



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“COORDINACIÓN DE LAS PROTECCIONES DE UN  
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO LA TÉCNICA  
HARDWARE IN THE LOOP Y EL PROTOCOLO DNP3”**

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
POTENCIA**

Presentado por:

**CÉSAR JOSÉ ANCHUNDIA JIMÉNEZ  
MIGUEL DARÍO APUNTES GARCÍA**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**AÑO: 2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por todo, por permitirle a mi madre seguir con vida y de esta forma brindarme la oportunidad de expresarle a ella mis más sinceros agradecimientos por todo el amor, la paciencia y el apoyo incondicional, sin usted, sin su esfuerzo y enseñanza no estaría logrando esto, me brindó lo mejor de la educación, su sacrificio hacia nosotros me impulsa, le agradezco por todo madre de mi alma.

A mis hermanos, sobrinos, cuñado, tíos y familiares por siempre brindarme ese apoyo incondicional tanto en lo emocional como en lo económico, también a las demás personas que de una u otra forma me ayudaron durante todo este proceso.

A todos mis maestros de la institución, en especial a mis tutores Ph.D. Síxifo Falcones y M.Sc. Johnny Rengifo, por todo el apoyo brindado en este proyecto.

**César José Anchundia Jiménez**

Mis agradecimientos a quienes forman parte de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a los profesores de la FIEC quienes con sus conocimientos inculcados hicieron que pueda crecer día a día como profesional.

Finalmente quiero agradecer al Ph.D. Síxifo Falcones y al Ing. Johnny Rengifo M.Sc. por habernos ayudado y guiado en las inquietudes presentadas en la elaboración de este proyecto.

**Miguel Darío Apuntes García**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto se lo dedico a Dios por darme las fuerzas para lograr alcanzar esta meta, a mi tío Pedro Magallanes por siempre brindarme esas palabras llenas de sabiduría e impulsarme a ser ingeniero, te llevo siempre en el corazón tío; todo mi esfuerzo para ustedes madre, hermanos y sobrinos siempre han sido mi motor para seguir adelante, les quedo eternamente agradecido.

A Dilma, por todo tu constante apoyo y esfuerzo incondicional para todos nosotros, eternamente agradecido contigo hermana; y a Nathan, aun no naces, pero daré todo mi esfuerzo para brindarles lo mejor junto a tu madre.

**César José Anchundia Jiménez**

A mis padres Sonia García y Miguel Apuntes quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy esta meta, por siempre inculcarme buenos valores y enseñarme a no rendirme ante las adversidades de la vida. A mi hermana Viviana Apuntes por su cariño y apoyo durante el transcurso de la carrera.

A mis tíos por estar siempre al pendiente de mí y brindarme su apoyo incondicional.

**Miguel Darío Apuntes García**

## **TRIBUNAL DE EVALUACIÓN**

---

**Ph.D. Síxifo Falcones**  
PROFESOR TUTOR

---

**M.Sc. Fernando Vaca**  
PROFESOR DE MATERIA  
INTEGRADORA

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; César José Anchundia Jiménez y Miguel Darío Apuntes García damos nuestro 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”

---

César José Anchundia  
Jiménez

---

Miguel Darío Apuntes  
García

## RESÚMEN

En el presente proyecto se implementa la técnica “Hardware in the Loop”, la simulación en tiempo real y la realización de un entorno SCADA para el control y monitoreo de un sistema de distribución eléctrica a un nivel de tensión de 4.16 kV, creando un entorno de prácticas experimentales en el laboratorio de simulación en tiempo real para implementarlos en cursos de formación complementaria de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, FIEC.

Para implementar éste proyecto se utilizó el programa Simulink/MatLab para modelar el sistema de distribución, también se utilizó en conjunto el programa RT – LAB que es un programa oficial de OPAL – RT fabricante del equipo del laboratorio de simulación en tiempo real, este programa permite la compilación del modelo creado para la realización de la simulación en tiempo real y deja listo al sistema para poder implementar la técnica Hardware in the loop a través de los módulos con los que cuenta el equipo OPAL – RT, módulo I/O OP5607 para entrada y salida de señales, un módulo de adquisición de datos OP8660 y un procesador de 32 núcleos, lo cual lo convierte en una potente herramienta para la elaboración de este tipo de pruebas de HIL, se utiliza además el equipo OMICRON CMS 356 que permite la amplificación de señales que son enviadas por el simulador y que sirven para las conexiones del relé de protección y poder evaluar sus funciones, se usa además el programa LabVIEW para diseñar un entorno Scada que permite supervisar y controlar el sistema de distribución, activar las fallas y visualizar las señales de voltaje y corriente del sistema en estado de operación normal y estado de falla, y finalmente se utiliza el protocolo de comunicación DNP3, para lograr de forma exitosa la evaluación de la función 67P del relé L90 GE mediante la técnica Hardware In the Loop.

**Palabras Clave:** Hardware in the loop, Simulación en tiempo real, relés de protección, Protocolo de comunicación DNP3, Scada.

## **ABSTRACT**

*This project implements the "Hardware in the Loop" technique, real time simulation (RTS) and a SCADA environment to control and monitoring a 4.16 KV electrical distribution system, creating experimental practices in the simulation laboratory using RTS which could be implemented in electrical engineering courses at the Faculty of Electrical and Computer Engineering, FIEC.*

*To implement this project, the Simulink / MatLab program was used to model the distribution system, and the RT - LAB program was used, which is an official program of OPAL - RT, a manufacturer of the simulation laboratory equipment in real time and allows the compilation of the model created to carry out the simulation in real time and leaves the system ready to implement Hardware in the loop technique through the modules that have the OPAL - RT, module I / O OP5607 for input and output of signals, we used a data acquisition module OP8660 and a 32-core processor, which makes it a powerful tool for the development of this type of HIL tests with the OMICRON CMS 356 equipment that allows the amplification of signals that they are sent by the simulator and they are used for the protection relay connections and to evaluate their functions.*

*To design a Scada environment, the LabVIEW program was used to monitor and control the distribution system, activate the faults and visualize the voltage and current signals of the system in normal operating state and fault state, and finally the protocol of DNP3 communication, to successfully achieve the evaluation of the 67P function of the GE L90 relay using the Hardware In the Loop technique.*

*Keywords: Hardware in the loop, Real-time simulation, protection relays, DNP3 communication protocol, Scada.*

## INDICE GENERAL

RESÚMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Propuesta.....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos .....	5
CAPÍTULO 2 .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Sistema eléctrico de distribución.....	6
2.2 Distribución en anillo .....	7
2.3 Relé de protección diferencial de linea L90 GE .....	7
2.4 OPAL – RT.....	8
2.5 Caja de expansión de I/O y FPGA OP5607 .....	8
2.6 Sistema SCADA.....	9
2.7 Protocolo DNP3 .....	10
2.8 Protección de sobre corriente direccional ANSI 67P.....	11
CAPÍTULO 3 .....	12



3. METODOLOGÍA .....	12
3.1 Descripción de la metodología e implementación .....	12
3.2 Etapas de implementación .....	13
3.3 Modelado del sistema de distribución y simulación OFFLINE.....	13
3.4 Hardware in the loop .....	13
3.4.1 Simulación del sistema eléctrico de distribución.....	14
3.4.2 Operación del sistema eléctrico de distribución simulado .....	15
3.4.3 Ajustes de relés de protección.....	17
3.4.4 Uso de RT-LAB.....	19
3.4.5 Compilación del sistema eléctrico de distribución.....	20
3.4.6 Modelo del sistema eléctrico de distribución .....	23
3.4.7 Envío de señales .....	25
3.4.8 Configuración del amplificador de señales OMICRON CMS 356 .....	26
3.4.9 Conexión del relé Multilin L90 GE.....	27
3.5 Señal de retorno del accionamiento del relé .....	28
3.6 Configuración del Protocolo de comunicación .....	29
CAPÍTULO 4 .....	34
4. RESULTADOS Y ANALISIS .....	34
4.1 Simulación Off-line del sistema eléctrico de distribución.....	34
4.2 Simulación en tiempo real del sistema eléctrico de distribución.....	39
4.3 Generación de las fallas con la técnica Hardware in the loop .....	41
4.4 Creación del entorno de control y visualización SCADA.....	44
4.4.1 Adicionar los archivos en el simulador de tiempo real.....	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
Conclusiones .....	48
Recomendaciones .....	48
BIBLIOGRAFÍA .....	

## **ABREVIATURAS**

HIL	Hardware In the Loop
IED	Intelligent Electronic Device
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
RTU	Remote Terminal Unit

## SIMBOLOGÍA

kV	Kilovoltio
us	Microsegundos
V	Voltio
A	Amperio
mV	Milivoltio

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Etapas para implementación del proyecto con HIL.....	4
Figura 2.1 Sistema eléctrico de potencia y distribución [5] .....	7
Figura 2.2 Relé de Protección L90 [7].....	8
Figura 2.3 Módulo OP5607 [9] .....	9
Figura 2.4 Sistema de supervisión SCADA [10] .....	10
Figura 3.1 Sistema de distribución en operación normal .....	15
Figura 3.2 Sistema de distribución en operación anormal .....	16
Figura 3.3 Ventana principal de RT-LAB .....	20
Figura 3.4 Propiedades de ejecución HIL.....	20
Figura 3.5 Ventana de modelo e interfaz del sistema simulado .....	21
Figura 3.6 Bloques de Artemis SSN .....	22
Figura 3.7 Ubicación de bloques de ARTEMIS SNN.....	22
Figura 3.8 Modelo del sistema de distribución diseñado .....	24
Figura 3.9 Carpeta contenedora del modelo en RT-LAB .....	25
Figura 3.10 Bloques de adquisición de datos en RT-LAB .....	26
Figura 3.11 Modulo de Adquisición de datos OP8660 [8] .....	26
Figura 3.12 Ajustes del amplificador .....	27
Figura 3.13 Conexión del relé GE L90 [7].....	28
Figura 3.14 Conexión del regulador de voltaje DC .....	29
Figura 3.15 Configuración del protocolo IEC 104.....	30
Figura 3.16 Transferencia de datos PC - Relé.....	30
Figura 3.17 Señales configuradas en el protocolo .....	31
Figura 3.18 Modelo de conexión esclavo OPAL - RT [15].....	32
Figura 3.19 Subsistema SM DNP3 .....	33
Figura 3.20 Subsistema SC DNP3.....	33
Figura 4.1 Oscilografía de voltaje de la barra 632 ante falla trifásica .....	35
Figura 4.2 Oscilografía de corriente de la barra 632 ante falla trifásica .....	36
Figura 4.3 Voltaje de relé virtual ante falla1 .....	42
Figura 4.4 Corriente de relé virtual ante falla1 .....	43
Figura 4.5 Voltaje del relé real L90 GE ante la Falla1 .....	43
Figura 4.6 Corriente del relé real L90 GE ante la Falla1 .....	44

<b>Figura 4.7 Sistema de distribución .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 4.8 Panel de control del sistema de distribución.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4.9 Visualización de las potencias de los generadores .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 4.10 Archivos de LabVIEW en RT-LAB .....</b>	<b>46</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1 Voltajes y corrientes en operación normal</b> .....	16
<b>Tabla 3.2 Corrientes mínima de cortocircuito</b> .....	16
<b>Tabla 3.3 Especificaciones de sobre corriente relé L90 GE</b> .....	17
<b>Tabla 3.4 Constantes de curvas IEEE</b> .....	18
<b>Tabla 4.1 Voltajes y corrientes en operación normal</b> .....	37
<b>Tabla 4.2 Voltajes y corrientes con falla 1</b> .....	38
<b>Tabla 4.3 Voltajes y corrientes en falla 2</b> .....	38
<b>Tabla 4.4 Voltajes y corrientes operación normal en tiempo real</b> .....	39
<b>Tabla 4.5 Voltajes y corrientes con Falla1 generada en tiempo real</b> .....	40
<b>Tabla 4.6 Voltajes y corrientes con Falla2 generada en tiempo real</b> .....	41

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la importancia en la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia se va convirtiendo en uno de los aspectos primordiales a ser tomados en cuenta, y esto se debe al aumento considerable de la carga conectadas a los sistemas eléctricos. Cada año las industrias, comercio y residencias dependen más del suministro eléctrico y el corte de este suministro ya sea por mantenimiento o alguna falla, generarían pérdidas y una no conformidad en el cliente, por esta razón los sistemas eléctricos han ido mejorando su tecnología para evitar estas inconformidades, a estos sistemas se lo consideran Smart Grids o también conocidos en español como Redes Inteligentes.

El motivo de implementar este nuevo sistema es debido a la necesidad de administrar de mejor manera los recursos energéticos, mejorar las respuestas del sistema eléctrico ante alguna contingencia, una mejor comunicación entre los dispositivos que forman parte al sistema eléctrico, tener un registro en tiempo real de lo que sucede con el funcionamiento correcto del sistema eléctrico.

Una parte fundamental de los Smart Grids es el sistema SCADA siglas que se deben a su nombre en inglés (Supervisory Control And Data Acquisition) que es un sistema que se encarga de comunicar, controlar y supervisar diversos dispositivos de campo aun a varios kilómetros de distancia [1].

Además, incorporan HMI que es la interfaz usuario – máquina, el cual proporciona un control del proceso mucho más intuitivo. Todo esto, tiene como fin ayudar a los operarios y supervisores a realizar de forma más eficiente su trabajo otorgándoles un mejor control y la posibilidad de realizar cambios inmediatos [1].

La implantación de estas Redes Inteligentes es un avance importante para el país en lo que se refiere a la producción de energía eléctrica, esto nace como una propuesta significativa por el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables,

que para mejorar la gestión de los sistemas eléctrico introduce en el país el programa “Redes Inteligentes en el Ecuador” [2].

El protocolo de comunicación DNP3 se desarrolló con el fin de lograr la interoperabilidad entre elementos de subestaciones como IEDs, RTUs y PCs, y para el control y monitoreo de las compañías eléctricas. Este protocolo es predominantemente usado en las industrias eléctricas, ya que permite enviar información de sistemas de energía y sobre los parámetros de voltaje, corriente, potencia, etc. Este protocolo maneja utiliza un sistema de solicitud – respuesta, este sistema permite intercambiar mensajes entre los dispositivos maestros como el SCADA y dispositivos remotos como son los IEDs [3].

