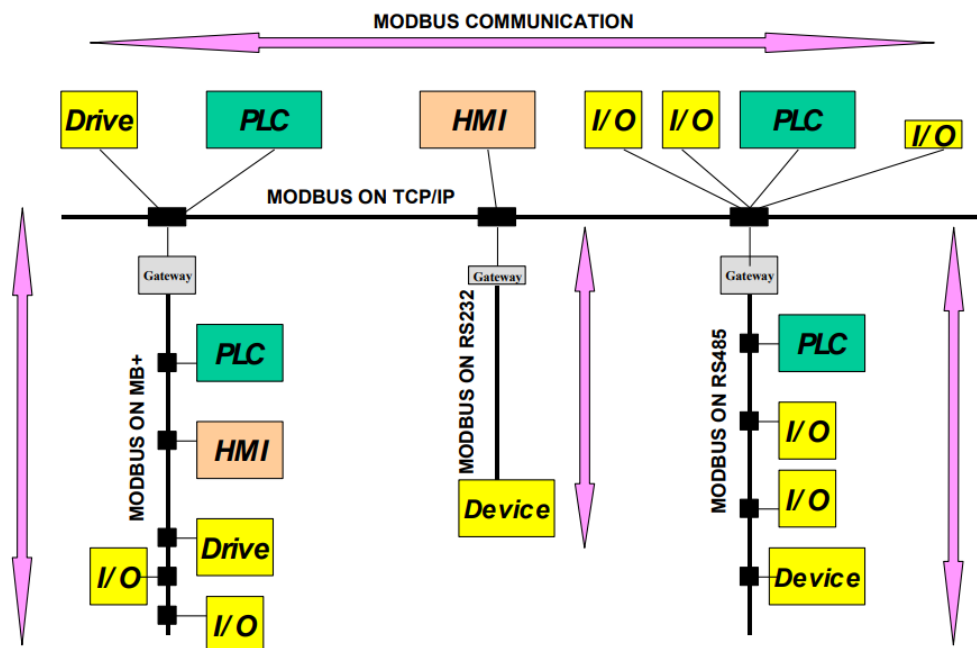


Figura 1.5 Ejemplo de arquitectura de red Modbus [6]

Modbus TCP/IP es una variante del protocolo que combina un estándar de red TCP/IP para transmitir la información del dispositivo en representación Modbus a través del medio físico Ethernet. Para lograr la comunicación Modbus TCP/IP es necesario definir una dirección IP en cada dispositivo, garantizando que todos los dispositivos conectados se encuentren en la misma subred; además, es necesario definir el puerto de escucha Modbus, que se ha reservado ser el 502 para la transmisión y recepción de mensajes

a través de Ethernet. Los dispositivos clientes Modbus se definen con una dirección de cliente dentro del rango 1-255, diferente para cada uno de los casos. La comunicación sólo será establecida una vez que el servidor Modbus solicite al cliente leer o escribir determinado tipo de dato; el cliente no puede enviar información por sí mismo, a menos que sea como respuesta a un requerimiento anterior del servidor.

La tabla 1.2 muestra la forma principal en la que se organiza la información de acuerdo al protocolo Modbus [6]. Existen dos tipos de datos que pueden ser transmitidos utilizando el protocolo Modbus, los datos conformados por un bit, llamados 'booleanos' y los que son arreglos conformados por 16 bits. Dentro de estas dos clasificaciones, el protocolo define si el acceso al dato es de lectura y escritura o de lectura solamente.

De manera análoga, los códigos de función Modbus descritos en la tabla 1.3 permiten al cliente determinar la dirección del dato donde debe acceder y la acción que debe ejecutar, entre escribir o leer sobre ese dato.

Tabla 1.2 Modelo de organización de la información según Modbus [6]

| Dato Modbus | Tipo de dato | Tipo de acceso | Direcciones disponibles |
|------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Entradas discretas | Un bit (booleano) | Sólo lectura | 00001 - 09999 |
| Bobinas | Un bit (booleano) | Lectura / escritura | 10001 - 19999 |
| Registros de entrada | Palabra de 16 bits | Sólo lectura | 30001 - 39999 |
| Registros de retención | Palabra de 16 bits | Lectura / escritura | 40001 - 49999 |

Tabla 1.3 Códigos de función Modbus [6]

| Códigos de función | | | |
|--------------------|-----------------------------|----|---------------------------------|
| 1 | Leer estado de bobinas | 5 | Escribir una sola bobina |
| 2 | Leer estado de entradas | 6 | Escribir un solo registro |
| 3 | Leer registros de retención | 15 | Escribir en múltiples bobinas |
| 4 | Leer registros de entrada | 16 | Escribir en múltiples registros |

1.5.4 OP5607

La tarjeta OP5607 constituye el núcleo central de procesamiento del simulador en tiempo real OPAL-RT. La tarjeta es una versión mejorada del módulo de procesamiento del simulador en su presentación original, diseñada con la plataforma de desarrollo Xilinx VC707 Virtex-7 FPGA para permitir el acondicionamiento de señales en el simulador y su expansión a otros dispositivos. Puede recibir hasta 8 grupos de acondicionamientos de señales digitales o análogas, lo que representa un total de 128 señales análogas o 256 señales digitales [9].



Figura 1.6 Módulo OP5607 [9]

1.5.5 OP8660

El módulo OP8660 que viene integrado en el tablero del simulador en tiempo real OPAL-RT es un controlador diseñado especialmente para aplicaciones de dispositivo en el lazo, o por su denominación en inglés, Hardware in The Loop. El módulo OP8660 básicamente es una tarjeta de adquisición de datos conectada a la tarjeta OP5607, que es el núcleo del simulador, permitiendo el mapeo de señales de entrada y salida al modelo simulado a través de bloques de programación de la librería de RT-LAB con un direccionamiento hacia cada uno de los puertos que permiten la salida o entrada de señales desde el exterior. El OP8660 consta de 4 módulos de alta corriente y alto voltaje, con un rango de tolerancia de hasta 600V y 15A, que permiten la conversión señales más pequeñas de corriente y voltaje dentro del rango de +/- 16V. [10]



Figura 1.7 Módulo OP8660 [10]

1.5.6 ARTEMIS-SSN

ARTEMIS State Space Nodal (SSN), por sus siglas en inglés, es un algoritmo de solución matemático, diseñado por OPAL-RT, especializado para aplicaciones en micro-redes, sistemas de distribución y drives complejos, que por su naturaleza requieren soluciones rápidas, de precisión y sin retardos artificiales de tiempo. El algoritmo optimiza los modelos eléctricos cargados al simulador mediante la aplicación de una avanzada técnica de desacoplamiento llamada Método nodal estado-espacio (state space nodal method), en la que virtualmente desacopla grandes sistemas de ecuaciones de estado-espacio convirtiéndolas en pequeños grupos, permitiendo obtener todas las soluciones de manera simultánea usando el método de admitancia nodal, que es el que normalmente se aplica para solucionar el problema. La principal funcionalidad de este método de resolución es que cada algoritmo de los distintos pequeños grupos se ejecuta en paralelo, sobre diferentes procesadores del simulador OPAL-RT, eliminando retardos artificiales de tiempo en la solución. [11], [12]

1.5.7 Relé L90 Line Differential Protection Relay

El relé de protección diferencial de línea L90 del fabricante General Electric es un dispositivo digital conocido como un dispositivo electrónico inteligente, multifunción, que tiene incorporadas funciones de protección, control y medición en su procesador inteligente electrónico. Permite al usuario la visualización de sus parámetros de programación y operación por medio de sus funciones de comunicación de alta velocidad y precisión, así como la compatibilidad con interfaz HMI para el control de sus parámetros. Entre los protocolos de comunicación que tiene habilitados se encuentran Modbus TCP/IP, DNP3 e IEC61850. [13]



Figura 1.8 Relé de protección L90 [13]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Una ventaja significativa de la utilización del simulador en tiempo real OPAL-RT es, sin lugar a duda, su versatilidad para el estudio de sistemas de potencia de magnitudes y complejidades diversas; lo que es alcanzado mediante la aplicación de algoritmos optimizados y FPGA para el cálculo y resolución de problemas en diversas aplicaciones eléctricas, que cuentan con plataformas de ingeniería que constituyen el software del simulador para la interacción del ingeniero con el modelo simulado, desde su concepción hasta la aplicación final, que es la posterior realización de pruebas en tiempo real que tendrán lugar en la simulación. La plataforma en la que se ha trabajado este proyecto es RT-LAB, que es completamente integrada con Matlab/Simulink, para posteriormente ser compilados y cargados al simulador y obtener resultados en tiempo real.

2.1 Descripción de la metodología de investigación e implementación

La metodología de diseño para los componentes de la red que será monitoreada y controlada por el sistema SCADA diseñado, se basará inicialmente en el ambiente de programación de Simulink, y finalmente, en el modelamiento de sistemas según RT-LAB para permitir la interacción en tiempo real con el simulador, en lo que respecta al sistema eléctrico. Para lograr la interacción del simulador con un dispositivo electrónico inteligente IED, la metodología utilizada fue la funcionalidad Hardware in The Loop (HIL) del simulador, que permite obtener señales en el exterior resultantes de la solución del modelo simulado por medio de un módulo de adquisición de datos, además de la utilización de un amplificador de señales. Por otro lado, la comunicación establecida para el sistema SCADA utilizó por metodología la arquitectura de una red Modbus TCP/IP, basándose en el modelo de comunicación por capas OSI en la que el simulador en tiempo real participó como cliente, al igual que los demás componentes de la red, comandados desde el centro de control del SCADA a través del software Labview programado como servidor e interfaz entre el operador del SCADA y todo lo que ocurre en la red simulada.

2.2 Definición de etapas en la implementación

De acuerdo a lo planteado anteriormente, se ha dividido la implementación en tres etapas principales, con el fin de abordar de manera independiente cada uno de los objetivos del proyecto de acuerdo a su campo de estudio, y obtener resultados específicos de acuerdo a la naturaleza de estudio de cada tema. La integración de las tres etapas se logra en la última de ellas, correspondiente al sistema SCADA final que es el entregable de todo el estudio.

2.2.1 Red de comunicación

En esta fase inicial de la implementación se pretende alcanzar los objetivos definidos en base al estudio e implementación del protocolo de comunicación Modbus TCP/IP en la red del sistema SCADA. Para esto, se han diferenciado cada una de las comunicaciones que deben ser establecidas en la red de comunicación, descritas en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Etapas de la implementación de la red de comunicación

| | | |
|---|---|--------------------------------------|
| 1 | Diseño de la arquitectura de la red con protocolo de comunicación Modbus TCP/IP | |
| 2 | OPAL-RT cliente Modbus | Simulador QMODMASTER servidor Modbus |
| 3 | Labview cliente Modbus | Simulador QMODMASTER servidor Modbus |
| 4 | Labview cliente Modbus | Labview servidor Modbus |
| 5 | OPAL-RT cliente Modbus | Labview servidor Modbus |
| 6 | PLC S7-1200 cliente Modbus | Labview servidor Modbus |
| 7 | Relé de protección cliente Modbus | Software Enervista servidor Modbus |
| 8 | Relé de protección cliente Modbus | Labview servidor Modbus |

Los dispositivos descritos en la tabla 2.1 son los que poseen el puerto de comunicación Ethernet y permiten definir una dirección de cliente para la transferencia de información a través del protocolo Modbus (ver anexo 1).

2.2.2 Hardware in The Loop

Esta etapa del proyecto corresponde a la implementación física de la prueba Hardware in The Loop con dos relés de protección del fabricante General Electric; para esto, se realiza la instalación eléctrica de los dispositivos físicos conectados a la red en el laboratorio de simulación, y se configuran los parámetros de la red eléctrica simulada y de los dispositivos inteligentes del sistema, de manera que reúnan las condiciones para la prueba. La tabla 2.2 detalla los requerimientos de la implementación.

Tabla 2.2 Etapas de la implementación de Hardware in The Loop

| | |
|---|--|
| 1 | Sistema de distribución en Simulink |
| 2 | Estudio de Cortocircuito |
| 3 | Programación del relé de protección |
| 4 | Configuración de I/Os en modelo Simulink |
| 5 | Conexión del relé al amplificador CMS 356 |
| 6 | Simulación de falla para actuación del relé |
| 7 | Retorno de señal del relé a la grid simulada |

2.2.3 Sistema SCADA

El sistema SCADA constituye la parte de la interfaz gráfica o HMI que ha sido desarrollado en Labview, así como la integración de la red de comunicación, que se logra definiendo un servidor Modbus en la programación de Labview que controle a cada uno de los clientes Modbus de la red; esto, definiendo a su vez servidores de comunicación E/S en la programación para acceder a las variables de control que van a ser monitoreadas desde los diferentes clientes de la red. En esta etapa se alcanza el objetivo principal del estudio, que es el monitoreo y control en tiempo real de la prueba de HIL del relé de protección digital actuando ante una falla en la red de distribución.

2.3 Etapas de implementación del sistema SCADA

2.3.1 Red de comunicación

El protocolo de comunicación sobre el que se desarrolla la red de comunicación del sistema SCADA es Modbus TCP/IP, cuyo medio físico de transmisión de información es por vía ethernet. Se escoge este protocolo posterior a un levantamiento realizado en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad al comienzo del proyecto (ver anexo 1), del cual se determinaron los dispositivos inteligentes que participarían en la red, que posean puerto ethernet y el protocolo Modbus TCP/IP habilitado de acuerdo a sus especificaciones.

2.3.1.1 Diseño de la arquitectura de la red Modbus TCP/IP

La arquitectura de la red de comunicación se realizó de manera que cada uno de los dispositivos inteligentes conectados a la red, cumpla el rol de cliente, respondiendo a los requerimientos del único servidor de la red que es el software Labview. La figura 2.1 describe los componentes de la red de comunicación con sus direcciones IP y puerto de escucha Modbus.

Se configuran las direcciones IP de los dispositivos clientes para que se encuentren dentro de la misma red del servidor; esto está condicionado a la dirección del simulador en tiempo real, dado que para este dispositivo se ha configurado una red local que permite la comunicación entre todos los procesadores del simulador OPAL-RT hacia la computadora principal y el software RT-LAB. Por esa razón, no debe cambiarse la dirección IP del computador principal ni de ningún módulo del simulador, sino más bien, adaptar la red externa para el sistema SCADA a la red existente.

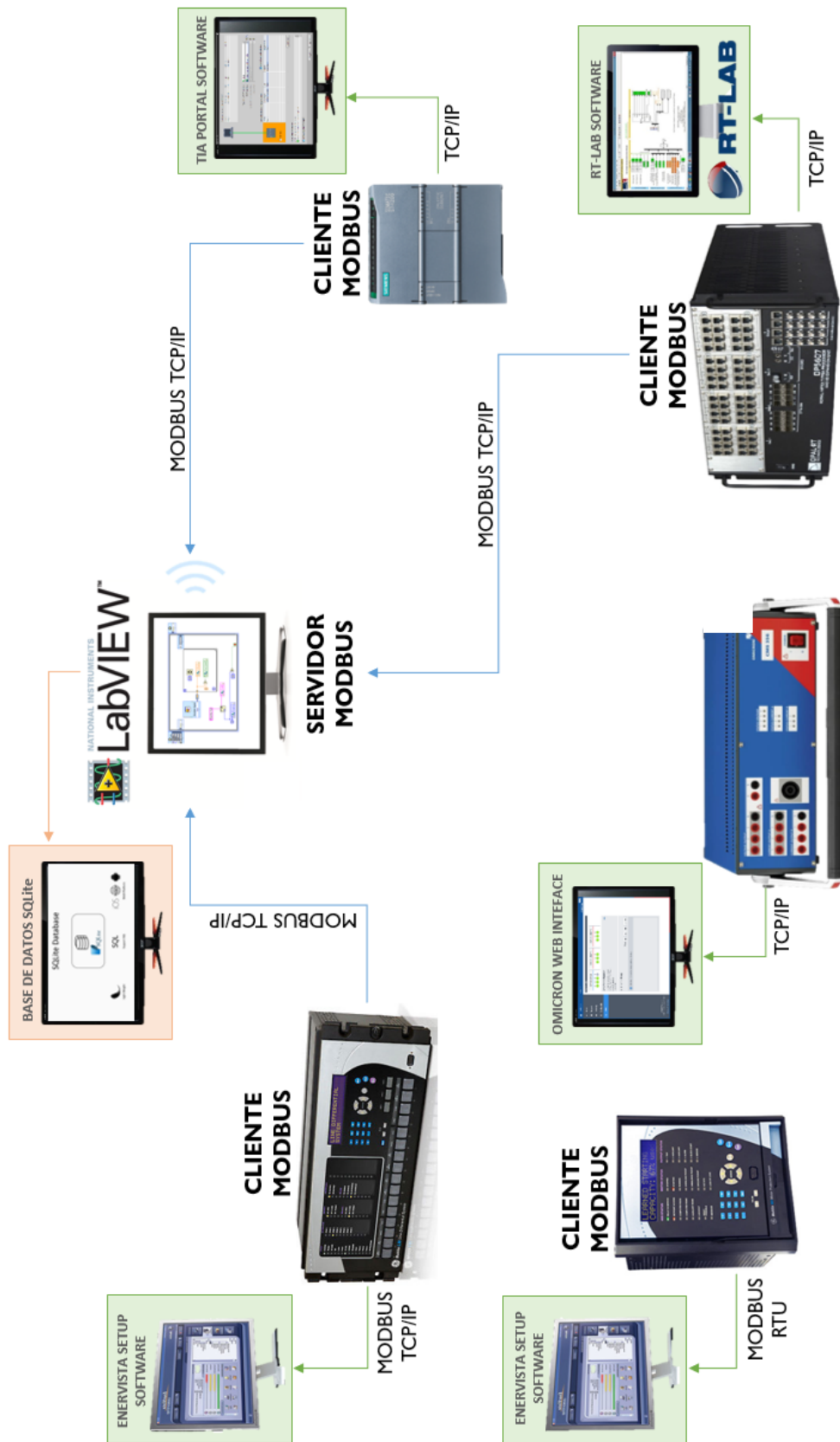


Figura 2.1 Red de comunicación Modbus TCP/IP para el sistema SCADA

El relé de protección de motores GE 469 se incluye en la red de comunicación, como se indicia en la figura 2.1, como un dispositivo Modbus RTU [14], dado que cuenta únicamente con puerto serial RS232, a través del cual se establece la comunicación hacia una computadora con su software de programación.

2.3.1.2 Comunicación Modbus OPAL-RT y Simulador QMODMASTER

Para establecer la comunicación en un modelo en Simulink, a través del protocolo Modbus utilizando el simulador OPAL-RT, es necesario configurar los bloques de comunicación de la librería del simulador especializados en el protocolo Modbus TCP/IP. Para este propósito, existe un ejemplo del funcionamiento de la comunicación Modbus que puede ser compilado y cargado en RT-LAB a modo de proyecto.

Tabla 2.3 Ubicación de archivos para comunicación Modbus

| Archivo | Dirección |
|----------------------|---|
| Modbus_Slave_service | C:\OPAL-RT\RT-LAB\v11.0.5.499\Examples\IO_Generic_Modbus_Slave_Service\Simulink |
| Modbus_slave_DIL | C:\OPAL-RT\RT-LAB\v11.0.5.499\Examples\IO_Generic_Modbus_Slave_SE\Simulink |

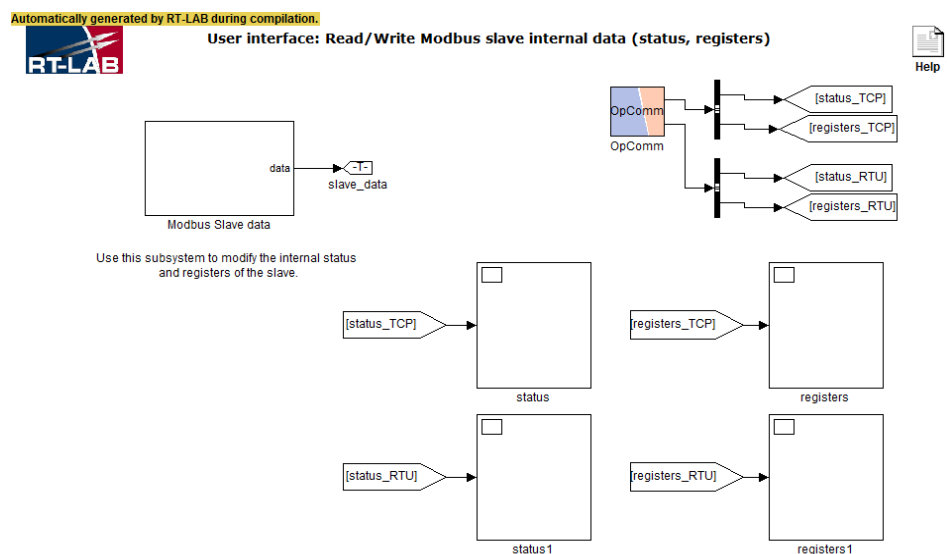


Figura 2.2 Consola del proyecto “Modbus_slave”

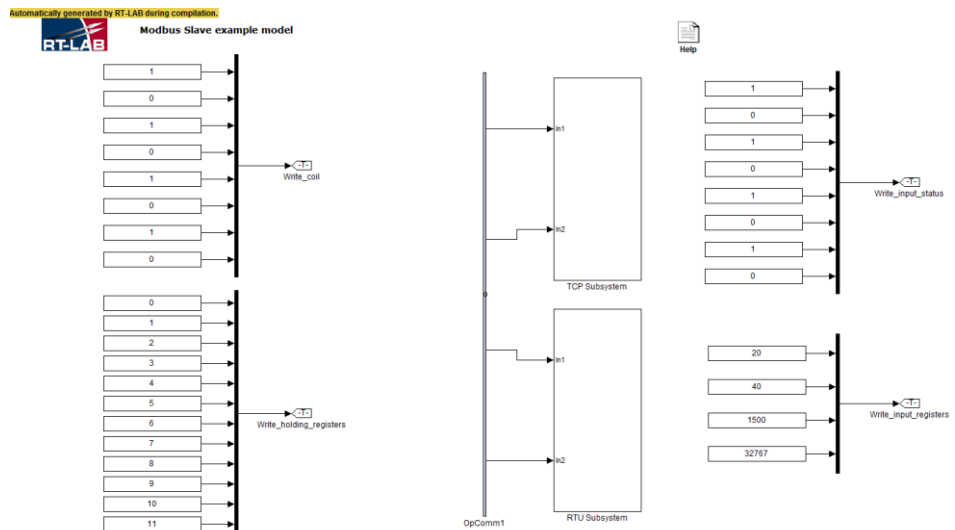


Figura 2.3 Consola del proyecto “Modbus_example”

En la tabla 2.3 se describen las direcciones de la ubicación de los archivos que se utilizaron para la comunicación Modbus en el simulador, en el disco C de la computadora central.

