

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Título del trabajo

**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL  
ESTUDIO DE SISTEMAS SCADA PARA SISTEMAS DE  
TRANSMISIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Electricidad**

Presentado por:

Jonathan Israel Zurita Jiménez

José Luis Reyes Del Pezo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico  
especialmente a Dios, quien es el único  
digno de todo reconocimiento.

A mis padres, los cuales siempre  
confiaron en mí y creyeron que yo podía  
culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mis hermanos por todo el apoyo  
emocional brindado.

A mis amigos, los cuales han sido  
personas importantes en la última etapa  
de mi vida; siempre brindándome su  
amistad incondicional y aprecio.

**Jonathan Zurita**

Este proyecto lo dedico a toda mi familia  
que siempre estuvo pendiente durante  
mi carrera universitaria, a mis padres  
Arturo Reyes, Gladys Del Pezo y a mis  
hermanos que siempre me brindaron  
todo ese apoyo moral durante toda esta  
etapa de estudio.

**José Reyes**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi gratitud a Dios que ha extendido su amor y misericordia permitiendo que culmine esta etapa de mi vida; a mi familia quienes siempre me han apoyado y han estado presentes de manera incondicional; mis compañeros de materia integradora los cuales me han acompañado y ayudado para poder realizar el presente proyecto; mis amigos quienes les guardo un profundo aprecio especialmente en los últimos años.

**Jonathan Zurita**

Agradezco a mis padres que siempre fueron el pilar fundamental de apoyo para culminar mi carrera, a mis amigos Francisco, David, Roger, Steven y Jonathan que estuvieron en todo momento en conjunto para poder culminar con éxito este proyecto.

**José Reyes**


De igual manera nuestros sinceros agradecimientos, al PhD. Sixifo Falcones y al MSc. Johnny Rengifo los cuales en su rol de profesor de materia integradora y tutor respectivamente, han aportado de manera significativa con sus conocimientos, dirección y paciencia para que la culminación de este proyecto integrador sea posible.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jonathan Israel Zurita Jiménez* y *José Luis Reyes Del Pezo* 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"

  
Jonathan Israel Zurita Jiménez  
José Luis Reyes Del Pezo

## EVALUADORES

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sixifo', is written over a horizontal dotted line.

PhD. Sixifo Falcones Zambrano  
PROFESOR DE LA MATERIA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Johnny Rengifo', is written over a horizontal dotted line.

Msc. Johnny Rengifo  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Este trabajo de titulación desarrolla la simulación de un sistema de transmisión eléctrica de 9 barras de la IEEE a través de una plataforma de un sistema SCADA. El objetivo de este proyecto fue Implementar un Laboratorio Virtual en Tiempo Real para el estudio de Sistemas SCADA aplicado a la Transmisión Eléctrica mediante el uso de una base de datos externa SQL. Por medio de este programa se simuló fallas y análisis de contingencia en cada una de las barras. Y los resultados se dan través de protocolo de comunicación OPC UA utilizado para realizar la comunicación entre RT-LAB (Host PC) y LabVIEW (Client PC), tanto Host PC y LabVIEW realizan funciones de igual similitud para maniobrar y al mismo tiempo controlar el modelo escogido. En las pruebas se realizan la exportación de mediciones de magnitudes eléctricas a la base de datos externa SQL, que permite al operador tener un registro histórico del funcionamiento del sistema eléctrico de potencia en la barra diseñada para que ocurra la falla.

**Palabras Claves:** Sistema de transmisión. Simulación en tiempo real, SCADA, base de datos.

## ABSTRACT

This work involves the simulation of an IEEE 9-bus electric transmission system through a SCADA system platform. The main purpose of this project is to implement a Virtual Laboratory in Real Time for the analysis of SCADA systems applied to Electric Transmission using an external SQL database. By using this program, the system was simulated likely failures in each bar so we can analyze them in order to come up with suitable solutions. The results are given through the OPC UA communication protocol that communicates RT-LAB (Host PC) and LabVIEW (Client PC), Both perform similar functions to handle and control the chosen model. During the tests, the measurements of electric magnitudes are exported to the external SQL database. This allows the operator to have a historical record of the electric power system performance in the bus designed to fail.

**Keywords:** transmission network, real-time simulation, SCADA, database.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1    INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Descripción del problema .....	2
1.2    Justificación del problema.....	2
1.3    Propuesta .....	3
1.4    Objetivos.....	5
1.4.1    Objetivo General.....	5
1.4.2    Objetivos Específicos .....	5
1.5    Marco teórico .....	5
1.5.1    Modelo de Sistema de Trasmisión.....	6
1.5.2    Sistema de Transmisión para Estudio de Control y SCADA.....	6
1.6    Programas computacionales y equipos necesarios para efectuar el proyecto de la Simulación tiempo real: .....	7
1.6.1    Matlab /Simulink. ....	7
1.6.2    Software LabVIEW .....	8
1.6.3    Software SQLite Studio .....	8
1.6.4    Simulación en Tiempo Real.....	8
1.6.5    Simulador en Tiempo Real Opal – RT .....	9
1.7    Smart Grids.....	9
1.8    Comunicación OPC UA (Arquitectura Unificada) .....	10

1.8.1	OPC UA Modelado de información.....	11
1.8.2	Capas de comunicación OPC UA.....	12
1.8.3	Aplicaciones con OPC UA.....	12
1.9	Sistema SCADA.....	13
1.9.1	Requisito del Sistema SCADA.....	15
1.9.2	Características de los Sistemas SCADA. ....	16
1.9.3	Sistema de monitoreo en Simulación en tiempo Real .....	16
CAPÍTULO 2.....		18
2	METODOLOGÍA A SEGUIR DEL DISEÑO DE CONTROL Y MONITOREO DE UN SCADA EN LABWIEV .....	18
2.1	Secuencia de Proyecto Integrador en Software.....	18
2.1.1	Modelar en Simulink .....	18
2.1.2	CONEXIÓN DE COMUNICACIÓN ENTRE PC Y OPAL-RT PARA PODER INSERTAR EL PROYECTO DE FORMA DIGITAL.....	20
2.1.3	Comunicación OPC UA CON LabVIEW.....	20
2.1.4	Procedimiento para guardar datos en SQLite Studio.....	21
CAPÍTULO 3.....		24
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	24
3.1	Diseño del modelo en Simulink.....	24
3.2	Funcionamiento del programa RT-LAB (Host PC).....	24
3.3	SCADA ELABORADO EN LABVIEW PARA EJERCER CONTROL.....	25
3.3.1	Diagrama unifilar del sistema de transmisión .....	25
3.3.2	Mediciones eléctricas de los Generadores. ....	28
3.3.3	Mediciones eléctricas de las líneas de transmisión. ....	29
3.3.4	Bosquejos de Gráficas de tendencia base de datos.....	30
3.3.5	Magnitud de Voltaje de las Barras.....	31
3.4	Pruebas del Sistemas .....	32

3.4.1	Contingencia de Línea de Transmisión. ....	32
3.4.2	Eventos de Fallas .....	34
CAPÍTULO 4.....		40
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
	Conclusiones.....	40
	Recomendaciones.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....		42

## **ABREVIATURAS**

IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
SCADA	Sistema de control y Adquisición de datos
OPC	OLE for Process Control
OPC UA	OPC de Arquitectura Unificada
SIL	Software in the Loop
HIL	Hardware in the loop
SQL	Lenguaje de Consulta estructurada

## **SIMBOLOGÍA**

G	Generadores
T	Transformadores
kV	Kilovoltios

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1. 1. Esquema del SCADA propuesto del Sistema de 9 Barra IEEE .....	4
Fig 1. 2 Representación de un Sistema Eléctrico de Potencia [5] .....	5
Fig 1. 3 Diagrama Unifilar del Sistema de Transmisión de IEEE [6].....	7
Fig. 1. 4 Conexión de comunicación del Smart Grids [4].....	10
Fig. 1. 5 OPC UA Modelado de información [22].....	11
Fig. 1. 6 Capas de comunicación OPC UA [22].....	12
Fig. 1. 7 Aplicaciones con OPC UA [22]. .....	13
Fig 1. 8 Sistema SCADA .....	15
Fig. 1. 9 Diagrama Unifilar de un SCADA [17].....	17
Fig 1. 10 IEEE 9 Bus System Test Case con falla en la línea de transmisión 4 - 6 [18] .....	18
Fig 1. 11 Modelo Simulink IEEE 9 Bus System con falla. ....	19
Fig 1. 12 Bloques de comunicación del servidor OPC y el Modelo .....	20
Fig 1. 13 Pantalla principal del software de base de datos de SQLite Studio.....	21
Fig 1. 14 Biblioteca SQL para LabVIEW del Dr. James Powell [1] .....	22
Fig 1. 15 VI que se encarga de crear la nueva tabla donde se guardan los datos. ....	22
Fig 1. 16 VI que tiene la función de llenar la tabla de la base de datos. ....	23
Fig 1. 17 Subsistemas de la simulación en RT-LAB.....	25
Fig 1. 18 Diagrama unifilar de sistema de transmisión. ....	26
Fig 1. 19 Diagrama unifilar con visibilidad de voltaje de barras. ....	27
Fig 1. 20 Diagrama unifilar con visibilidad de corriente en las líneas. ....	27
Fig 1. 21 Diagrama unifilar con visibilidad de flujo de carga. ....	28
Fig 1. 22 Pantalla con mediciones eléctricas de los generadores. ....	28
Fig 1. 23 Pantalla con mediciones eléctricas de líneas de transmisión. ....	29
Fig 1. 24 Línea de transmisión 4- 6 con bloque de falla. ....	30
Fig 1. 25 Gráficas y base datos ante una falla monofásica. ....	30
Fig 1. 26 Exportación de datos a SQLite Studio. ....	31
Fig. 1. 27 Voltajes de las barras en valores pu.....	32
Fig 1. 28 Salida de Operación de la Línea de Transmisión 7 - 5.....	33
Fig 1. 29 Pantalla de Diagrama Unifilar ante la salida de la Línea 7 - 5. ....	34
Fig 1. 30 Pantalla de diagrama unifilar ante un evento de falla. ....	35
Fig. 1. 31 Respuesta de los generadores ante un evento de falla.....	36

Fig. 1. 32 Mediciones de las líneas durante el evento de una falla. ....	36
Fig 1. 33 Gráfica y base de datos durante ocurrencia de falla.....	37
Fig 1. 34 Exportación de datos a SQLite Studio ante ocurrencia de falla.....	38
Fig 1. 35 Gráfico de los Voltajes en pu de las Barras del Sistema .....	38

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto integrador consiste en dar una mejor confiabilidad a las líneas de transmisión eléctrica empleando la nuevas tecnología de las redes inteligentes, ya que hoy en día, las redes convencionales están dando muchos problemas en la estabilidad y disturbios en los sistemas Eléctricos de potencia.

Por el motivo que existían varias anomalías en los sistema de transmisión se acudió al laboratorio para realizar un esquema de sistemas de potencia la misma que se diseñó en software Matlab - Simulink el sistema mediante una PC modelo, que luego será enviado al simulador Opal – RT, equipo donde se realizara la simulación en tiempo real. La supervisión y control de datos de un Sistema de Trasmisión de 230 kV, tiene como finalidad realizar varios ensayos de apertura y cierre de interruptores de línea debido a una perturbación de una falla en una de las barras del sistema de 230 kV en por medio de un sistema SCADA que se usan para el respectivo monitoreo y control, que es elaborado en el Laboratorio de Sistema de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación de nuestra institución. Los sistemas SCADA descritos en [1] permiten hacer varias maniobras de prueba utilizando comunicaciones y mediciones basadas en hardware y software.

Para que este modelo se efectué se requiere de varios parámetros importantes como: un simulador en tiempo real Opal - RT equipo que dispone de una alta tecnología que permite simular proyectos de alta complejidad comunicándose por medio de una computadora que ejecutará datos y al mismo tiempo recibir datos reales. En [2] implementa simulación en tiempo real, para esto se requiere elaborar en el software Matlab - Simulink los bloques del sistema control con sus respectivas señales de medición. Las simulaciones hechas en Matlab son agrupadas por medio de un software RT- LAB para transformarlas a un código C y luego las almacena a Opal – RT 4500 por medio de una red de Ethernet.

También se requiere del software de LabVIEW, el cual ejecuta programación de forma gráfica creados en bloques de cada uno de ellos.

Además, depende de la plataforma de SQLite Studio ejecutable desde una computadora que me haga la conexión y la importación de datos desde LabVIEW. En [3] se realiza

los pasos en conexión SQLite y los ajustes de programación, así mismo se crea sus respectivas tabla de cada una de las variables más importante guardadas en la base de dato que generarán un histórico.