### **1.1 Descripción del problema**

Debido a que los estudiantes en el transcurso de la carrera de ingeniería en electricidad llegamos a conocer teóricamente varios temas de ámbito profesional como sistemas de distribución, sistemas de transmisión, sistemas Scada, Coordinación de protecciones, etc., en las cuales aprendemos de los equipos que sirven para la supervisión y protección de los sistemas eléctricos, pero no llegamos a aplicarlas de forma práctica en un sistema real en el trascurso de la misma, es por esto que es necesario crear una alternativa para que los estudiantes puedan aplicar y fortalecer sus conocimientos, utilizando equipos reales en sistemas de eléctricos de potencia simulados en tiempo real.

Con ayuda del simulador OPAL - RT se puede implementar practicas experimentales en las cuales se puedan realizar simulaciones operando en tiempo real para la supervisión y control de redes eléctricas ya sean estas de distribución o transmisión, la cual sería puesta a prueba en diferentes escenarios de operación.



## **1.2 Justificación del problema**

Este proyecto se realiza como propósito de brindar una alternativa para crear practicas experimentales de materias complementarias de la carrera de ingeniería en electricidad, para que los estudiantes puedan aplicar sus conocimientos en ciertas áreas de electricidad, ya que gracias al simulador OPAL – RT pueden realizarse pruebas de simulación en tiempo real mediante la técnica hardware in the loop y model in the loop que permiten la integración de equipos reales.

Además, permite al estudiante la experimentación con equipos reales de campo, y aprender de sus configuraciones, conexiones, de sus protocolos de comunicación, etc.

## **1.3 Propuesta**

En éste proyecto se implementa un sistema de distribución eléctrica que permita la evaluación de las funciones del relé L90 GE ante perturbaciones generadas en una red simulada en tiempo real implementando la técnica HIL (por sus siglas en inglés, Hardware In the Loop) y de estar forma experimentar con él funcionamiento de un equipo físico externo ante los eventos que puede llegar a tener una red eléctrica real, además se crea un sencillo sistema SCADA con ayuda del programa LabVIEW para el monitoreo y control de la red modelada en Matlab/Simulink, compilada en la plataforma RT-LAB, el cual nos servirá como interfaz para la operación del sistema eléctrico de distribución en tiempo real con ayuda del simulador OPAL RT.

El sistema de distribución usada para este proyecto es la propuesta por la IEEE que dicta un sistema eléctrico de prueba de una red de distribución de 13 nodos con un solo punto de generación y con cargas desbalanceadas. Este sistema fue modificado añadiéndole una línea de distribución el cual sirvió para realizar un mallado en el sistema, y también añadiendo un nuevo punto de generación al sistema.

Esto con el fin de probar la funcionalidad de sobre corriente direccional 67P del relé L90, ya que teniendo dos puntos de generación y un pequeño mallado en el sistema se podrá circular corriente en ambas direcciones hacia el punto donde será colocado el relé.

En la Figura 1.1 se define de mejor manera la propuesta de implementación del proyecto utilizando la técnica HIL y el respectivo sistema SCADA.



**Figura 1.1 Etapas para implementación del proyecto con HIL**

## 1.4 Objetivos

En la siguiente sección se mencionará los objetivos principales con los que se aportará con este proyecto integrador.

### 1.4.1 Objetivo General

Implementar la simulación en tiempo real de un sistema de distribución eléctrico utilizando el programa RT – LAB y además aplicar la técnica Hardware in the loop con la ayuda del equipo OPAL – RT que se encuentran en el laboratorio de simulación en tiempo real que nos permita incorporar un relé digital L90 GE, evaluando la operación de su función 67P.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Implementar el uso de equipos físicos externos en un sistema de distribución simulado en tiempo real.

Diseñar un sistema de distribución apto para la coordinación de protecciones en la simulación en tiempo real que se realizará en el programa RT-LAB.

Ejecutar protecciones eléctricas virtuales y además implementar equipos físicos reales mediante la técnica HIL.

Diseñar una interfaz gráfica SCADA para observar la variación de estado del sistema y además controlarlo de manera más sencilla.

Implementar la comunicación del protocolo DNP3 TCP/IP con el relé L90 General Electric.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se comentará una breve descripción de los equipos utilizados para lograr la técnica Hardware in the loop, con el cual se podrá incorporar el relé L90 a la red simulada para evaluar su función 67P, que es el tema principal de nuestro proyecto.

### 2.1 Sistema eléctrico de distribución

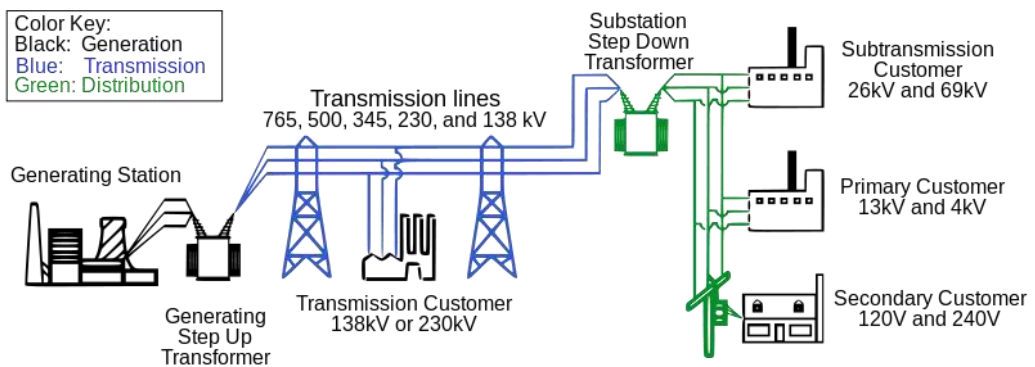
Los sistemas eléctricos de distribución son parte muy importante en un sistema eléctrico de potencia, debido a que un sistema de distribución tiene como objetivo básico distribuir la energía eléctrica generada por las centrales eléctricas a las industrias y a los usuarios que se encuentran ubicados en diferentes lugares [4].

Los sistemas eléctricos de distribución dependiendo de la carga que van a alimentar, se clasifican en:

- Industriales.
- Comerciales.
- Urbanos.
- Rurales [4].

La energía eléctrica se distribuye desde las subestaciones de transformación en dos etapas, iniciando desde las subestaciones de transformación distribuyen la energía mediante anillos que encierran los grandes centros de consumo, las tensiones utilizadas en esta etapa están entre 25 kV y 132 kV, en los anillos antes mencionados se encuentran subestaciones transformadoras de distribución, las cuales reducen las tensiones desde el nivel de reparto al de distribución de media tensión [4].

La etapa dos hace referencia a la red de distribución, la cual maneja niveles de tensión de 3 kV a 30 kV y están de forma mallada, los grandes centros de consumo están cubiertos por esta red de distribución, que llegan hasta los centros de transformación, que son la última etapa del suministro de media tensión, ya que en estos centros de transformación se reduce la tensión a niveles 110/220 V [5].



**Figura 2.1 Sistema eléctrico de potencia y distribución [5]**

## 2.2 Distribución en anillo

Un Sistema en anillo es aquel en la que las líneas de transmisión y la central generadora o central de distribución forman un circuito cerrado y de esta forma permitir a las centrales tener dos vías para transmitir o distribuir la energía y de esta forma el servicio se pueda mantener al momento de producirse alguna falla en cualquier línea del sistema de distribución [6].

## 2.3 Relé de protección diferencial de línea L90 GE

El relé diferencial de corriente de línea L90 es un equipo de protección que forma parte de la gama de equipos electrónicos inteligentes de General Electric. Es un relé con interfaz de comunicaciones integral, que brinda protección para líneas de distribución o transmisión en cualquier nivel de tensión. Sus algoritmos se basan en la serie de Fourier para el enfoque y restricción estadística adaptativa que proporciona una mayor sensibilidad para la detección de fallas, que le permite detectar fallas de línea a tierra con una impedancia mayor a los sistemas

eléctricos que existen. Tiene varios protocolos de comunicación incorporados entre ellos DNP3, Modbus TCP/IP, IEC 61850 e IEC 60870-5-104 [7].



**Figura 2.2 Relé de Protección L90 [7]**

## **2.4 OPAL – RT**

Opal – RT es líder en la industria mundial de simulación en tiempo real, para diseñar, probar y optimizar los sistemas de control y protección en la industria de la electricidad, mecánica, electrónica, etc., gracias a sus simuladores basados en equipos PC/FPGA, que permiten realizar técnicas Hardware in the loop.

Este sistema de simulación en tiempo real trabaja con la plataforma HYPERSIM, pero debido a que en la industria los ingenieros utilizan en muchas ocasiones para temas de investigación y aplicación el software Simulink/MatLab, es por esto por lo que OPAL – RT también cuenta con un software en el cual se pueden cargar diseños de simulink previamente configurados para compilarlos y poder realizar la simulación en tiempo real [8].

## **2.5 Caja de expansión de I/O y FPGA OP5607**

El OP5607 es una unidad de expansión de E / S que usa la plataforma de desarrollo Xilinx Virtex-7™ FPGA para proporcionar entradas y salidas adicionales para los simuladores y unidades de expansión OPAL-RT existentes.

Esta tarjeta de adquisición de datos OP5607 está conformado con un núcleo principal para el procesamiento de simulaciones en tiempo real OPAL-RT. Ésta es una versión mejorada de la presentación original del módulo de procesamiento del simulador.

Pueden configurarse hasta 8 grupos de señales digitales o análogas, lo que quiere decir que puede llegar a tener un total de 128 señales de tipo análogas o 256 señales de tipo digitales [9].



**Figura 2.3 Módulo OP5607 [9]**

## **2.6 Sistema SCADA**

Es un sistema de adquisición de datos para el control y supervisión de sistemas de la industria en general, y de esta forma monitorear el proceso en una planta por medio de un sistema central que cumpla la función de Master que controla un conjunto de varias unidades remotas o RTU. De esta forma se puede lograr la automatización de una forma sencilla que permite mejorar las cuestiones operativas de una central ya que le da al operador la facilidad de tener datos desde los dispositivos de campo, ya que transmiten sus señales por medio de protocolos o sensores en tiempo real, y de esta forma tener actuaciones inmediatas ante cualquier anomalía [10].



**Figura 2.4 Sistema de supervisión SCADA [10]**

## **2.7 Protocolo DNP3**

El protocolo para red distribuida DNP por sus siglas en inglés y la versión 3, está basado en el comité 57 de la IEC y ofrece mayor flexibilidad y funcionalidades que otros protocolos convencionales, además proporciona autenticación segura [11].

La continua evolución de la tecnología en el ámbito eléctrico actualmente se ve reflejada en la implantación de las redes Smart Grid, y a medida que evoluciona el sector eléctrico es necesaria la incorporación de tecnologías de información y comunicación (TIC) y de esta forma posibilitar el intercambio de datos bidireccional [12].

Actualmente en la industria los sistemas de control son basados en las soluciones orientadas para los propietarios de cada equipo, y es por esto por lo que la implantación de protocolos de comunicación que permitan la interoperabilidad entre diferentes fabricantes de equipos aportara a las empresas un ahorro importante por coste de implantación, materiales y mantenimientos en las subestaciones eléctricas [12].



## **2.8 Protección de sobre corriente direccional ANSI 67P**

Las protecciones en los sistemas eléctricos son un punto muy importante que no se puede pasar por alto en una red, ya que gracias a estos dispositivos se pueden evitar daños en equipos de alto valor de una subestación, como son transformadores, seccionadores, etc., y también se disminuye el riesgo a una discontinuidad del servicio eléctrico hacia los clientes residenciales y comerciales.

Las protecciones de sobre corriente son dispositivos diseñados para operar cuando la corriente o magnitud del elemento al que se está protegiendo supera los parámetros predeterminados en el ajuste de este, estas magnitudes excesivas de corriente deben liberarse lo más pronto posible con el fin de evitar daños en los elementos del sistema como se mencionó anteriormente [13].

Esta protección direccional es muy importante en los sistemas en anillo, son un tipo particular de las protecciones de sobre corriente, porque también miden cuando se excede una magnitud de corriente del sistema provocada por alguna falla, pero con las condiciones que estas actúan cuando la intensidad de falla circula en un sentido determinado, mientras tanto la protección no opera.

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGÍA

Por su alta eficiencia el simulador en tiempo real OPAL-RT es ideal para el estudio de sistemas de potencia y sistemas de distribución, ya que por su alta versatilidad maneja de forma adecuada las diversas magnitudes y complejidades que pueden presentar los sistemas antes mencionados.

El simulador en tiempo real OPAL-RT cuenta con un software RT-LAB el cual es compatible con el software simulink lo que es muy conveniente para el proyecto que estamos realizando, ya que permite cargar y compilar el diseño realizado del sistema de distribución y de esta forma crea automáticamente un algoritmo de optimización gracias a las tarjetas FPGA que tiene incorporadas el simulador.

Además, el software RT-LAB permite la configuración y aplicación de la técnica “Hardware in the loop, HIL” que es la idea principal del proyecto, también se pueden adicionar archivos para el uso de “software in the loop” que para este proyecto es importante porque permite interactuar con el sistema SCADA que fue desarrollado en la plataforma grafica de LABVIEW.

### 3.1 Descripción de la metodología e implementación

Para lograr la implementación de nuestro proyecto mediante la técnica “Hardware in the loop”, inicialmente se procedió a solucionar lo que es la simulación OFFLINE del sistema eléctrico de distribución para lo cual se trabajó en un principio con el software MatLab específicamente con el ambiente de programación por bloques simulink y con la librería SimPowerSystem, además se utilizó el software LABVIEW como se mencionó anteriormente, esto para lograr el sistema SCADA.

Luego se procedió a utilizar el software RT-LAB en conjunto con simulador en tiempo real OPAL-RT, para poder compilar el sistema de distribución modelado y crear la interfaz para lograr la simulación ONLINE en tiempo real.

Una vez lograda la simulación en tiempo real se procedió a la implementación de la técnica antes mencionada “Hardware in the loop” para lograr la interacción entre el simulador OPAL-RT y un dispositivo electrónico inteligente, IED, esto se logró ya que el simulador OPAL-RT permite enviar y recibir señales por medio del módulo de adquisición de datos, lo cual se detallará posteriormente.