Los archivos de la tabla 2.3 pueden ser cargados al simulador como un proyecto, de la denominación que desee el usuario. Para este estudio, se crearon dos proyectos que se encuentran visibles en la ventana principal de RT-LAB, de nombres “Modbus_slave” y “Modbus_example”. Las figuras 2.2 y 2.3 muestran las consolas de los modelos que son visibles al ser cargados al simulador.

El simulador QMODMASTER es una aplicación ejecutable, de licencia libre, que puede ser descargada de su página web [15], recomendada por los manuales de usuario de RT-LAB para probar la comunicación Modbus con el simulador en tiempo real.

El simulador OPAL-RT sólo puede ser configurado como cliente o esclavo Modbus, de manera que para probar la comunicación es necesario utilizar una aplicación externa que cumpla el rol de servidor o maestro y solicite una respuesta al simulador como cliente; con este fin se ejecuta QMODMASTER, definiendo la dirección IP y puerto de escucha Modbus del cliente, así como el modo Modbus, la dirección

ID, el código de función de los datos que se quieren leer, la dirección inicial de la información con su respectivo formato de lectura y la cantidad de registros a los que se van a acceder. La figura 2.4 muestra la conexión Modbus establecida desde QMODMASTER hacia el modelo “Modbus_slave” ejecutándose en el simulador. En la figura 2.5 se muestran los registros que el simulador envía al QMODMASTER desde la consola. En este ejemplo, QMODMASTER está leyendo los registros tipo ‘coils’ que son los datos tipo booleanos contenidos en el primer recuadro de la figura 2.5.

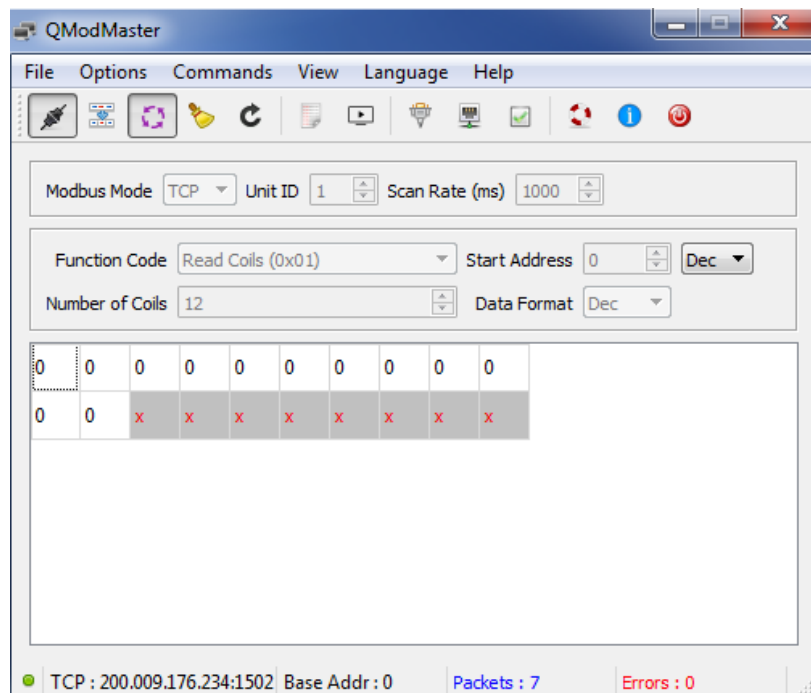


Figura 2.4 QMODMASTER accediendo a los registros tipo ‘coils’

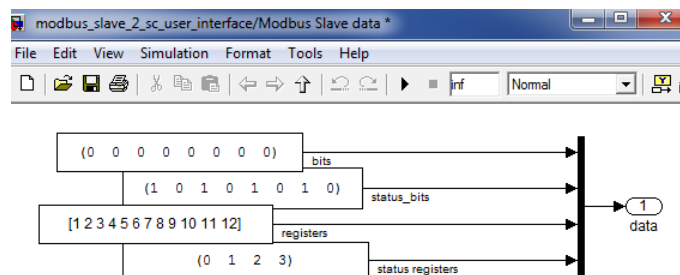


Figura 2.5 Registros de la consola del simulador

2.3.1.3 Comunicación Modbus TCP/IP en Labview

El software Labview es una plataforma de programación gráfica que permite el desarrollo de aplicaciones SCADA mediante la instalación del módulo Datalogging and Supervisory Control (DSC), que expande las funcionalidades de programación hacia la incorporación de servidores de comunicación y protocolos industriales, entre ellos Modbus TCP/IP, con el que se ha desarrollado la arquitectura de la red del SCADA de estudio.

Gracias al módulo DSC es posible definir un servidor de entradas y salidas E/S tipo Modbus, ya sea como maestro o como esclavo, y establecer la comunicación con un dispositivo o aplicación externa. Para probar la comunicación en Labview, se definió un servidor de E/S tipo esclavo, en el que, de manera análoga a la prueba descrita en la sección 2.3.1.3, se estableció la comunicación con QMODMASTER definiendo la dirección IP de la computadora central, que es donde se ejecuta Labview, y el puerto de escucha Modbus definido por defecto de 502 para Labview.

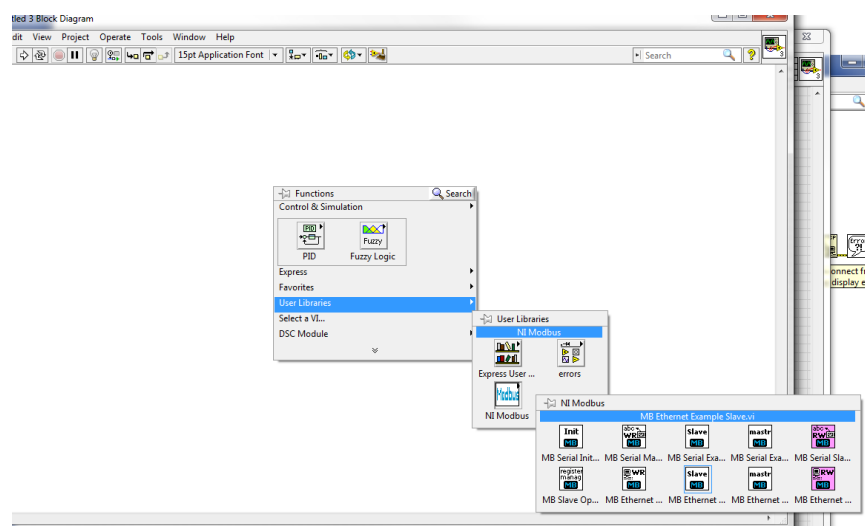


Figura 2.6 Librería NI Modbus

Así mismo, es posible establecer la comunicación Modbus entre un servidor tipo esclavo y un servidor tipo maestro en el mismo proyecto de Labview. Para esto se utilizó la librería descargable [16] NI Modbus, que se presenta en la figura 2.6.

2.3.1.4 Comunicación Labview y OPAL-RT

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, la comunicación Modbus en las plataformas Labview y OPAL-RT se configura y prueba de manera exitosa con una aplicación externa; por lo que ahora se establece la comunicación entre ambos ambientes de programación utilizando el modelo descrito en 2.1.3.3 y la librería NI Modbus en Labview. La figura 2.7 muestra capturas de pantalla de la comunicación establecida entre el VI del ejemplo de la librería NI Modbus, que cumple el rol de maestro Modbus, y la ventana de la consola del modelo ejecutándose en el simulador, como esclavo Modbus. Se resalta en un recuadro rojo las variables que están siendo comunicadas de manera visible en este ejemplo.

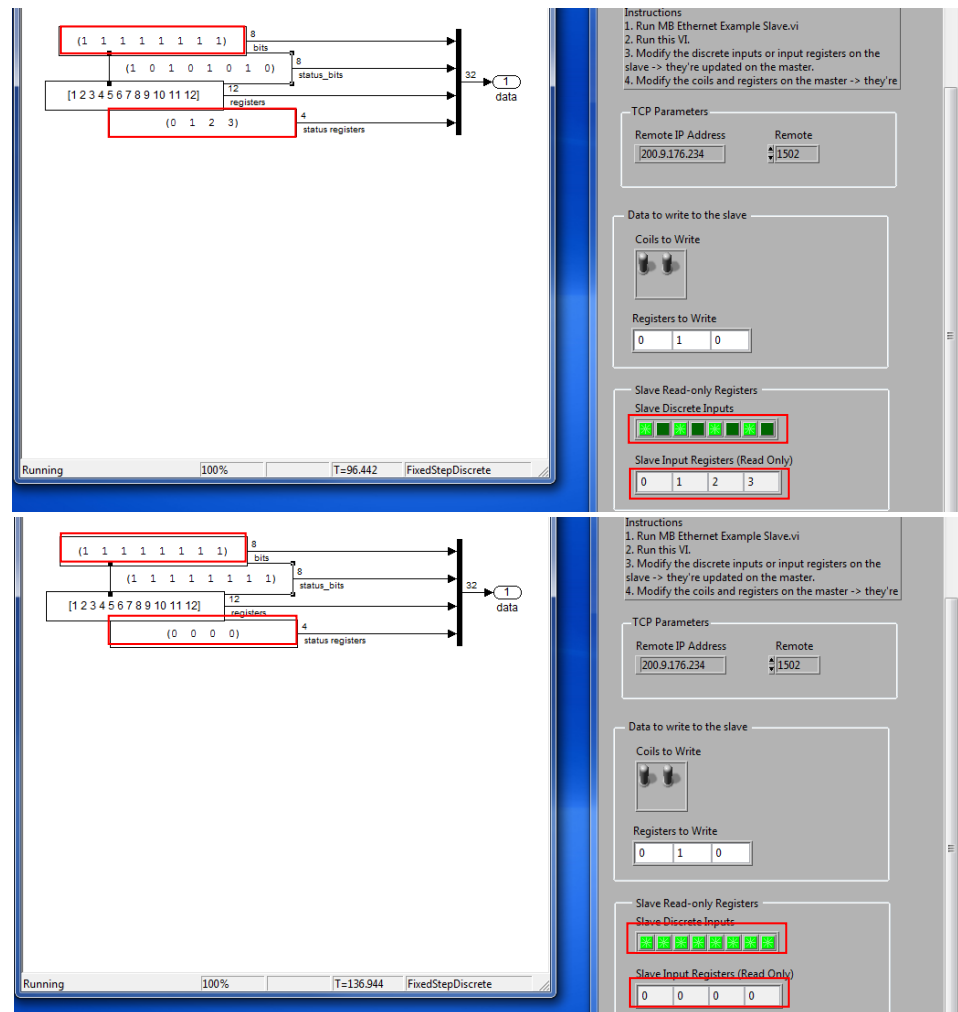


Figura 2.7 Comunicación Labview (maestro) – OPAL-RT (esclavo)

2.3.1.5 Comunicación PLC S7-1200 y Labview

El controlador PLC S7-1200 se escogió para ser parte de la red SCADA dado que permite la comunicación a una red TCP/IP gracias a que tiene incorporado en su hardware un puerto ethernet, y habilitado el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP en sus librerías de programación. De esta forma, se realizó la lógica del programa del PLC incluyendo el bloque MB server, que permite la comunicación del PLC como maestro o servidor Modbus, desde el software de programación Siemens TIA Portal.



Figura 2.8 Configuración del PLC mediante el software TIA Portal

La figura 2.9 muestra la programación realizada en Labview, donde se configuraron controladores e indicadores conectados a variables compartidas que responden a la solicitud establecida por el maestro PLC a través de la definición de servidores de E/S Modbus en un proyecto de Labview.

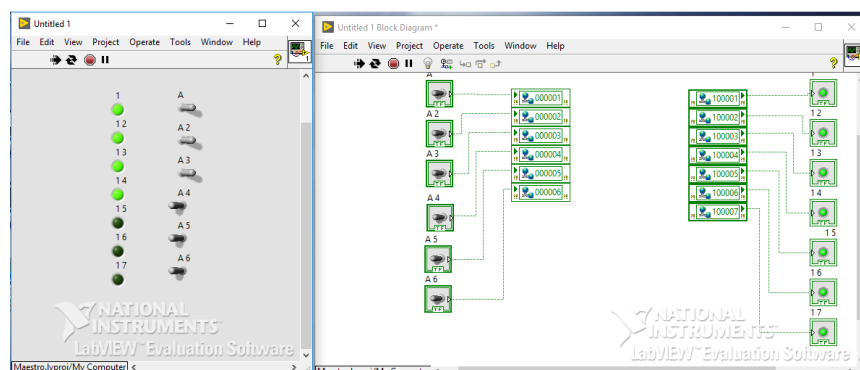


Figura 2.9 Comunicación Labview – PLC S7-1200

En la figura 2.10 se presentan fotos de la prueba de comunicación realizada entre el PLC y la programación en Labview. Se puede diferenciar que al accionar los interruptores conectados a las entradas

digitales del PLC, se encienden los leds simulados en Labview en (a), y de manera análoga, al accionar los interruptores virtuales en Labview, se encienden los leds de la parte frontal del PLC que corresponden a las salidas digitales en (b).

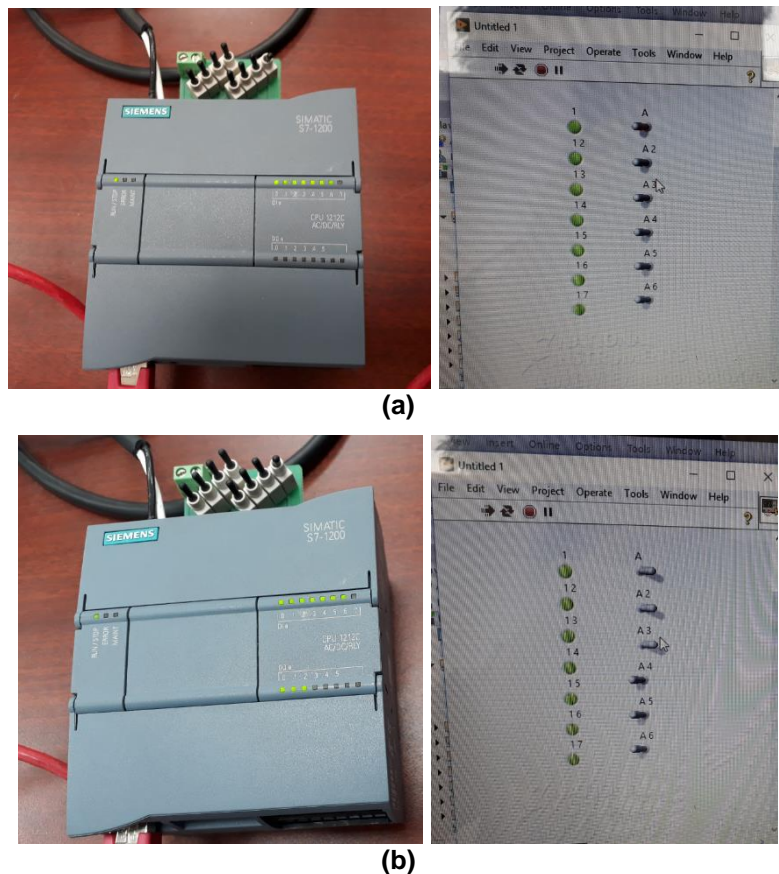


Figura 2.10 Prueba de comunicación Labview – PLC S7-1200. Prueba de interruptores físicos (a) y prueba de interruptores simulados (b)

2.3.1.6 Comunicación Modbus TCP/IP del Relé de protección L90

De todos los dispositivos electrónicos inteligentes que se encontraron disponibles en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad, se escogió el relé L90 Line Differential Relay del fabricante General Electric para el proyecto, al ser el único dispositivo con puerto Ethernet en su hardware, además del protocolo Modbus TCP/IP habilitado en su programación. De esta forma, se configuró el dispositivo para establecer la comunicación Modbus TCP/IP como cliente Modbus.

La primera prueba de comunicación se realizó con el software del fabricante Enervista Setup Software, logrando acceder a los parámetros de programación de manera exitosa, como se muestra en la figura 2.11. Posteriormente, se establece la comunicación entre el relé de protección y Labview, para lo que se debe tener en consideración que el relé de protección únicamente puede comunicarse como esclavo o cliente Modbus, de manera que Labview debe ser programado como servidor para iniciar y establecer la comunicación con el relé.



Figura 2.11 Comunicación relé L90 con software Enervista Setup

Otra consideración importante al establecer la comunicación del relé con Labview, es que, por diseño del fabricante, de acuerdo al manual del usuario [13], el relé se encuentra codificado para restringir la comunicación vía Ethernet hacia cualquier otro dispositivo externo que no sea su software de desarrollo, por lo que es necesario ingresar una contraseña para cambiar su estado de configuración de 'Restricted' a 'Command' o a 'Setting', para permitir la comunicación. La figura 2.12 indica la dirección, desde el display del relé, del parámetro de acceso que debe ser cambiado, y la tabla 2.4 describe los parámetros que deben configurarse en el relé para permitir la comunicación con un servidor Modbus externo.



Figura 2.12 Dirección de la configuración de seguridad en relé

Tabla 2.4 Configuración del relé L90 para comunicación Modbus

| Parámetro por defecto | Parámetro habilitante | Contraseña |
|-----------------------|-----------------------|------------|
| Restricted | Command | 47111 |
| | Setting | 47111 |

En Labview, se debe configurar un servidor E/S como fue descrito en el apartado 2.3.1.4, y definir variables compartidas para establecer la comunicación entre la solicitud hecha por el maestro Labview hacia el relé vía Modbus. Los indicadores de respuesta del relé que se mostrarán en Labview deberán ser compatibles con el tipo de dato que se transmite del relé. En el anexo 4 se detallan los pasos a seguir para establecer la comunicación con un ejemplo de aplicación, y en el anexo 5 se describen las variables con las que se estableció la comunicación desde Labview hacia el relé L90.

2.3.1.7 Habilitación de puerto ethernet adicional para red de comunicación en la tarjeta OP5607 del simulador OPAL-RT

Uno de los requerimientos para establecer una red de comunicación para el sistema SCADA es que no exista tráfico de información a través de los protocolos de comunicación ethernet, principalmente para el simulador en tiempo real, que utiliza la red para establecer comunicación entre sus tarjetas o procesadores. Con este fin, y de acuerdo a la instrucción de la base de conocimiento de la página de OPAL-RT [17], surge la necesidad de habilitar otro puerto ethernet en el simulador.



Figura 2.13 Acceso al ambiente Linux del simulador

En la tarjeta OP5607 del simulador OPAL-RT es posible habilitar un puerto ethernet adicional, dado que físicamente se encuentra disponible un segundo puerto justo a un lado del que se encuentra funcionando con el simulador. Para esto, es necesario conectar un monitor, un teclado y un ratón a la tarjeta OP5607 para acceder al ambiente de programación Linux, como se muestra en la figura 2.13.

El procedimiento para programar el puerto ethernet adicional por primera vez se encuentra en el artículo de la base de conocimiento de la página de OPAL-RT en [17]. La tabla 2.5 muestra los parámetros configurados para el puerto adicional, que fueron definidos de acuerdo a la red del sistema SCADA a la que se va a conectar el simulador.

Tabla 2.5 Parámetros del puerto ethernet eth1

| | |
|-------------------------|--|
| Puerto | eth1 |
| Dirección IP | 200.9.176.64 |
| Subnet mask | 255.255.255.128 |
| Default gateway address | blank |
| Hardware | eth1 (Intel Corporation Unknown device 1521) |
| MAC address | 00:25:90:5c:f1:d8 |

Se realizaron pruebas de comprobación de la comunicación entre la computadora principal y el puerto adicional habilitado, conectado a la red local (ver anexo 3). Las conexiones físicas desde el puerto adicional hacia el switch de comunicación interno y hacia la red local se presentan en fotos en la figura 2.14.



Figura 2.14 Fotos de las conexiones físicas del puerto eth0 y eth1

2.3.1.8 Configuración final de la red de comunicación

Una vez establecidas las comunicaciones individuales entre los elementos de la red SCADA y Labview, que será el interfaz del sistema e integrador de la comunicación; y resuelto el problema del tráfico de comunicación en el simulador OPAL-RT con la habilitación de un puerto ethernet adicional para la red Modbus TCP/IP, el siguiente paso es definir correctamente las direcciones de todos los elementos de la red, garantizando la comunicación hacia la computadora central. La figura 2.15 presenta la arquitectura final de la red con las direcciones de cada uno de los elementos.