El operador es la persona que manipula el software del sistema de transmisión eléctrica mediante el uso del simulador OPAL- RT, por otra parte, también monitorea por pantalla todo el diseño de control en el software LabVIEW con la disponibilidad de exportar mediciones de magnitudes eléctricas a una base de datos externa SQLite Studio. A si pues, este proyecto tenga un almacenamiento de información eléctrica especifica donde el estudiante visualice por medio del computador el SCADA el día, fecha y hora los cambios que se han estado realizando cuando exista una interrupción eléctrica.

Para el desarrollo de este proyecto se requiere de la utilización de dos ordenadores, el HOST PC que es donde se ejecuta la simulación de tiempo real y el CLIENT PC que es donde está el operador y monitorea el sistema SCADA. La comunicación entre el simulador de tiempo real y el SCADA se realiza por medio del protocolo de comunicación OPC UA.

### **1.1 Descripción del problema**

La necesidad de la ESPOL para formar ingenieros eléctricos que tengan una base de conocimientos entorno al Sistema SCADA, ha llevado a que se desarrolle una plataforma donde se puedan realizar prácticas de Laboratorio aprovechando los equipos eléctricos existentes y se los pueda combinar con el uso de software (esto quiere decir que los elementos usados en la red sean usados de forma dinámica en bloque en el programa Simulink y con el Software LabVIEW.

### **1.2 Justificación del problema**

Consciente de la necesidad de adquirir conocimientos entorno al Sistema SCADA el presente proyecto integrador tiene como finalidad desarrollar una plataforma de estudio en Tiempo Real aplicado de Sistemas de Transmisión Eléctrica; donde los estudiantes que tomen la materia SCADA APLICADO A LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS puedan realizar prácticas de Laboratorio haciendo uso de los equipos eléctricos existentes en los Laboratorios de la Facultad, así como Hardware y Software. A

fin de que puedan interactuar con un Sistema similar a los que existen en la vida real.

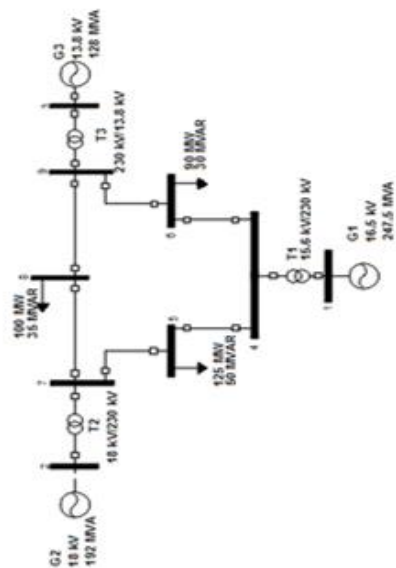
### **1.3 Propuesta**

Este proyecto integrador tiene un esquema de un sistema de potencia Eléctrico, donde se enfocará en realizar un diseño de una Red inteligente Smart Grid que valla de la manos con los Sistemas SCADA, ya sean estos que realicen el control desde una PC que trabajara conjuntamente con el Equipos Opal – RT para desarrollar un laboratorio virtual.

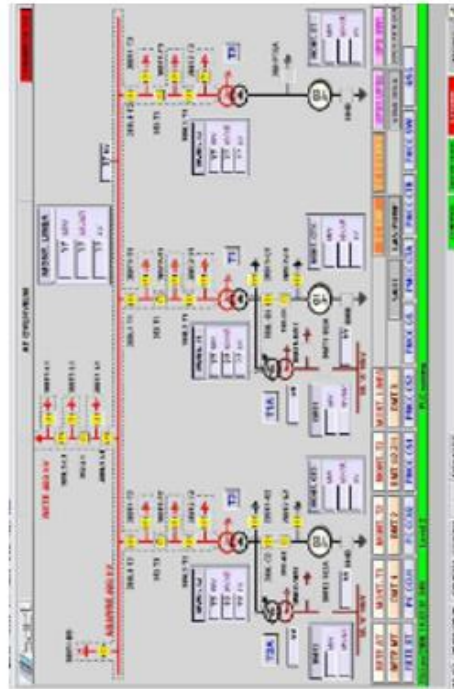
Inicialmente como parte fundamental es modelar el sistema de Transmisión, con todos los elementos que en ello lo contenga y que simule en el Software de Matlab. Es por esto, que se seleccionó el Modelo de IEEE presentado [6] Una vez realizado el paso anterior, se asocia con el Software RT- LAB para realizar la simulación de tiempo real.

Como parte final se encuentra el modelo diseñado en un SCADA elaborado en Software de LabVIEW donde se mostrará valores de resultado de los elementos usados en la red, por otro lado, si llagase a ver un cambio brusco en las líneas se van a guardar los datos en una base de Dato MSQlite, tal como se muestra en la Fig. 1.1.

Sistema IEEE



Sistema Propuesto Scada



Monitoreo



Datos Guardados



Fig 1. 1. Esquema del SCADA propuesto del Sistema de 9 Barra IEEE

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

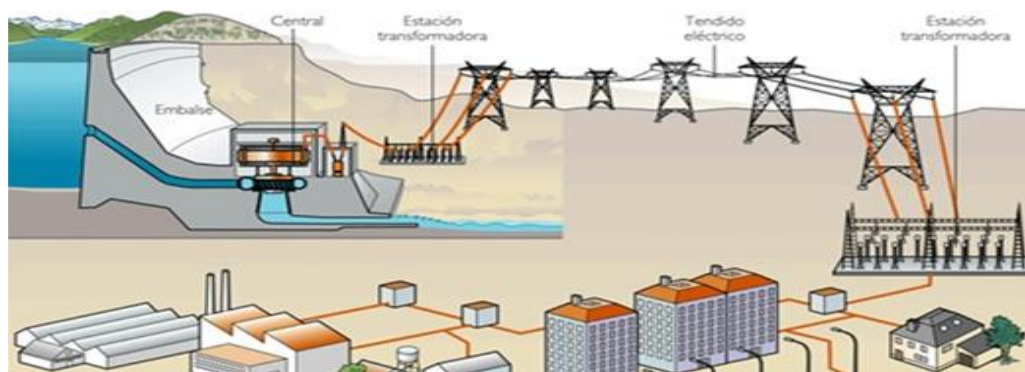
Implementar un Laboratorio Virtual en Tiempo Real para el estudio de Sistemas SCADA aplicado a la Transmisión Eléctrica mediante el uso de una base de datos externa SQL.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar en Simulink un Sistema de Transmisión Eléctrica para el caso de estudio del presente proyecto integrador.
- Simular en Tiempo Real el Sistema de Transmisión Eléctrica con cada de sus elementos que comprende su red.
- Desarrollar un Sistema SCADA en LabVIEW capaz de exportar los datos a SQL y crear un registro histórico.

## 1.5 Marco teórico

Los sistemas de potencia se dividen en tres etapas generación, transmisión y distribución. La primera permite la conversión de energía utilizando distintas plantas según la fuente de energía. En transmisión se transporta la energía grandes distancias, y finalmente en distribución se lleva la energía a los consumidores para su comercialización.



**Fig 1. 2 Representación de un Sistema Eléctrico de Potencia [5]**

### **1.5.1 Modelo de Sistema de Trasmisión**

Un modelo de Sistema de Transmisión encargados de llevar la energía a gran distancia por medio de cables aéreos y por encima de estructuras metálicas, desde las centrales de generación hasta las subestaciones eléctricas

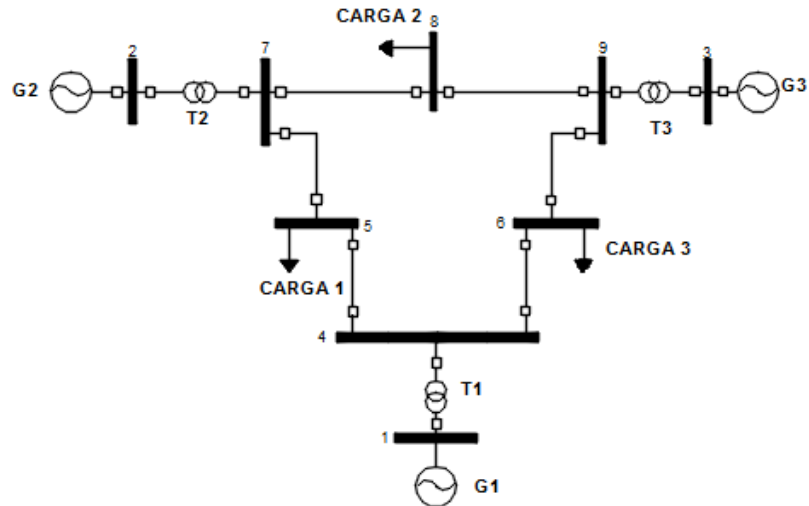
Actualmente en Ecuador existe un modelo de transmisión de unas nuevas centrales Hidroeléctricas Coca Codo Sinclair y la sopladora de 500 kV que reparten energía a las siguientes subestaciones: El Inga, San Rafael, Chorrillo y Tisaleo. El propósito del proyecto es mantener confiabilidad y seguridad a los Sistemas Eléctricos de Potencia, y a su vez que estas generadoras cumplan con la demanda actual sin ninguna inconsistencia [21].

### **1.5.2 Sistema de Transmisión para Estudio de Control y SCADA.**

Este sistema de transmisión documento usado para fine de estudio en la parte de Control a 230 kV de Voltaje nominal, este tipo de estudio presenta característica como:

- Tiene un esquema unifilar básico y fácil de entender
- Comprenden de 3 diferentes Generadores que alimentan a los Transformadores
- Están integrado 3 Transformadores que envían la energía a las líneas de trasmisión para mantener a un solo voltaje nominal de 230 kV.
- Diseñado con 9 barras eléctricas para formar un sistema de lazo cerrado.

- El sistema presenta análisis de flujo de carga, que sirve para corroborar en realizar más tipos de prueba sean esto análisis de cortocircuito y análisis de contingencia etc.



**Fig 1. 3 Diagrama Unifilar del Sistema de Transmisión de IEEE [6].**

Para que nuestro proyecto tenga una mejor acogida y porque presenta estudios ya realizado que permitirá mayor confianza al momento de la simulación, se ha escogido el documento [6] de un modelo planteado por IEEE que hace el estudio de un sistema eléctrico de potencia conformado por: tres Generadores, tres Transformadores y de nueve barra. Se escogió este documento porque ya presenta estudios de Análisis de Cortocircuito, y también facilita un flujo de carga y cumple con la regulación del voltaje en las barras de acuerdo a las normas IEEE.

## **1.6 Programas computacionales y equipos necesarios para efectuar el proyecto de la Simulación tiempo real:**

### **1.6.1 Matlab /Simulink.**

Simulink es un programa que trabaja juntamente con Matlab el cual permite diseñar un modelo de forma gráfica, ya sean estos modelos eléctricos. El software nos permitirá diseñar el proyecto trifilar de IEEE mediante el uso de

sus bloques de su librería, para luego poder realizar los análisis de falla, flujo de carga y visualizar los voltajes en cada barra [7].

### **1.6.2 Software LabVIEW**

Este software permite la instrumentación y el control de una programación gráfica, también dispone de varias herramientas que hace la comunicación para que se realice el interfaz para actuar con otros equipos. El programa computacional se utilizará para diseñar un SCADA que permitan monitorear y al mismo tiempo realizar un control desde sus pantallas [8].

### **1.6.3 Software SQLite Studio**

Se refiere a una librería de software que trabaja de forma ejecutable sin necesidad que sea instalada en un computador. Para el uso de esta aplicación que permitirá recibir valores mediante tablas desde LabVIEW, se debe crear VIs de programación grafica donde se dará dirección de conexión y el nombre de la carpeta donde se almacenara toda la base de todas las variables, creándose datos histórico en SQLite Studio [9].

### **1.6.4 Simulación en Tiempo Real.**

La simulación y las pruebas en tiempo real se extienden más allá de la simulación al verificar el comportamiento del diseño algorítmico mientras se ejecutan modelos a las velocidades requeridas, respetando los requisitos de sincronización precisos. El modelo en ejecución está conectado a sensores, actuadores y otro hardware. La simulación y las pruebas en tiempo real abarcan la creación rápida de prototipos de control, DSP y prototipos del sistema de visión, y la simulación de in the loop (HIL).