### **3.2 Etapas de implementación**

Para lograr la implementación de nuestro proyecto se planificaron 4 etapas importantes, las cuales son:

- Modificación del sistema de distribución y simulación OFFLINE.
- Hardware in the loop y simulación en tiempo real.
- Sistema SCADA.
- Comunicación mediante el protocolo DNP3.

### **3.3 Modelado del sistema de distribución y simulación OFFLINE**

Para la implementación de nuestro proyecto utilizamos el modelo de prueba de la IEEE 13 Node Test Feeder [14], para la modificación del sistema de distribución en el cual se basa nuestro proyecto fue importante la utilización de simulink, esencialmente la librería SimPowerSystem, que fue utilizada porque tiene bloques que modelan líneas trifásicas, interruptores, generadores, bloques de fallas, etc, los cuales fueron importantes porque facilitaron mucho la modificación del modelo [14].

### **3.4 Hardware in the loop**

Para la implementación de esta técnica es necesaria la utilización de un IED's, el laboratorio de simulación en tiempo real cuenta con el relé L90 del fabricante General Electric, el cual fue sometido a condiciones normales de operación y también a condiciones de operación anormales, momento en el cual se accionan sus contactos como una señal de disparo ante la falla que se simula en el sistema de distribución, para la prueba del relé digital de protección primeramente se deben establecer las condiciones del equipo en la red de distribución simulada,

se debe programar las funciones y los parámetros de accionamiento del relé, para enviar las señales al amplificador y de igual manera recibirlas a través de los módulos de entrada - salida analógicas y digitales OP8660 y OP5607.

### **3.4.1 Simulación del sistema eléctrico de distribución**

Por lo general en los sistemas de distribución es común los desbalances de tensiones entre fases, debido a la continua variación de carga en la red, con tan solo tener en la red cargas monofásicas provenientes de usuarios residenciales provocan un estado de desequilibrio en el sistema trifásico.

Es debido a esto que nuestro sistema tiene diferentes valores de corriente, para lograr esto fue necesario modificar los parámetros de las líneas en el sistema simulado, y de igual forma fue necesario colocar cargas desbalanceadas.

Lo esencial en esta parte es diseñar un sistema que sea capaz de soportar los diferentes parámetros y condiciones que demanda la técnica Hardware in the loop, para lo cual el sistema a modelar debe ser capaz de soportar cortocircuitos, flujo de potencia, y que en estas pruebas en el sistema no ocasionen retardos de tiempo, es importante realizar una previa investigación respecto al software RT-LAB para conocer los mejores métodos que se pueden aplicar para poder realizar la técnica Hardware in the loop.

Para nuestro sistema es esencial ser ordenado en el modelado del sistema de distribución, para esto utilizamos dos subsistemas que cumplieran con lo requerido para poder simular en tiempo real al momento de compilar el modelo en RT-LAB.

Para asegurarnos que la red cumpla con lo requerido de soportar cálculos de flujo de potencia, y eventos de cortocircuito fue esencial basarnos en el modelo de 13 nodos de la IEEE, sin embargo fue

necesario realizarle ciertas modificaciones para acondicionarlo a lo que requería nuestro proyecto integrador, como fue reducir el sistema, agregar interruptores, bloques de falla, señales de lectura de voltaje y corriente, teniendo en cuenta cumplir con lo requerido para que no se ocasionen retardos en la simulación.

### 3.4.2 Operación del sistema eléctrico de distribución simulado

Para obtener los datos necesarios para el ajuste de los relés digitales de protección tanto real como virtual en el sistema de distribución en estado de operación normal y operación de falla fue necesario la utilización del programa ETAP, que es un software especializado en el estudio de flujos de sistemas de potencia y además brinda la opción de simular fallas de cortocircuito.

En el programa mencionado anteriormente se simula el modelo del sistema de distribución tal como se observa en la Figura 3.1 para ejecutar análisis de flujo de carga, y poder obtener los resultados de respuesta del sistema en operación normal, los valores de voltajes y corriente más relevantes del sistema se muestran en la Tabla 3.1.

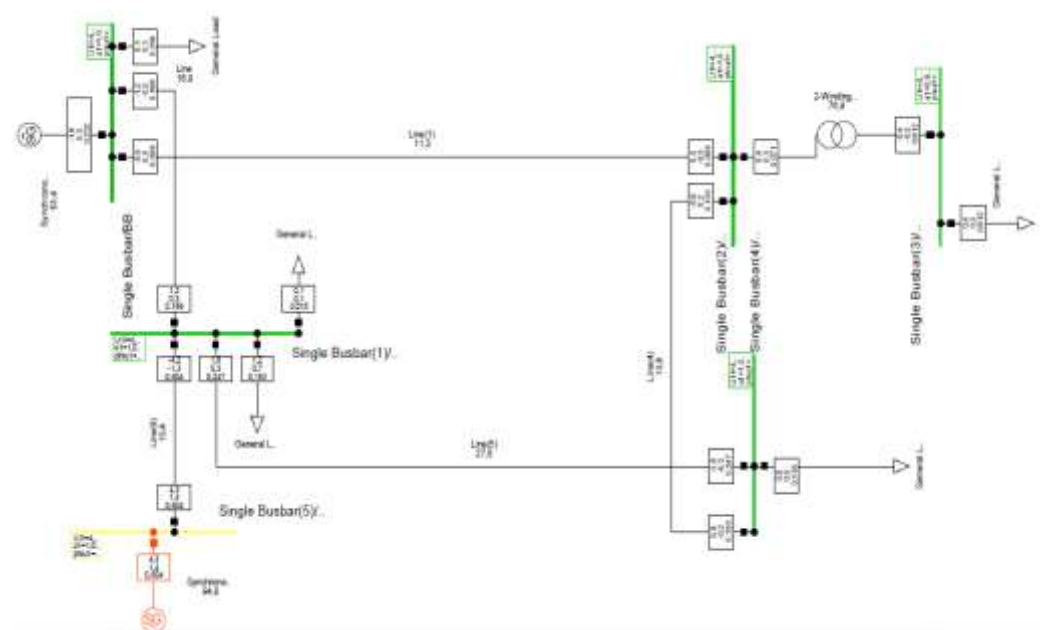
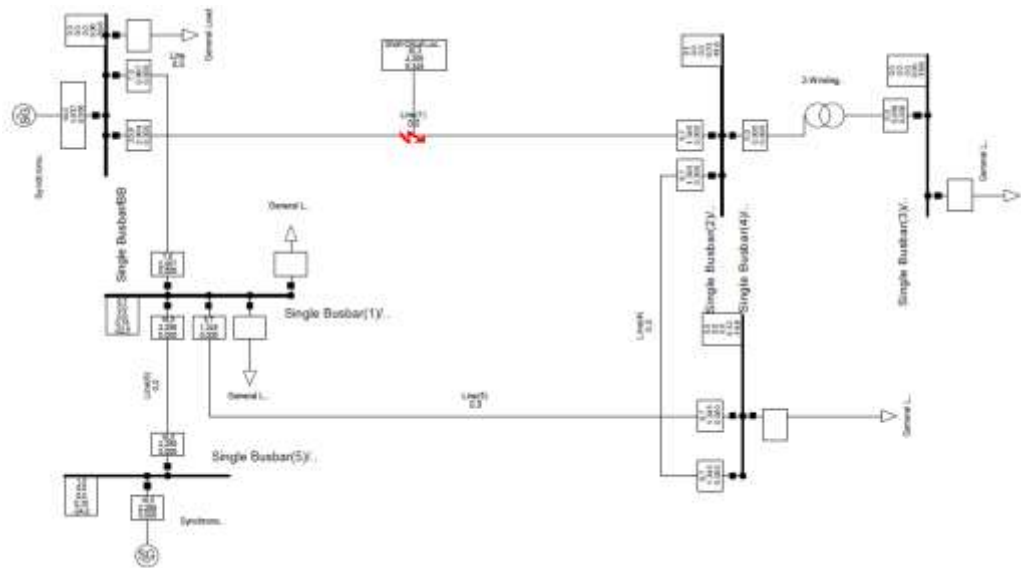


Figura 3.1 Sistema de distribución en operación normal

**Tabla 3.1 Voltajes y corrientes en operación normal**

		Voltajes [PU]	Corrientes [A]
Barra 632	Fase A	1.012	224.5
	FaseB	1.038	105.7
	Fase C	1.01	193.1
Barra 680	Fase A	1.016	122.8
	FaseB	1.04	49.99
	Fase C	1.013	105.7

Como se mencionó en el párrafo anterior, con la ayuda del programa ETAP se realizó un estudio de cortocircuitos en las dos zonas en la que se simulan las fallas en nuestro sistema de distribución modelado, tal como se muestra en la Figura 3.2, y además también se muestran los valores de las corrientes de cortocircuitos obtenidos para las fallas simuladas, estos valores se pueden observar en la Tabla 3.2.



**Figura 3.2 Sistema de distribución en operación anormal**

**Tabla 3.2 Corrientes mínima de cortocircuito**

	Voltaje [V]	Corriente [kA]
Falla	0	9.349

### 3.4.3 Ajustes de relés de protección

Como se mencionó anteriormente, para programar los relés digitales es necesario el estudio de protecciones y por lo cual fue empleado el programa ETAP para determinar las corrientes mínimas para la actuación y accionamiento de los equipos de protección que tendrá el sistema de distribución modelado, para este proyecto fue planteado el estudio de la función 67 y por lo cual para las zonas en la que se simulara la falla se seleccionaron protecciones 50/67.

Para un correcto ajuste de los parámetros del relé real es necesario ver las especificaciones de sobre corriente que son facilitadas por el fabricante en el manual de usuario y dan un informa detallado del relé de protección, las cuales se mencionan en la Tabla 3.3 [7].

**Tabla 3.3 Especificaciones de sobre corriente relé L90 GE**

Forma de corriente	Fasor o RMS
Nivel de pickup	0,000 a 30,000 p.u. en pasos de 0,001
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)
Curvas	IEEE Moderada/muy/extremadamente inversa
	FlexCurves (programable)
	Tiempo definido (curva basada en 0.01 s)
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)

De acuerdo con las especificaciones del fabricante se utiliza la curva moderadamente inversa de sobre corriente del relé de acuerdo con la Norma IEEE C37.112-1996.

Las constantes utilizadas en las curvas de sobre corriente de tiempo inverso de acuerdo con la Norma IEEE son las mostradas en la Tabla 3.4 [7].

**Tabla 3.4 Constantes de curvas IEEE**

Curvas IEEE	A	B	C	$t_r$
IEEE Extremadamente inversa	28,2	0,1217	2	29,1
IEEE muy inversa	19,61	0,491	2	21,6
IEEE moderadamente inversa	0,0515	0,114	0,02	4,85

Las ecuaciones necesitadas para los ajustes del accionamiento de las protecciones también pueden ser encontradas en el manual de usuario del relé L90 GE en la misma sección que se encuentran las curvas de sobre corriente de tiempo inverso.

$$T_{reset} = TDM \times \left[ \frac{t_r}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.1)$$

$$T = TDM \times \left[ \frac{A}{\left( \frac{I}{I_{pickup}} \right)^p - 1} + B \right] \quad (2.2)$$

Donde:

$T$  : Tiempo de operación en segundos.

$T_{reset}$  : Tiempo de reinicio en segundos.

$TDM$  : Ajuste de multiplicador.

$I$  : Corriente de entrada.

$A, B, p$  : constantes.

$t_r$  : constante característica.

$I_{pickup}$  : Corriente pico.



Una vez obtenidos todos los valores de las constantes de las fórmulas antes mencionadas y los datos obtenidos en la simulación en el programa ETAP se procede a evaluarlos para el cálculo de los parámetros del relé de sobre corriente instantáneo:

$$I_{pickup50} = \frac{Ifalla_{min}}{RTC} = \frac{9349}{50} = 186.98 A \quad (2.3)$$

$$I_{pickup50 P.U} = \frac{I_{pickup}}{I} = \frac{186.98}{224.5} = 0.83 pu \quad (2.4)$$

Donde:

$Ifalla_{min}$  : Corriente minima de falla.

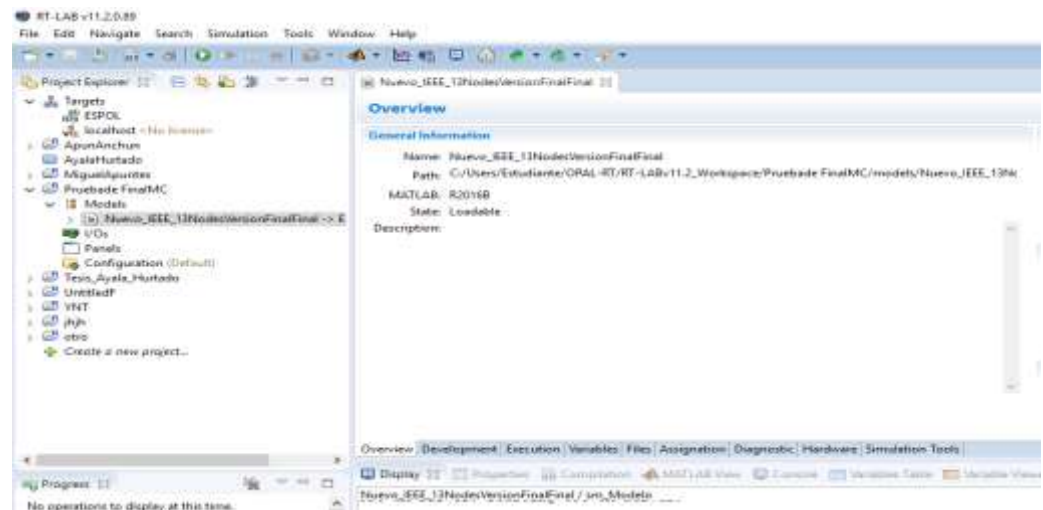
$RTC$  : Ratio de transformación de corriente.

#### 3.4.4 Uso de RT-LAB

RT-LAB es una herramienta importante y muy sofisticada, la cual se utiliza para cargar el modelo diseñado en Simulink, cabe recalcar que antes de poder compilar el modelo es importante acondicionar el mismo con las librerías de RT-LAB en conjunto con el bloque Artemis y de esta forma poder lograr la simulación en tiempo real.