En la configuración final de la red, todos los dispositivos figuran como esclavos o clientes Modbus, en tanto que existe un único servidor o maestro Modbus que es Labview; esto se logra gracias a la funcionalidad de integración de la comunicación del complemento DSC en Labview, por ser especializado para aplicaciones SCADA.

Una consideración importante que debe resaltarse de la figura 2.15, es la ausencia del relé de protección 469 como parte de la red de comunicación, ya que el dispositivo cuenta únicamente con protocolo Modbus RTU, para el que se definen direcciones propias de una conexión serial a través del puerto RS-232; de acuerdo al manual del usuario del relé 469 [18] la velocidad de respuesta en la comunicación es de 19200, en tanto que la dirección de esclavo es 253. Se definen los parámetros de la comunicación para la conexión del relé con su software de programación, sin embargo, cabe resaltar que no será parte de la red de comunicación ya que únicamente se consideran los dispositivos que permiten la comunicación TCP/IP por medio físico ethernet.

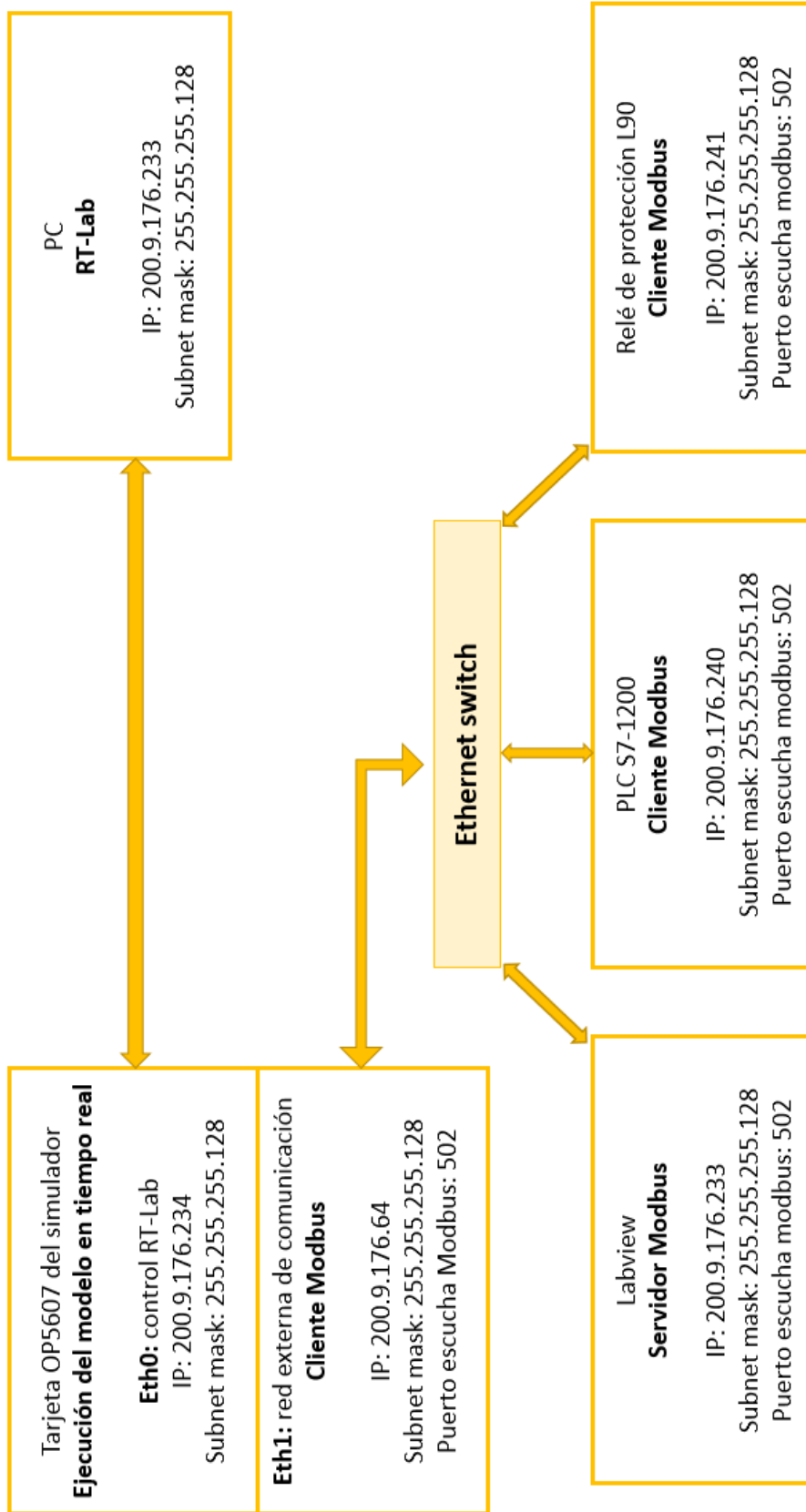


Figura 2.15 Red de comunicación Modbus TCP/IP para el sistema SCADA

2.3.2 Hardware in The Loop

Los relés de protección digital, del fabricante General Electric, L90 y 469, son dispositivos inteligentes IEDs que forman parte de la arquitectura del sistema SCADA y cumplen dos roles principales: como clientes Modbus en la red de comunicaciones, y como elemento principal de la prueba HIL en la que su accionamiento será sometido a prueba frente a condiciones normales y de contingencia de una red eléctrica de distribución simulada. Para la realización de pruebas en los relés digitales de protección, se establecen las condiciones para el accionamiento del relé en la red eléctrica simulada, se programan los relés con sus parámetros de accionamiento, y finalmente, se realiza la conexión HIL hacia los puertos de la tarjeta de adquisición de datos del simulador de acuerdo a la configuración de conexiones del relé, del amplificador de señales OMICRON CMS 356 y al mapeo de entradas y salidas digitales y analógicas del módulo OP8660.

2.3.2.1 Red eléctrica de distribución

Para llevar a efecto la realización de pruebas en tiempo real sobre relés de protección digitales, la red eléctrica de distribución simulada debe reunir las condiciones necesarias para la configuración HIL en el simulador en tiempo real; esto es, debe permitir la solución del algoritmo de flujo de potencia y de cortocircuito en el modelo en tiempo real sin retardos intencionales de tiempo.

Existe una aplicación especializada para la prueba HIL que permite la ejecución en tiempo real del algoritmo de solución de la red modelada con la librería de SimPowerSystems en Simulink [19], que es la aplicación ARTEMIS SSN (véase sección 1.5.6), cuyas funcionalidades extienden la capacidad de la red para su ejecución en tiempo real, proporcionando la opción de manejar una cantidad ilimitada de interruptores para la desconexión de la red en condiciones de falla y sin retardo intencional de tiempo, para el cálculo del algoritmo de solución utilizando varios procesadores del simulador en paralelo.

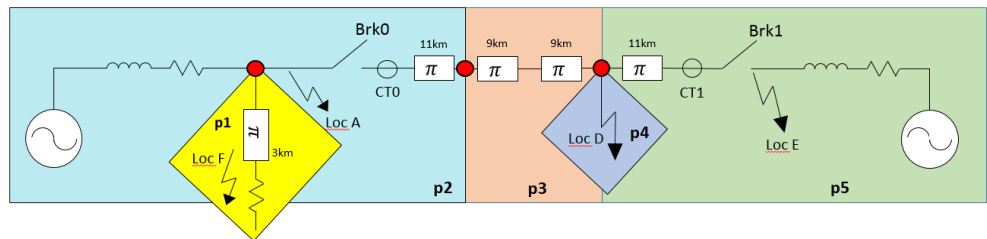


Figura 2.16 Red de distribución utilizada en la simulación [20]

La red de distribución utilizada en el desarrollo de este proyecto corresponde a la mostrada en la figura 2.16, que se incluye en la librería de Matlab “blockset ARTEMIS” [20]. Se trata de una pequeña red de distribución con capacidad de falla para múltiples pruebas, que utiliza varios grupos de interruptores en el modelo con bloques especializados que evitan la sobrecarga de memoria sin retardo de tiempo, especializado para pruebas HIL.

En la figura 2.16 se especifican los diferentes elementos de la red manejados por la función ARTEMIS para la solución del problema, donde:

- Loc i: indica las locaciones donde es posible generar una falla trifásica en la red
- pi: particiones de la red producto del desacoplamiento de la función ARTEMIS SSN
- Brki: Interruptores de la red simulados
- CTi: Transformadores de corriente simulados

2.3.2.2 Operación de la red

Los datos requeridos para el ajuste de la protección de los relés digitales se obtienen a partir del estudio de operación de la red en condiciones normales y de contingencia, lo que se efectúa utilizando la herramienta computacional especializada en sistemas eléctricos de distribución ETAP [21], en el que se simula la red y se ejecuta un flujo de carga y un estudio de cortocircuito en la barra a la que se conectarán los relés, que es la representada en el recuadro amarillo de la partición p1 en la figura 2.16.

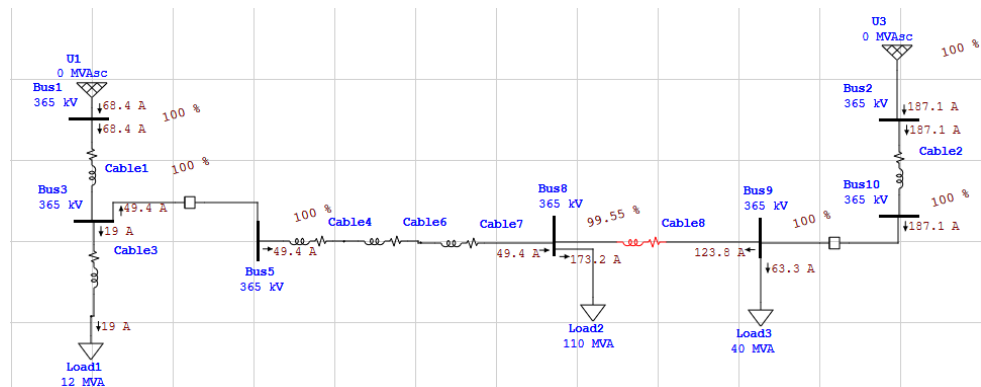


Figura 2.17 Flujo de carga de la red simulada en ETAP

En la figura 2.17 se muestran los resultados de la simulación en ETAP de la red de estudio, para todas las barras del sistema. Para este modelamiento en ETAP se utilizaron dos barras infinitas en representación de los generadores del modelo, con el propósito de simplificar el análisis.

Tabla 2.6 Resultados de la simulación en ETAP para barra BUS0

| Flujo de carga | Corriente de falla máxima | Corriente de falla mínima |
|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 49.4 A | 20.832 kA | 0.899 kA |

2.3.2.3 Estudio de protecciones

Para efectos de programación de los relés digitales reales, es necesario determinar las corrientes mínimas de actuación y los tiempos de accionamiento, de acuerdo a la curva de protección definida para cada relé. Los parámetros finalmente configurados en la programación de las funciones de protección 50/51 de los relés son los mismos para los dos casos, dado que reciben la misma señal de voltaje y de corriente al conectarse a una misma barra de la red simulada; limitación que se presenta debido al hardware del amplificador de señales disponible (véase sección 2.3.2.3).

Los parámetros de ajuste de los relés de protección digitales, se seleccionan a partir de las especificaciones de sobrecorriente que vienen dadas por el fabricante [13], las mismas que se listan en las tablas 2.7, 2.8, 2.9, 2.11 y en las ecuaciones de esta sección.

Tabla 2.7 Especificaciones de la protección de sobrecorriente de tiempo inverso [13]

| Corriente | Fasor o RMS |
|----------------------------------|--|
| Nivel de pickup | 0.000 a 30.000 p.u. en pasos de 0.001 |
| Nivel de dropout | 97% a 98% de Pickup |
| Precisión para CTs de 0.1 a 2.0 | +/-0.5% de lectura o +/-1% de placa de CT (cualquiera que sea el más grande) |
| Precisión para CTs mayores a 2.0 | +/-1.5% de lectura > 2.0 veces placa de CT |
| Curvas | IEEE Moderada/muy/extremadamente inversa |
| | IEC A/B/C e inversa corta |
| | GE IAC inversa, poco/muy/extremadamente inversa |
| | I2t |
| | FlexCurves (programable) |
| | Tiempo definido (curva basada en 0.01 s) |
| Multiplicador | Time Dial en el rango de 0.00 a 600.00 en pasos de 0.01 |
| Tipo de reset | Instantáneo/temporizado (por IEEE) |
| Precisión de tiempo | Opera a >1.03 veces la corriente de Pickup +/-3% o 4ms (cualquiera que sea más grande) |

Se utilizará la curva de sobrecorriente del relé de acuerdo a la norma IEEE C37.112-1996, de tipo moderadamente inverso. Las curvas IEEE son derivadas de las ecuaciones (2.1) y (2.2) con los parámetros de acuerdo a la tabla 2.7, especificados de acuerdo al tipo de curva:

$$T = TDM \times \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^p - 1} + B \right] \quad (2.1)$$

$$T_{reset} = TDM \times \left[\frac{t_r}{1 - \left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^2} \right] \quad (2.2)$$

Donde:

- T*: tiempo de operación en segundos
TDM: parámetro multiplicador
I: corriente de entrada
I_{pickup}: parámetro de la corriente de arranque
A: constante
T_{reset}: tiempo de reseteo en segundos (asumiendo que la capacidad de energía es 100% y que el reset es temporizado)
B: constante
p: constante
t_r: constante característica

Tabla 2.8 Constantes de curvas IEEE de tiempo inverso [13]

| Curvas IEEE | A | B | p | t _r |
|-----------------------------|--------|--------|---------|----------------|
| IEEE Extremadamente inversa | 28.2 | 0.1217 | 2.0000 | 29.1 |
| IEEE muy inversa | 19.61 | 0.491 | 2.0000 | 21.6 |
| IEEE moderadamente inversa | 0.0515 | 0.1140 | 0.02000 | 4.85 |

Tabla 2.9 Tiempos de desconexión de curvas IEEE, en segundos [13]

| TDM | Corriente (I/I _{pickup}) | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 |
| IEEE Extremadamente inversa | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 11.341 | 4.761 | 1.823 | 1.001 | 0.648 | 0.464 | 0.355 | 0.285 | 0.237 | 0.203 |
| 1.0 | 22.682 | 9.522 | 3.647 | 2.002 | 1.297 | 0.927 | 0.709 | 0.569 | 0.474 | 0.407 |
| 2.0 | 45.363 | 19.043 | 7.293 | 4.003 | 2.593 | 1.855 | 1.418 | 1.139 | 0.948 | 0.813 |
| 4.0 | 90.727 | 38.087 | 14.587 | 8.007 | 5.187 | 3.71 | 2.837 | 2.277 | 1.897 | 1.626 |
| 6.0 | 136.09 | 57.13 | 21.88 | 12.01 | 7.78 | 5.564 | 4.255 | 3.416 | 2.845 | 2.439 |
| 8.0 | 181.454 | 76.174 | 29.174 | 16.014 | 10.374 | 7.419 | 5.674 | 4.555 | 3.794 | 3.252 |
| 10.0 | 226.817 | 95.217 | 36.467 | 20.017 | 12.967 | 9.274 | 7.092 | 5.693 | 4.742 | 4.065 |
| IEEE Muy inversa | | | | | | | | | | |
| 0.5 | 8.09 | 3.514 | 1.471 | 0.899 | 0.654 | 0.526 | 0.45 | 0.401 | 0.368 | 0.345 |
| 1.0 | 16.179 | 7.028 | 2.942 | 1.798 | 1.308 | 1.051 | 0.9 | 0.802 | 0.736 | 0.689 |
| 2.0 | 32.358 | 14.055 | 5.885 | 3.597 | 2.616 | 2.103 | 1.799 | 1.605 | 1.472 | 1.378 |
| 4.0 | 64.716 | 28.111 | 11.769 | 7.193 | 5.232 | 4.205 | 3.598 | 3.209 | 2.945 | 2.756 |
| 6.0 | 97.074 | 42.166 | 17.654 | 10.79 | 7.849 | 6.308 | 5.397 | 4.814 | 4.417 | 4.134 |
| 8.0 | 129.432 | 56.221 | 23.538 | 14.387 | 10.465 | 8.41 | 7.196 | 6.418 | 5.889 | 5.513 |
| 10.0 | 161.79 | 70.277 | 29.423 | 17.983 | 13.081 | 10.51 | 8.995 | 8.023 | 7.361 | 6.891 |
| 0.5 | 3.22 | 1.902 | 1.216 | 0.973 | 0.844 | 0.763 | 0.706 | 0.663 | 0.63 | 0.603 |
| 1.0 | 6.439 | 3.803 | 2.432 | 1.946 | 1.688 | 1.526 | 1.412 | 1.327 | 1.26 | 1.207 |
| 2.0 | 12.878 | 7.606 | 4.864 | 3.892 | 3.377 | 3.051 | 2.823 | 2.653 | 2.521 | 2.414 |
| 4.0 | 25.756 | 15.213 | 9.729 | 7.783 | 6.753 | 6.102 | 5.647 | 5.307 | 5.041 | 4.827 |
| 6.0 | 38.634 | 22.819 | 14.593 | 11.675 | 10.13 | 9.153 | 8.47 | 7.96 | 7.562 | 7.241 |
| 8.0 | 51.512 | 30.426 | 19.458 | 15.567 | 13.507 | 12.20 | 11.29 | 10.61 | 10.08 | 9.654 |
| 10.0 | 64.39 | 38.032 | 24.322 | 19.458 | 16.883 | 15.25 | 14.11 | 13.26 | 12.60 | 12.06 |

Para la curva IEEE moderadamente inversa, las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$T = TDM \times \left[\frac{0.0515}{\left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^{0.02} - 1} + 0.1140 \right] \quad (2.3)$$

$$T_{reset} = TDM \times \left[\frac{4.85}{1 - \left(\frac{I}{I_{pickup}} \right)^2} \right] \quad (2.4)$$

Calculamos los parámetros para nuestro relé de sobrecorriente, de acuerdo al estudio de cortocircuito:

- Relación de transformación del CT

$$110\%I_{carga} = 1,10 \times 49,40 = 54,34 \text{ A} \quad (2.5)$$

$$RTC = \frac{100}{5} = 20 \quad (2.6)$$

De acuerdo a la ecuación 2.5, para un 10% sobre la corriente nominal de operación, con un valor de 54,34 A se escoge el primario del transformador más próximo en términos de disponibilidad comercial [22], que es el TC de 100:5.

- Cálculo de los parámetros del Relé de Sobrecorriente de tiempo inverso 51

$$I_{pickup51_{prim}} = 150\%I_{carga} = 1,5 \times 49,40 = 74,1 \text{ A} \quad (2.7)$$

$$TAP51 = I_{pickup51_{sec}} = \frac{I_{pickup51_{prim}}}{RTC} = \frac{74,1}{20} = 3,71 \quad (2.8)$$

Se considera un tiempo de operación estimado de acuerdo al interruptor escogido de la librería de ETAP, además, se han considerado valores típicos de tiempo de despeje de falla y tiempo de ajuste del relé, que se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Tiempos de operación considerados para el cálculo [13]

| Parámetro | Descripción | Valor |
|----------------|------------------------------------|--------|
| $t_{setrelé}$ | Tiempo de apertura del interruptor | 50 ms |
| $t_{despeje}$ | Tiempo de despeje de falla | 130 ms |
| $t_{interrup}$ | Tiempo de interrupción de la falla | 50 ms |

Para el cálculo del tiempo de operación estimado, con los tiempos de la tabla 2.10, se tiene:

$$\begin{aligned} t_{reset} &= t_{despeje} - t_{setrelé} - t_{interrup} \\ &= 130 - 50 - 50 = 30ms \end{aligned} \quad (2.9)$$

Despejando la ecuación 2.4 para el cálculo del TDM:

$$TDM = \frac{t_{reset}}{1 - \left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^2} = \frac{0,03}{1 - \left(\frac{49.4}{74.1}\right)^2} = 0,00344 \quad (2.10)$$

Calculando el tiempo de operación real de la protección:

$$T = 0,00344 \left[\left(\frac{0.0515}{\left(\frac{49.4}{74.1}\right)^{0.02} - 1} \right) + 0.1140 \right] = 0,03 \text{ seg} \quad (2.11)$$

De manera análoga, se calculan los parámetros del relé de sobrecorriente instantáneo, de acuerdo a las especificaciones del fabricante para este tipo de protección, detalladas en la tabla 2.11.