La simulación y las pruebas en tiempo real le permiten:

- Refine y verifique el funcionamiento funcional de los diseños de sistemas de control con su hardware
- Explore y pruebe continuamente nuevas ideas utilizando una plataforma flexible y escalable
- Pruebe el hardware del sistema de control incluso cuando una planta o sistema físico no esté disponible

- Investigue escenarios e interacciones de hardware que son complejas, costosas o peligrosas de realizar con hardware de producción.
- Evite defectos de diseño costosos al detectar errores temprano cuando aún son rentables para corregir

Hoy en día ya se está implementando la nueva tecnología de simulaciones en tiempo real, ya que se requiere que los procesos industriales o eléctricos actúen de forma rápida y segura optimizando la parte de costos, porque se usa menos elementos para realizar algún proyecto, la ventaja que se tiene en la simulación que se puede ejecutar diferentes proyectos donde obtendrá valores reales al momento de realizar una prueba o algún cambio. A continuación, se presenta detalladamente el equipo a utilizarse:

#### **1.6.5 Simulador en Tiempo Real Opal – RT**

Es un equipo que tiene un alto potencial que realiza simulaciones avanzadas aplicadas a la parte de ingeniería, este equipo viene con su propio software para comunicarse con el computador que ejecuta pruebas de modelos y al mismo tiempo analizar su rendimiento en tiempo real

A continuación, el equipo presenta un software RT- Lab que realiza varios pasos para hacer el ingreso de un proyecto que se desee simular y estos son:

- a) Editar.** - Aquí se abre el circuito de Simulink para cuando se realice algún cambio.
- b) Compilar.** - Comprende de la agrupación que todo el modelo de Simulink que será convertido dentro del software de tiempo real para realizar con éxito su simulación.
- c) Ejecutar.** - Una vez que el modelo ya ha sido compilado, se procederá a mandar a ejecutar donde actuaran varios procesadores para realizar su simulación. La target envía y recibe datos una vez que simule un modelo

#### **1.7 Smart Grids.**

Hace varios años atrás se comprendía que red eléctrica era conformada por varias de líneas de transmisión, donde cada una de ellas envían energía a las

subestaciones de distribución donde realizan el trabajo de bajar el voltaje de producción hacia los grandes consumidores [12].

Conforme ha pasado el tiempo se ha visto que un solo tipo de generación no ha podido mantener la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, es por esto que se vio obligado a incorporar varias fuentes de generaciones como: Eólicas, Térmica, Solares e Hidráulicas.

Esta es la razón por qué se están construyendo los Sistemas de Smart Grids, porque comprende en un conjunto de equipos que se instalan de forma automatizada, permitiendo garantizar una eficiente energía eléctrica y para que no haya corte de energía que haga perder económicamente a CNEC.[12]

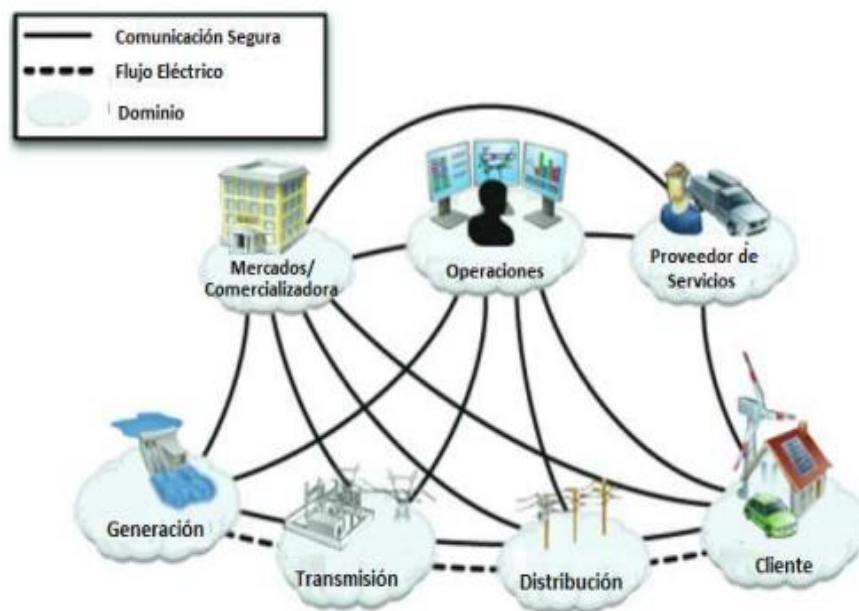


Fig. 1. 4 Conexión de comunicación del Smart Grids [4]

### 1.8 Comunicación OPC UA (Arquitectura Unificada)

La comunicación OPC UA es una tecnología capaz de realizar una plataforma de comunicación que permita ser confiable y segura, y que realice la comunicación entre el cliente y servidor. Una parte muy importante de UA es la posibilidad de usar estructuras o modelos. Esto significa que las etiquetas o puntos de datos se pueden agrupar y dar contexto, lo que facilita mucho la gobernanza y el mantenimiento. Estos modelos se pueden identificar en

tiempo de ejecución, lo que hace posible que un cliente explore la conexión posible preguntando al servidor.

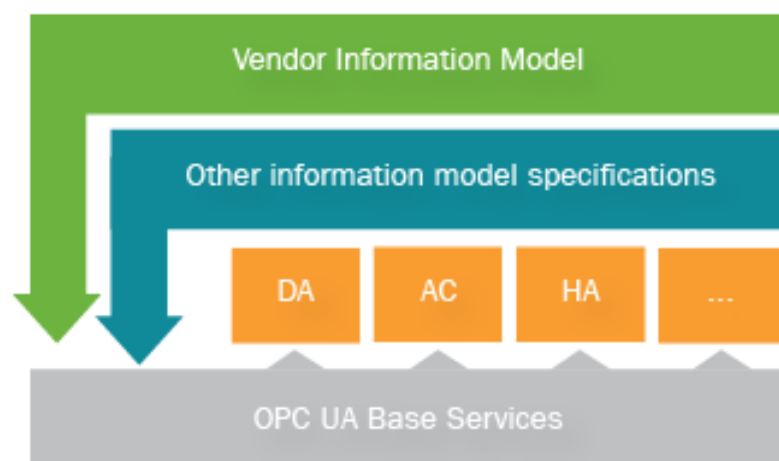
Para la comunicación de los equipos industriales debe ser una conexión confiable para el diseño de los sistemas de automatización mediante los protocolos de comunicación, la ventaja de esta comunicación es que se puede trabajar con varios protocolos para el diseño de una red [13].

Seguidamente se menciona algunos beneficios de la comunicación OPC UA:.

- Ejecuta su plataforma de comunicación para sistemas pesados
- Tiene una configuración de comunicación de forma fácil
- Tiene un alto alcance de conectividad
- El sistema es abierto se puede usar en cualquier sistema.

#### 1.8.1 OPC UA Modelado de información

El modelado de información es muy moderno en OPC UA. Estos modelos pueden ser definidos por fabricantes o protocolos como BACNet, pero también pueden contener más de una estructura MESH donde se pueden definir relaciones y conexiones muy complejas entre puntos y nodos. También existe la posibilidad de tener estructuras de datos para que ciertos datos siempre se agrupen y manejen como una sola pieza [22].



**Fig. 1. 5 OPC UA Modelado de información [22].**

### 1.8.2 Capas de comunicación OPC UA

OPC UA es, como se dijo antes, construido para ser independiente de la plataforma y la comunicación está integrada en capas en la parte superior de la pila estándar TCP / IP. Por encima de las capas de transporte estándar, hay dos capas, una que maneja la sesión y otra para establecer un canal seguro entre el cliente y el servidor. La capa de transporte está formada por TCP / IP y además de ese SSL, HTTP o HTTPS. La capa de comunicación asegura el canal de comunicación no solo porque los datos están dañados, sino que también asegura la autenticación para que los puntos finales no puedan infiltrarse ni modificarse. Esto se basa en certificados X.509 que tienen tres partes, y la primera confianza entre pares debe hacerse manualmente, pero luego el resto se ocupa de forma segura [22].

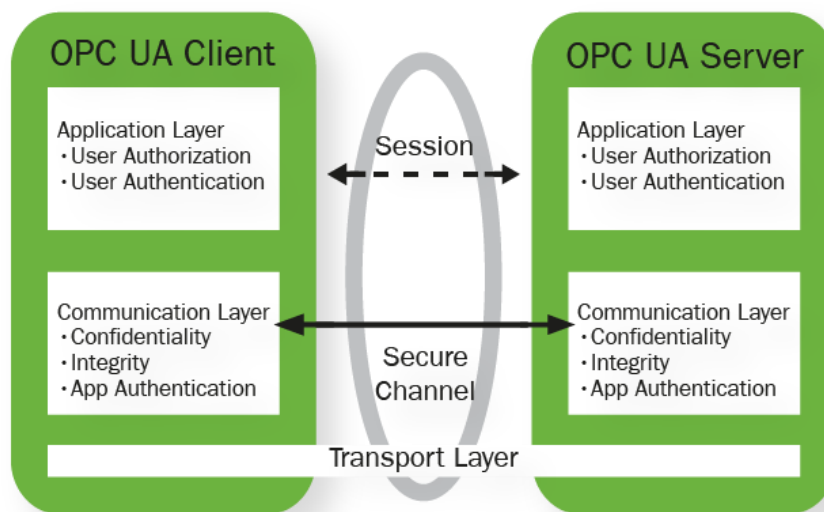
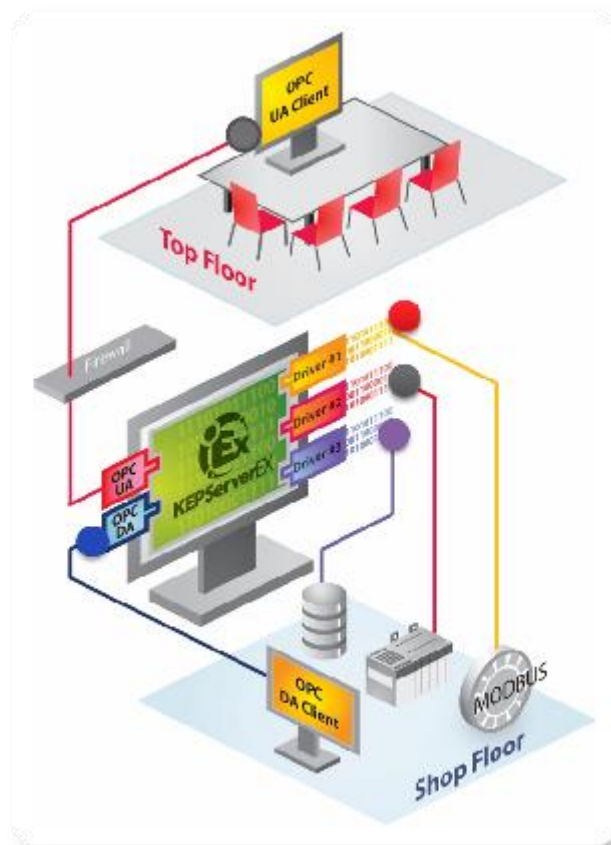


Fig. 1. 6 Capas de comunicación OPC UA [22].

### 1.8.3 Aplicaciones con OPC UA

Hasta ahora, OPC UA se usa principalmente para unir puentes entre diferentes servidores OPC, esto se llama túnel. Esto es algo que, por

ejemplo, hace el túnel KEPServerEX OPC UA. Otras aplicaciones incluyen el servidor de descubrimiento de GE Global y el mismo sistema de control que tiene soporte completo de OPC UA para explorar las estructuras de datos. Esto todavía es bastante poco frecuente, pero el desarrollo es rápido y se realiza mucho trabajo para incluir modelos de datos para transferir modelos desde BACNet, ISA95 y PLCopen [22].



**Fig. 1. 7 Aplicaciones con OPC UA [22].**

## **1.9 Sistema SCADA**

Los sistemas SCADA se usaron por primera vez en la década de 1960. El SCADA tiene como significado Supervisión, Control y Adquisición de datos, además hace el uso de para actúen los sensores, actuadores y controladores comunicado entre ellos para controlar y supervisar procesos de transmisión a gran distancia. Los sistemas SCADA ejecutan un esquema de diseño donde reciben información de la unidad terminal maestra (MTU), luego las MTU se

alimentan de información de las unidades terminales remotas (RTU), a su vez son las que se encargan de recibir información de todos los equipos que se encuentran instalados en el campo laboral. [14].