Además es importante cumplir con todos los parámetros de ajuste para no mostrar ningún error en el momento de la compilación del modelo o en el momento que se vaya a crear la interfase del sistema, en la Figura 3.3 se muestra la ventana principal de RT-LAB, en la cual la sección de la izquierda sirve para crear y agrupar los nuevos proyectos que se simularan en tiempo real, en la parte de la derecha está el panel de ajuste e información, en el cual se deben colocar los respectivos parámetros de ejecución, asignación, diagnostico, como se muestra en la Figura 3.4.

También se recomienda que no se creen muchas carpetas de trabajo en RT – LAB que contengan nombres similares y mucho menos que se creen modelos similares en la misma carpeta de trabajo ya que por su estructura interna en los subsistemas puede crear errores al momento de compilar y simular porque el programa guarda memoria previa para ciertos análisis.



**Figura 3.3** Ventana principal de RT-LAB



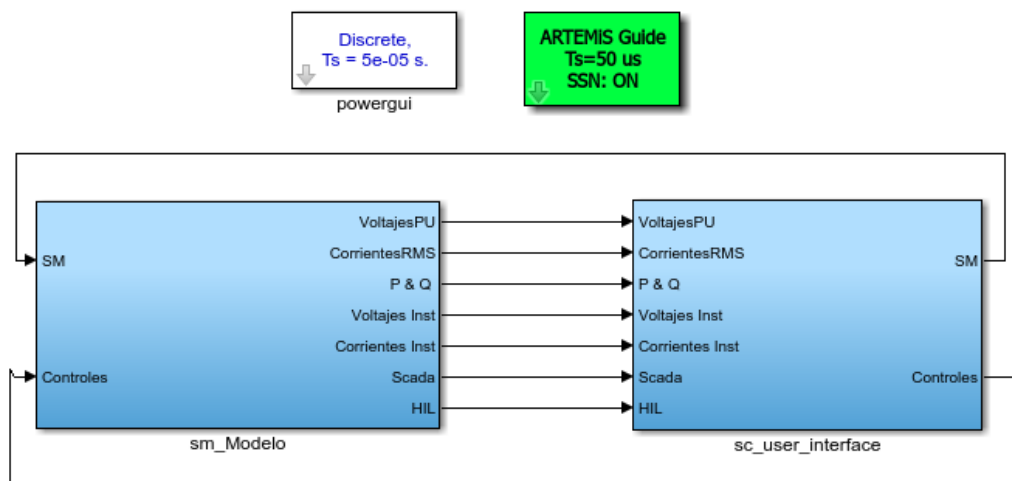
**Figura 3.4** Propiedades de ejecución HIL

### 3.4.5 Compilación del sistema eléctrico de distribución

El sistema modelado cuenta con la implementación de los bloques de ARTEMIS, el cual es importante para simular sistemas con bloques de distribución, también es importante la división de subsistemas para la compilación del sistema de distribución, para nuestro proyecto fue suficiente la división de dos subsistemas como se muestra en la figura,

en el subsistema de la izquierda nombrado “sm\_modelo” se desarrolló todo el modelo y cálculos necesarios que necesita el sistema para operar de la forma requerida para la simulación de falla en tiempo real, también en este subsistema se pueden colocar las señales de envío hacia el sistema SCADA que actuara como maestro de nuestro sistema de distribución.

El subsistema de la derecha nombrado “sc\_user\_interface” es utilizado para colocar las señales y valores que se deseen mostrar al momento de la simulación en tiempo real, cabe recalcar que es recomendable no realizar cálculos en este subsistema ya que al momento de compilar generara un mayor consumo de memoria lo cual no es bueno debido a que se elevara el overrun.

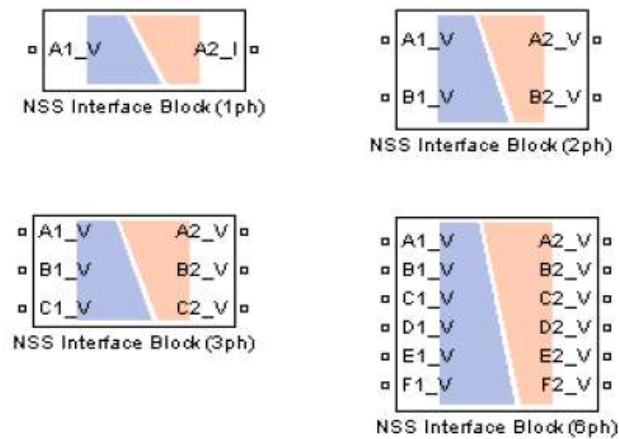


**Figura 3.5 Ventana de modelo e interfaz del sistema simulado**

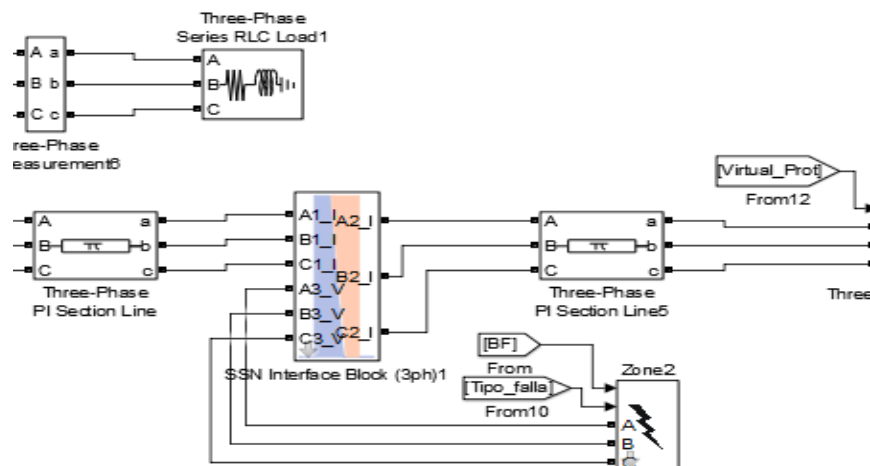
Además es muy importante utilizar en modelamiento de sistemas eléctricos los bloques de NODOS DE ESPACIO DE TIEMPO de ARTEMIS (SSN) por sus siglas en inglés, de acuerdo al trabajo previo de conocimiento que se realizó para conocer las técnicas que mejoren y permitan la simulación en tiempo real, se pudo conocer que estos bloques de ARTEMIS SSN, son algoritmos sofisticados de solución matemática diseñados específicamente por OPAL-RT para sistemas eléctricos en especial, para sistemas de distribución, micro redes y en

general para sistemas que necesiten por su naturaleza soluciones rápidas, gracias a la técnica de método nodal de espacios que utilizan estos bloques permiten optimizar los modelos eléctricos cargados al software RT-LAB ya que con sus algoritmos descompone virtualmente los grandes sistemas y los agrupa en pequeños grupos con los que de igual forma se consigue los mismo resultados de forma simultánea, ya que en diferentes procesadores del hardware cada grupo se ejecuta en paralelo.

En la Figura 3.7 se muestra en que zona fue utilizado este bloque SNN de ARTEMIS, para poder solucionar de forma más rápida nuestro sistema de distribución eléctrica simulado.



**Figura 3.6 Bloques de Artemis SNN**



**Figura 3.7 Ubicación de bloques de ARTEMIS SNN**

Tal como se muestra en la Figura 3.7 los bloques de ARTEMIS SSN jamás se deben colocar en serie con un medidor de voltaje y corriente, puesto que estos bloques manejan una estructura específica en sus algoritmos y al ser colocados en serie con los medidores, estos interfieren en la solución rápida de los mismos, es por esto que el programa mostrara error al tratar de compilar y simular algún sistema si se los aplica de esta forma errónea.

#### **3.4.6 Modelo del sistema eléctrico de distribución**

El modelo a continuación cuenta con los bloques de comunicación de RT-LAB que son importantes para la simulación en tiempo real, estos bloques son importantes ya que son uno de los requerimientos de RT-LAB para la simulación en tiempo real, ya que si estos bloques no son adicionados se ejecutarán errores al momento de compilar y cargar el sistema modelado, como anteriormente se comentó, en el subsistema “modelo” se agregan las señales que serán enviadas al entorno grafico LABVIEW que simula el sistema SCADA de la red de distribución creada y que se comentará más adelante.

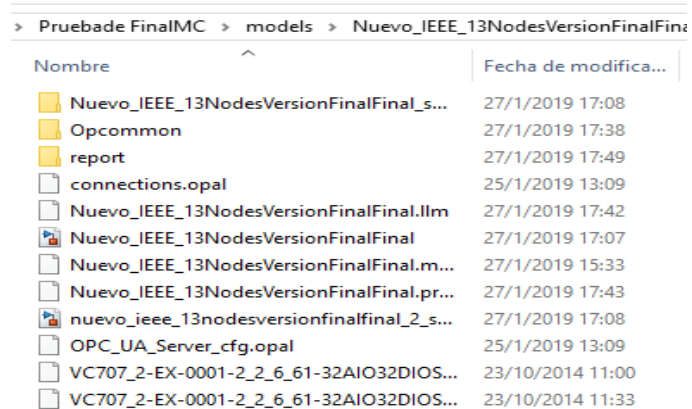
Para el envío de estas señales es importante utilizar los bloques de RT-LAB, es recomendable que para la mayoría de las entradas y salida sean utilizados bloques prediseñados de la librería RT-LAB para no incurrir en errores innecesarios.

Además, podemos observar también los bloques de ARTEMIS SSN, los cuales facilitan la ejecución del sistema en tiempo real, para nuestro proyecto utilizamos dos bloques de ARTEMIS SSN, ya que al utilizar dos fallas en dos zonas diferentes se demanda una gran cantidad de memoria para la resolución del modelo, pero gracias a estos bloques y las propiedades que fueron comentadas en la sección anterior.



### 3.4.7 Envío de señales

Para el envío de señales es obligatorio utilizar los bloques de “AnalogIn” y “AnalogOut” de RT-LAB, además de colocar en la carpeta de origen de Opal-RT los archivos de “Bitstream” correspondientes a la Vcard que utiliza el módulo de adquisición de datos OP5607, tal como se muestra en la Figura 3.9.



The image shows a file explorer window with the following path: > Pruebade FinalIMC > models > Nuevo\_IEEE\_13NodesVersionFinalFinal. The window displays a list of files and folders with their names and modification dates.

Nombre	Fecha de modifica...
Nuevo_IEEE_13NodesVersionFinalFinal_s...	27/1/2019 17:08
Opcommon	27/1/2019 17:38
report	27/1/2019 17:49
connections.opal	25/1/2019 13:09
Nuevo_IEEE_13NodesVersionFinalFinal.llm	27/1/2019 17:42
Nuevo_IEEE_13NodesVersionFinalFinal	27/1/2019 17:07
Nuevo_IEEE_13NodesVersionFinalFinal.m...	27/1/2019 15:33
Nuevo_IEEE_13NodesVersionFinalFinal.pr...	27/1/2019 17:43
nuevo_ieee_13nodesversionfinalfinal_2_s...	27/1/2019 17:08
OPC-UA_Server_cfg.opal	25/1/2019 13:09
VC707_2-EX-0001-2_2_6_61-32AIO32DIOS...	23/10/2014 11:00
VC707_2-EX-0001-2_2_6_61-32AIO32DIOS...	23/10/2014 11:33

**Figura 3.9 Carpeta contenedora del modelo en RT-LAB**

Es recomendable que se utilicen bloques terminales de simulink en los bloques “AnalogOut1” que hacen referencia a las señales que van hacia el exterior y que son necesarias para la técnica Hardware in the loop, tal como se muestra en la Figura 3.10, porque si no el programa muestra error.

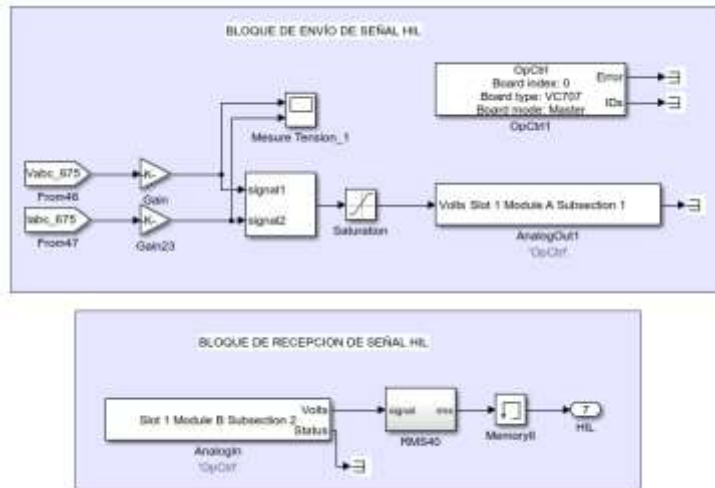


Figura 3.10 Bloques de adquisición de datos en RT-LAB

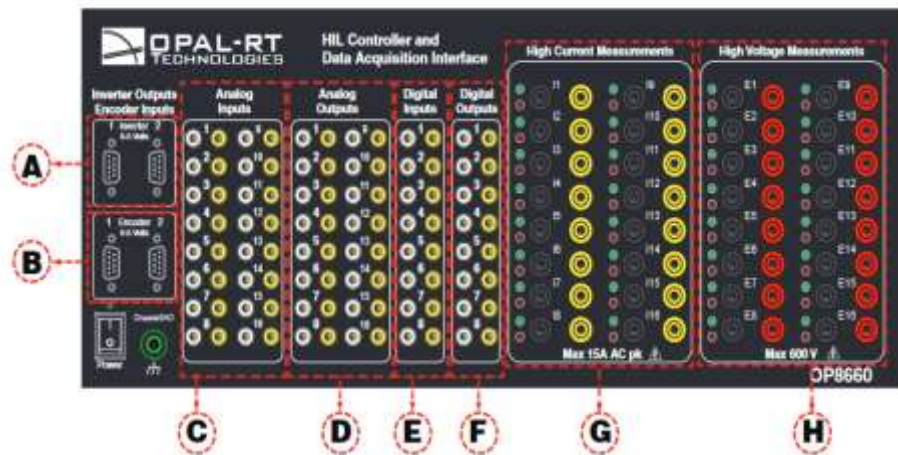


Figura 3.11 Modulo de Adquisición de datos OP8660 [8]

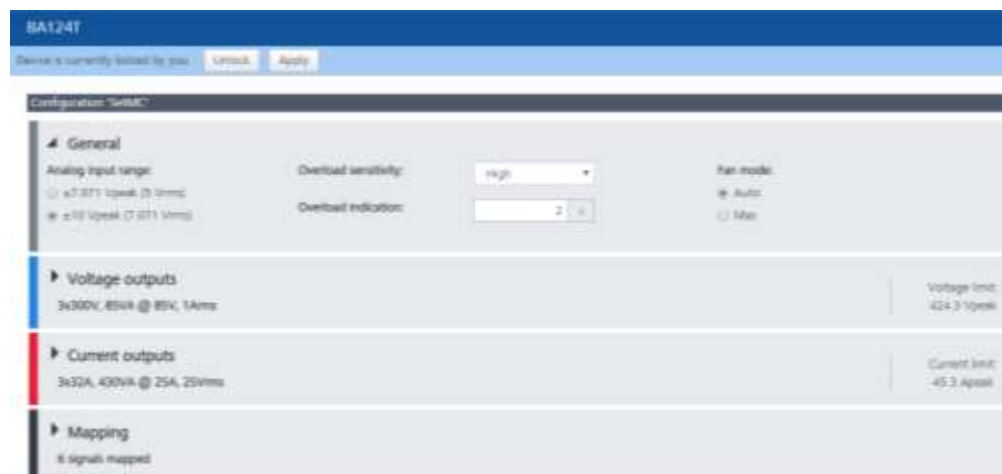
### 3.4.8 Configuración del amplificador de señales OMICRON CMS 356

El amplificador de señales utilizados en este proyecto es el OMICRON CMS356, y es importante el uso de este equipo para poder amplificar las señales análogas provenientes de la simulación ya que el simulador cuenta con una restricción de  $\pm 16V$ , y este voltaje no es adecuado porque es de una tensión muy baja para poder alimentar el relé de protección real, por lo cual es necesario realizar la conexión de las señales de salida de la simulación hacia el amplificador.