- Cálculo de los parámetros del relé de sobrecorriente Instantáneo

$$I_{pickup50} = \frac{I_{falla_{min}}}{RTC} = \frac{899}{20} = 44.95 \text{ A} \quad (2.12)$$

$$I_{pickup50_{p.u.}} = \frac{I_{pickup50}}{I} = \frac{44.95}{49.4} = 0.9 \quad (2.13)$$

Tabla 2.11 Especificaciones de la protección sobrecorriente instantánea [13]

| | |
|----------------------------------|--|
| Nivel de pickup | 0.000 a 30.000 p.u. en pasos de 0.001 |
| Nivel de dropout | 97% a 98% de Pickup |
| Precisión para CTs de 0.1 a 2.0 | +/-0.5% de lectura o +/-1% de placa de CT (cualquiera que sea el más grande) |
| Precisión para CTs mayores a 2.0 | +/-1.5% de lectura |
| Alcance máximo | Mayor a 2% |
| Retraso de Pickup | 0.00 a 600.00 en pasos de 0.01 |
| Retraso de Reset | 0.00 a 600.00 en pasos de 0.01 |
| Tiempo de operación | < a 16 ms a tres veces la corriente de Pickup a 60Hz < a 20 ms a tres veces Pickup a 60Hz (para neutro) |
| Precisión de tiempo | Opera a 1.5 veces la corriente de Pickup +/-3% ó +/-4ms (cualquiera que sea más grande) |

2.3.2.4 Consideraciones al cargar y compilar el modelo en RT-Lab

Utilizando la librería SimPowerSystems [19], es posible modelar la red eléctrica de distribución presentada en la sección 2.3.2.1, adicionando los bloques de la aplicación ARTEMIS SSN para lograr las condiciones de la prueba HIL para los relés de protección digitales; sin embargo, para la carga y compilación del modelo al simulador en tiempo real por medio de la plataforma RT-Lab, existen ciertas restricciones que deben cumplirse, o se mostrarán mensajes de error antes de la carga o en el proceso de compilación.

Desde la ventana principal de RT-Lab, seleccionando el modelo que se va a cargar al simulador, deben garantizarse las condiciones que se resumen en la tabla 2.12 para que no surjan mensajes de error durante la compilación o carga.

Tabla 2.12 Condiciones para la carga y compilación del modelo

| Pestaña de la ventana principal | Parámetro de configuración | Estado |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Overview | State | Loadable |
| Development | Target plataform | Redhat |
| Execution | Real-time simulation mode | Hardware synchronized |
| | Real-time communication link type | UDP/IP |
| | Time factor | 1.0 |
| | Stop time (s) | Infinity |
| | Pause time (s) | Infinity |
| | Enable detection of overruns | Yes |
| | Action to perform on overruns | Continue |
| | Number of steps without overruns | 10 |
| Assignment | Choose a physical node | RTServer_176_234 |
| | Run in XHP mode | Yes |
| Diagnostic | Enable monitoring | Yes |
| | Enable watchdog | Yes |
| | Watchdog timeout (ms) | 5000 |
| Hardware | Reset model on IO missing | Yes |
| | Enable cacheable DMA memory access | Yes |
| Simulation Tools | Handle console automatically | Yes |

2.3.2.5 Señales del modelo hacia el exterior

Una vez definidos los parámetros de operación de los relés digitales, para los niveles de corrientes y voltajes de la red simulada, el siguiente paso es la instalación física de los relés para la prueba HIL; para esto, es necesario configurar la salida de señales desde el modelo hacia el exterior. Las librerías de RT-Lab cuentan con bloques especializados para la configuración de la tarjeta de adquisición de datos OP8660, que permiten el mapeo de las señales de entrada o salida análogas del modelo hacia el exterior o viceversa. En la figura 2.18 se muestra la configuración del bloque 'AnalogOut' utilizado para transmitir las señales de corriente y voltaje de una barra de la red hacia el exterior para la conexión de los relés.

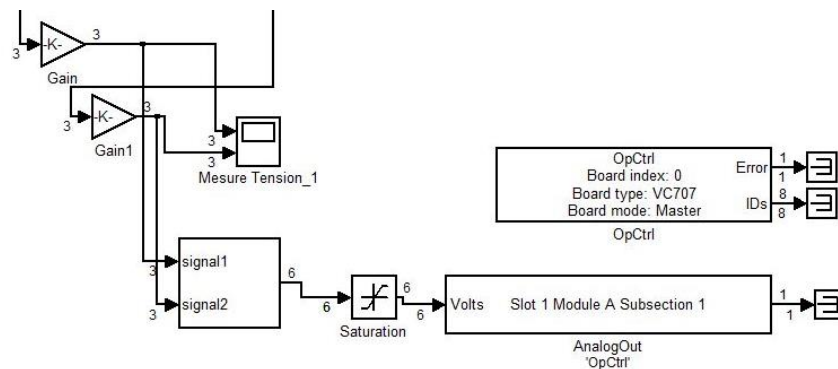


Figura 2.18 Bloque 'AnalogOut' en la simulación

Cada bloque 'Analogut' permite transmitir hasta un máximo de ocho señales monofásicas diferentes; para este estudio, se configuró para seis señales, tres de corriente y tres de voltaje, de la barra a la que se conectan los relés de protección físicos. Debe considerarse que la tarjeta de adquisición de datos OP8660 soporta niveles de voltaje hasta +/- 16V, por lo que es necesario preceder a las señales que se transmitirán al exterior con bloques de ganancias que reduzcan el valor de las señales dentro de los límites, además de una saturación en ese rango de voltaje para garantizar por completo que no se producirá ningún daño al componente físico de la tarjeta de adquisición de datos.

Como se observa en la figura 2.18, es necesario que cada bloque ‘AnalogOut’ se instale en el modelo con su bloque controlador ‘OpCtrl’, en el que se definen las rutas de los archivos de configuración de la tarjeta de adquisición de datos. El simulador en tiempo real del laboratorio de ESPOL, desde la plataforma de RT-Lab, cuenta con un modelo cargado y compilado “IO_TEST_CENACE” en el que se encuentran todos los bloques de adquisición de datos ya configurados y listos para instalarse en cualquier modelo; de este proyecto se extrajeron los bloques y los archivos necesarios para la configuración. En la figura 2.19 se presenta la ventana de la carpeta del modelo de estudio, resaltando los archivos de configuración del controlador que deben copiarse del modelo “IO_TEST_CENACE” para permitir la comunicación correcta con la tarjeta de adquisición de datos del simulador.

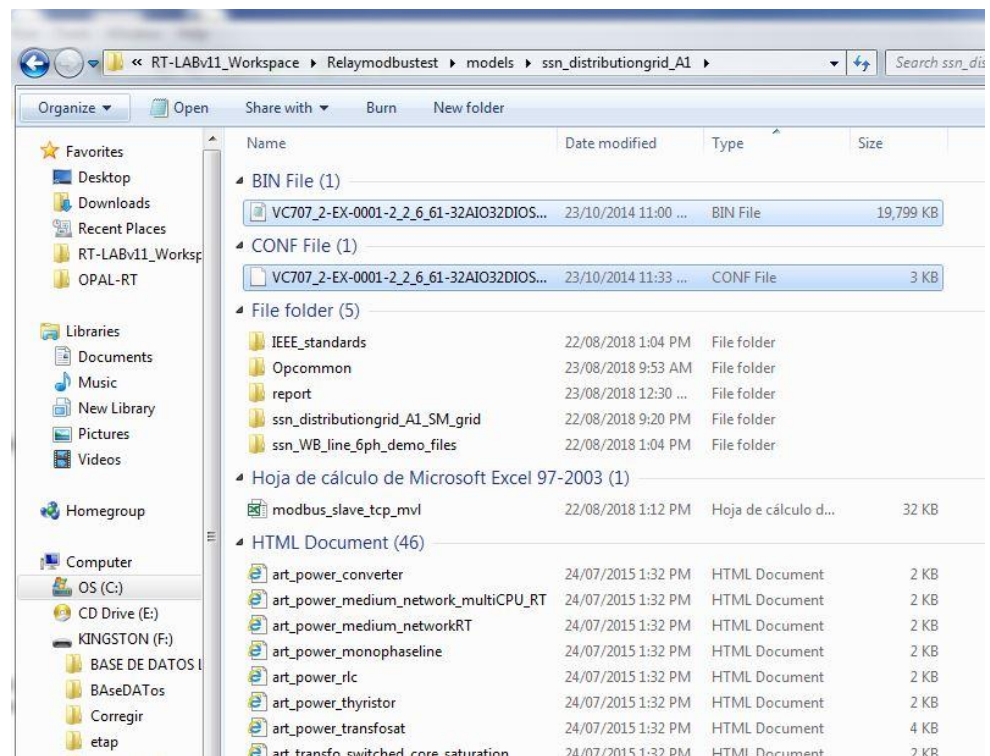


Figura 2.19 Archivos requeridos para la adquisición de datos

2.3.2.6 Amplificador de señales

Como se explicó en el apartado anterior, la tarjeta de adquisición de datos tiene rangos de corriente y voltaje permisibles que deben garantizarse en las señales transmitidas al exterior para evitar daños al hardware del simulador, de manera que es necesario instalar un amplificador de señales, ya sea para devolver la magnitud original de las señales del modelo, o en el caso de exceder los límites de amplificación, para obtener señales equivalentes dentro de rangos controlables. El amplificador con el que cuenta el simulador en tiempo real es el OMICRON CMS 356, que tiene una salida trifásica más una salida línea-neutro de voltaje, y dos salidas de corriente que constituyen un divisor de corriente entre ellas. Para configurar el nivel de amplificación deseado de las señales del modelo, se debe acceder al interfaz web del amplificador CMS 356, que se comunica al simulador y su red local vía TCP/IP; únicamente si el switch de comunicaciones interno del simulador está habilitado, y si el cable ethernet está conectado a la salida del amplificador hacia el switch, es posible acceder al software online del amplificador, caso contrario no aparece habilitada la opción de acceso.

Es posible acceder desde el ícono de acceso directo del computador principal. Con doble click, se ingresa a la ventana principal donde, si estuviere en línea, aparece el ícono del dispositivo instalado, al que se puede acceder con click derecho seleccionando la opción 'Open web interface' como se muestra en la figura 2.20.

En la ventana del navegador que aparece, como se muestra en la figura 2.21, es posible monitorear, configurar y modificar los parámetros de amplificación y operación del dispositivo.

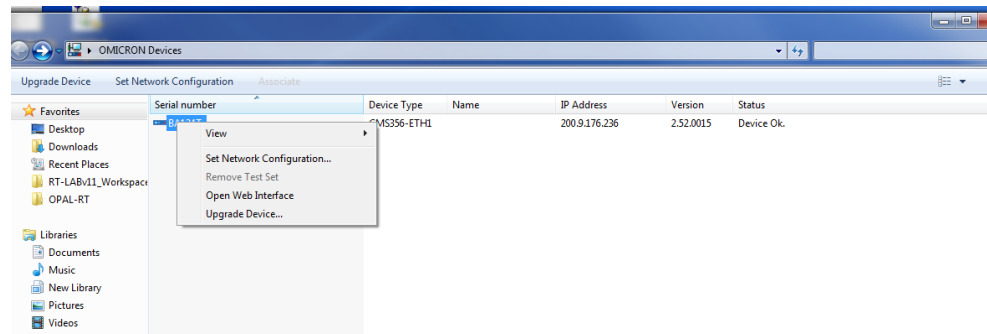


Figura 2.20 Software online del amplificador CMS 356

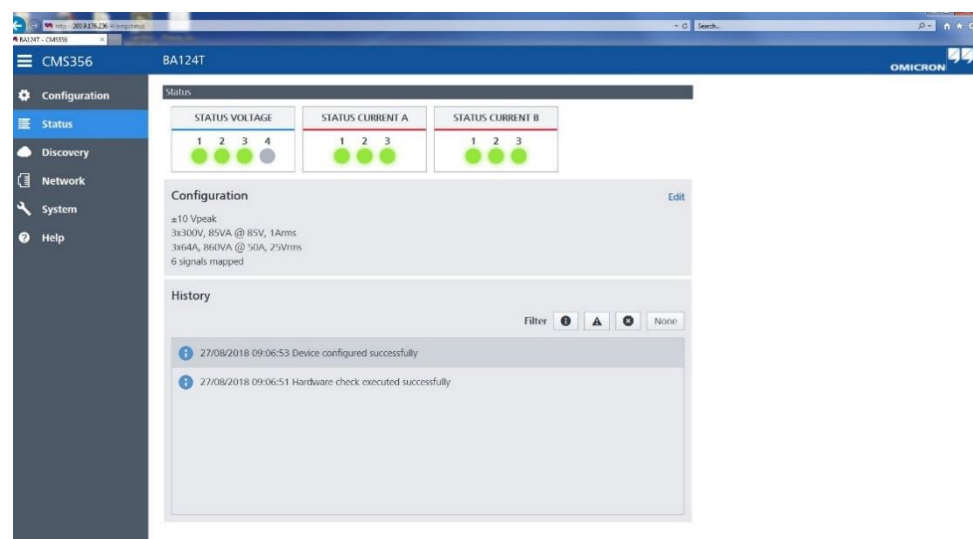


Figura 2.21 Ventana principal del software del amplificador CMS 356

2.3.3 Sistema SCADA

En esta etapa final de la implementación, se realiza la integración de las comunicaciones individuales establecidas entre cada uno de los dispositivos del sistema SCADA y el software Labview, previamente acondicionadas para la red de distribución modelada que es objeto de estudio. La interfaz gráfica que se realiza en el software Labview, además de mostrar la información resultante de la comunicación Modbus TCP/IP, permite el control sobre las variables de accionamiento de los dispositivos de la red, de manera que es necesario garantizar y validar la respuesta correcta de los dispositivos ante una orden del servidor Labview. Adicionalmente, se realiza el monitoreo de la respuesta de los relés de protección digitales en prueba HIL y se interactúa con ellos desde la interfaz gráfica, completando así la aplicación final que es el objetivo principal de este estudio.

2.3.3.1 Comunicación en la red eléctrica simulada

En la red eléctrica de distribución presentada en la sección 2.3.2.1 modelada en Simulink, también se definen bloques de comunicación de las librerías de RT-Lab para establecer la conexión Modbus TCP/IP ente el modelo cargado al simulador, ejecutándose como cliente Modbus, y el software Labview, maestro Modbus de todos los elementos de la red.

Los bloques de comunicación utilizados siguen la arquitectura de conexión de los ejemplos de modelos de simulación de los protocolos de comunicación que se encuentran en los directorios de RT-Lab en la computadora principal; modelos que, al cargarse como un proyecto hacia el simulador en tiempo real, permiten el análisis de la configuración del protocolo y el direccionamiento de registros y parámetros para establecer la comunicación, de acuerdo a lo expuesto en la sección 2.3.1.4. La figura 2.22 presenta la red eléctrica simulada en el ambiente Simulink, con los bloques de comunicación Modbus incorporados y resaltados en un recuadro rojo.

Para la carga y compilación del modelo al simulador en tiempo real, es necesario dividirlo en dos subsistemas: uno donde se definirán todos los elementos de la red modelada, de nombre SM_grid, y otro que será la interfaz en tiempo real de la simulación, de nombre SC_Console; en ambos se requiere la instalación de los bloques de comunicación, y, además, la interconexión de señales entre ellos, como se presenta en la figura 2.21.

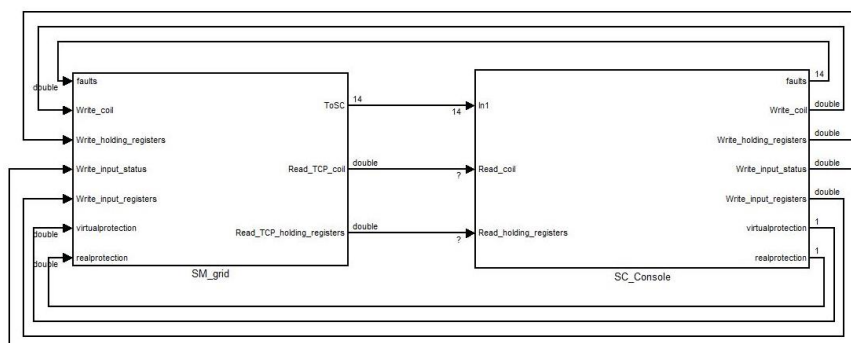


Figura 2.21 Interconexión de subsistemas por comunicación Modbus

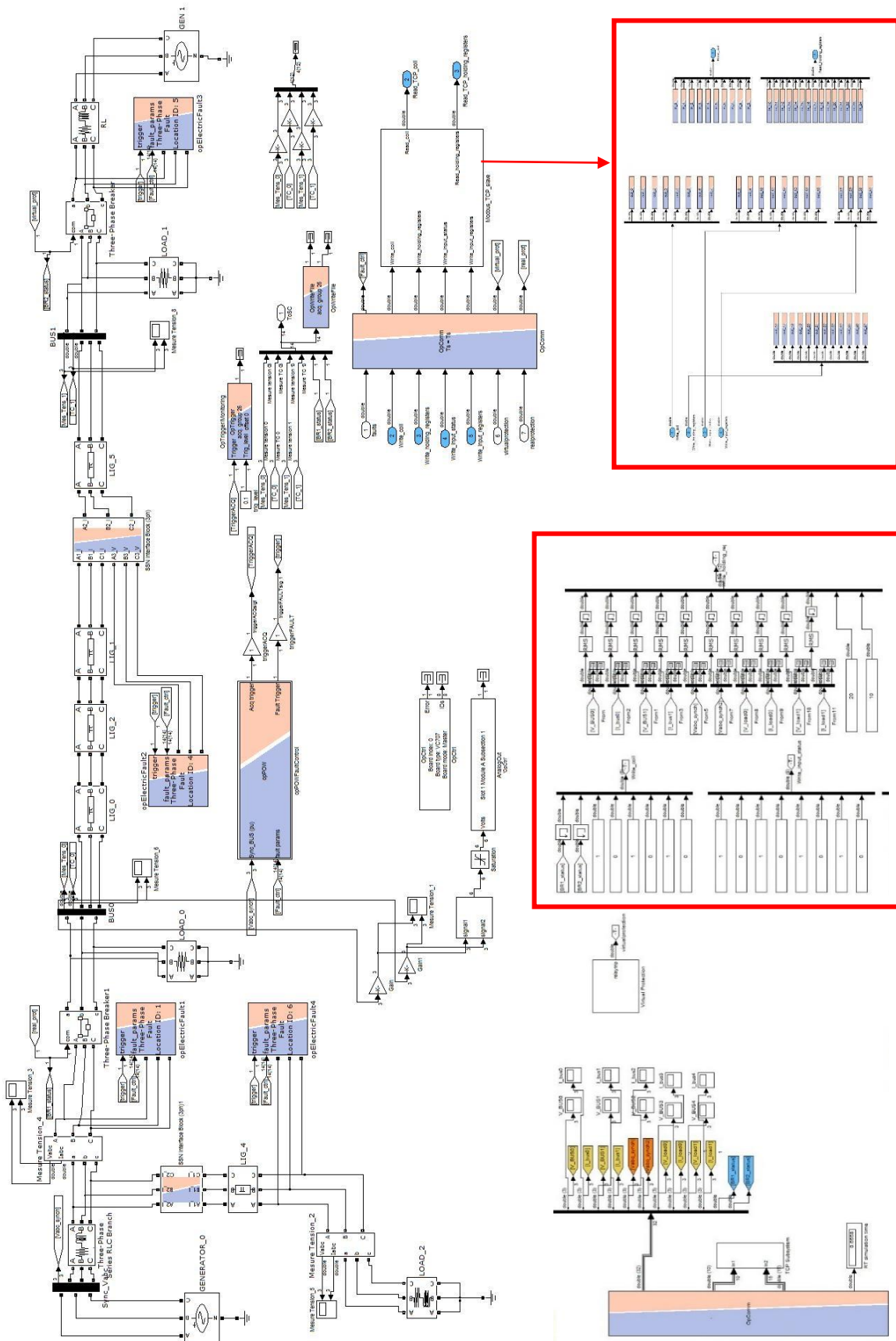


Figura 2.22 Red eléctrica simulada con bloques de comunicación Modbus

En el subsistema consola, además, se deben definir las señales que van a ser comunicadas desde la simulación hacia Labview, conectándolas a través de etiquetas 'From' que vienen desde el subsistema modelo, y que receptan las señales de corriente y voltaje de determinada barra de la red. La figura 2.23 presenta la configuración necesaria para la comunicación desde la consola. Otra consideración importante, es que debe identificarse correctamente el tipo de registro de las señales que se comunicarán en la configuración de la figura 2.23, ya que los bloques Modbus permiten la comunicación de cuatro tipos de datos, y si no se define correctamente la naturaleza de la información, al momento de la compilación se mostrará un error por comunicación.

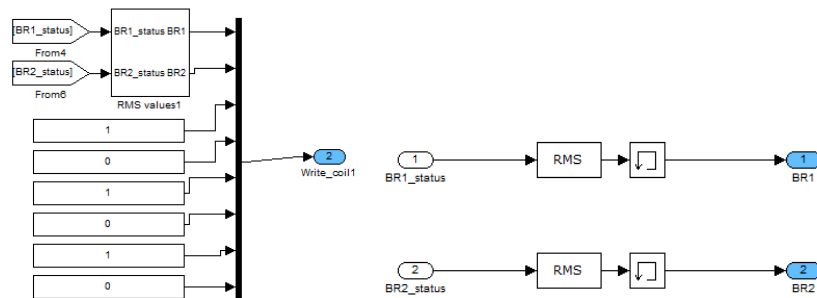


Figura 2.23 Configuración de datos Modbus desde consola

Finalmente, se deben cargar dos archivos de formato .opal para definir la comunicación Modbus al cargar el modelo al simulador, como se muestra en la figura 2.24. En la figura 2.25 se observan los archivos, que además deben estar incluidos en la carpeta del modelo en el directorio de RT-Lab.