El sistema SCADA recopila información, como por ejemplo dónde se produjo una fuga en una tubería, transfiere la información a un sitio central, alertando a la estación de origen de que se ha producido la fuga, realizando el análisis y el control necesarios, como determinar si la fuga es crítica. y mostrar la información de manera lógica y organizada. Los sistemas SCADA pueden ser relativamente simples, como uno que monitorea las condiciones ambientales de un pequeño edificio de oficinas, o increíblemente complejo, como un sistema que monitorea toda la actividad en una planta de energía nuclear o la actividad de un sistema municipal de agua.

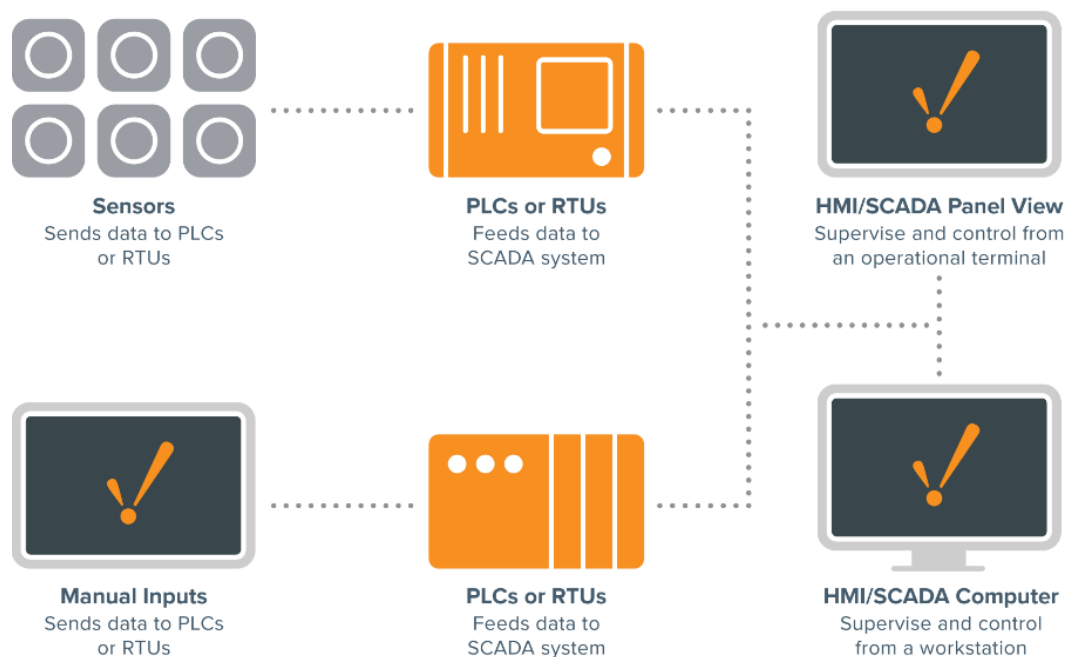
En cuanto al uso, los sistemas SCADA son utilizados por organizaciones industriales y empresas de los sectores público y privado para controlar y mantener la eficiencia, distribuir datos para tomar decisiones más inteligentes y comunicar problemas del sistema para ayudar a mitigar el tiempo de inactividad. Los sistemas SCADA funcionan bien en muchos tipos diferentes de empresas porque pueden variar desde configuraciones simples hasta instalaciones grandes y complejas. Los sistemas SCADA son la columna vertebral de muchas industrias modernas, que incluyen:

- Energía
- Alimentos y bebidas
- Fabricación
- Petróleo y gas
- Poder
- Reciclaje
- Transporte
- Agua y aguas residuales

Y muchos más.

Los sistemas SCADA son efectivos ya que pueden generar importantes ahorros de tiempo y dinero. Se han publicado numerosos estudios de casos que destacan los beneficios y ahorros de usar una solución moderna de software SCADA como Ignition.

Por lo tanto, el sistema SCADA es una plataforma de control, donde se va a diseñar una plataforma para mostrar los voltajes, corriente y potencia del sistema de 9 barra ya mencionado, en un esquema unifilar de la red, a su vez permita realizar análisis de falla en su línea y guarda valores de cada evento cuando se realice una contingencia en la línea por parte del operador.



**Fig 1. 8 Sistema SCADA**

### 1.9.1 Requisito del Sistema SCADA

Los sistemas SCADA tienen que cumplir varios requisitos, en [15] tiene algunas cualidades para sacarle un máximo beneficio al sistema que son:

1. El sistema debe tener un diseño abierto, de tal forma que cuando se aumente el proyecto se pueda acceder para rectificar su modelo elaborado en LabVIEW.

2. La comunicación debe ser de gran facilidad para que operador o usuario tenga acceso a la red del computador.
3. El programa deberá instalarse lo más fácil posible, para que el usuario no tenga problema al momento de usarlo.

### **1.9.2 Características de los Sistemas SCADA.**

Los sistemas SCADA requieren de varias características que se deben considerar para un diseño de un SCADA que son las siguientes:

- Tener una buena adquisición y un buen almacenamiento de datos.
- Presentar graficas de las variables calculadas.
- Se debe realizar una buena conexión para el diseño de las bases de dato.
- El diseño del SCADA debe ser abierto, que al momento de hacer algún ajuste se pueda modificar.
- La información del campo debe ser transmitida sin daño alguno.

### **1.9.3 Sistema de monitoreo en Simulación en tiempo Real**

Los sistemas de monitoreo son usados para supervisar tanto a los equipos comando por hardware y la parte del SCADA que es parte del software, en caso de existir alguna anomalía estos estarán avisando alguna alerta, si ocurriese algo como esto aquí se podría visualizar donde está el daño. En [16] estudia monitoreo en tiempo real con esto supervisa los voltaje, corrientes en las líneas que se encuentran en el campo, con esto se logra verificar que los datos se están transportando de forma segura a los MTU que son los indicados en recibirlos para luego analizarlos.

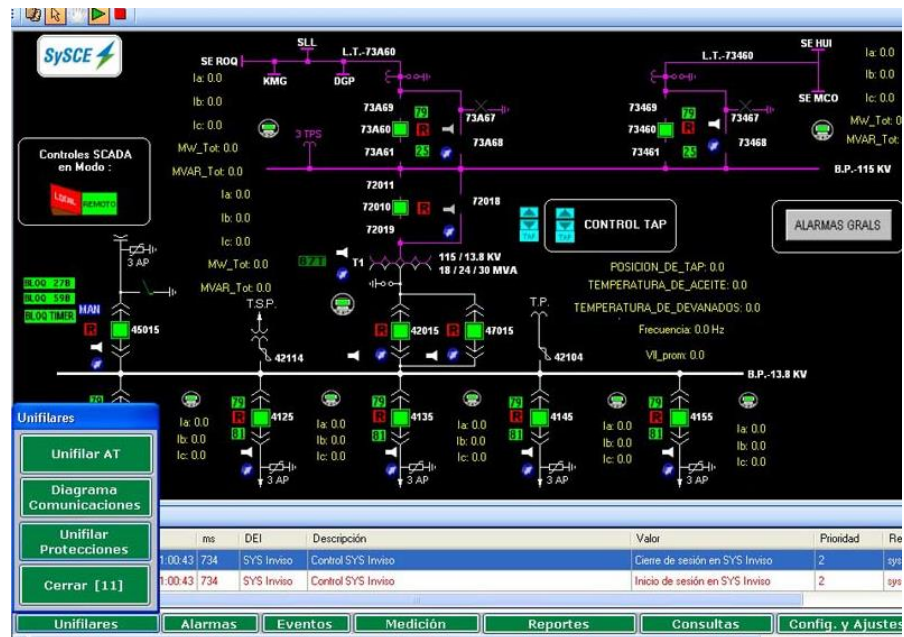


Fig. 1. 9 Diagrama Unifilar de un SCADA [17]

En Figura [1.10] muestra un sistema eléctrico donde el operador podrá hacer un tipo de maniobras en caso de requerirlo, también como se puede visualizar consta de equipos como Generadores, Transformador, y Líneas de transmisión.

Las pantallas de los SCADA deben ser diseñadas de la manera más simple posible tal que la persona encarga del control no tenga problema al momento de usarlo, por el contrario, los sistemas SCADA realizan monitorios de mediciones como: Magnitud de las tres fases en RMS, Corriente de las tres fases RMS, potencias monofásicas y el voltaje en cada una de las barras del sistema que permitirá a visualizar que el sistema esta operación normal

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA A SEGUIR DEL DISEÑO DE CONTROL Y MONITOREO DE UN SCADA EN LABWIEV

Para la realización del presente proyecto se establece una secuencia de pasos, que son un patrón de procesos a ejecutarse con el fin de cumplir con los objetivos establecidos en el capítulo anterior de este trabajo.

### 2.1 Secuencia de Proyecto Integrador en Software

En la figura 2.1, se muestra los pasos a seguir para poder realizar el presente proyecto en lo que respecta al software.



Figura 2.1 Diagrama de bloque de la secuencia del proceso del proyecto en software

En la figura anterior, se establece la secuencia que se debe cumplir para el cumplimiento satisfactorio del proyecto integrador.

#### 2.1.1 Modelar en Simulink

Para el presente proyecto se utiliza como modelo de caso de estudio el sistema de transmisión IEEE 9 Bus System [18].

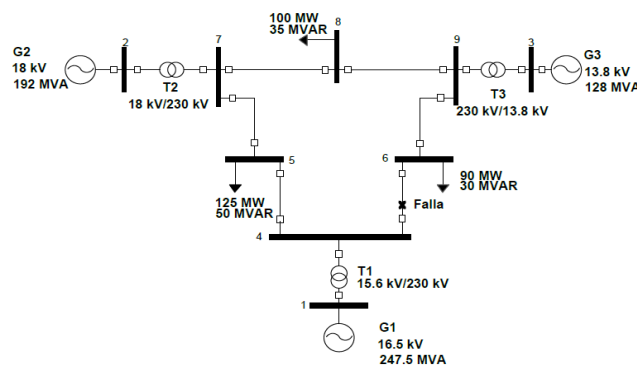
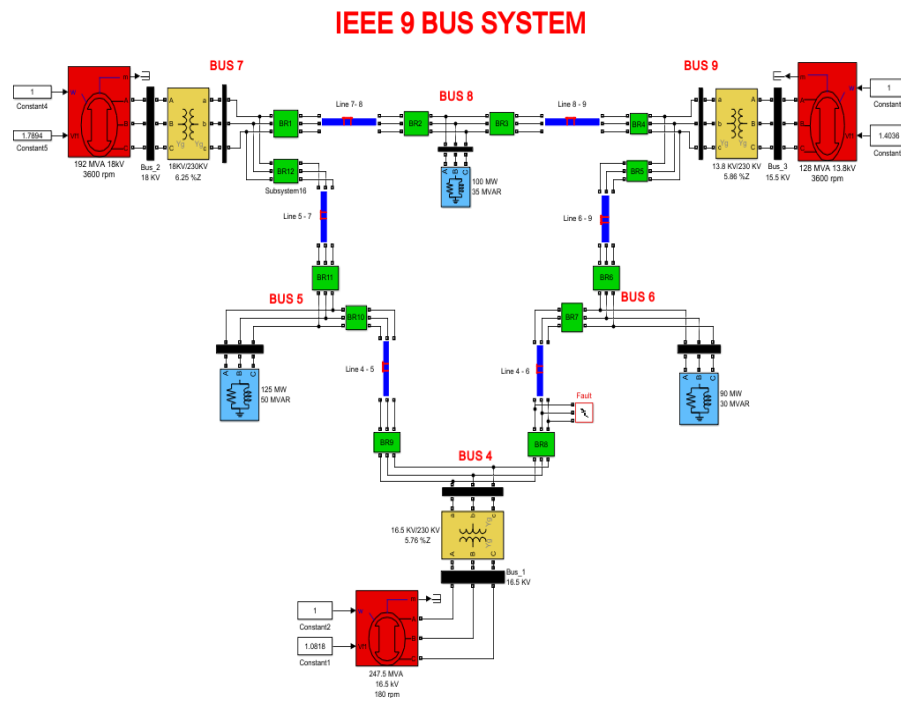


Fig 1. 10 IEEE 9 Bus System Test Case con falla en la línea de transmisión 4 - 6 [18]

Este sistema consta de nueve barras, tres generadores, tres transformadores y tres cargas; el cual se simula en Simulink - Matlab. Se modela el sistema original con la única diferencia que para este caso de estudio se coloca una falla en la línea de transmisión que va de la línea de la barra 4 a la barra 6; más específicamente ubicada en el extremo de la línea cercano a la barra 4 representada en la figura con una **X**.