Para realizar una correcta conexión de estas señales es necesario visualizar porque puerto saldrán las señales análogas del simulador y que estén coincidan con la conexión que va hacia el amplificador.

Además, es importante configurar la combinación de las salidas y voltajes de corriente adecuados para el proyecto a implementar, esto se puede realizar desde la interfaz web del amplificador, lo cual se puede acceder desde el navegador utilizando la dirección IP 200.009.176.237 que es la IP estática ajustada para el amplificador, dentro de ella se puede ajustar los rangos requeridos. En la Figura 3.12 se observa lo ajustes para nuestro proyecto.



**Figura 3.12 Ajustes del amplificador**

### **3.4.9 Conexión del relé Multilin L90 GE**

Una vez realizada la correcta amplificación de las señales que se van a utilizar en el sistema, se procede a la conexión de las borneras del relé de protección real.

Las primeras salidas trifásicas de corriente del amplificador se conectan a las entradas de los CTs, las cuales están marcadas como CURRENT INPUTS, y las salidas de voltaje del amplificador se conectan a los terminales que están marcadas como VOLTAGE INPUTS.

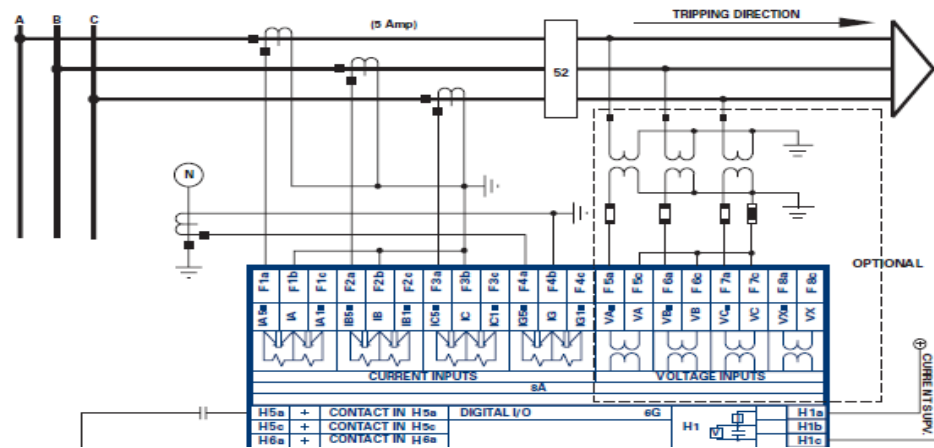


Figura 3.13 Conexión del relé GE L90 [7]

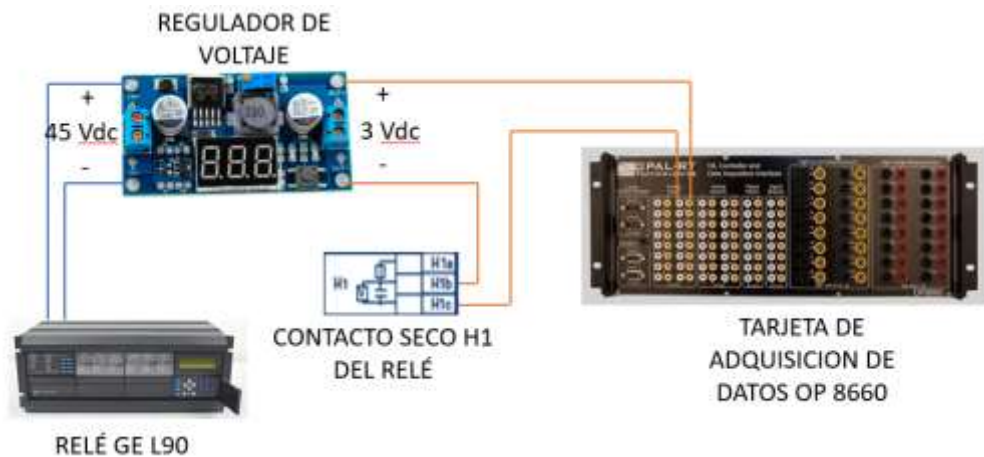
### 3.5 Señal de retorno del accionamiento del relé

Para el paso final de la técnica Hardware in the loop es importante el retorno de la señal de disparo del relé de protección real, lo cual será aprovechado con unos de sus tantos contactos con los que cuenta.

Al momento de producirse la falla en tiempo real en el sistema simulado, este relé de protección mide la falla y cierra sus contactos si es que las condiciones de falla sobrepasan sus niveles ajustados previamente, y envía una señal de 46 Vdc, lo cual es una señal muy alta para los rangos permitidos por el simulador que anteriormente mencionamos que son +/-16V y lo cual es peligroso porque se puede dañar el hardware del simulador.

Para lograr la técnica hardware in the loop fue necesaria la implementación de un regulador de voltaje DC, con el cual logramos reducir el voltaje de 46Vdc iniciales del contacto del relé a 3.1Vdc, lo cual es admitido por la entrada análoga del simulador y logra retornar la señal al sistema simulado a través de la tarjeta de adquisición de datos del módulo OP8660 en tiempo real y permite la actuación en los interruptores de protección que se encuentran ubicados en las líneas comprometidas con la falla.

En la Figura 3.14 se muestra la conexión del regulador para poder obtener un valor entre los rangos +/-16V admitido por el módulo OP8660.



**Figura 3.14 Conexión del regulador de voltaje DC**

### 3.6 Configuración del Protocolo de comunicación

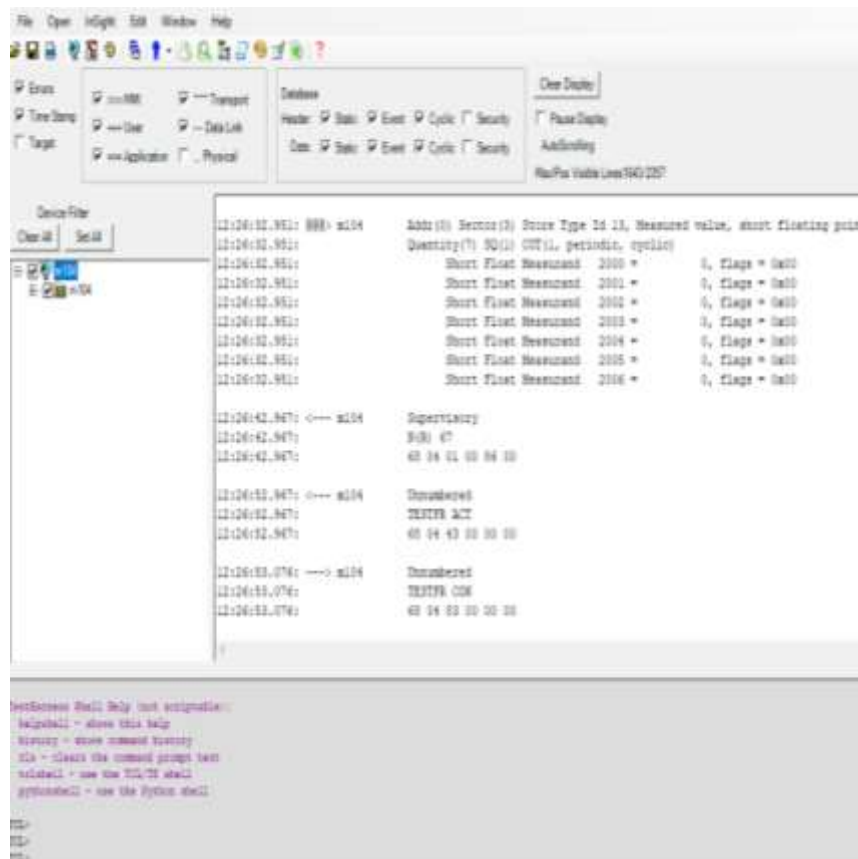
Para realizar la comunicación del relé L90 GE por medio del protocolo de comunicación de comunicación fue necesario el uso de un programa externo que tiene funciones para varios protocolos como DNP3, IEC 60870, IEC 61850, MODBUS entre otros, y funciona como simuladores Master y Esclavo.

Para nuestro propósito se utilizó el programa para configurar la función de Master en el PC ante el relé de protección, lo cual se consiguió ajustando el programa para la conexión por medio del protocolo IEC 60870-5-104, en el cual se debe introducir la dirección IP 200.009.176.241 y el puerto 2404 del relé de protección en la pestaña channel del programa, tal como se muestra en la **Figura 3.15**.



**Figura 3.15 Configuración del protocolo IEC 104**

Cuando se logra la conexión por medio del protocolo IEC 104, la ventana principal del programa muestra con éxito la transferencia de datos entre el PC y el relé de protección, tal como se puede apreciar en la Figura 3.16.



**Figura 3.16 Transferencia de datos PC - Relé**

Es muy importante este tipo de comunicación ya que se puede configurar ciertos datos para poder visualizarlos y enviarlos por medio del protocolo hacia otros equipos o programas, en nuestro caso solo visualizamos los datos de las entradas de voltaje y corriente que son configurados como datos de señales análogas que van desde el rango de 2000 a 2006 respectivamente; y además visualizamos el estado de batería del relé que se muestra como un dato binario con el dato número 100 y el estado de acción de disparo del relé ante una falla en el sistema simulado que también se muestra como un binario con el dato número 101, tal como se puede observar en la Figura 3.17.

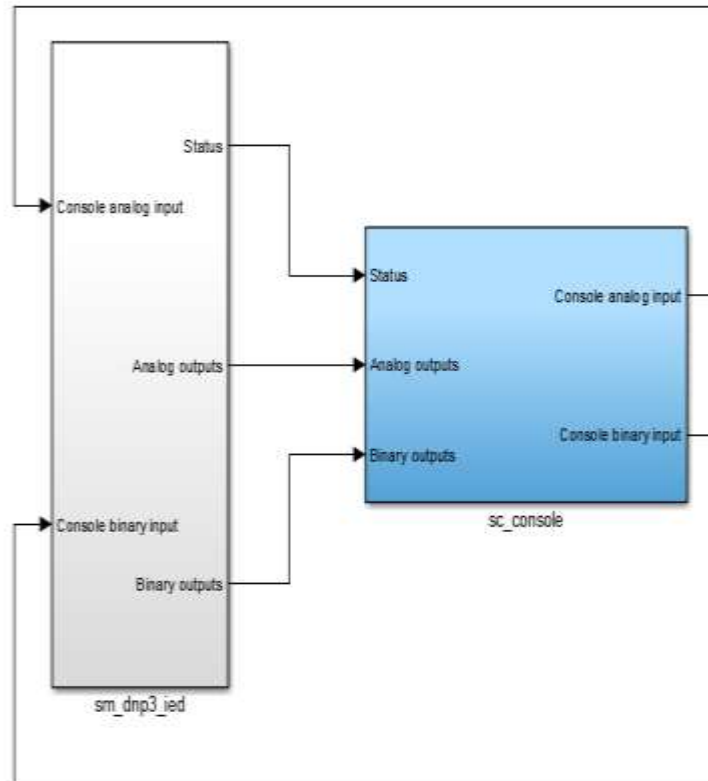
Channel	Session	Sector	Type	Number	Value	Flags	Time Updated
m104	m104	m104	[7] Single-point information	100	On	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[7] Single-point information	101	Off	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2000	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2001	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2002	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2003	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2004	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2005	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[13] Measured value, short floating point number	2006	0	Valid	01Feb19 12:25:43.045 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4000	1103430646	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4001	1415271520	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4002	1550152799	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4003	1103475079	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4004	1363432572	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4005	1163264082	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4006	359620583	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4007	1494553856	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4008	1	Valid	01Feb19 12:14:01.654 (assumed)
m104	m104	m104	[15] Integrated totals	4009	241576	Valid	01Feb19 12:16:35.460 (invalid)

**Figura 3.17 Señales configuradas en el protocolo**

Para realizar la comunicación entre el programa MatLab/Simulink como Master y el equipo OPAL – RT como esclavo, se siguió un ejemplo que se encuentra en la librería de RT – LAB, la cual cuenta con bloques prediseñados para este tipo de comunicación y que de igual forma que con el programa anterior que simula servidores solo necesita ser configurados ciertos parámetros como dirección IP, numero de puerto, numero de fuente, los cuales se encuentran en los manuales del relé L90.

Una vez configurados estos parámetros se procede a realizar bloques de subsistemas debido a lo que se mencionó en la sección 3.4.5, en el ejemplo de RT – LAB tenemos un bloque SM en el cual se crean salidas y entradas análogas

y además se crea una salida de estado, la cual mostrará el estado de conexión por medio del protocolo.