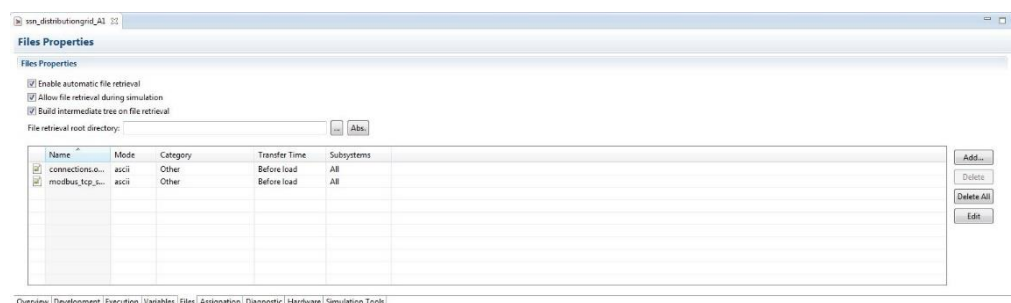


Figura 2.24 Archivos .opal para comunicación Modbus cargados desde la pestaña Files en RT-Lab

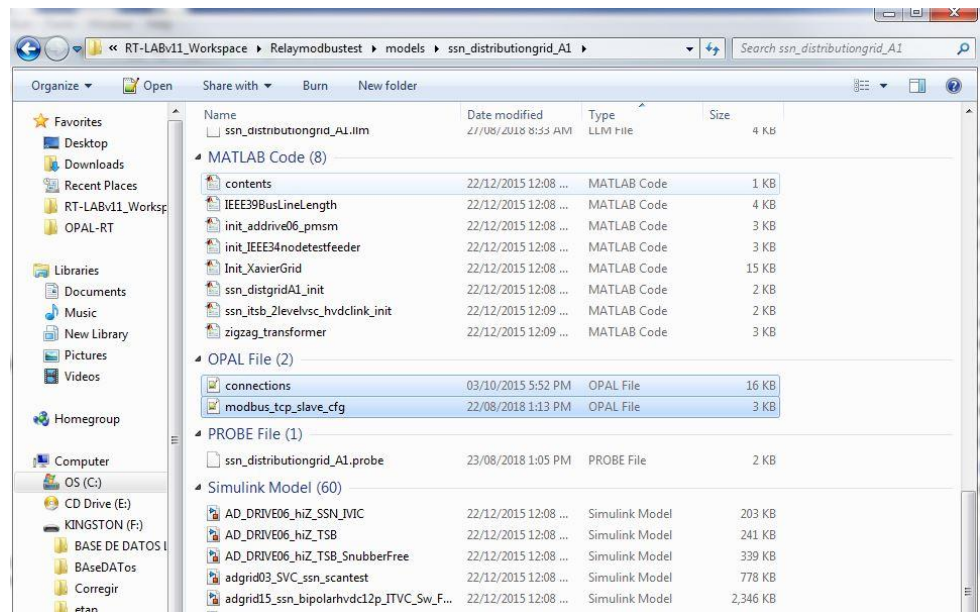


Figura 2.25 Archivos .opal para comunicación Modbus en el directorio del modelo

2.3.3.2 Lógica de habilitación la protección en la red

Con el objeto de visualizar la falla generada en la red, que provocará el accionamiento de los relés de protección digitales conectados al simulador, se diseña e implementa una lógica de permisión o habilitación de las protecciones en la red. Básicamente, se realiza un control con el PLC S7-1200, para que interrumpa el paso de la señal de retorno al simulador (que es el contacto de apertura del interruptor o 'trip' para mandar a abrir el interruptor de la red simulada y evitar que se propague la falla), y que solamente después de un comando ejecutado desde el interfaz del SCADA en Labview, habilite la salida digital del PLC y permita el retorno de la señal a la tarjeta de adquisición de datos, para que la reciba el interruptor simulado en el modelo a través de un bloque 'AnalogIn'. El sistema SCADA ejecuta la comunicación con el PLC mediante el protocolo Modbus TCP/IP. El programa del PLC y su carga y ejecución se realiza antes de cargar el modelo al simulador utilizando el software del fabricante Siemens 'TIA PORTAL', mediante comunicación vía ethernet.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados del estudio realizado en este proyecto corresponden a la instalación física del sistema SCADA diseñado y su implementación como laboratorio virtual para la realización de prácticas experimentales. En este capítulo se exponen los procedimientos a seguir para replicar la arquitectura del sistema SCADA propuesto para una red eléctrica de distribución simulada.

3.1 Arquitectura del sistema SCADA

La arquitectura resultante del sistema SCADA diseñado se presenta en la figura 3.1, en la que se describe con precisión cada una de las conexiones físicas realizadas en la implementación, con sus respectivos medios físicos de transmisión de información o de señales, y sus rangos de valores en operación. El sistema SCADA implementado consta de tres capas principales de aplicación, siendo el control central el nivel más alto, desde donde se realiza el monitoreo, control y adquisición de datos de lo que está sucediendo en la red de distribución a través de la interfaz gráfica de Labview, integrando softwares adicionales de los dispositivos de campo como SQLite, TIA Portal, Omicron Web Interface, Enervista Setup Software, Matlab/Simulink y RT-Lab y estableciendo la integración del protocolo de comunicación, que a su vez constituye el segundo nivel de aplicación; en la red de comunicación, todos los dispositivos del sistema SCADA se comunican en calidad de clientes o esclavos hacia el maestro Labview, receptando y enviando información de la operación de la red por medio físico ethernet, hacia un switch de comunicación principal, que a su vez comunica hacia un switch de comunicación interno que se encuentra físicamente dentro del módulo del simulador, y establece la comunicación hacia la red local de los procesadores del simulador y del amplificador de señales CMS 356. El último nivel de aplicación lo constituyen los dispositivos de campo, que interactúan con el simulador mediante instalaciones físicas con cable de cobre, receptando señales de corriente y voltaje en los rangos de 0 – 40V y 4.1 – 500A respectivamente; así como señales digitales para el caso del PLC S7-1200.

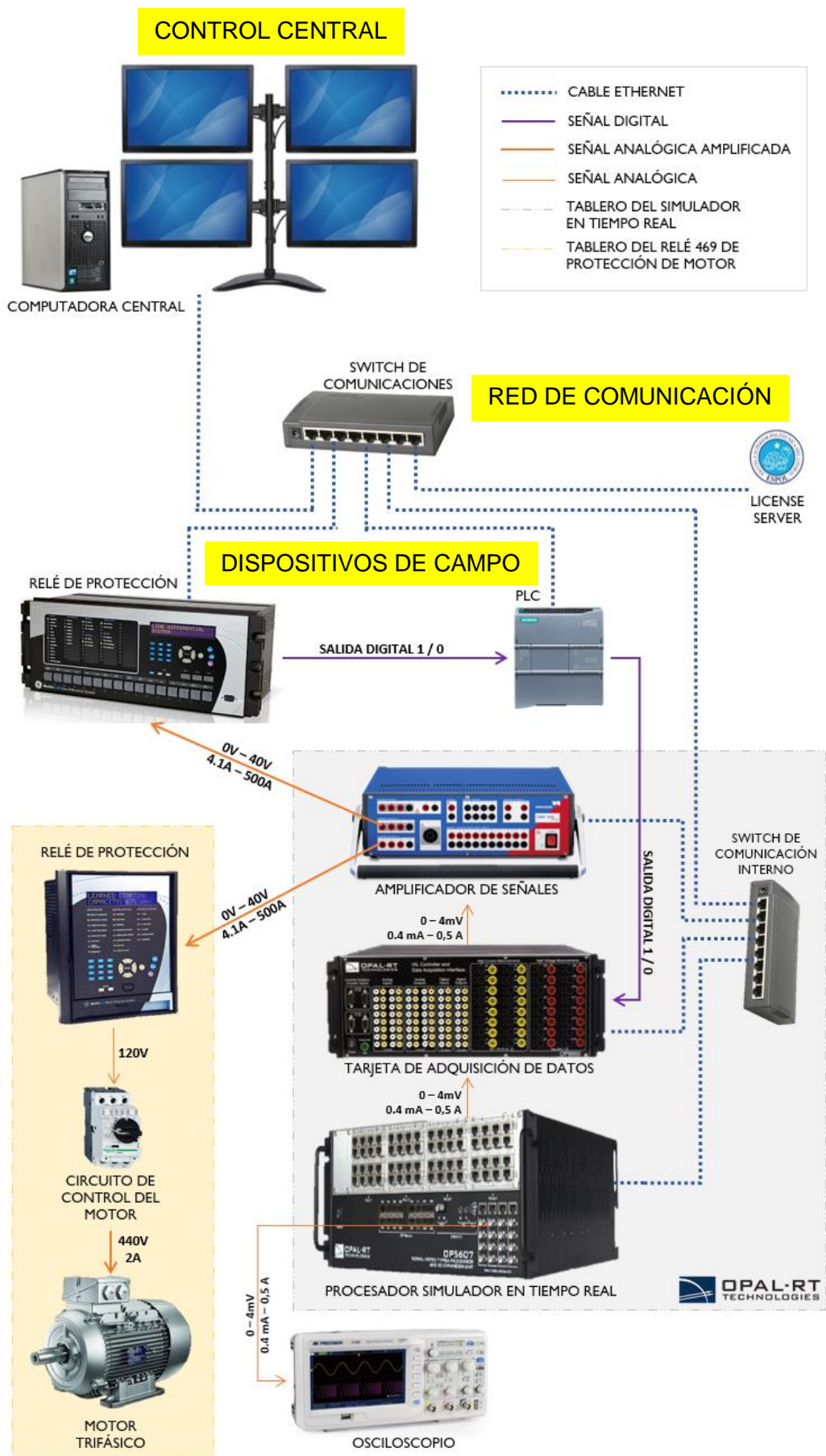


Figura 3.1 Arquitectura de las conexiones del sistema SCADA

3.2 Procedimiento para implementar el sistema SCADA

En esta sección, se describen los pasos para la implementación del sistema SCADA de acuerdo a la arquitectura mostrada en la figura 3.1. Las consideraciones de programación específicas para cada dispositivo se explican en detalle en las diferentes secciones del capítulo 2, de manera que, en este apartado, se hace especial énfasis en las conexiones físicas y procedimientos para habilitar la aplicación que se ha configurado en el desarrollo de este proyecto, sin considerar modificaciones adicionales.

3.2.1 Carga del modelo en el simulador en tiempo real desde RT-Lab

En la ventana principal de RT-Lab versión 11.0 se encuentra cargado el proyecto de nombre 'RelayModbustest', ya compilado y habilitado de manera que pueda ser cargado por el usuario en cualquier momento. La dirección del proyecto en el disco C de la computadora principal se muestra en la tabla 3.1.

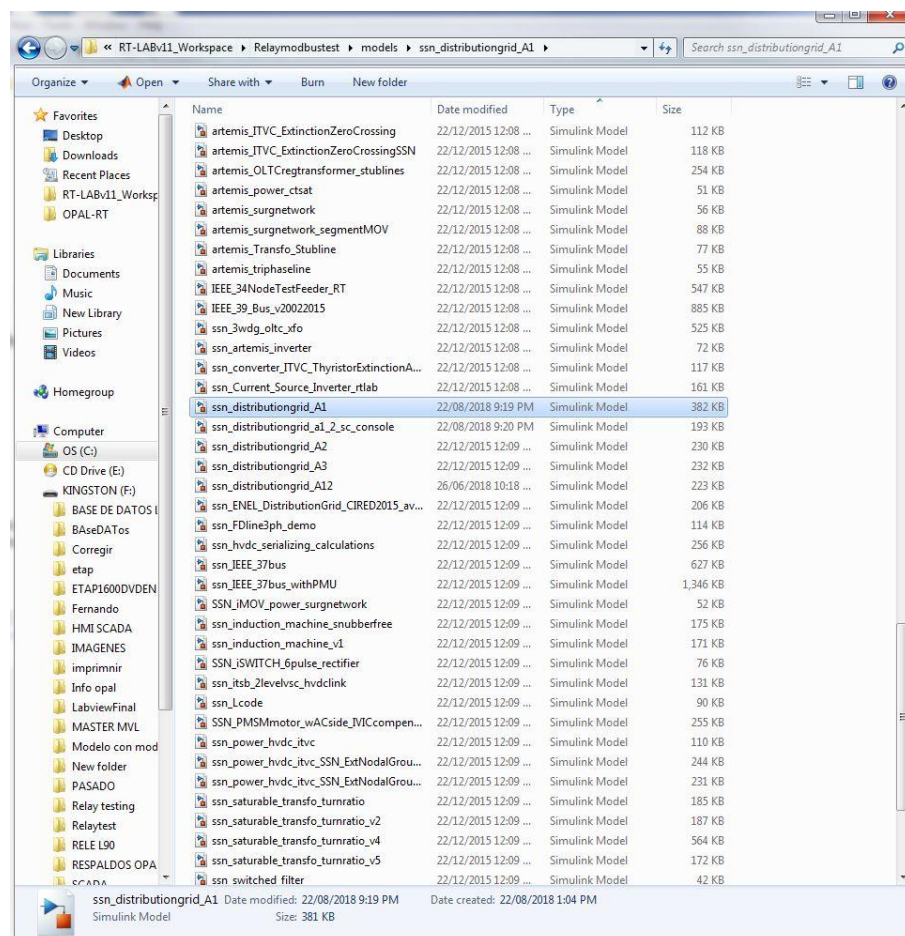


Figura 3.2 Directorio del proyecto en la computadora principal

En el directorio de ubicación del proyecto se encuentran, además, todos los archivos que utiliza el modelo para ejecutar las diferentes aplicaciones para las que ha sido configurado; sin embargo, el archivo de Simulink principal que se ejecuta al momento de cargar el proyecto es “ssn_distributiongrid_A1”, como se muestra en la figura 3.2.

Tabla 3.1 Ubicación del proyecto en la computadora principal

| Proyecto | Directorio | Modelo de Simulink cargado |
|-----------------|--|---|
| RelayModbustest | C:/Users/ESPOL/OPAL-RT/RT-LABv11_Workspace/RelayModbustest | C:/Users/ESPOL/OPAL-RT/RT-LABv11_Workspace/RelayModbustest/models/ssn_distributiongrid_A1/ssn_distributiongrid_A1 |

Adicionalmente, se debe garantizar en la ventana principal de RT-Lab, antes de cargar el modelo al simulador, que se reúnan las condiciones requeridas para ejecutar la prueba HIL resumidas en la tabla 2.12.

3.2.2 Comprobación de la salida de señales del simulador hacia el exterior

Para garantizar el funcionamiento correcto del proyecto antes de proceder a la conexión física de los relés, es deseable verificar las señales análogas que están siendo transmitidas desde la simulación hacia el exterior. Para esto, se debe conectar un osciloscopio a las salidas concéntricas que se encuentran en la parte inferior izquierda del procesador OP5607, conectando un cable ethernet desde el puerto RJ-45 que se encuentra en la parte superior de las salidas de osciloscopio, hacia uno de los puertos RJ-45 de los grupos de señales, que corresponden a las salidas mapeadas desde los bloques ‘AnalogOut’ del modelo de Simulink. En este caso, se debe conectar con el primer puerto RJ-45 ya que se mapearon las primeras seis salidas análogas desde el modelo. En la figura 3.3 se muestra la configuración descrita para la conexión del osciloscopio, que debe conectarse en los puertos que se conectan al cable Ethernet color naranja; en la figura 3.4 se muestra la señal esperada.

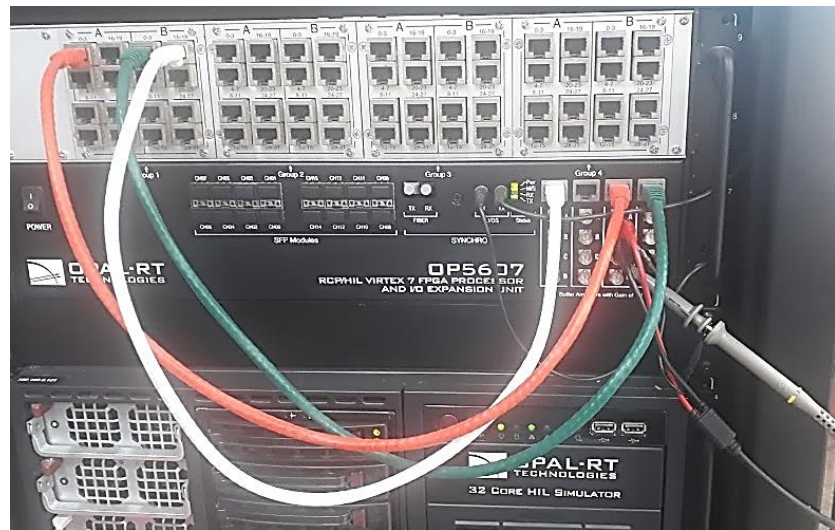


Figura 3.3 Conexión de osciloscopio a procesador OP5607

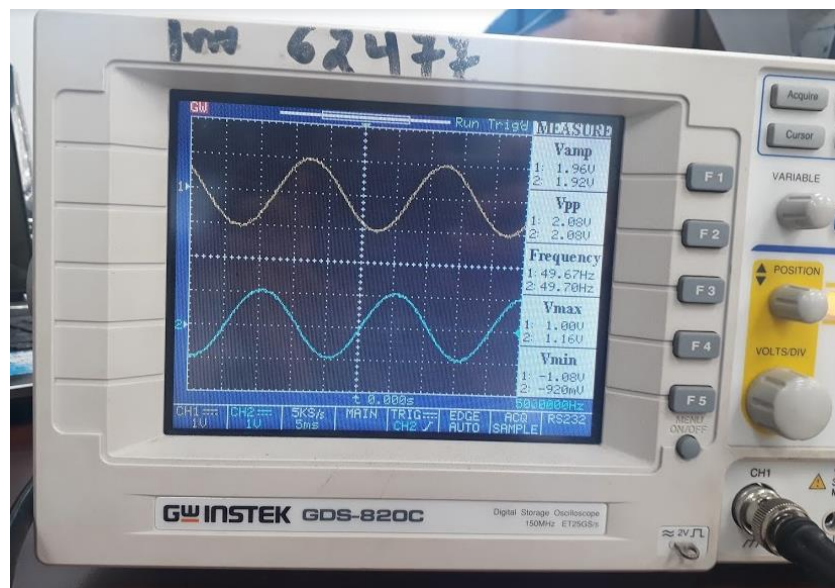


Figura 3.4 Fases a y b de la señal de voltaje de la barra BUS0

3.2.3 Configuración del amplificador de señales CMS 356

En la sección anterior se comprobó el correcto mapeo de señales análogas desde el modelo hacia el exterior con el osciloscopio, pero con la limitación de que las señales se encuentran dentro del rango admisible por el simulador de +/-16V, de manera que es necesario realizar la conexión de estas señales análogas de salida de la simulación hacia el amplificador CMS 356. En la parte posterior del simulador, del lado de las conexiones del procesador OP5607, se encuentran varios cables planos que llevan las señales análogas desde los puertos RJ-45 del OP5607

hacia la tarjeta de adquisición de datos OP8660; el procedimiento a seguir para la amplificación de las señales mapeadas es: identificar el cable plano que conecta las señales análogas del puerto RJ-45 al que se mapearon desde Simulink, que para este caso es el primer puerto, y conectar la otra punta del cable plano hacia el adaptador que se encuentra en la parte posterior del amplificador CMS 356, mostrado en la figura 3.5. De este adaptador, salen borneras color verde en las que se deben conectar las señales de corriente y voltaje que serán amplificadas en los puertos de la parte delantera del CMS 356. Se encuentran disponibles siete cables tipo bornera, de los cuales tres llevan señales de corriente, otros tres llevan señales de voltaje y uno de ellos la tierra. La conexión necesaria para la aplicación se muestra en la figura 3.6.

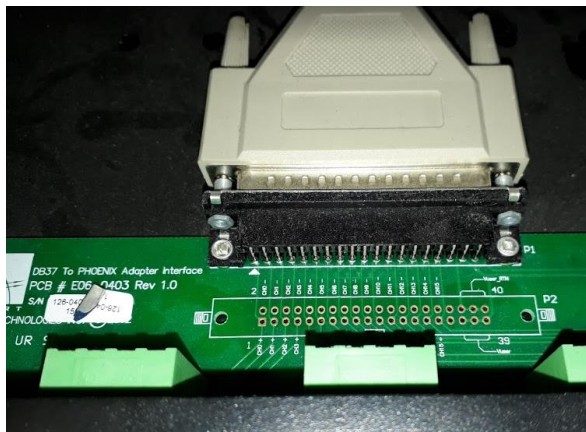


Figura 3.5 Adaptador para conexión del amplificador CMS 356



Figura 3.6 Conexiones del amplificador CMS 356

3.2.4 Conexión del relé de protección diferencial de línea L90

El diagrama de conexiones del relé L90 se presenta en la figura 3.10, que muestra la vista del tablero sobre el que se encuentra montado el relé, y que permite el acceso seguro hacia las borneras de alimentación de CTs y PTs del relé. El circuito de alimentación del relé no se encuentra graficado en el tablero, sin embargo, el equipo dispone de un conector a 120VAC instalado en borneras en la parte posterior del relé.