El modelo final en simulink se muestra a continuación:



**Fig 1. 11 Modelo Simulink IEEE 9 Bus System con falla.**

El bloque de falla ubicado cerca de la barra 4, tiene la disponibilidad de mediante una orden poder producir tres tipos diferentes de falla. Este bloque se lo encuentra en la biblioteca Artemis (Advanced Real-Time ElectroMagnetic Simulation) que está instalada en Simulink.

En la figura 2.4 se muestra el bloque de falla trifásica utilizado en este sistema, el cual permite producir tres tipos de falla. La entrada al bloque BF representa la orden de falla, cuando se envía un '1' ocurre la falla y asimismo cuando se envía un '0' se despeja la falla. Para este caso de estudio, la falla ocurre de manera manual. La entrada Tipo falla indica el tipo de la falla que se aplica al sistema, sea monofásico, bifásico o trifásico.

### 2.1.2 CONEXIÓN DE COMUNICACIÓN ENTRE PC Y OPAL-RT PARA PODER INSERTAR EL PROYECTO DE FORMA DIGITAL.

Por medio del programa Matlab – Simulink que trabaja con una plataforma de bloque servirá para efectuar técnicamente la elaboración y realizar cambios de parámetros de acuerdo a los elementos del modelo propuesto. Primeramente por medio de protocolo de comunicación TCP / IP se realice la vinculación entre la Matlab y RT – LAB, para luego llevar la información en 3 núcleos principales hacia la target donde se realizara la simulación en tiempo real, que se encarga de editar, compilar, ejecutar. Tanto el modelo hecho en Simulink como RT- LAB se encuentran en la Host-PC la cual es la computadora donde se ha compilado el sistema de transmisión Eléctrica. [19].

Por medio de la Target se estima procesar todos los núcleos sean estos, SM\_Modelo, SS\_Calculo, SC\_interfaz, estos van hacer que la simulación sea realizada sin ningún problema, caso contrario va existir anomalía en compilar el modelo.

### 2.1.3 Comunicación OPC UA CON LabVIEW.

Para lograr una buena comunicación se tiene que usar el núcleo **SC\_interfaz**, donde se ubican todas las señales que se van a identificar para poder enviar y recibir datos que se ejecutan en el modelo juntos con el servidor. Para poder incluir esta interacción es necesario trabajar con LabVIEW que se comunican a través del protocolo de comunicación OPC UA con RT - LAB, tienen una comunicación bidireccional; ya que tanto el simulador le envía las mediciones de la señal a LabVIEW, y de la misma manera, LabVIEW envía orden al simulador para operar el sistema. [8]

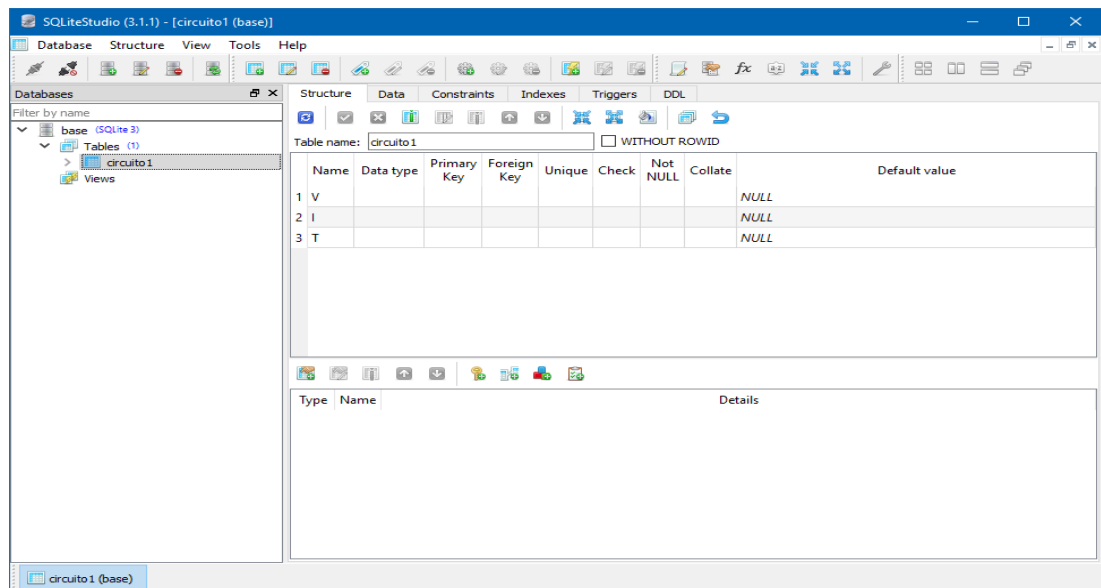


Fig 1. 12 Bloques de comunicación del servidor OPC y el Modelo

### 2.1.4 Procedimiento para guardar datos en SQLite Studio

Una vez mostrada los resultados técnicos en la interfaz del SCADA creada en LabVIEW se requiere la disponibilidad de exportación de mediciones de magnitudes eléctricas a una base de datos externa con la finalidad de tener un registro histórico de eventos del sistema eléctrico de potencia, en este caso, se registra la base datos para el evento de falla.

Hay varios tipos de software base de datos, pero para el presente proyecto integrador se hará uso del software SQLite Studio. El cual presenta muchas características que lo hacen amigable ya que no requiere programación ni instalación, solo debe ser ejecutado; además, es un software libre.



**Fig 1. 13 Pantalla principal del software de base de datos de SQLite Studio**

Para poder exportar los datos de LabVIEW a la base externa SQL se utiliza un complemento de LabVIEW que no está instalado por defecto en el programa, pero se encuentra en la página de National Instruments llamado Biblioteca SQLite para LabVIEW del Dr. James Powell que se puede descargar libremente e instalar en el software de LabVIEW.

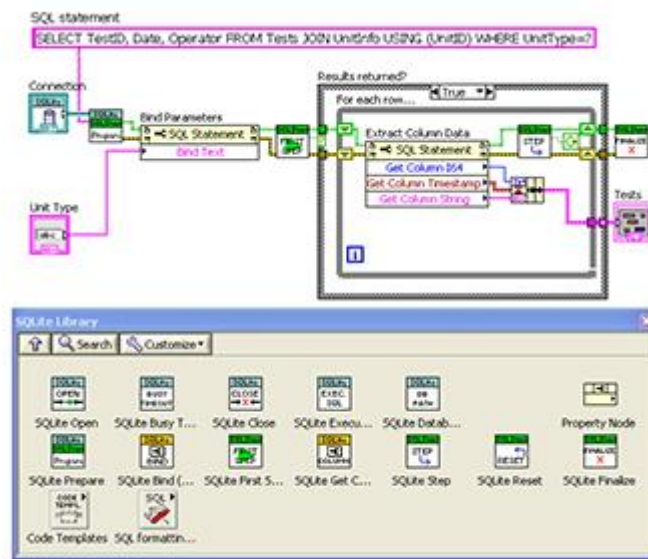


Fig 1. 14 Biblioteca SQL para LabVIEW del Dr. James Powell [1]

En la base de datos SQLite se obtiene una tabla en la que se almacena sólo los datos ante el evento de falla. Para obtener las tablas mencionadas anteriormente, se procede a realizar dos VI's en LabVIEW; donde el primer VI llamado "sql\_init\_.vi" tiene la función de crear la nueva tabla donde se guardan los datos.

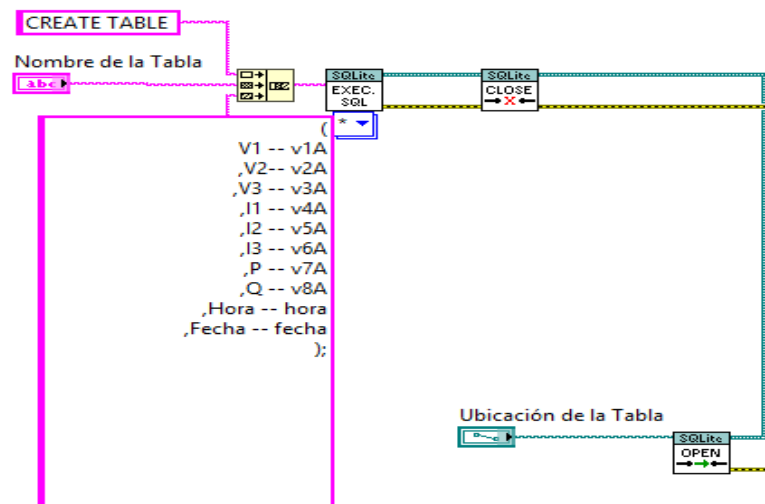
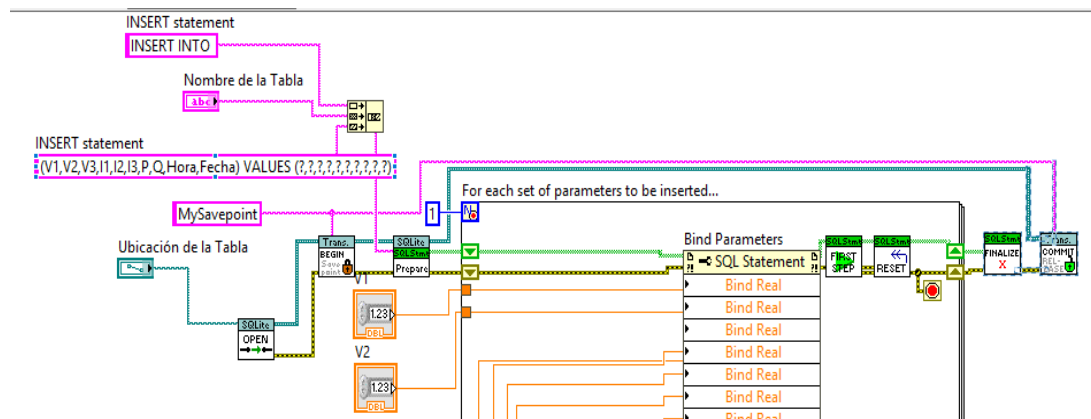


Fig 1. 15 VI que se encarga de crear la nueva tabla donde se guardan los datos.

En la anterior figura, se puede observar que en el panel frontal se encuentra la opción que permite nombrar la tabla, así como seleccionar la ubicación

donde se desea guardar. En el diagrama de bloques se utiliza la librería SQLite Library que es la que permite crear la tabla en la base de datos de SQLite Studio.

Luego de haber creado la tabla, la cual en primera instancia está vacía. Se crea un nuevo VI llamado “sql\_insert.vi” que tiene la función de llenar la tabla con los datos de las mediciones deseadas.



**Fig 1. 16 VI que tiene la función de llenar la tabla de la base de datos.**

En la figura anterior, se muestra la programación gráfica que realiza la función de llenar la tabla creada en el anterior VI; donde se puede observar la utilización de la librería SQLite Library que permite la exportación a la base de datos SQLite Studio.

# CAPÍTULO 3

## 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el capítulo anterior de METODOLOGIA se describió de manera breve la secuencia del proceso para el desarrollo del presente proyecto integrador, en el presente capítulo se describirá mayor detalle de esos pasos.

### 3.1 Diseño del modelo en Simulink

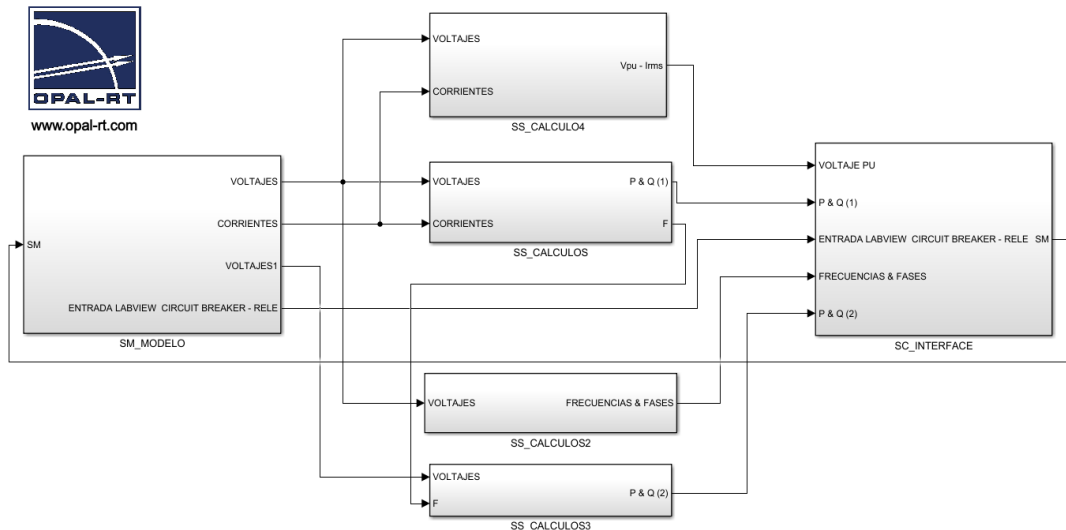
Como objeto de estudio se utilizó el sistema de 9 barras de la IEEE el cual se ha modelado en Simulink tal como se muestra en Fig. 1.11 que aplica la falla entre la barra 4 y barra 6. Como se mencionó anteriormente el modelo es el original estandarizado, con la única diferencia de la colocación de un bloque de falla en la barra 4 del sistema simulado; a fin de observar el comportamiento del sistema ante un evento de falla. Este sistema está compuesto de tres generadores de maquina síncrona, tres transformadores que elevan la tensión de operación de los generadores a 230 kV, seis líneas de transmisión que forman un anillo, tres cargas constantes y un bloque de falla.