**Figura 3.18 Modelo de conexión esclavo OPAL - RT [15]**

En la Figura 3.19 se observa el subsistema SM en el cual se crea un bloque de conexión en los cuales se deben ajustar los parámetros mencionados anteriormente para lograr la conexión del protocolo, y en la Figura 3.20 se muestra el subsistema SC en el cual se crean señales de visualización, los cuales mostraran las señales simuladas en tiempo real en OPAL – RT, al igual que con el modelo de distribución, estos subsistemas deben ser cargados y compilados en RT – LAB que es la plataforma de compatibilidad entre OPAL – RT y Simulink, manteniendo de igual forma los bloques de comunicación de Artemis para no tener errores al momento de compilar y crear la interfase de la simulación en RTS.



Simulated IED communicating over DNP3

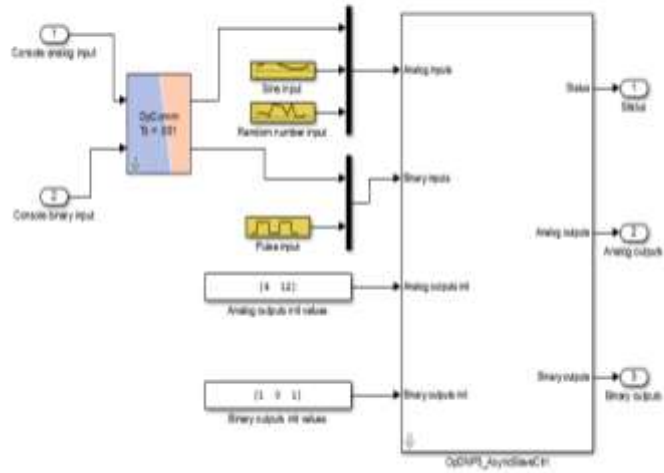


Figura 3.19 Subsistema SM DNP3



Simulated IED communication over DNP3 console

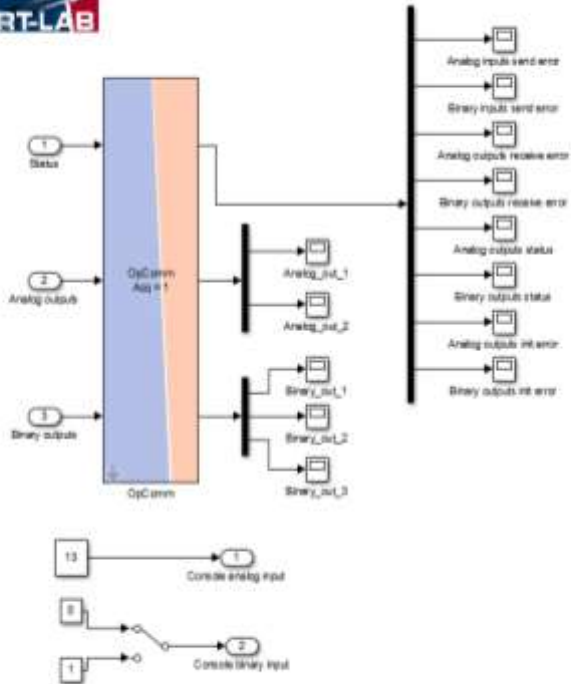


Figura 3.20 Subsistema SC DNP3

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS

En esta sección se pretende documentar los resultados obtenidos mientras se implementaba la técnica Hardware in the loop, que es importante para la aplicación de prácticas experimentales para cursos posteriores de la carrera ingeniería en electricidad en el laboratorio de simulación en tiempo real.

Por lo general en los sistemas de distribución es común los desbalances de tensiones entre fases, debido a la continua variación de carga en la red, con tan solo tener cargas monofásicas en la red provenientes de usuarios residenciales generan un estado de desequilibrio en el sistema trifásico, ya que provocan magnitudes y fases de corrientes diferentes.

Es por esto por lo que nuestro sistema tiene diferentes valores de corriente, para lograr esta similitud a un sistema real fue necesario modificar los parámetros de las líneas en el sistema simulado, y de igual forma fue necesario colocar cargas desbalanceadas.

Estos desbalances aparecerán en las simulaciones tanto en tiempo off-line como en tiempo real.

### 4.1 Simulación Off-line del sistema eléctrico de distribución

Una vez modificado y acondicionado el sistema de distribución seleccionado para este proyecto, se procedió a realizar las simulaciones correspondientes en off-line, para visualizar la forma en que opera el sistema eléctrico de distribución ante eventos de fallas.

Las fallas que se simularán en el sistema serán denominadas "Falla1", la que se encuentra ubicada entre la barra 632 y barra 633 de nuestro sistema eléctrico de distribución, mientras que la falla ubicada entre la barra 692 y la barra 675 será

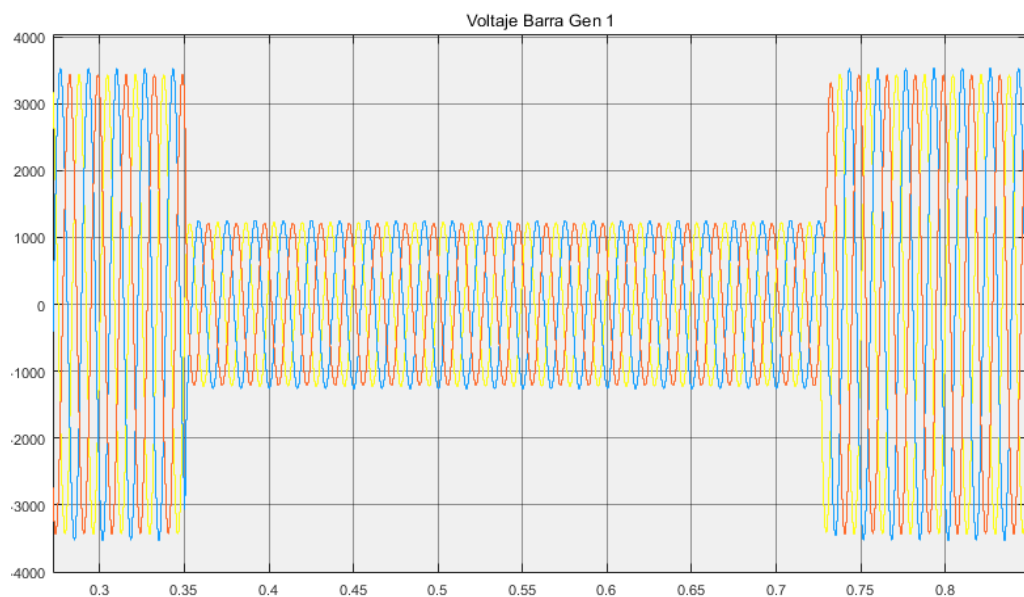


denominada “Falla2”, estas denominaciones se utilizarán para hacer menciones en el resto del capítulo.

Cabe mencionar que estas fallas podrán ser de tipo trifásicas y monofásicas, de acuerdo con la selección del operador al momento de la simulación.

En la Figura 4.1 se puede observar la forma en que se comporta el voltaje ante la “Falla1”, podemos apreciar el comportamiento normal de las ondas de voltaje del generador que se encuentra en la barra 632 hasta el momento en que se genera la perturbación en el sistema donde se aprecia la caída de tensión debido a la falla trifásica que fue activada en ese instante.

De igual forma podemos apreciar como al momento en que los relés virtuales despejan la falla, la tensión de voltaje vuelve a su estado normal de operación que es lo esperado que suceda en la simulación en tiempo real.

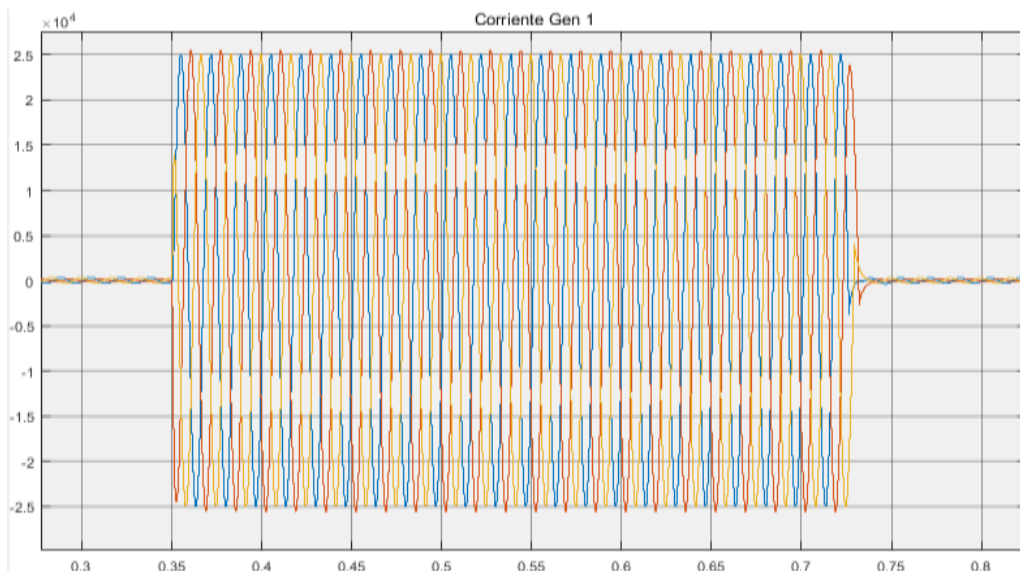


**Figura 4.1 Oscilografía de voltaje de la barra 632 ante falla trifásica**

Tal como sucede una variación en los niveles de voltaje debido a la perturbación que se da en el sistema, lo mismo pasa con la intensidad de corriente que circula por él circuito.

En la Figura 4.2 podemos observar la forma en la que se comportan las corrientes ante la “Falla1”, igual que con los voltajes, antes de la falla tenemos un comportamiento normal pero justo en el instante de falla tenemos una elevación excesiva de corriente, lo cual es muy perjudicial para los sistemas eléctricos de distribución, ya que estas altas corrientes pueden llegar a dañar valiosos equipos de una subestación y peor aún pueden llegar a causar muerte, es por esto que son importantes los equipos de protección.

De igual forma podemos apreciar como al momento en que los relés virtuales despejan la falla, la intensidad de corriente vuelve a su estado normal de operación que es lo esperado que suceda en la simulación en tiempo real.



**Figura 4.2 Oscilografía de corriente de la barra 632 ante falla trifásica**

En la Tabla 4.1 podemos observar los valores del voltaje y de la corriente de los diferentes elementos que tenemos en el sistema eléctrico de distribución en operación normal, como se observa los valores de voltaje están dentro del rango  $\pm 5\%$  de la regulación de voltaje que debe tener un sistema eléctrico.

Los valores de corriente de cada fase varían en su magnitud, cabe recalcar que esta variación es debido a que el sistema seleccionado es un sistema desbalanceado porque es muy común tener este tipo de desbalances de

corriente en esta clase de sistemas de distribución debido a que por naturaleza la mayoría de sus cargas residenciales son cargas monofásicas.

Además, se comenta que la magnitud de corriente de la carga 4 tiene una intensidad muy elevada, esto es debido a que en la barra anterior tenemos un transformador reductor, por lo cual al bajar su tensión la corriente tiende a elevarse para poder suplir la demanda necesitada por esta carga.

**Tabla 4.1 Voltajes y corrientes en operación normal**

		<b>Voltajes [PU]</b>	<b>Corrientes [A]</b>
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	1.012	224.5
	<b>FaseB</b>	1.038	105.7
	<b>Fase C</b>	1.01	193.1
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	1.016	122.8
	<b>FaseB</b>	1.04	49.99
	<b>Fase C</b>	1.013	105.7
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	1.012	3.985
	<b>FaseB</b>	1.038	15.15
	<b>Fase C</b>	1.01	27.48
<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	1.009	4.251
	<b>FaseB</b>	1.039	14.89
	<b>Fase C</b>	1.003	29.55
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	1.009	61.68
	<b>FaseB</b>	1.039	61.1
	<b>Fase C</b>	1.003	62.99
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.9833	697.5
	<b>FaseB</b>	1.019	528.4
	<b>Fase C</b>	0.9865	538.4
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	1.005	226.6
	<b>FaseB</b>	1.041	35.36
	<b>Fase C</b>	1.002	157.3

En la Tabla 4.2 podemos observar los valores de voltaje y corriente que se generan al producirse la falla 1 en la línea entre la barra 632 y la barra 634, como se puede apreciar, tenemos una caída de tensión en todo el sistema, y las intensidades de corriente en los generadores aumentan de forma elevada, lo cual puede generar daños como se mencionó anteriormente.

**Tabla 4.2 Voltajes y corrientes con falla 1**

		Voltajes [PU]	Corrientes [A]
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	0.3816	16950
	<b>FaseB</b>	0.3933	17280
	<b>Fase C</b>	0.379	16980
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	0.9673	3566
	<b>FaseB</b>	0.9928	3594
	<b>Fase C</b>	0.9666	3598
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	0.3816	1.491
	<b>FaseB</b>	0.3933	5.696
	<b>Fase C</b>	0.379	10.23
<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	0.7129	2.98
	<b>FaseB</b>	0.7418	10.54
	<b>Fase C</b>	0.7102	20.75
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	0.7129	43.24
	<b>FaseB</b>	0.7418	43.25
	<b>Fase C</b>	0.7102	44.23
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.6866	482.8
	<b>FaseB</b>	0.7269	373.5
	<b>Fase C</b>	0.6919	374.2
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	0.7068	148.8
	<b>FaseB</b>	0.7423	49.65
	<b>Fase C</b>	0.7077	90.62

De igual forma en la Tabla 4.3 se observan los voltajes y corrientes que se generan debido a la Falla2, como podemos observar esta falla provoca menos elevación de la intensidad de corriente en el generador 1 que se encuentra en la barra 632, pero provoca una elevación en el generador 2 debido a que está más cerca de esta zona.