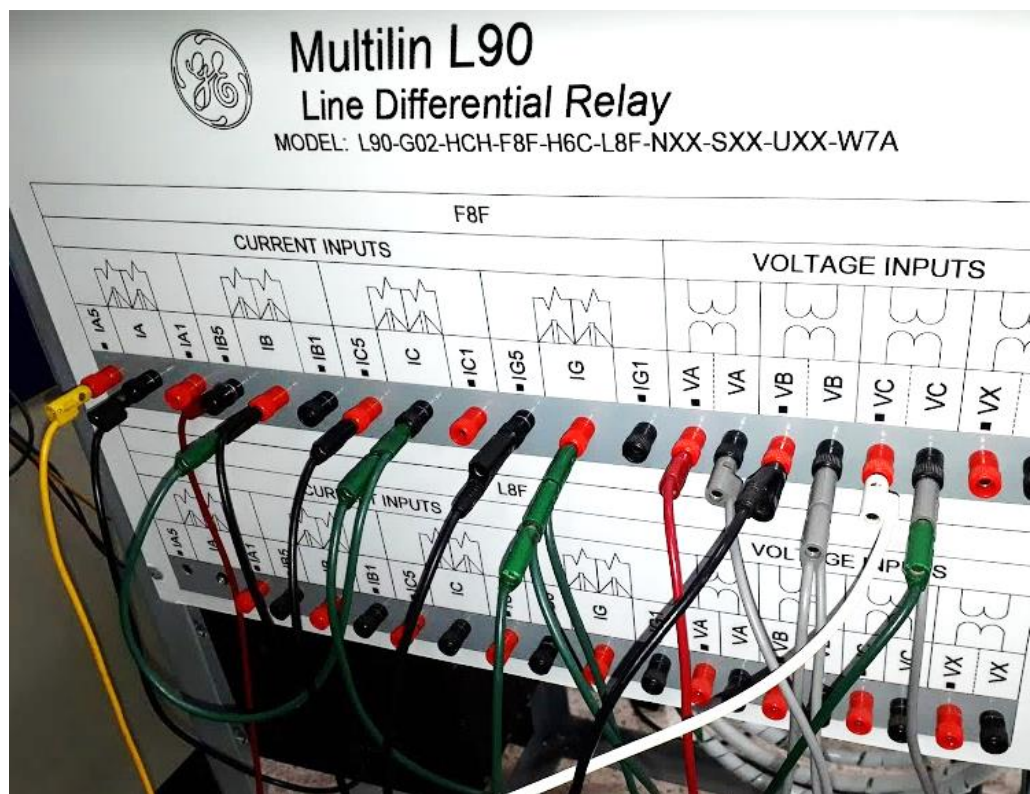


Figura 3.7 Conexiones del relé L90

Como se observa en la figura 3.8, las entradas de CTs se conectan a la primera salida trifásica de corriente del amplificador, y las entradas de PTs a la única salida trifásica de voltaje. Ambos relés comparten la misma señal de voltaje, y la corriente como un divisor de voltaje en esta configuración.



Figura 3.8 Salidas de corriente y voltaje del amplificador CMS 356

3.2.5 Conexión del relé de protección de motores 469

Para la conexión del relé 469, se especifica el diagrama esquemático de la instalación en la figura 3.11. Este relé está integrado en un tablero que contiene además un motor trifásico de 11kW, y el circuito de control para el arranque directo del motor.

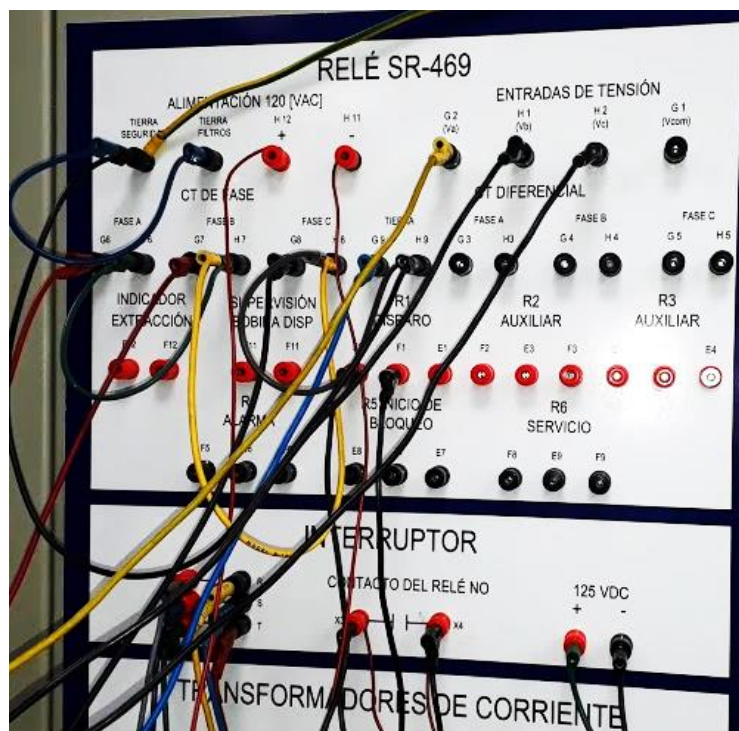


Figura 3.9 Conexión del relé 469

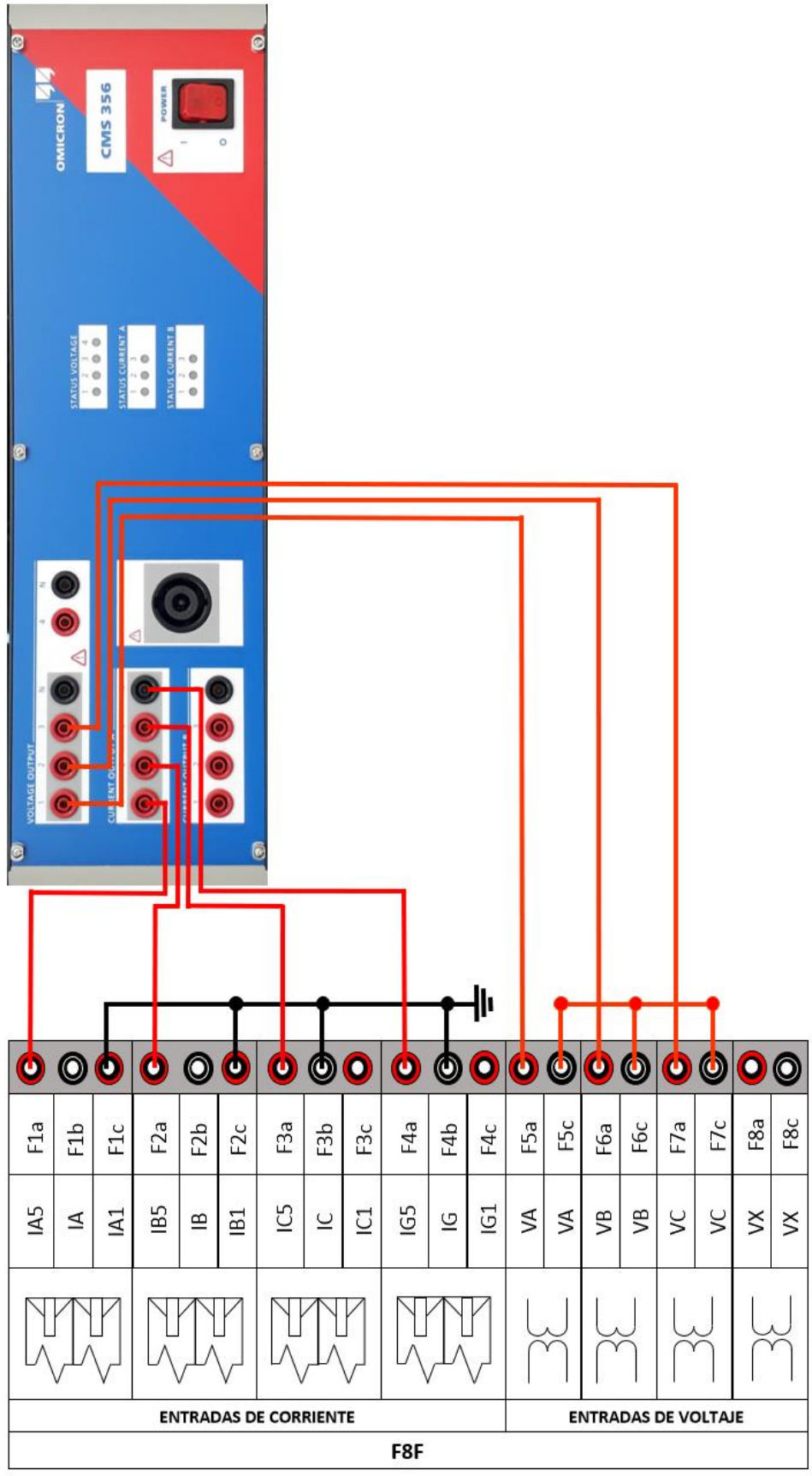


Figura 3.10 Conexiones del tablero del relé L90

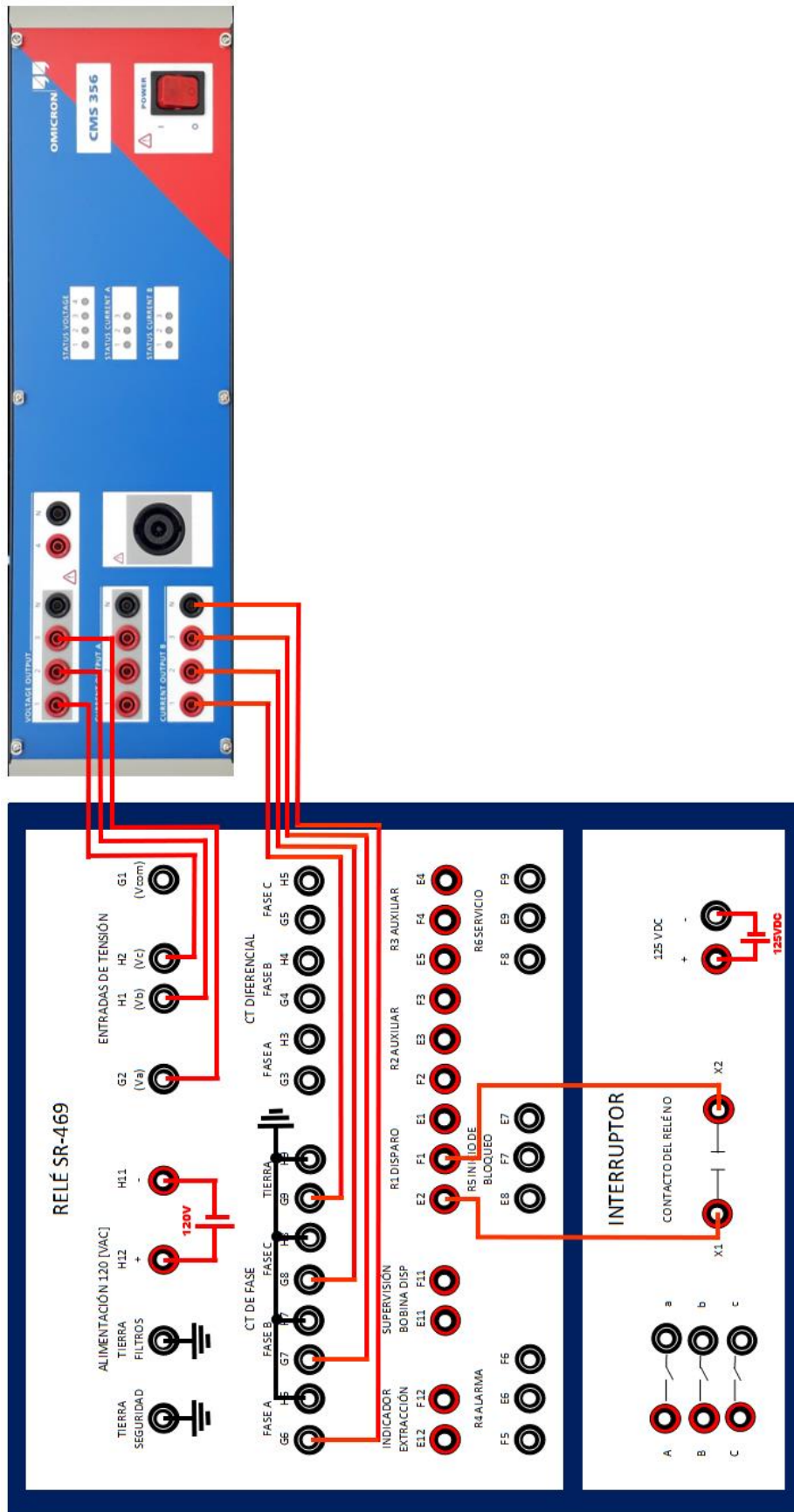


Figura 3.11 Conexiones del tablero del relé 469

De acuerdo a la figura 3.11, se energiza el circuito de control del relé a 120VAC, y se cablean las salidas de CTs y PTs hacia las salidas del amplificador CMS 356. Adicionalmente, se energiza el circuito de control del arrancador con una fuente de 125VDC para visualizar el disparo del interruptor por falla del relé.

La figura 3.12 muestra la conexión de ambos relés en paralelo, de acuerdo a las configuraciones individuales descritas en las secciones anteriores.



Figura 3.12 Conexión de relés de protección en paralelo

3.2.6 Conexión del motor trifásico

La práctica de accionamiento del relé de protección de motores 469 se complementa con la incorporación a la prueba de la marcha del motor trifásico de 11kW, por lo que se debe realizar el circuito de alimentación independiente para el motor. Se recomienda realizar la prueba de medición de aislamiento en las bobinas del motor, y verificar que la conexión de fases sea delta 440V antes de realizar la conexión, para garantizar que el motor se encuentra en un estado adecuado.



Figura 3.13 Medición de aislamiento en bobinas del motor trifásico

El circuito de alimentación del motor trifásico debe ser independiente del circuito de control del relé y de la operación de la red, ya que los valores máximos de voltaje que se manejan desde la simulación, habiendo pasado por el amplificador de señales, son hasta 42VAC. Por esta razón, se recomienda utilizar el tablero del transformador de 220V a 440V del laboratorio de Potencia, o conectarse directamente al punto de 480V del laboratorio de simulación en tiempo real; ambos medios se probaron con un correcto accionamiento del motor.



Figura 3.14 Alimentación 440V para motor trifásico

El arrancador del motor trifásico se encuentra incorporado en el tablero del relé 469, de manera que basta con conectar los bornes del interruptor hacia las entradas del motor, y energizar el circuito de control a 125VDC, como se muestra en las figuras 3.16 y 3.17.

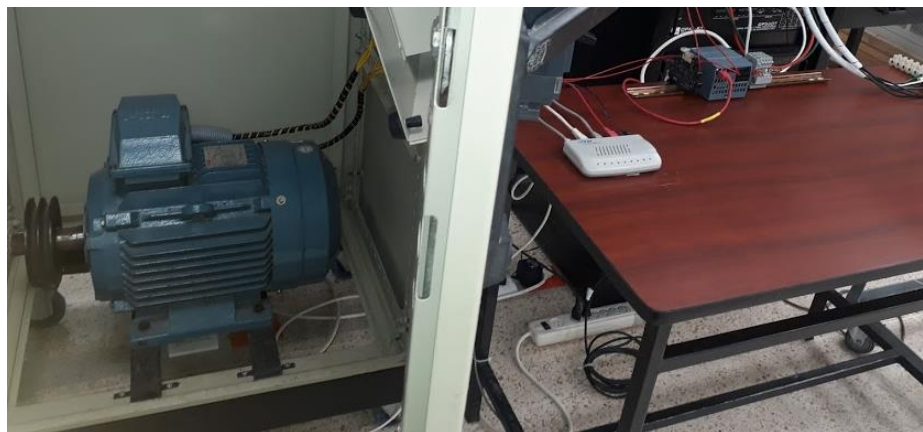


Figura 3.15 Motor trifásico en el tablero de prueba

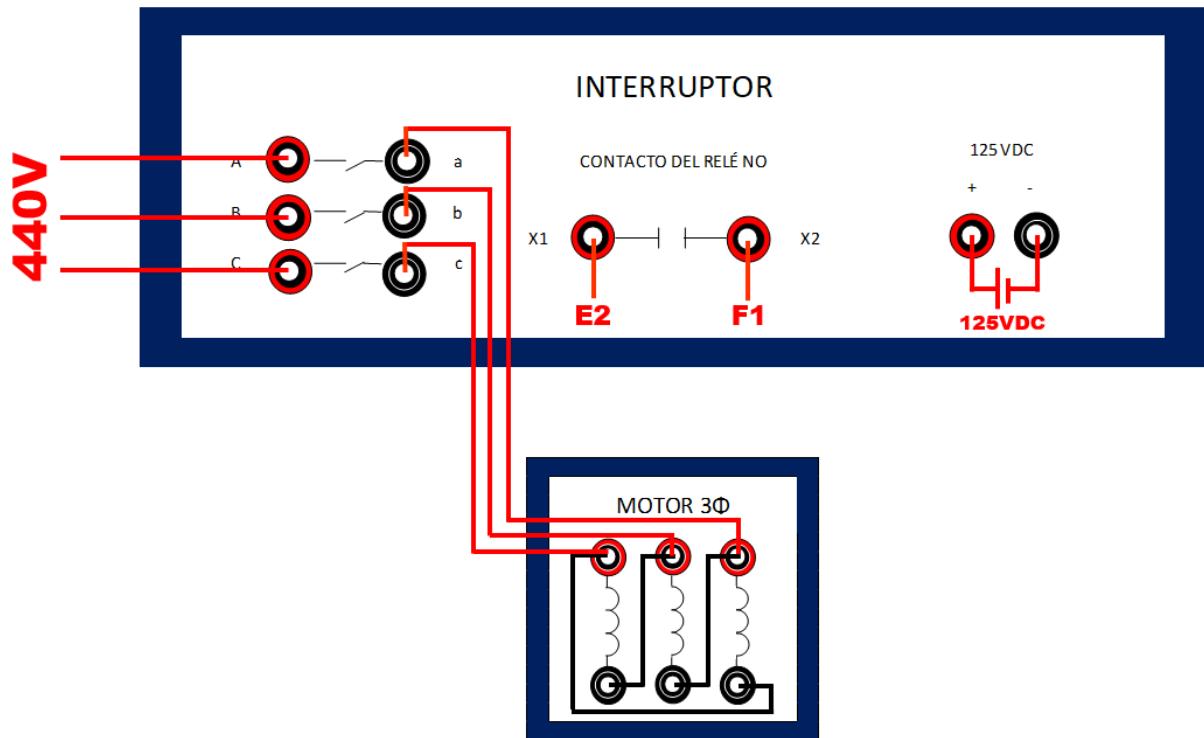


Figura 3.16 Conexión del motor trifásico desde el tablero



Figura 3.17 Arrancador del motor trifásico

3.2.7 Circuito de control de la señal de retorno al simulador

El circuito de control a 120V implementado para crear una señal de retorno del relé de protección hacia el simulador en tiempo real, como paso final de la configuración HIL, se realizó aprovechando el contacto de disparo o 'trip' del accionamiento del relé frente a una falla. Al detectar una falla por sobrecorriente, el relé de protección cierra un contacto que ejecuta la orden de disparo del interruptor que debe abrir la línea de alimentación eléctrica evitando que se propague la falla; para este control, el contacto de disparo permite energizar la bobina de un relé auxiliar, cuyo contacto normalmente cerrado, al energizarse, se abre, enviando una pequeña señal de voltaje del orden de 0.11VAC, que retorna al simulador a través de la tarjeta de adquisición de datos como una entrada análoga, cuyo bloque de mapeo en Simulink se define como 'AnalogIn' en el modelo ejecutándose en tiempo real.

En este punto del control, se incorpora la lógica de habilitación del PLC, que interrumpe la señal de retorno al simulador con una salida digital Q0.0, cuyo accionamiento se debe realizar desde el interfaz del SCADA a través de comunicación Modbus TCP/IP. Este circuito se implementa con el fin de controlar la entrada de los relés de protección a la simulación habilitando o inhabilitando la señal de retorno que controla un interruptor simulado. Cuando la salida del PLC está a un nivel bajo (cero), en la simulación se envía un valor alto (uno) al interruptor simulado que está siendo controlado por el relé de protección físico; por otro lado, cuando la salida del PLC se cambia a un valor alto desde el interfaz del SCADA, el valor del voltaje de retorno se envía hacia un switch automático en la simulación, que al captar un valor mayor que cero en la entrada análoga, envía un valor de cero al interruptor del modelo en Simulink, simulando la apertura del interruptor y el despeje de la falla en la línea. La figura 3.18 muestra la configuración del circuito de control para la señal de retorno, utilizando el contacto de disparo del relé L90, conectado en serie a un contacto seco del mismo relé a 48VDC, para energizar la bobina del relé auxiliar y realizar la aplicación descrita.