### 3.2 Funcionamiento del programa RT-LAB (Host PC)

RT- LAB es el software del simulador de tiempo real OPAL- RT. Este software permite compilar en su interfaz los modelos simulados en Simulink - Matlab, pero para conseguir hacerlo de manera correcta se deben cumplir algunos requisitos que se detallan a continuación:

- La simulación se debe dividir en subsistemas.
- Hay un subsistema Máster SM\_MODELO, que es donde se coloca el sistema de transmisión eléctrica IEEE 9 Bus System.
- Hay un subsistema de Consola SC\_INTERFACE, que es el que se muestra al usuario cuando se ejecuta la simulación en tiempo real.
- Hay varios subsistemas de cálculos SS\_CALCULOS, para el presente proyecto se utilizaron cuatro bloques de cálculos, en los que se

calculaba un tipo de medición eléctrica. Se realizaron cálculos de potencia activa y reactiva tanto de los generadores como de las líneas de transmisión, valores RMS de voltaje y corriente, así como los ángulos de los voltajes y la frecuencia de los generadores.



**Fig 1. 17 Subsistemas de la simulación en RT- LAB.**

Cabe mencionar que tanto la simulación en Simulink como en RT- LAB se realizaron en la Host PC que es la computadora principal donde se ejecuta la simulación en tiempo real.

### 3.3 SCADA ELABORADO EN LABVIEW PARA EJERCER CONTROL

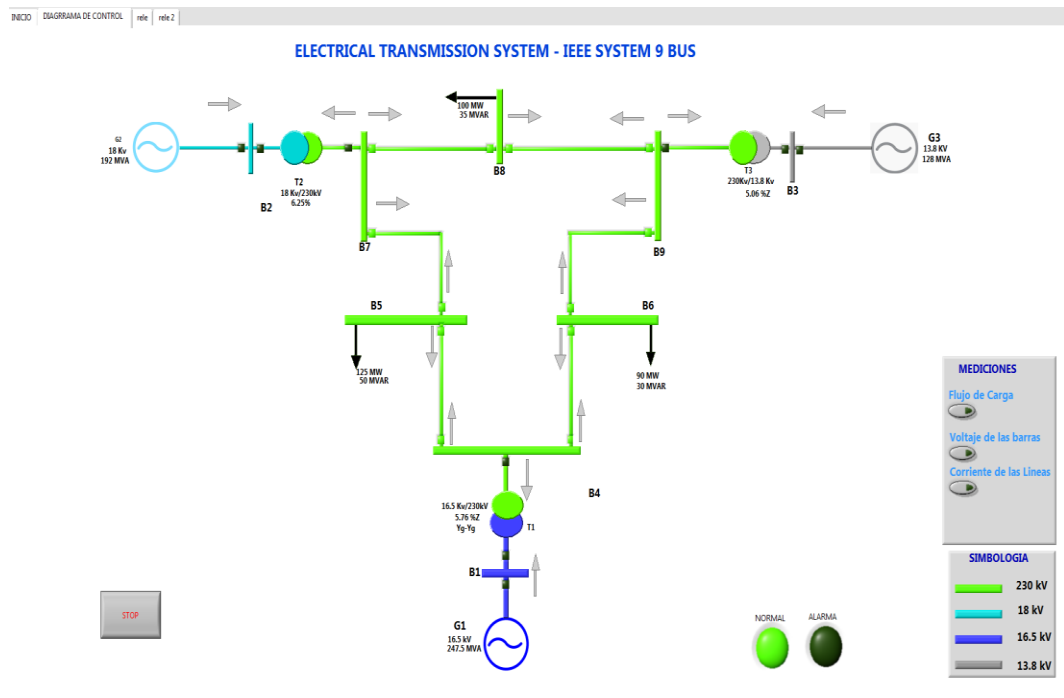
La plataforma del sistema SCADA se ha realizado en el software LabVIEW, el cual presenta cinco pantallas, organizadas de la siguiente manera:

1. Diagrama unifilar del sistema de Transmisión
2. Mediciones eléctricas de los generadores.
3. Mediciones eléctricas de las líneas de transmisión.
4. Gráfica y base de datos
5. Magnitud de voltaje de las barras.

#### 3.3.1 Diagrama unifilar del sistema de transmisión

En la figura 3.3 se muestra el diagrama unifilar del sistema de transmisión, el cual recibe los datos del simulador de tiempo real por medio del protocolo de

comunicación OPC UA y los muestra en esta pantalla por medio de indicadores de LabVIEW.



**Fig 1. 18 Diagrama unifilar de sistema de transmisión.**

Esta pantalla presenta la disponibilidad de mostrar u ocultar las mediciones de voltaje, corriente y flujo de carga a través de las líneas de transmisión. A la derecha de la pantalla se muestra un cuadro llamado MEDICIONES con unos botones de control, los cuales al pulsarse permite la visibilidad de la medición requerida.

Por ejemplo, al oprimir el botón de voltaje se muestra los voltajes en cada una de las barras que conforman el sistema de transmisión eléctrica. Como se muestra en la figura 3.4.

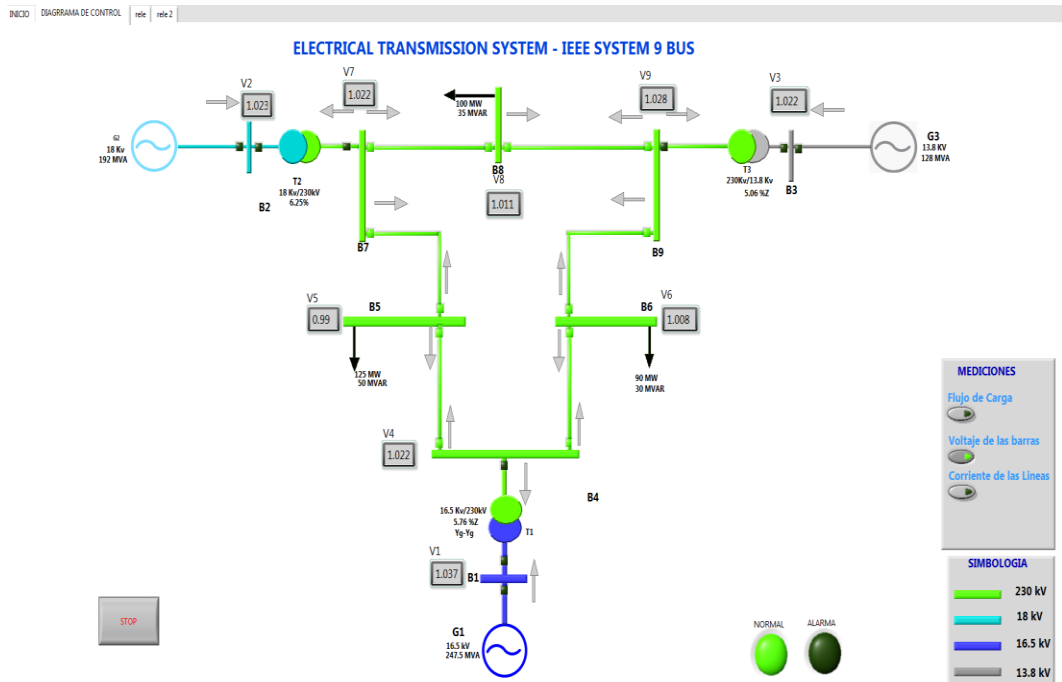


Fig 1. 19 Diagrama unifilar con visibilidad de voltaje de barras.

De la misma forma ocurre para la visibilidad tanto de las corrientes como para el flujo de carga a través de las líneas de transmisión, como muestra en las figuras 3.5 y 3.6.

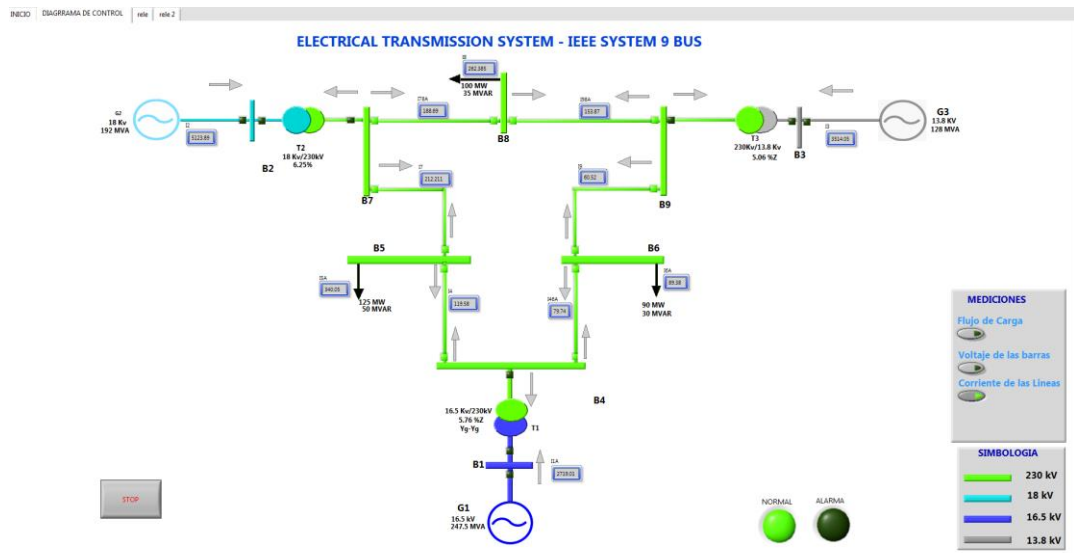


Fig 1. 20 Diagrama unifilar con visibilidad de corriente en las líneas.

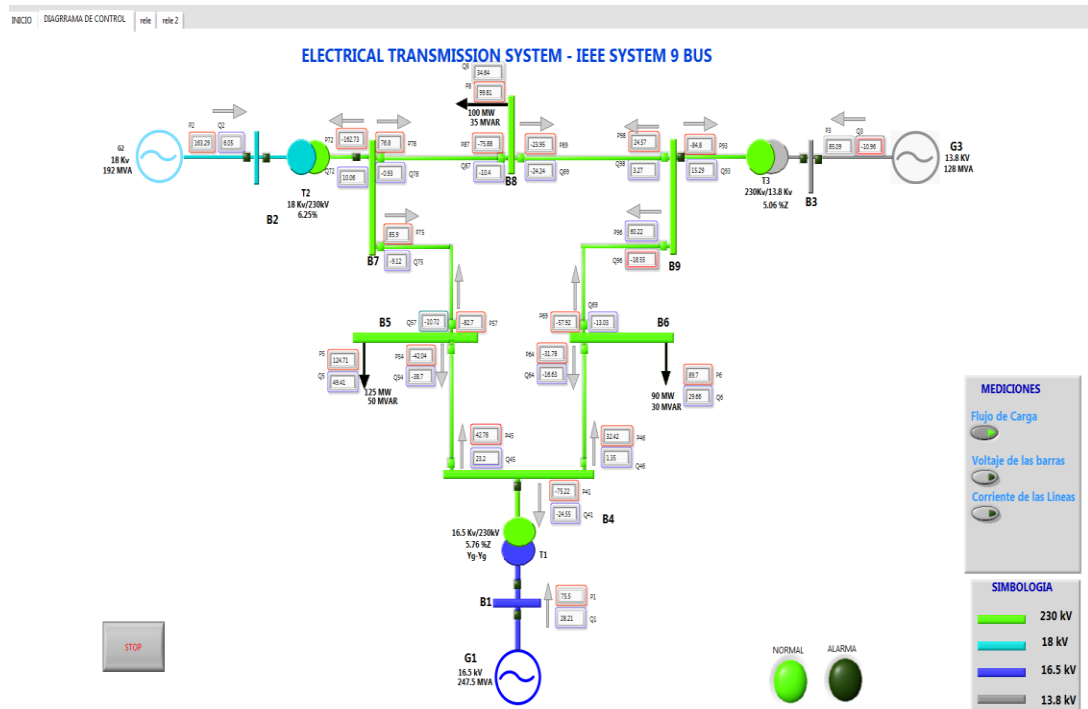


Fig 1. 21 Diagrama unifilar con visibilidad de flujo de carga.