**Tabla 4.3 Voltajes y corrientes en falla 2**

		Voltajes [PU]	Corrientes [A]
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	0.6865	11220
	<b>FaseB</b>	0.7049	11410
	<b>Fase C</b>	0.6852	11250
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	0.7755	7789
	<b>FaseB</b>	0.7941	7924
	<b>Fase C</b>	0.7733	7804
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	0.6865	2.682
	<b>FaseB</b>	0.7049	10.21
	<b>Fase C</b>	0.6852	18.5

<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	0.1703	0.7119
	<b>FaseB</b>	0.1753	2.492
	<b>Fase C</b>	0.1711	4.999
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	0.1703	10.33
	<b>FaseB</b>	0.1753	10.22
	<b>Fase C</b>	0.1711	10.66
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.4406	309.9
	<b>FaseB</b>	0.4559	234.2
	<b>Fase C</b>	0.4427	239.4
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	0.08	16.88
	<b>FaseB</b>	0.0083	5.578
	<b>Fase C</b>	0.0811	10.39

#### 4.2 Simulación en tiempo real del sistema eléctrico de distribución

En el capítulo anterior se dieron toda la metodología para lograr la simulación en tiempo real, y en esta sección se mostrarán los resultados obtenidos, los cuales pudimos comprobar que son similares a los obtenidos en la simulación off-line.

En la Tabla 4.4 podemos observar los valores obtenidos de voltaje y corrientes simulados en tiempo real, y comparando con la Tabla 4.1 tenemos que los valores de voltaje y corrientes tienen un porcentaje de error del 0.4%, lo cual es muy aceptable para los fines de nuestro proyecto, porque este porcentaje no afectará en los ajustes de los parámetros de nuestra protección virtual ni real.

**Tabla 4.4 Voltajes y corrientes operación normal en tiempo real**

		<b>Voltajes [PU]</b>	<b>Corrientes [A]</b>
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	1.014	225.5
	<b>FaseB</b>	1.042	106.7
	<b>Fase C</b>	1.025	193.15
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	1.021	122.83
	<b>FaseB</b>	1.06	49.92
	<b>Fase C</b>	1.018	105.67
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	1.017	3.975
	<b>FaseB</b>	1.041	15.19
	<b>Fase C</b>	1.05	27.41

<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	1.012	4.246
	<b>FaseB</b>	1.042	14.83
	<b>Fase C</b>	1.009	29.51
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	1.012	61.61
	<b>FaseB</b>	1.042	61.15
	<b>Fase C</b>	1.009	62.90
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.9835	697.55
	<b>FaseB</b>	1.022	528.43
	<b>Fase C</b>	0.9868	538.43
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	1.009	226.67
	<b>FaseB</b>	1.045	35.30
	<b>Fase C</b>	1.008	157.35

De igual forma podemos observar en la Tabla 4.5 y en la Tabla 4.6 los valores de voltaje y corriente obtenidos al generar la Falla1 y Falla2.

**Tabla 4.5 Voltajes y corrientes con Falla1 generada en tiempo real**

		<b>Voltajes [PU]</b>	<b>Corrientes [A]</b>
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	0.3821	16950.14
	<b>FaseB</b>	0.3937	17281.09
	<b>Fase C</b>	0.373	16979.68
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	0.9668	3566.25
	<b>FaseB</b>	0.9931	3593.87
	<b>Fase C</b>	0.9672	3597.95
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	0.3821	1.495
	<b>FaseB</b>	0.3937	5.691
	<b>Fase C</b>	0.374	10.27
<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	0.7125	2.94
	<b>FaseB</b>	0.7414	10.50
	<b>Fase C</b>	0.7106	20.79
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	0.7125	43.28
	<b>FaseB</b>	0.7423	43.21
	<b>Fase C</b>	0.7107	44.27
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.6862	482.84
	<b>FaseB</b>	0.7265	373.54
	<b>Fase C</b>	0.6915	374.27
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	0.7064	148.83
	<b>FaseB</b>	0.7427	49.61
	<b>Fase C</b>	0.7081	90.66

**Tabla 4.6 Voltajes y corrientes con Falla2 generada en tiempo real**

		<b>Voltajes [PU]</b>	<b>Corrientes [A]</b>
<b>Barra 632</b>	<b>Fase A</b>	0.6865	11220
	<b>FaseB</b>	0.7049	11410
	<b>Fase C</b>	0.6852	11250
<b>Barra 680</b>	<b>Fase A</b>	0.7755	7789
	<b>FaseB</b>	0.7941	7924
	<b>Fase C</b>	0.7733	7804
<b>Carga 1</b>	<b>Fase A</b>	0.6865	2.682
	<b>FaseB</b>	0.7049	10.21
	<b>Fase C</b>	0.6852	18.5
<b>Carga 2</b>	<b>Fase A</b>	0.1703	0.7119
	<b>FaseB</b>	0.1753	2.492
	<b>Fase C</b>	0.1711	4.999
<b>Carga 3</b>	<b>Fase A</b>	0.1703	10.33
	<b>FaseB</b>	0.1753	10.22
	<b>Fase C</b>	0.1711	10.66
<b>Carga 4</b>	<b>Fase A</b>	0.4406	309.9
	<b>FaseB</b>	0.4559	234.2
	<b>Fase C</b>	0.4427	239.4
<b>Carga 5</b>	<b>Fase A</b>	0.08	16.88
	<b>FaseB</b>	0.0083	5.578
	<b>Fase C</b>	0.0811	10.39

Observando los valores de las tablas antes mencionadas y verificar que también tienen un porcentaje de error del 0.4% podemos concluir que la simulación en tiempo real no afecta los cálculos en un sistema eléctrico.

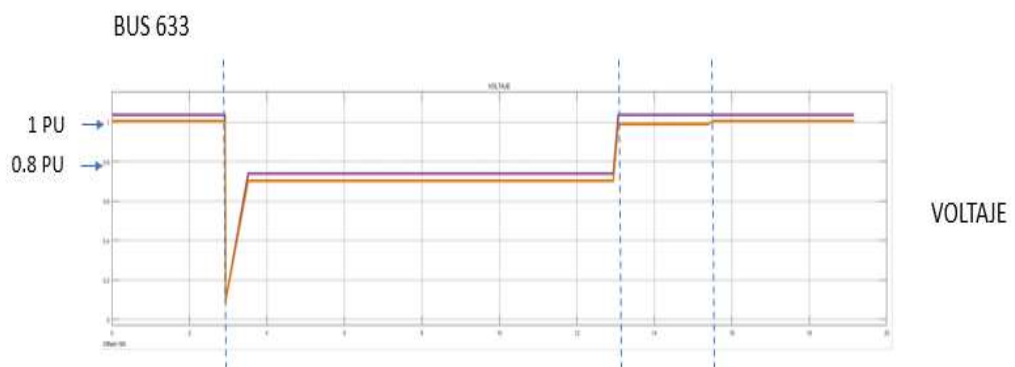
### **4.3 Generación de las fallas con la técnica Hardware in the loop**

Luego que se logró recibir la señal desde el exterior tras varias minuciosas pruebas y haber logrado la técnica hardware in the loop, se procedió a observar el funcionamiento del relé L90 GE tras generarse fallas en el sistema simulado.

Para evaluar el correcto funcionamiento del relé L90 y de la función 67P se colocaron las fallas de forma estratégica en las ubicaciones mencionadas en la sección 4.1, porque de esta forma tendríamos doble sentido de corriente para

cada falla, y se puede verificar que la configuración de la función 67P tanto del relé virtual como relé real sea la correcta.

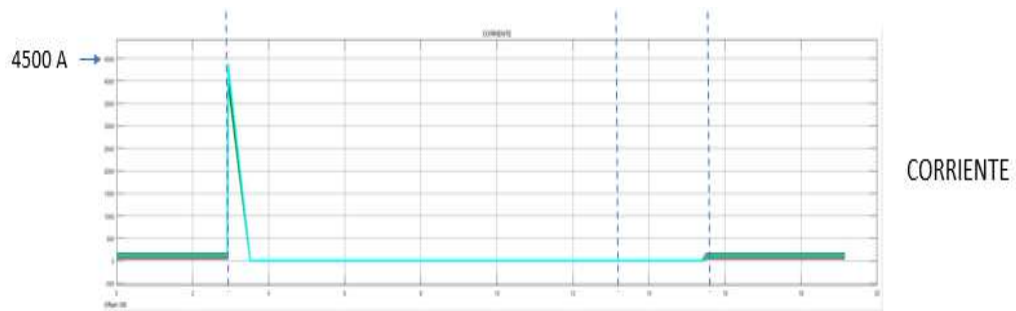
En la Figura 4.3 podemos observar el comportamiento del voltaje en la barra 633, como se puede apreciar en el inicio, el voltaje se encuentra en operación normal, en el momento que se genera la falla, el voltaje tiene una caída de tensión y es justo ahí donde el relé sensa la polarización que produce este disturbio, actúa y abre el interruptor que se encuentra comprometido con la falla, para mejorar la tensión en un valor de 0.8 P.U., hasta volver a medir la corriente y verificar si la intensidad de falla ha desaparecido del sistema para volver a cerrar el interruptor y tener nuevamente el sistema en operación normal.



**Figura 4.3 Voltaje de relé virtual ante falla1**

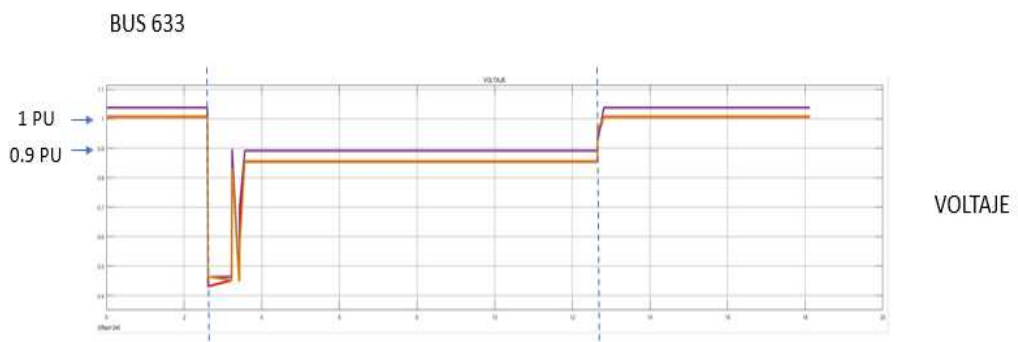
En la Figura 4.4 podemos observar que la corriente tiene similar comportamiento al que tuvo el voltaje al momento de generarse la falla en el sistema, de igual forma podemos apreciar como la intensidad de corriente tiene valores excesivos para los soportados por el sistema aproximadamente 4500A, y es justo ahí donde actúa el relé abriendo el interruptor e impidiendo que esta corriente siga circulando, hasta que vuelva a medir la intensidad y estar dentro de los ajustes predeterminados para su operación normal.





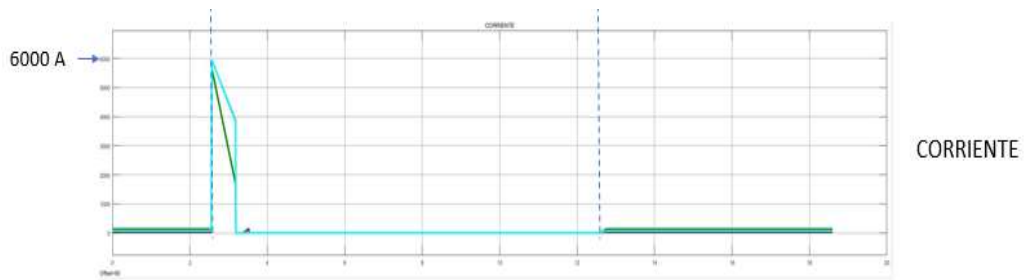
**Figura 4.4 Corriente de relé virtual ante falla1**

Como se observa en la Figura 4.5, el comportamiento del relé real es similar al del relé virtual, al momento de generarse la falla en el sistema el relé abre el interruptor, despeja la falla y trata de mantener el sistema operando en un nivel de voltaje de 0.87 P.U., y de igual forma al momento de desaparecer la falla el relé vuelve a cerrar el interruptor para dejar el sistema en operación normal.



**Figura 4.5 Voltaje del relé real L90 GE ante la Falla1**

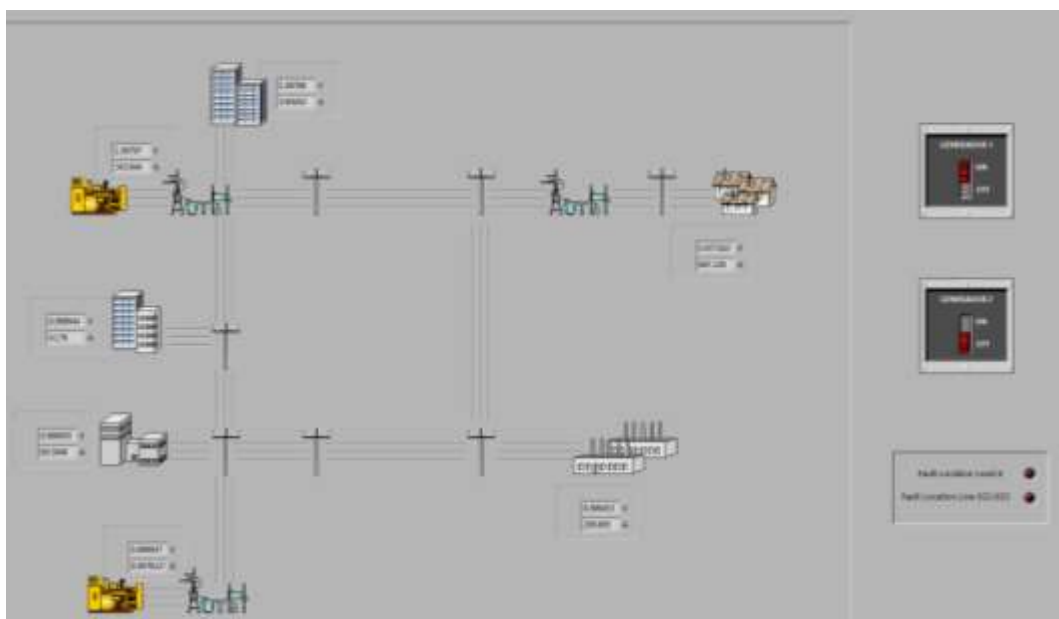
Para la corriente del sistema en el momento que se genera la falla tenemos un comportamiento similar, la intensidad de corriente sobrepasa los ajustes predeterminados y el relé L90 abre el interruptor impidiendo que esa excesiva corriente circule y provoque daños a los equipos en el sistema, el relé vuelve a cerrar el interruptor cuando la falla ha desaparecido del sistema, tal como observamos en la Figura 4.6.