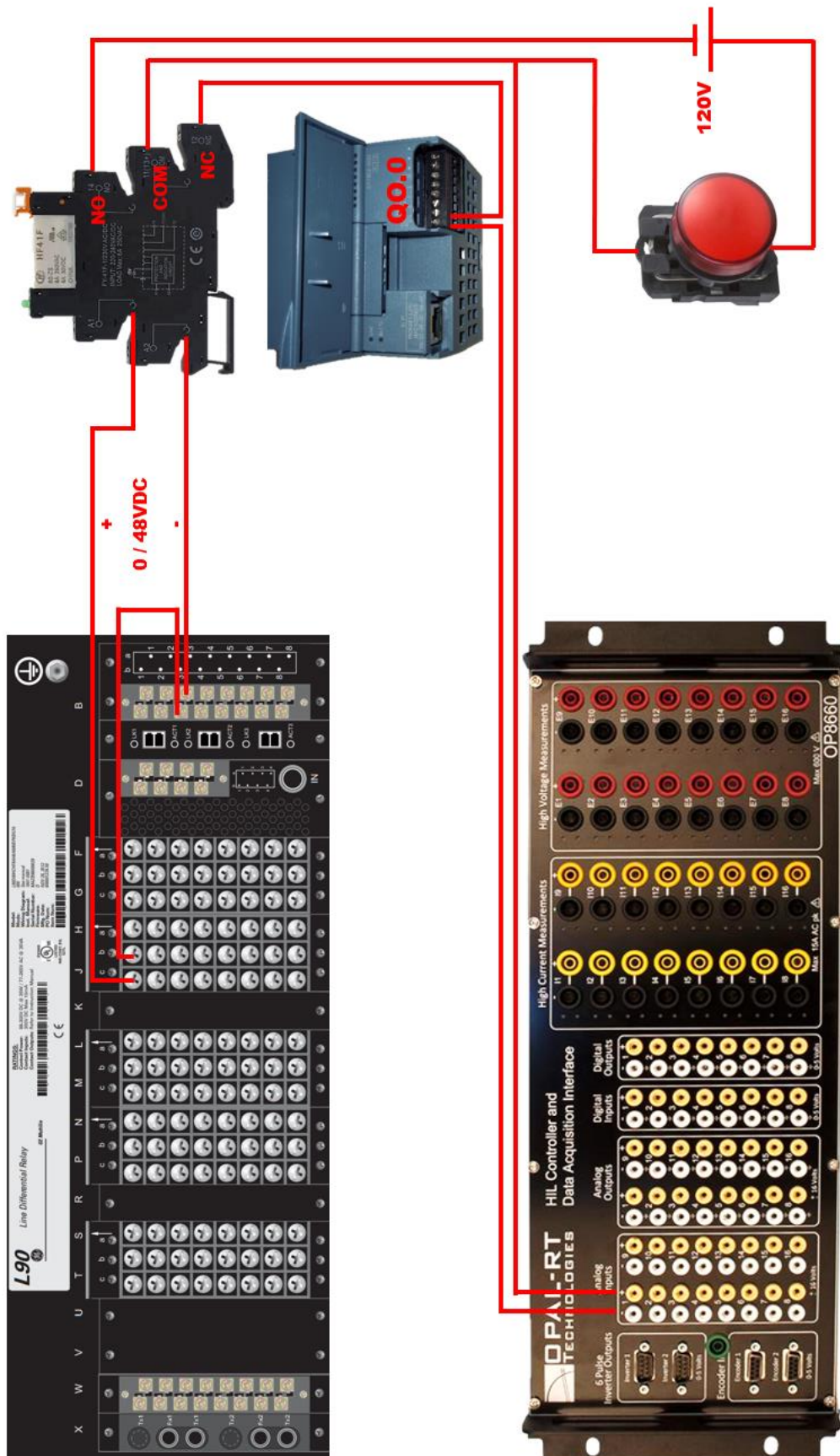


Figura 3.18 Circuito de control para la señal de retorno al simulador



Figura 3.19 Circuito de control para el retorno de señal al simulador

3.2.8 Interfaz gráfica en Labview

Como se explica en el capítulo dos, se establece la integración de la comunicación entre los dispositivos del sistema SCADA utilizando el software Labview, por lo que la interfaz gráfica para la supervisión y control de la información transmitida desde los dispositivos de campo que operan en la red simulada, se desarrolla en el ambiente de programación gráfica de Labview.

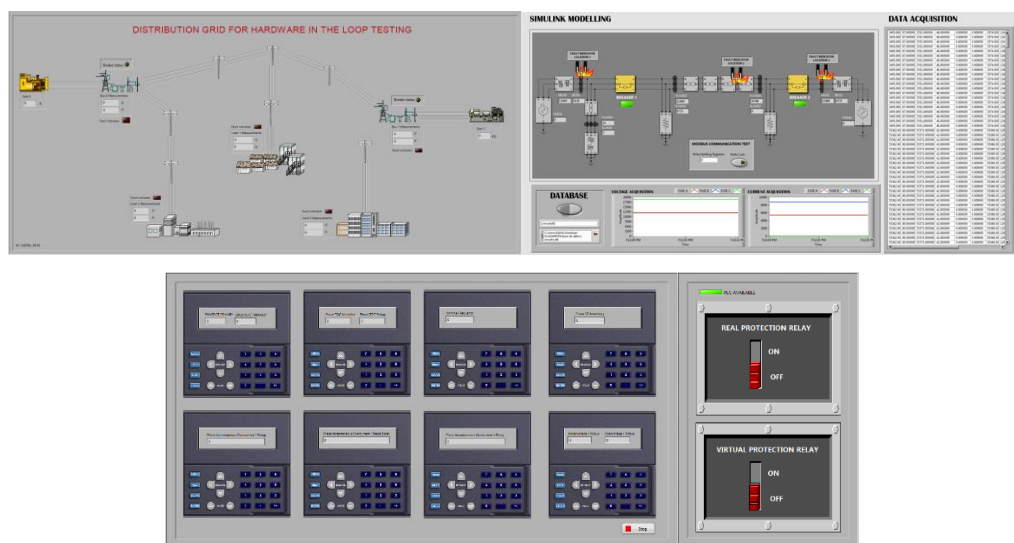


Figura 3.20 Ventanas de control del sistema SCADA

3.2.9 Disparo de los relés de protección por falla en la red simulada

Para probar el accionamiento de los relés, se genera una falla desde la consola de RT-Lab y se observa que los relés realizan el disparo correcto con dos respuestas esperadas: el relé L90 envía una señal para la apertura del interruptor simulado mediante la entrada análoga y previo a la habilitación de la salida digital del PLC, y el relé 469 dispara el interruptor real provocando el paro del relé por protección. Las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 muestran los resultados de la prueba.



Figura 3.21 Disparo del relé L90



Figura 3.22 Disparo del relé 469



Figura 3.23 Disparo del interruptor del motor



Figura 3.24 Sistema SCADA implementado

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Se desarrolló la arquitectura de un sistema SCADA con el propósito de aprovechar y maximizar el potencial de los recursos disponibles en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad, por lo que no se requirió realizar inversión adicional.

La integración de la comunicación entre todos los dispositivos del sistema SCADA, utilizando el protocolo Modbus TCP/IP, se logró utilizando servidores de comunicación en el software Labview, en el que además se desarrolló la interfaz gráfica para el monitoreo y control del sistema operando en tiempo real.

La incorporación del PLC S7-1200 a la red permitió el control de la operación en tiempo real de los relés de protección, a través de una lógica de control programada y cargada al dispositivo mediante el software TIA Portal, en la que una señal de accionamiento desde el sistema SCADA habilitó una salida digital del PLC, permitiendo el paso de la señal de disparo de los relés de protección como retorno al simulador. Se realizó así para permitir la visualización de la falla en la red, y con ella la operación de los relés para esa condición de operación, sin que se produzca el despeje de la falla de acuerdo a la programación del relé, sino según la orden del operador del SCADA.

Se modeló un sistema de distribución con capacidad de cortocircuito en la plataforma de desarrollo RT-Lab del simulador en tiempo real OPAL-RT, para la conexión 'Hardware in The Loop' de dos relés de protección del fabricante General Electric, y se realizó la prueba de su accionamiento en diferentes escenarios de operación de la red eléctrica simulada, incluyendo la marcha de un motor y su paro por disparo de la protección; se comprobó el funcionamiento correcto de los dos relés probados.

Recomendaciones

Se recomienda extender el estudio de este t3pico de investigaci3n hacia los siguientes semestres, ya que existe un alto potencial de desarrollo sobre la base de investigaci3n presentada en este proyecto que, con el debido tiempo, permitir3 alcanzar m3s y mejores resultados.

Es recomendable manejar los distintos niveles de voltaje de las instalaciones el3ctricas de este proyecto cuidando las normas de seguridad para trabajos el3ctricos, y rigi3ndose con precisi3n a las instrucciones descritas en este informe y en los manuales del fabricante de cada uno de los dispositivos del sistema.

Con el objeto de mejorar la implementaci3n realizada, se recomienda el desarrollo de m3dulos de soporte para los rel3s de protecci3n m3s adecuados a las limitaciones f3sicas de la instalaci3n, que corresponden a la ubicaci3n de las entradas de corriente y voltaje de los rel3s con respecto a las salidas del simulador en tiempo real. Con la implementaci3n de estructuras mejoradas para la disposici3n f3sica de los dispositivos de campo, se reducir3an al m3nimo los riesgos implicados a los empates que deben realizarse entre los cables banana-banana disponibles para la instalaci3n, que pueden ser causantes de puntos calientes que generen posibles corto-circuitos. Adem3s, se recomienda la compra de cables el3ctricos de longitudes y capacidades adecuadas para soportar los niveles de cortocircuito que circulen del simulador hacia los rel3s de protecci3n.

La pr3ctica de conexi3n y prueba de rel3s de protecci3n que se lleva a cabo en el laboratorio de potencia puede realizarle en el laboratorio de simulaci3n en tiempo real sin ning3n problema utilizando el modelo presentado en este proyecto. Es recomendable estudiar la operaci3n Hardware in The Loop con otros protocolos de comunicaci3n como OPC UA o DNP3.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. SIDGE. “Redes Inteligentes y Generación Distribuida” en Programa Redes Inteligentes Ecuador. 2017.
- [2] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. El ministerio de electricidad presentó su programa “Redes Inteligentes en Ecuador”. [Online]. Disponible en: www.energia.gob.ec
- [3] National Instruments. Biblioteca SQLite para Labview del Dr. James Powell. [Online]. Disponible en: www.ni.com
- [4] Youtube. E- Learning SCADA Lesson 1- What is SCADA? [Online]. Disponible en: www.youtube.com
- [5] Electrical Engineering Portal. Twelve golden rules for specifying and implementing a good SCADA system. [Online]. Disponible en: www.electrical-engineering-portal.com
- [6] Modbus. Modbus application protocol specification V1.1b3. [Online]. Disponible en: www.Modbus.org
- [7] Youtube. OSI Model (OSI Reference Model): The 7 Layers Explained [Online]. Disponible en: www.youtube.com
- [8] Acromag Inc. “Introduction to Modbus TCP/IP”. Wixom, U.S.A. 2005.
- [9] OPAL-RT Technologies (2015). OP5607 User Manual. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com
- [10] OPAL-RT Technologies (2015). OP8660 User Manual. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com
- [11] OPAL-RT Technologies (2018). The State-Space Nodal Solver for ARTEMIS. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com

- [12] OPAL-RT Technologies. Knowledge Base (20 de diciembre de 2016). How to use multiple cores in parallel with ARTEMIS SSN. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com
- [13] GE Multilin. "L90 Line Differential Relay. UR Series Instruction Manual". Markham, Ontario, Canada. 2006, pp. 1-2.
- [14] Real Time Automation. MODBUS RTU. [Online]. Disponible en: www.rtaautomation.com
- [15] SourceForge (3 de septiembre de 2018). QModMaster. [Online]. Disponible en: www.sourceforge.net
- [16] National Instruments. MODBUS Library for Labview. [Online]. Disponible en: www.ni.com.
- [17] OPAL-RT Technologies. Knowledge Base (17 de febrero de 2017). How to correctly separate the Ethernet communication protocols traffic from the RT-LAB Probe Control traffic in distinct networks. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com
- [18] GE Multilin. "469 Motor Management Relay. Instruction Manual". Markham, Ontario, Canada. 2010, pp. 4-46.
- [19] Mathworks. Simscape Electrical. Model and simulate electronic, mechatronic, and electrical power systems. [Online]. Disponible en: www.mathworks.com
- [20] OPAL-RT Technologies. Knowledge Base (7 de septiembre de 2018). DEMO: Small distribution grid for relay testings. [Online]. Disponible en: www.OPAL-RT.com
- [21] ETAP Powering Success. Electrical Power System Analysis & Operation Software. [Online]. Disponible en: www.etap.com
- [22] RITZ Instrument Transformers. Transformadores de medida en media tensión. [Online]. Disponible en: www.ritz-international.com.

ANEXOS

1. Levantamiento de equipos que dispongan de protocolos de comunicación habilitados en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electricidad

LABORATORIO DE SISTEMAS DE POTENCIA

| Equipo | Marca | Protocolo | Puerto |
|--------------------------------------|------------------|--|-------------------------------------|
| F35 Multiple Feeder Management Relay | General Electric | DNP, IEC61850, MODBUS, IEC60870 | 9-pin RS232C serial port |
| 469 Motor Management Relay | General Electric | Modbus, Devicenet, Ethernet | RS485, RS232, Ethernet |
| L90 Line Differential Relay | General Electric | DNP, IEC61850, MODBUS, IEC60870, fiber optic | RS485, RS232, fiber optic |
| T35 Transformer Management Relay | General Electric | DNP, IEC61850, MODBUS, IEC60870 | RS485, RS232, Ethernet, fiber optic |

LABORATORIO DE CONTROLES INDUSTRIALES

| Equipo | Marca | Protocolo | Puerto |
|---|---------|------------------------------------|--|
| Variador de frecuencia Siemens | Siemens | USS | Puerto RS-485 |
| PLC Simatic S7-200 | Siemens | Modbus, USS, Profibus | Puerto RS-485 |
| Simatic NET CP 243-1 Communications processor for industrial Ethernet | Siemens | BOOTP, Ethernet, TCP/IP, XPUT/XGET | Connector for I/O bus, 8-pin RJ45 socket |
| Arrancador suave | WEQ | RS-232C | Puerto serial RS-232 |
| Touch Panel HMI | Siemens | LAN, USB | Ethernet / USB |
| Variador de frecuencia Fr-S520 | Terco | RS-485 | Puerto RS-485 |

OTROS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

| Equipo | Marca | Puerto |
|--|------------------|--------------------------------|
| Omicron CT Analyzer | Omicron | 9-pole SUB-D connector, male |
| Micro-ohmmeter model 6250 | AEMC instruments | Serie / Ethernet |
| Megger MIT 520/2 | Megger | HDMI |
| Ground Tester Model 6470 | AEMC instruments | USB |
| Power Pad Model 3945-B | AEMC instruments | RS-232 con acoplamiento óptico |
| PMM-1 Power Multimeter | Megger | HDMI |
| Omicron CPC 100 | Omicron | Serie / Ethernet |
| BK Precision 5492 5 1/2 Digital Multimeter | BK Precision | HDMI |
| Meter accuracy verifier model MAV2 | | Ethernet |

2. Conexión del relé de protección de motores 469

Estableciendo la comunicación del relé de protección SR469 al PC host por puerto serial

Se consiguió establecer la comunicación al computador del simulador desde el relé a través del puerto frontal serial, dado que conseguimos el cable serial y que el PC tiene un puerto de este tipo. Fue necesario instalar en el computador el software del relé, en el que se logró establecer la comunicación identificando el puerto COM1 al que conectamos el cable.



Conexión del relé de protección SR469 a motor de inducción

Se realizaron las conexiones en el tablero del relé, a fin de estudiar y verificar el cableado del relé para la protección de un motor, identificar las salidas y entradas que requiere para la operación ante una falla y posteriormente conectarlas al simulador. Además, se realizó la prueba de marcha del motor y simulación de falla para tomar la medición de las corrientes de operación antes y después de la falla, y compararlas con las corrientes simuladas en nuestra red en el simulador. Se habilitó el punto de 480V y se armó una extensión para la alimentación del motor.



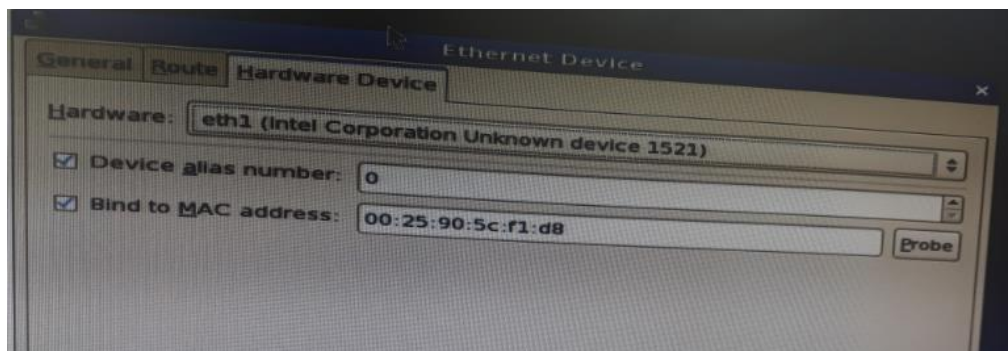
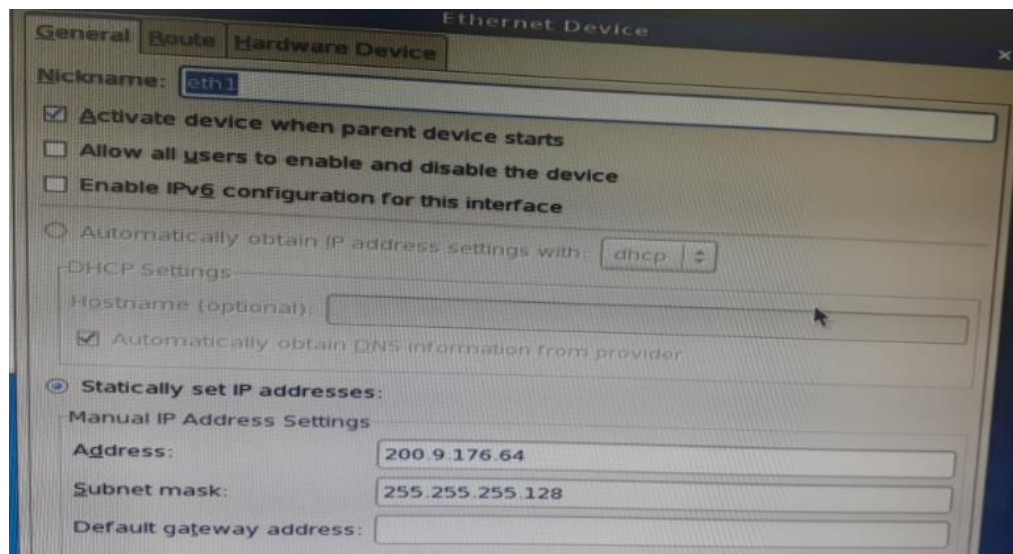
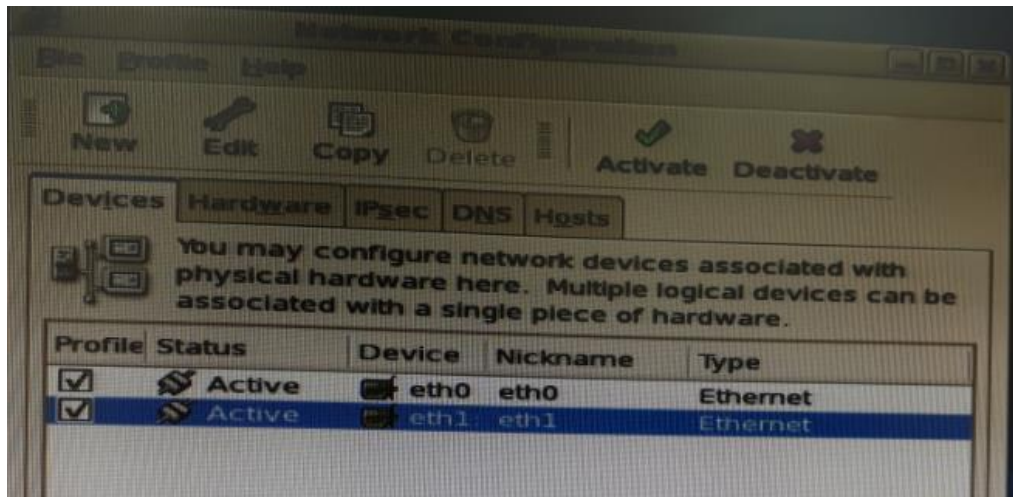
Se realizaron las conexiones de acuerdo al manual del relé y tomando como referencia la guía de prácticas del laboratorio, debido a que la guía omitía ciertas conexiones importantes para la instalación, considerando que no se está usando el tablero del transformador que hay en el laboratorio.



Se presentaron problemas al momento de energizar el relé debido a que mostraba falla de LOCKOUT que es el bloqueo del arranque a causa de una falla persistente, que no existía dado que el motor aún no se había arrancado. Se logró solucionar con la guía del manual, leyendo cada uno de los parámetros, habilitando únicamente los parámetros requeridos para la prueba y configurando correctamente los límites de operación.