### 3.3.2 Mediciones eléctricas de los Generadores.

En esta pantalla se muestra la potencia, voltajes y corrientes de cada uno de los tres generadores que conforman el sistema de transmisión eléctrica; así como la frecuencia y un diagrama polar donde se grafica la magnitud y el ángulo de los voltajes.

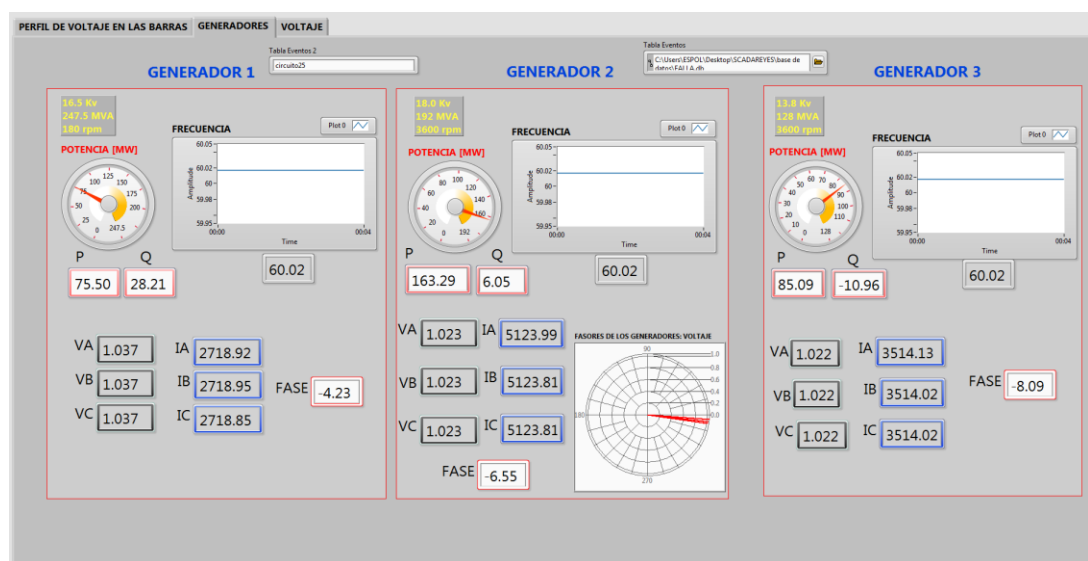
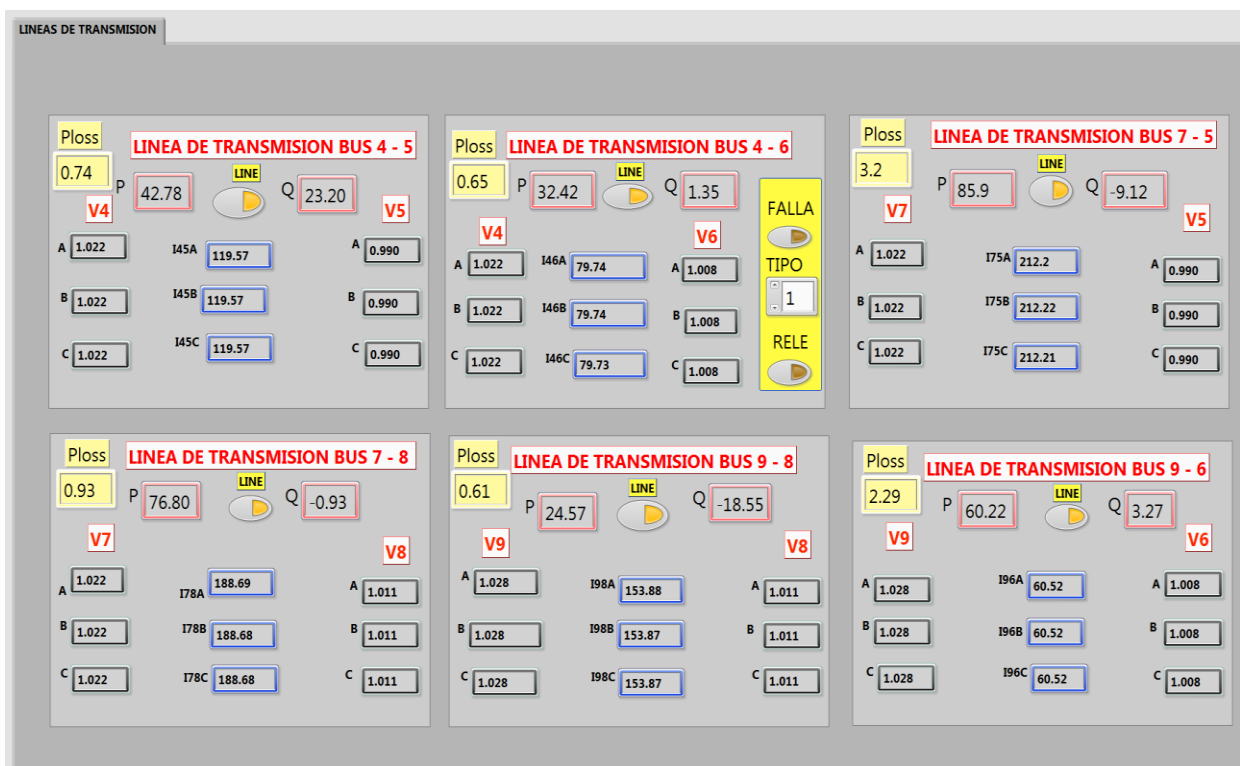


Fig 1. 22 Pantalla con mediciones eléctricas de los generadores.

### 3.3.3 Mediciones eléctricas de las líneas de transmisión.

En esta pantalla se muestra las mediciones eléctricas de cada una de las líneas de transmisión que conforma este sistema de 9 barras. Tiene indicadores de los voltajes de las barras en los extremos de cada línea de transmisión, así como la corriente que circula y el flujo de carga. También muestra un indicador donde se puede observar las pérdidas de potencia activa en cada línea de transmisión. Además, incluye un botón con el que se mantiene activa o se desactiva la línea de transmisión.



**Fig 1. 23 Pantalla con mediciones eléctricas de líneas de transmisión.**

En el cuadro de la línea de transmisión mostrado en la figura anterior, está ubicado el bloque de falla. Donde el botón FALLA es el que efectúa la falla al presionarlo. El botón TIPO, es el que dependiendo del valor ingresado efectúa un tipo de falla diferente siendo estos: 1 para falla monofásica, 2 para falla bifásica y 3 para falla trifásica. Y el botón RELE es para activar o desactivar un relé de protección de sobrecorriente simulado en Simulink. Esto se lo puede ver con más claridad en la siguiente figura 3.8.

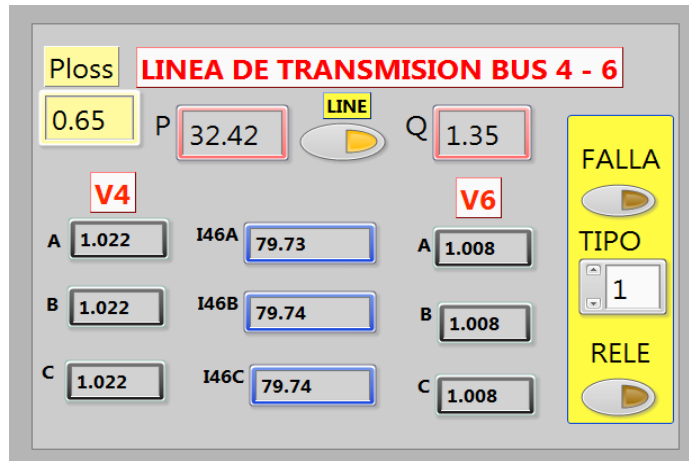


Fig 1. 24 Línea de transmisión 4- 6 con bloque de falla.

### 3.3.4 Bosquejos de Gráficas de tendencia base de datos.

En esta pantalla se muestra tres gráficas, una de voltaje y una de corriente en la barra donde es aplicada la falla; así como una tabla de base de datos donde se tendrá un registro histórico de los eventos de falla que ocurren en el sistema a fin de exportarlos a una base de datos externa SQLite Studio. Además, se muestra la gráfica de la sumatoria de las pérdidas de potencia total en las líneas de transmisión como se observa en la figura 3.9.

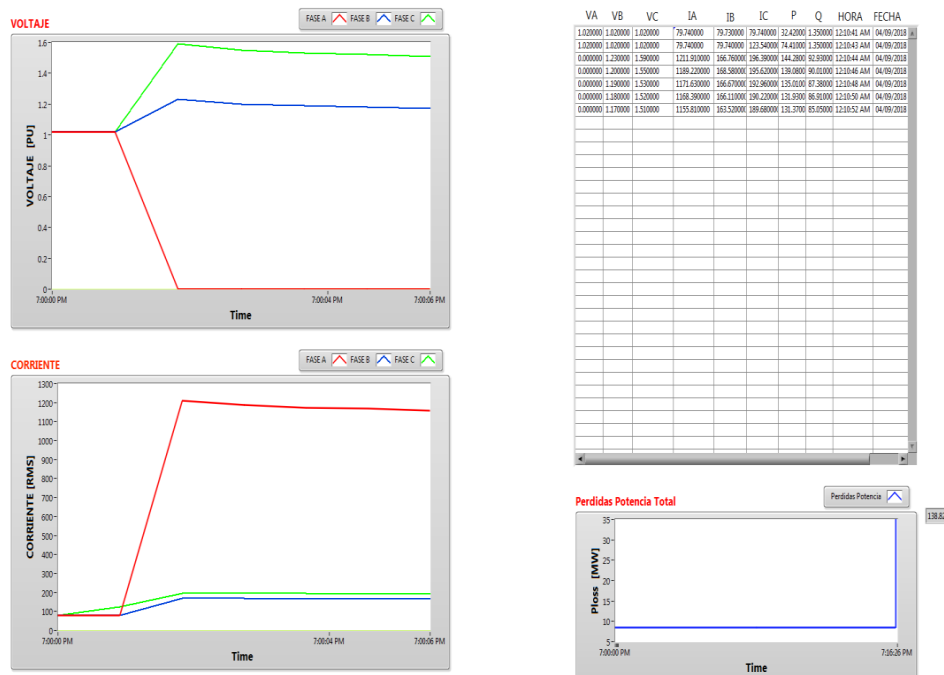
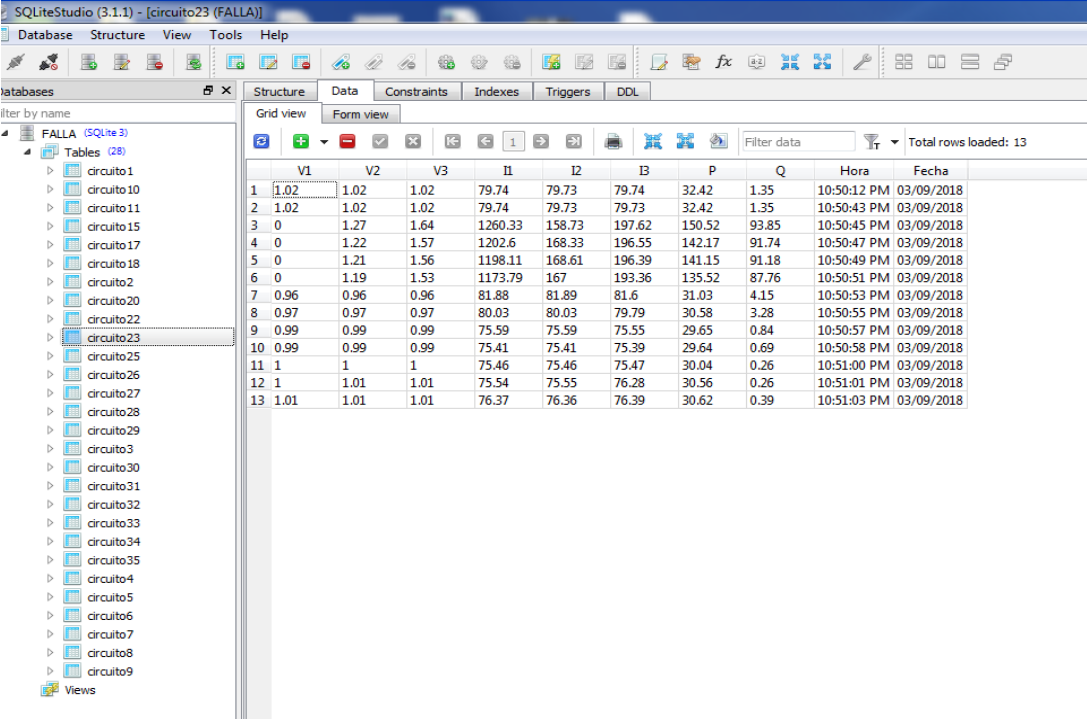


Fig 1. 25 Gráficas y base datos ante una falla monofásica.