**Figura 4.6 Corriente del relé real L90 GE ante la Falla1**

#### 4.4 Creación del entorno de control y visualización SCADA

Para la creación de este entorno utilizamos el software LABVIEW, la cual es una herramienta de programación gráfica de fácil manejo y que permite realizar variaciones de diseños dependiendo de la creatividad y necesidades del usuario del usuario, para nuestro sistema de distribución utilizamos tableros de control en el cual se visualizara el sistema de distribución operando en condiciones normales, un tablero para visualizar y controlar las fallas que se simularan en el proyecto, además de controlar la actuación de los relés, esto para observar que el usuario tiene el control total de los relés de protección tanto virtual como real, y también un tablero para visualizar las potencias demandadas en operación normal y operación de falla, lo antes mencionado se puede apreciar en la Figura 4.7 y Figura 4.8.



**Figura 4.7 Sistema de distribución**

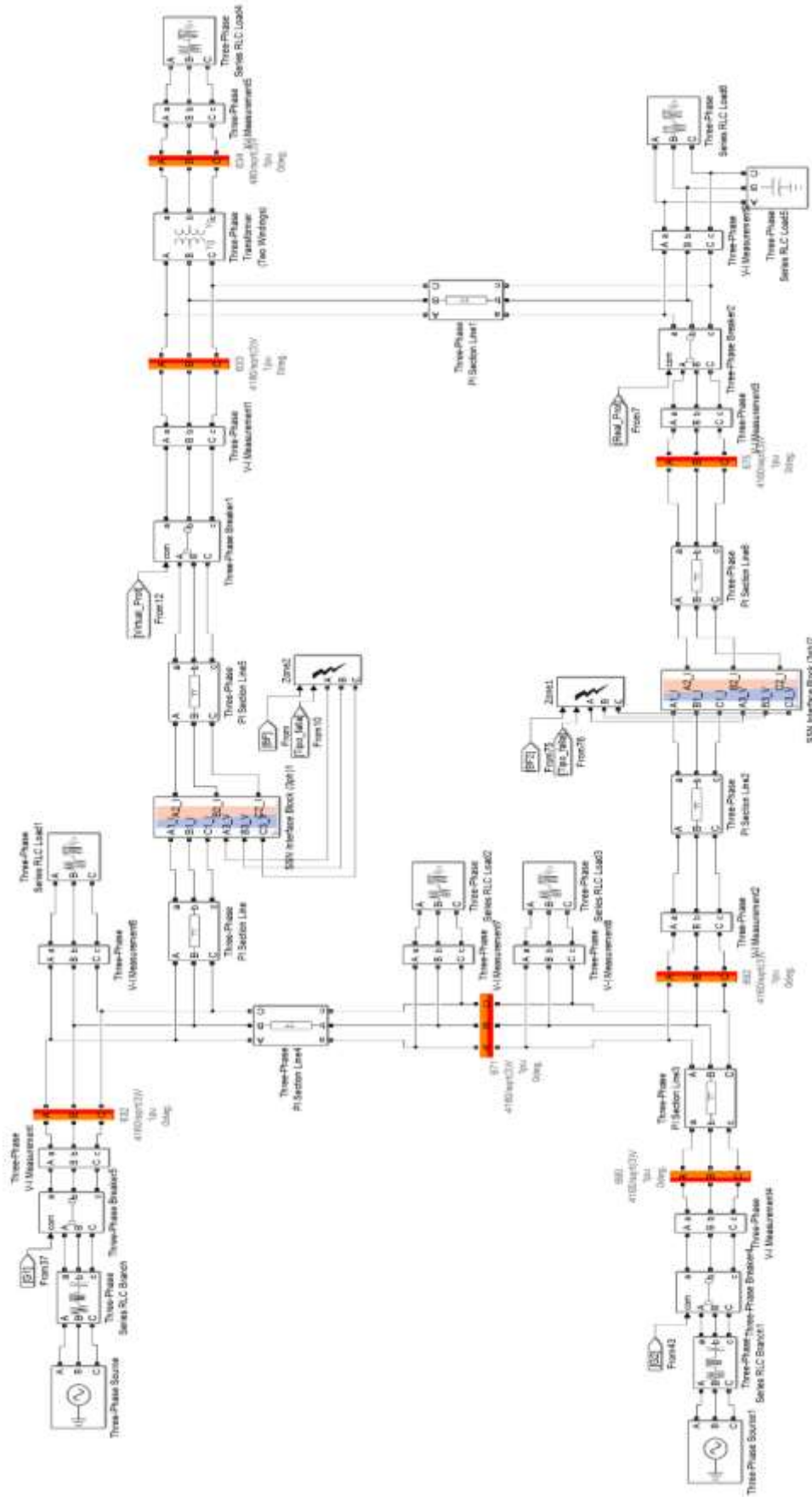


Figura 4.8 Panel de control del sistema de distribución

Y de igual forma podemos observar las potencias de los generadores.

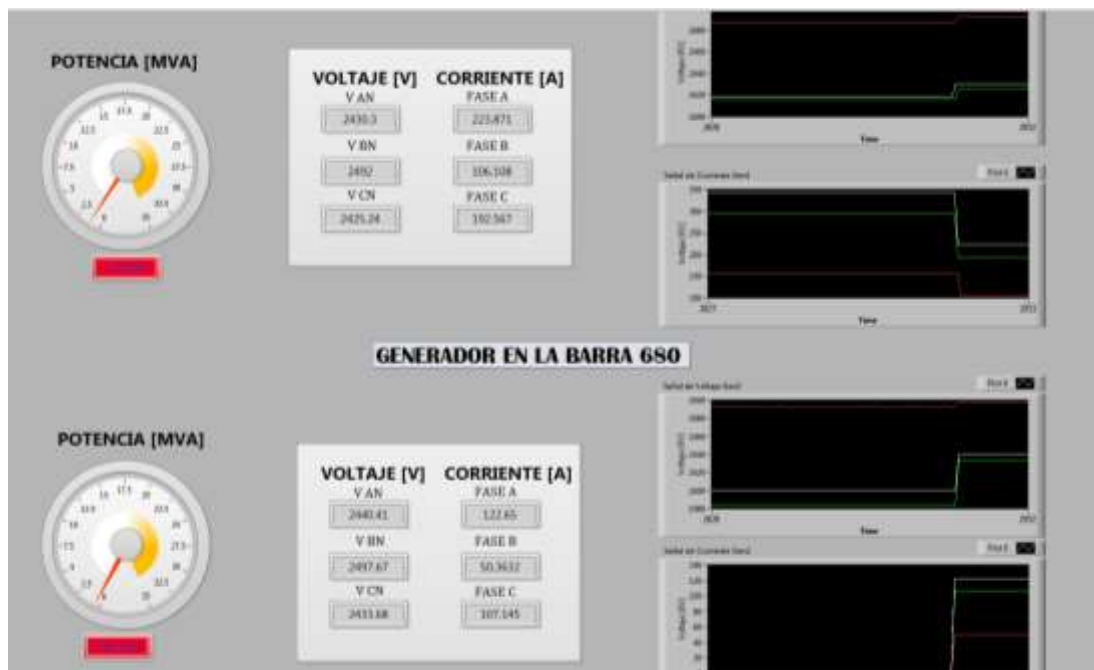


Figura 4.9 Visualización de las potencias de los generadores

#### 4.4.1 Adicionar los archivos en el simulador de tiempo real

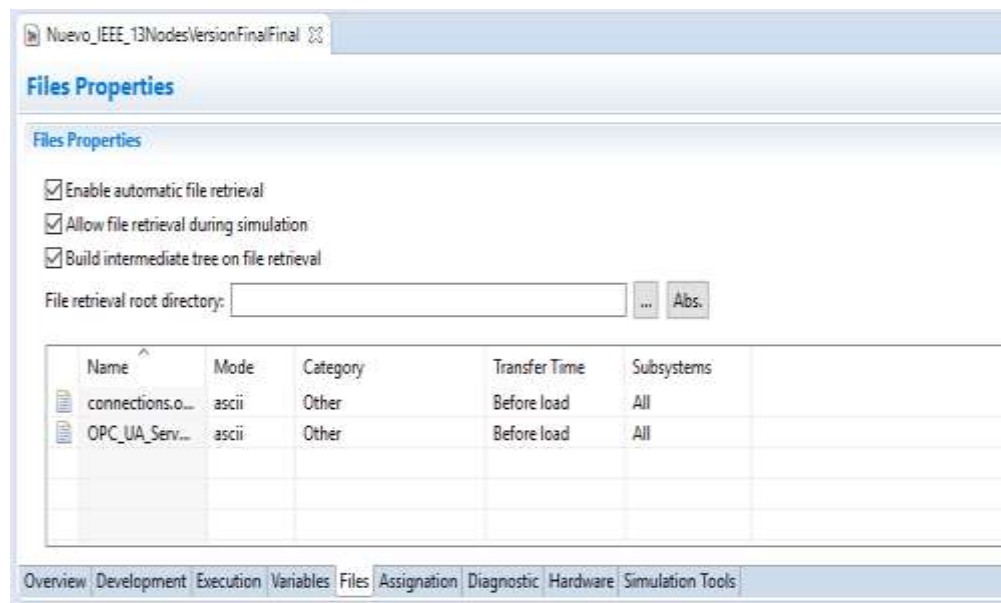


Figura 4.10 Archivos de LabVIEW en RT-LAB

Para lograr la compatibilidad entre LabVIEW con el simulador de tiempo real OPAL - RT primeramente se deben configurar sus scripts en el cual se detallan las señales de salida y entrada, las cuales se debieron haber especificado anteriormente en el subsistema "sm\_model", luego se debe cargar estos archivos en el software RT-LAB y de esta forma el programa queda configurado para su funcionamiento en tiempo real, la Figura 4.10 muestra la sección de la pantalla principal de RT-LAB en la cual se deben cargar los archivos de los scripts creados.

Otro punto importante es que se recomienda que estos archivos de script de LABVIEW se agreguen junto con la carpeta de origen del proyecto creado en RT-LAB.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta sección se mencionarán las conclusiones y recomendaciones más importantes que se dedujeron en el transcurso del avance del proyecto integrador.

### **Conclusiones**

Con la simulación en tiempo real pudimos implementar la técnica hardware in the loop que permite a equipos de protección externos interactuar con sistemas eléctricos simulados y de esta forma evaluarlos en diferentes escenarios.

Se pudo comprobar el funcionamiento de la operación 67P del relé L90 GE ante una falla trifásica en un sistema de distribución simulado en tiempo real.

Se logro comunicar el relé GE L90 bajo protocolo de comunicación IEC-104 con el programa externo como un simulador Master.

Se creo un SCADA en Labview, el cual permite al usuario monitorear el estado de la simulación y variar ciertas propiedades en la operación del sistema modelado.

### **Recomendaciones**

Se recomienda el uso de los bloques de Artemis SNN ya que estos liberan espacio al momento de la simulación, y además nos permite desfragmentar en varias partes el sistema modelado, de esta manera realizar la simulación de forma paralela y lograr la simulación en tiempo real.

Al momento de crear la estructura del sistema en simulink, se debe tener cuidado de no crear varios bucles en él envió de datos del subsistema del modelado al subsistema de la interfaz, ya que esto crea una ralentización en la simulación del sistema.

Se debe tener cuidado en los Sample Time de la simulación del sistema ya que Artemis puede simular una red de distribución por debajo de 100  $\mu$ s.

También se recomienda solicitar al inicio de futuros proyectos integradores, abastecer el laboratorio de simulación en tiempo real, con instrumentos de medición como pinzas amperimétricas, multímetros, visualizadores de ondas como osciloscopios, variadores de voltaje, reóstatos y en especial con cables de conexión para las entradas analógicas del simulador.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Lopes y N. C. Fernandes, «Comunicación de red inteligente: Análisis de requerimientos y protocolos SCADA,» de *Simposio Brasileiro de Sistemas Eléctricos*, Niteroi, 2018.
- [2] MEER, «Análisis para la Implementación de Redes Inteligentes en Ecuador,» Consultoría, Quito, 2014.
- [3] R. Amoah, S. Camtepe y E. Foo, «Securing DNP3 Broadcast Communications in SCADA Systems,» de *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Brisbane, Australia, 2016.
- [4] J. D. Juárez Cervantes, *Sistemas de distribución de energía eléctrica*, Mexico D.F.: Sans Serif Editores, 1995.
- [5] C. N. d. Eléctricidad, *Normas de distribución y construcción*, Mexico: Adriana Espinosa Editores, 1997.
- [6] J. Gonzáles y A. Arcos, «Necesidad de estandarización para determinar las tasas de falla de los elementos de la red,» de *CIREN 2009 - 20a Conferencia y Exposición Internacional sobre Distribución de Electricidad - Parte 1*, Praga, Republica Checa, 2016.
- [7] G. Electric, «UR Series Instruction Manual, L90 Line Differential Relay,» GE Industrial System, Boston, EE.UU., 2006.
- [8] O. RT, «Simulador Potente en Tiempo Real,» HELP, 2015.
- [9] O.-R. T. INC, «RCP/HIL Virtex 7 FPGA Processor & I/O Expansion Unit,» OP5607, Montreal.
- [10] C. De Castro Lozano y C. Romero Morales, «Introducción a SCADA,» 2003.
- [11] L. Cheng, «Estudio y aplicación de DNP3.0 en sistema SCADA,» de *Actas de la Conferencia Internacional de Ingeniería Electrónica y Mecánica y Tecnología de la Información de 2011*, Harbin, China, 2011.
- [12] A. Ortega, C. M. Schweitzer y A. A. Shinoda, «Simulación del protocolo DNP3 sobre TCP / IP en una red IEEE 802.11g ad-hoc con medidor inteligente,» de *2016 IEEE ANDESCON*, Arequipa, Perú, 2016.



- [13] S. Electricidad, «Protección de sobreintensidad direccional (67/67N),» 2016.
- [14] G. Sybille, G. Shirek y W. Kersting, «IEEE 13 Node Test Feeder,» de *PES T&D 2012*, Orlando, FL, USA, 2012.
- [15] RT-LAB, Simulink y MatLab, «Ejemplos de Comunicación DNP3,» 2008.