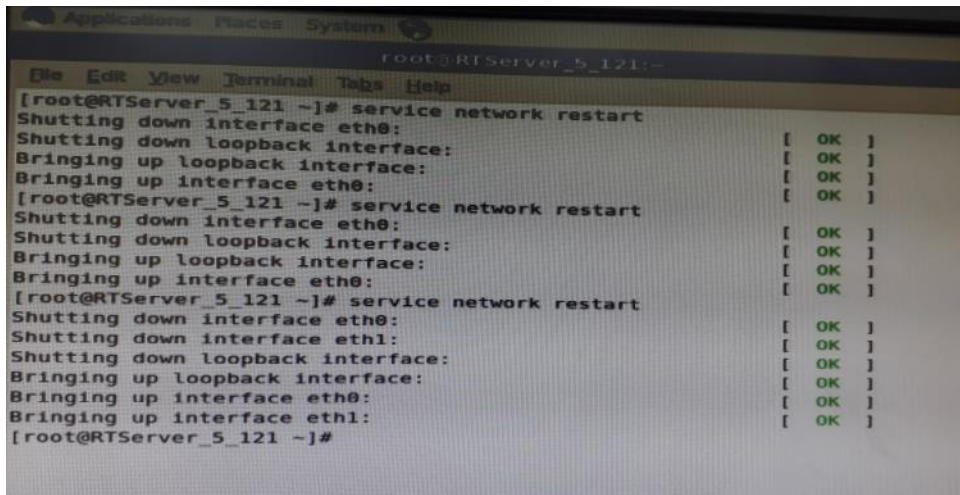
3. Configuración en ambiente Linux del segundo puerto ethernet del simulador en tiempo real OPAL-RT

Programación en ventana Network Configuration en Redhat:



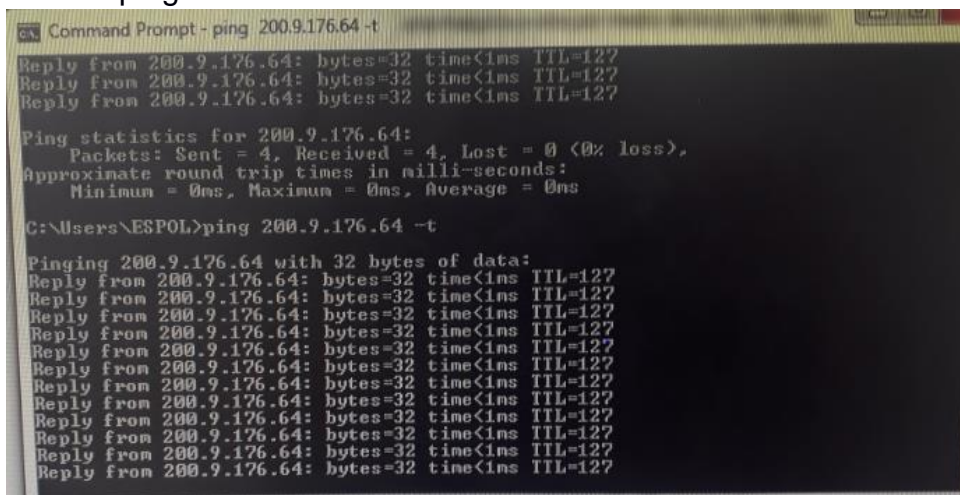
Verificación de comunicación a la red

- Prueba en root con comando #service network restart: ok



```
root@RTServer_5_121:~# service network restart
Shutting down interface eth0: [ OK ]
Shutting down loopback interface: [ OK ]
Bringing up loopback interface: [ OK ]
Bringing up interface eth0: [ OK ]
root@RTServer_5_121:~# service network restart
Shutting down interface eth0: [ OK ]
Shutting down loopback interface: [ OK ]
Bringing up loopback interface: [ OK ]
Bringing up interface eth0: [ OK ]
root@RTServer_5_121:~# service network restart
Shutting down interface eth0: [ OK ]
Shutting down interface eth1: [ OK ]
Shutting down loopback interface: [ OK ]
Bringing up loopback interface: [ OK ]
Bringing up interface eth0: [ OK ]
Bringing up interface eth1: [ OK ]
root@RTServer_5_121:~#
```

- Prueba ping: ok



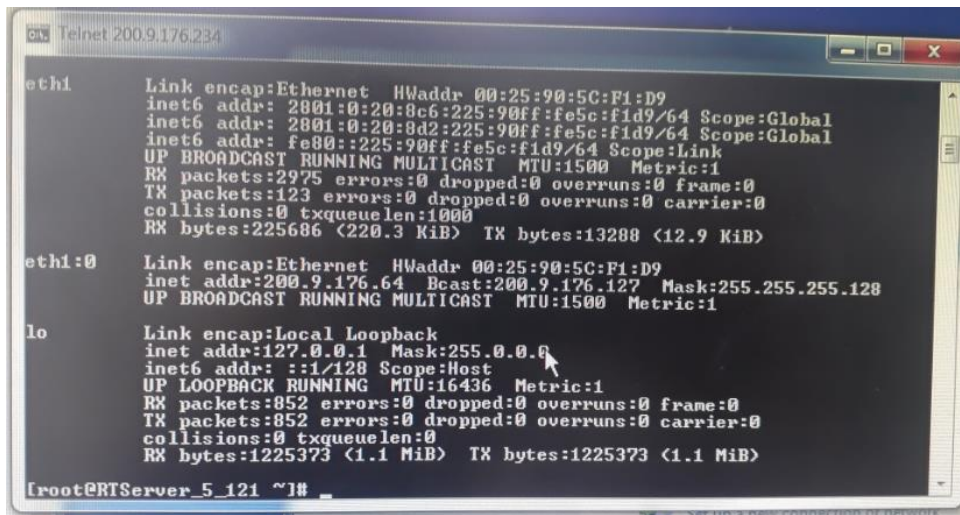
```
Command Prompt - ping 200.9.176.64 -t
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127

Ping statistics for 200.9.176.64:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 0ms, Average = 0ms

C:\Users\ESPOL>ping 200.9.176.64 -t

Pinging 200.9.176.64 with 32 bytes of data:
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
Reply from 200.9.176.64: bytes=32 time<1ms TTL=127
```

- Prueba telnet: ok



```
Telnet 200.9.176.234

eth1      Link encap:Ethernet  HWaddr 00:25:90:5C:F1:D9
          inet6 addr: 2001:0:20:8c6:225:90ff:fe5c:f1d9/64 Scope:Global
          inet6 addr: 2001:0:20:8d2:225:90ff:fe5c:f1d9/64 Scope:Global
          inet6 addr: fe80::225:90ff:fe5c:f1d9/64 Scope:Link
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:2975 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:123 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:225686 (220.3 KiB)  TX bytes:13288 (12.9 KiB)

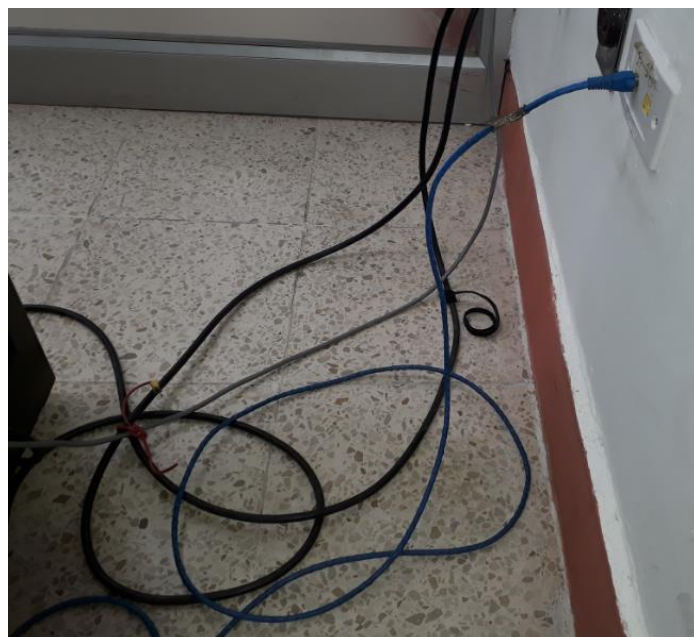
ethi:0    Link encap:Ethernet  HWaddr 00:25:90:5C:F1:D9
          inet addr:200.9.176.64 Bcast:200.9.176.127 Mask:255.255.255.128
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1

lo        Link encap:Local Loopback
          inet addr:127.0.0.1 Mask:255.0.0.0
          inet6 addr: ::1/128 Scope:Host
          UP LOOPBACK RUNNING  MTU:16436  Metric:1
          RX packets:852 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:852 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:0
          RX bytes:1225373 (1.1 MiB)  TX bytes:1225373 (1.1 MiB)

root@RTServer_5_121 ~]#
```

Configuración física

- Cable rojo: Desde target a switch interno de comunicación
- Cable azul: Desde switch de comunicación hacia red de laboratorio



4. Formato para lectura de variables del relé L90 en Labview

- 1 DÍGITO: Por ser Holding Register, va el número **4**
- 2 DÍGITO: Se escribe la dirección EN DECIMAL del Modbus memory map del relé L90, pero se suma 1 al número

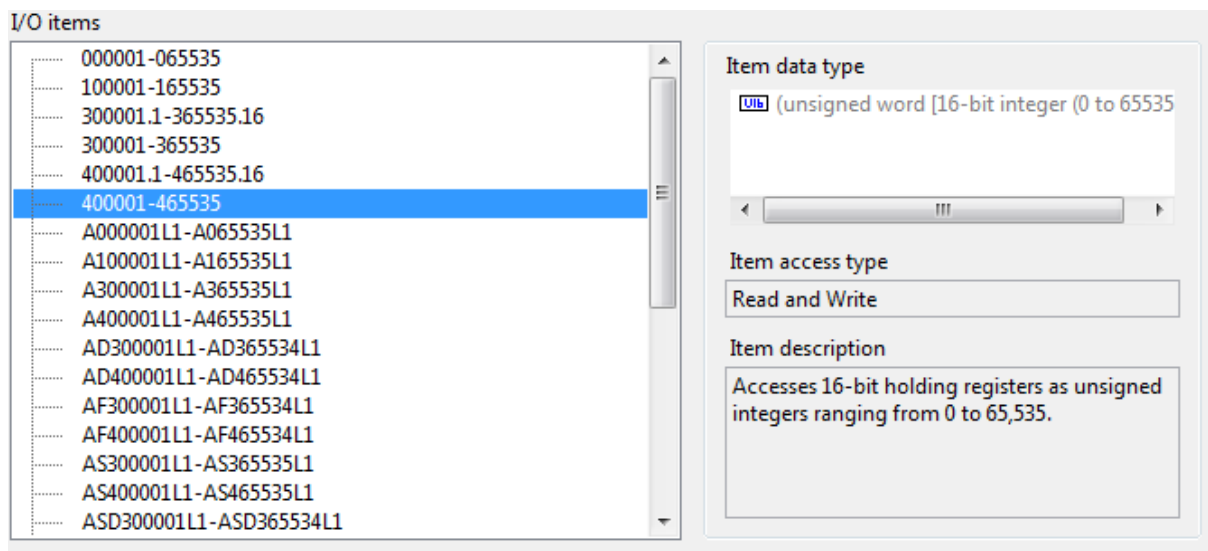
Ejemplo:

Para leer el command password setting, que tiene la dirección como se muestra en la figura:

| Passwords (Read/Write Command) | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------|-----|---|------|---|
| 4000 | Command Password Setting | 0 to 4294967295 | --- | 1 | F003 | 0 |
| Passwords (Read/Write Setting) | | | | | | |
| 4002 | Setting Password Setting | 0 to 4294967295 | --- | 1 | F003 | 0 |
| Passwords (Read/Write) | | | | | | |
| 4008 | Command Password Entry | 0 to 4294967295 | --- | 1 | F003 | 0 |
| 400A | Setting Password Entry | 0 to 4294967295 | --- | 1 | F003 | 0 |

Donde el número 4000 es la dirección de la variable en formato hexadecimal, y el valor F003 es el formato en que se presenta, que según la tabla de formatos es U32 (32 bit signed Big-endian)

En Labview se creará la variable compartida de tipo 400001-465535 que es la correspondiente a las variables de tipo Holding Register

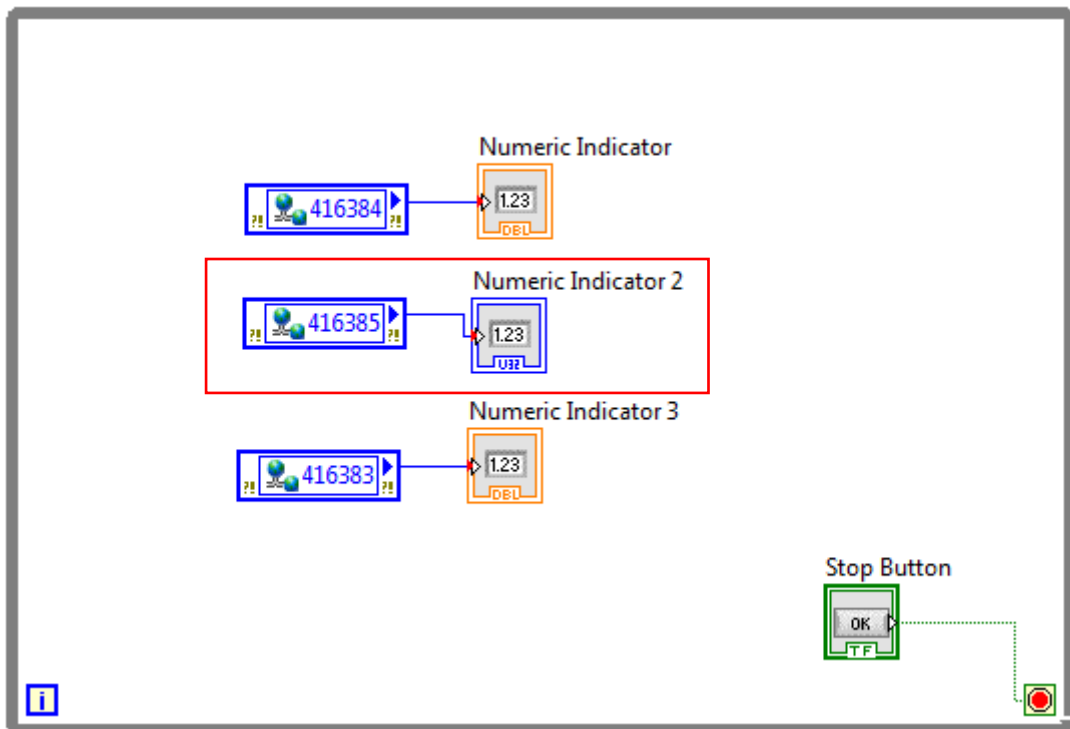


Se seleccionará Add range, se escogerá 1, y se colocará el nombre de la variable que queremos leer.

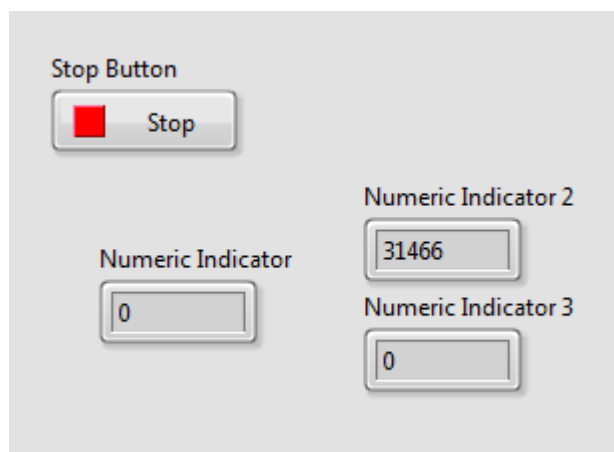
En este ejemplo, se quiere leer la variable Command Password Setting en la dirección 4000, ya convertido a decimal es la dirección 16384. Entonces, en Labview,

se nombra a la variable compartida que se está creando como **416385** ya que se debe sumar 1 al último dígito.

Esa variable se cableará en el VI hacia un indicador numérico de tipo U32, como se muestra en la figura:



Al ejecutarlo, se leerá el valor almacenado en el relé según el formato en que se definió como Representation en Labview



Se debe cambiar el formato de acuerdo a la tabla de Labview o al software Enervista, donde se puede visualizar el tipo de dato con más facilidad.

5. Direcciones para acceder a variables del relé de protección L90, tomadas del Modbus Memory Map, en el manual del fabricante [13]

| Dirección | | Dirección Labview | Nombre de Registro | Acceso | Formato | |
|-----------|-------|-------------------|---|-----------|---------|-------------------------|
| Hex | Dec | | | | Tipo | Descripción |
| 1800 | 6144 | 406145 | Source 1 Phase A Current RMS | READ ONLY | F060 | FLOATING POINT |
| 1802 | 6146 | 406147 | Source 1 Phase B Current RMS | READ ONLY | F060 | FLOATING POINT |
| 1804 | 6148 | 406149 | Source 1 Phase C Current RMS | READ ONLY | F060 | FLOATING POINT |
| 1806 | 6150 | 406151 | Source 1 Neutral Current RMS | READ ONLY | F060 | FLOATING POINT |
| 1808 | 6152 | 406153 | Source 1 Phase A Current Magnitude | READ ONLY | F002 | UR_SINT16 |
| 180A | 6154 | 406155 | Source 1 Phase A Current Angle | READ ONLY | F060 | FLOATING POINT |
| 4080 | 16513 | 416514 | Modbus Slave Address | READ ONLY | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4087 | 16519 | 416520 | IP ADDRESS | READ ONLY | F003 | UNSIGNED 32 BIT INTEGER |
| 4089 | 16521 | 416522 | IP SUBNET MASK | READ ONLY | F003 | UNSIGNED 32 BIT INTEGER |
| 408B | 16523 | 416524 | GATEWAY ADDRESS | READ ONLY | F003 | UNSIGNED 32 BIT INTEGER |
| 40A0 | 16544 | 416545 | TCP Port Number for the Modbus protocol | READ ONLY | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4480 | 17536 | 417537 | PHASE CT PRIMARY | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4481 | 17537 | 417538 | PHASE CT SECONDARY | R/W | F123 | BOOLEAN |
| 4482 | 17538 | 417539 | GROUND CT PRIMARY | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4483 | 17539 | 417540 | GROUND CT SECONDARY | R/W | F123 | BOOLEAN |
| 4500 | 17664 | 417665 | Phase VT Connection | R/W | F100 | BOOLEAN |
| 4501 | 17665 | 417666 | Phase VT Secondary | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4502 | 17666 | 417667 | Phase VT Ratio | R/W | F060 | FLOATING POINT |
| 4600 | 17920 | 417921 | Nominal Frequency | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4602 | 17922 | 417923 | Frequency And Phase Reference | R/W | F167 | UINT16 ? |
| 4610 | 17936 | 417937 | L90 Number of Terminals | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 4700 | 18176 | 418177 | Breaker 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 4701 | 18177 | 418178 | Breaker 1 Name | R/W | F206 | WORD 6 CHARACTER ASCII |
| 4704 | 18180 | 418181 | Breaker 1 Mode | R/W | F157 | BOOLEAN |
| 4705 | 18181 | 418182 | Breaker 1 Open | R/W | F300 | UINT16 |
| 4706 | 18182 | 418183 | Breaker 1 Close | R/W | F300 | UINT16 |
| 5900 | 22784 | 422785 | Phase TOC Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5901 | 22785 | 422786 | Phase TOC Signal Source | R/W | F167 | UINT16 ? |
| 5902 | 22786 | 422787 | Phase TOC Input | R/W | F122 | BOOLEAN |
| 5903 | 22787 | 422788 | Phase TOC Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5904 | 22788 | 422789 | Phase TOC Curve | R/W | F103 | UINT16 ? |

| Dirección | | Dirección Labview | Nombre de Registro | Acceso | Formato | |
|-----------|-------|-------------------|---|--------|---------|-------------------------|
| Hex | Dec | | | | Tipo | Descripción |
| 5905 | 22789 | 422790 | Phase TOC Multiplier | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5906 | 22790 | 422791 | Phase TOC Reset | R/W | F104 | UINT16 ? |
| 5907 | 22791 | 422792 | Phase TOC Voltage Restraint | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5A00 | 23040 | 423041 | Phase Instantaneous Overcurrent 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5A02 | 23042 | 423043 | Phase Instantaneous Overcurrent 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5A03 | 23043 | 423044 | Phase Instantaneous Overcurrent 1 Delay | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5A04 | 23044 | 423045 | Phase Instantaneous Overcurrent 1 Reset Delay | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5B00 | 23296 | 423297 | Neutral Time Overcurrent 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5B02 | 23298 | 423299 | Neutral Time Overcurrent 1 Input | R/W | F122 | BOOLEAN |
| 5B03 | 23299 | 423300 | Neutral Time Overcurrent 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5B04 | 23300 | 423301 | Neutral Time Overcurrent 1 Curve | R/W | F103 | UINT16 ? |
| 5B05 | 23301 | 423302 | Neutral Time Overcurrent 1 Multiplier | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5C00 | 23552 | 423553 | Neutral Instantaneous Overcurrent 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5C02 | 23554 | 423555 | Neutral Instantaneous Overcurrent 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5C03 | 23555 | 423556 | Neutral Instantaneous Overcurrent 1 Delay | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5C04 | 23556 | 423557 | Neutral Instantaneous Overcurrent 1 Reset Delay | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5D00 | 23808 | 423809 | Ground Time Overcurrent 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5D02 | 23810 | 423811 | Ground Time Overcurrent 1 Input | R/W | F122 | BOOLEAN |
| 5D03 | 23811 | 423812 | Ground Time Overcurrent 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5D04 | 23812 | 423813 | Ground Time Overcurrent 1 Curve | R/W | F103 | UINT16 ? |
| 5D05 | 23813 | 423814 | Ground Time Overcurrent 1 Multiplier | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 5E01 | 24065 | 424066 | Ground Instantaneous Overcurrent 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 5E02 | 24066 | 424067 | Ground Instantaneous Overcurrent 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 7000 | 28672 | 428673 | Phase Undervoltage 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 7002 | 28674 | 428675 | Phase Undervoltage 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| 7003 | 28675 | 428676 | Phase Undervoltage 1 Curve | R/W | F111 | BOOLEAN |
| 7100 | 28928 | 428929 | Phase Overvoltage 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| 7102 | 28930 | 428931 | Phase Overvoltage 1 Pickup | R/W | F001 | UNSIGNED 16 BIT INTEGER |
| B000 | 45056 | 445057 | Digital Element 1 Function | R/W | F102 | BOOLEAN |
| B001 | 45057 | 445058 | Digital Element 1 Name | R/W | F203 | WORD 16 CHARACTER ASCII |
| B015 | 45077 | 445078 | Digital Element 1 Input | R/W | F300 | UINT16 |