Los valores mostrados en la tabla de la figura anterior son exportados por medio de la librería SQL del Dr. James Powell descrita en la metodología al software SQLite Studio. Como se muestra en la figura 3.10.



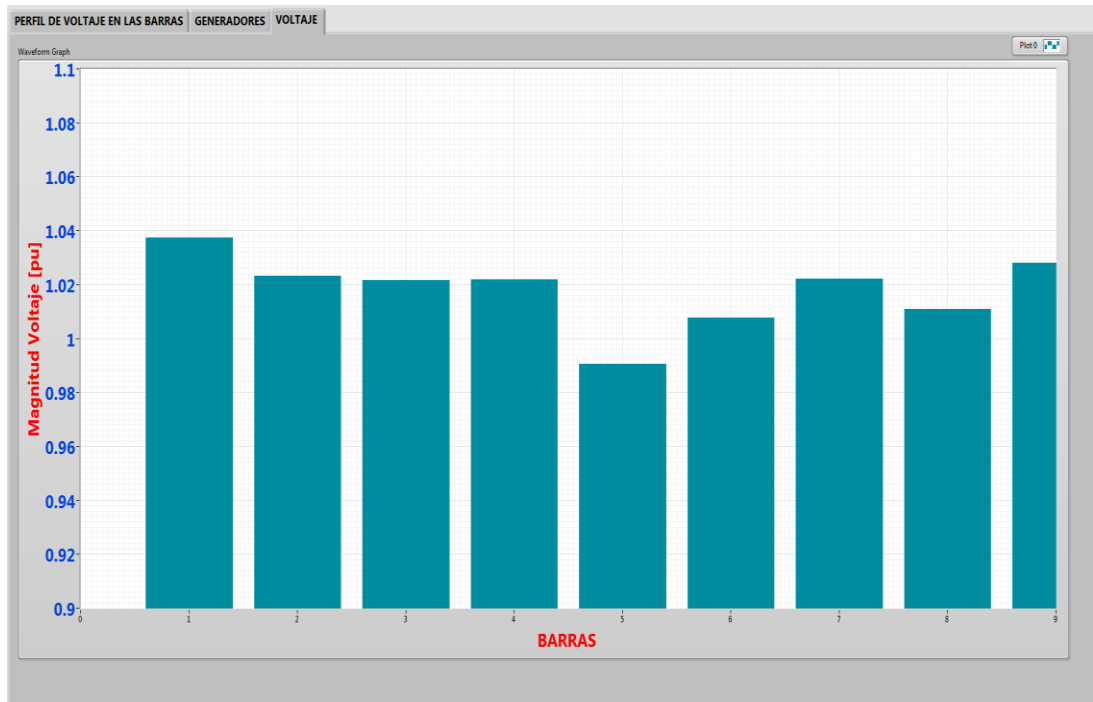
	V1	V2	V3	I1	I2	I3	P	Q	Hora	Fecha
1	1.02	1.02	1.02	79.74	79.73	79.74	32.42	1.35	10:50:12 PM	03/09/2018
2	1.02	1.02	1.02	79.74	79.73	79.73	32.42	1.35	10:50:43 PM	03/09/2018
3	0	1.27	1.64	1260.33	158.73	197.62	150.52	93.85	10:50:45 PM	03/09/2018
4	0	1.22	1.57	1202.6	168.33	196.55	142.17	91.74	10:50:47 PM	03/09/2018
5	0	1.21	1.56	1198.11	168.61	196.39	141.15	91.18	10:50:49 PM	03/09/2018
6	0	1.19	1.53	1173.79	167	193.36	135.52	87.76	10:50:51 PM	03/09/2018
7	0.96	0.96	0.96	81.88	81.89	81.6	31.03	4.15	10:50:53 PM	03/09/2018
8	0.97	0.97	0.97	80.03	80.03	79.79	30.58	3.28	10:50:55 PM	03/09/2018
9	0.99	0.99	0.99	75.59	75.59	75.55	29.65	0.84	10:50:57 PM	03/09/2018
10	0.99	0.99	0.99	75.41	75.41	75.39	29.64	0.69	10:50:58 PM	03/09/2018
11	1	1	1	75.46	75.46	75.47	30.04	0.26	10:51:00 PM	03/09/2018
12	1	1.01	1.01	75.54	75.55	76.28	30.56	0.26	10:51:01 PM	03/09/2018
13	1.01	1.01	1.01	76.37	76.36	76.39	30.62	0.39	10:51:03 PM	03/09/2018

Fig 1. 26 Exportación de datos a SQLite Studio.

Cabe mencionar que, en este trabajo solo se exportan datos ante el evento de falla en el sistema de transmisión.

### 3.3.5 Magnitud de Voltaje de las Barras.

En esta pantalla se muestra por medio de un gráfico de barras las magnitudes de los voltajes en valores pu de cada barra del sistema de transmisión objeto de estudio, como se observa en la figura 3.10.



**Fig. 1. 27 Voltajes de las barras en valores pu**

Ante una ocurrencia de falla, que en este trabajo es efectuado de manera manual por el mismo operador. A continuación, se observa la respuesta del sistema SCADA ante el evento de falla.

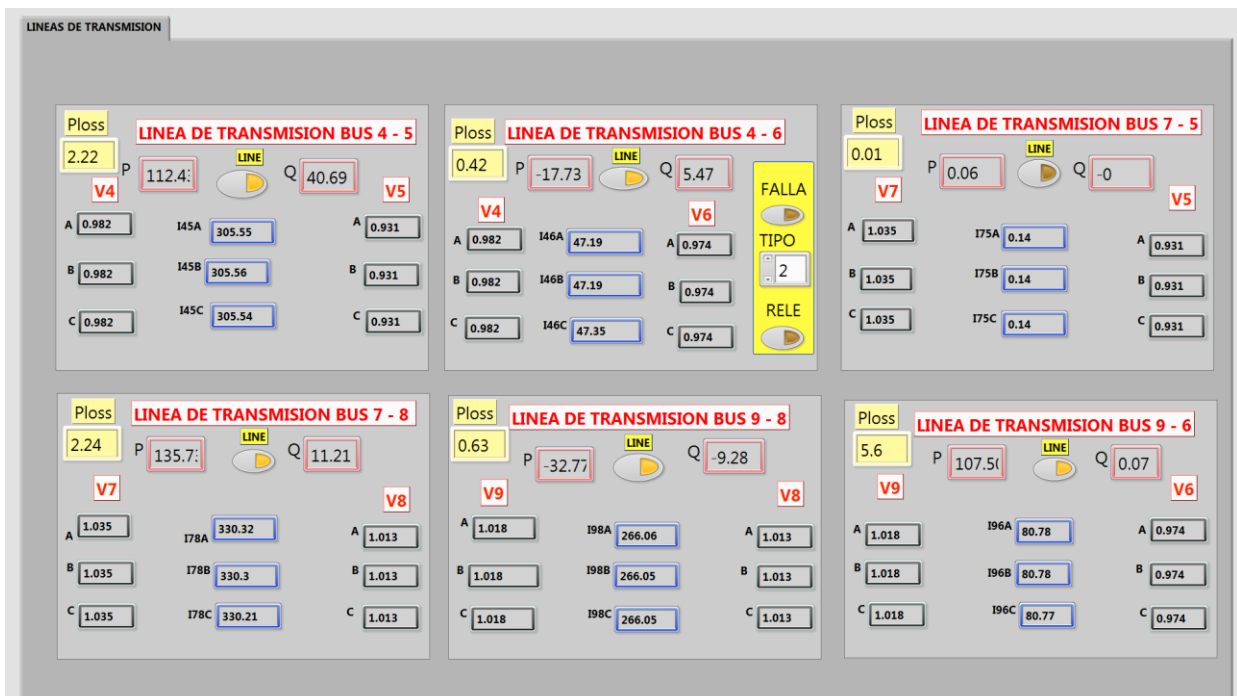
### 3.4 Pruebas del Sistemas

Este estudio se realizó en el laboratorio que ejecuta simulación en tiempo real de forma computacionalmente o con equipos que estén involucrados a la nueva tecnología, se debe realizar todo tipo de prueba que justifiquen o certifiquen la valides del trabajo. A continuación, se presenta ciertas verificaciones del SCADA diseñado.

#### 3.4.1 Contingencia de Línea de Transmisión.

Como se mencionó anteriormente, en la pantalla de las líneas de transmisión hay un botón con el cual se puede abrir o cerrar cada una de las líneas. En este caso se puede apreciar de forma visual la salida u operación de una línea de transmisión. Teniendo como ejemplo la salida de operación de la línea de transmisión que conecta desde la barra 7 a la barra 5.

En la figura 3.11 de exportación de base de dato, se puede observar que al estar apagado el botón de la línea no hay flujo de corriente ni potencia en la misma. La línea de transmisión y los interruptores de potencia ubicados en los extremos de esta tiene color verde. Ante una contingencia o salida de una línea de transmisión, el sistema cambia el color de la línea de verde a rojo y los interruptores cambian a color blanco en señal de que están abiertos. Cabe mencionar que las aperturas o cierres de las líneas se realizan de forma manual.



**Fig 1. 28 Salida de Operación de la Línea de Transmisión 7 - 5.**

Asimismo se puede apreciar en la pantalla del diagrama unifilar de SCADA, el cambio de color de la línea de transmisión que ha salido de operación; como se muestra en la figura 3. .

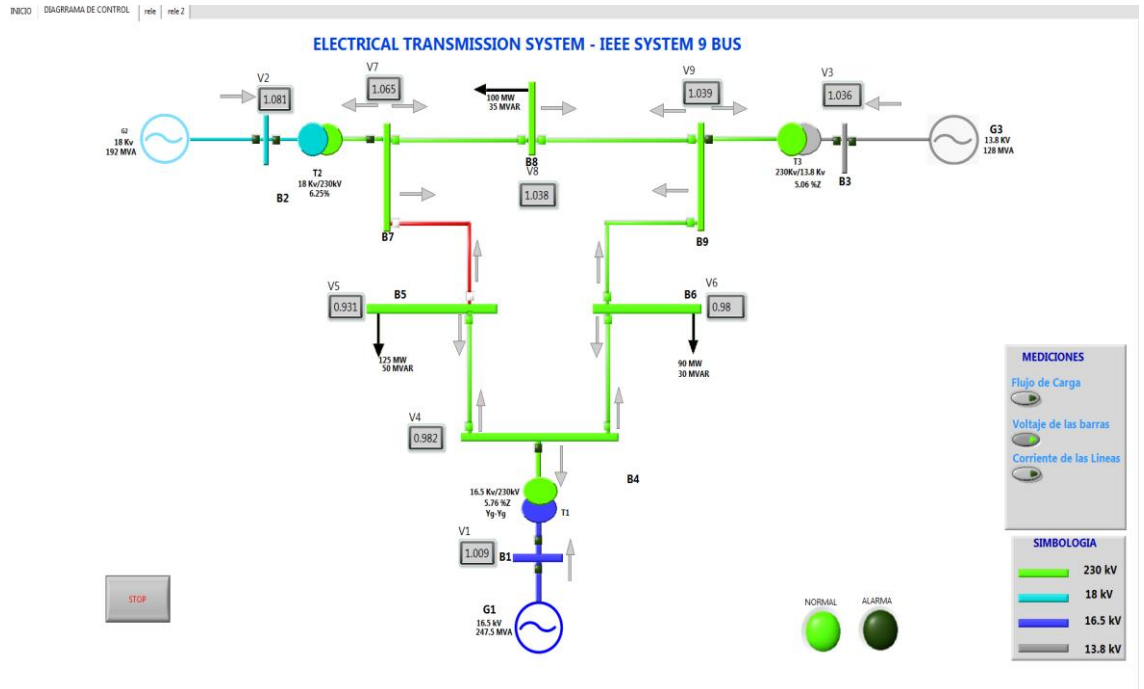
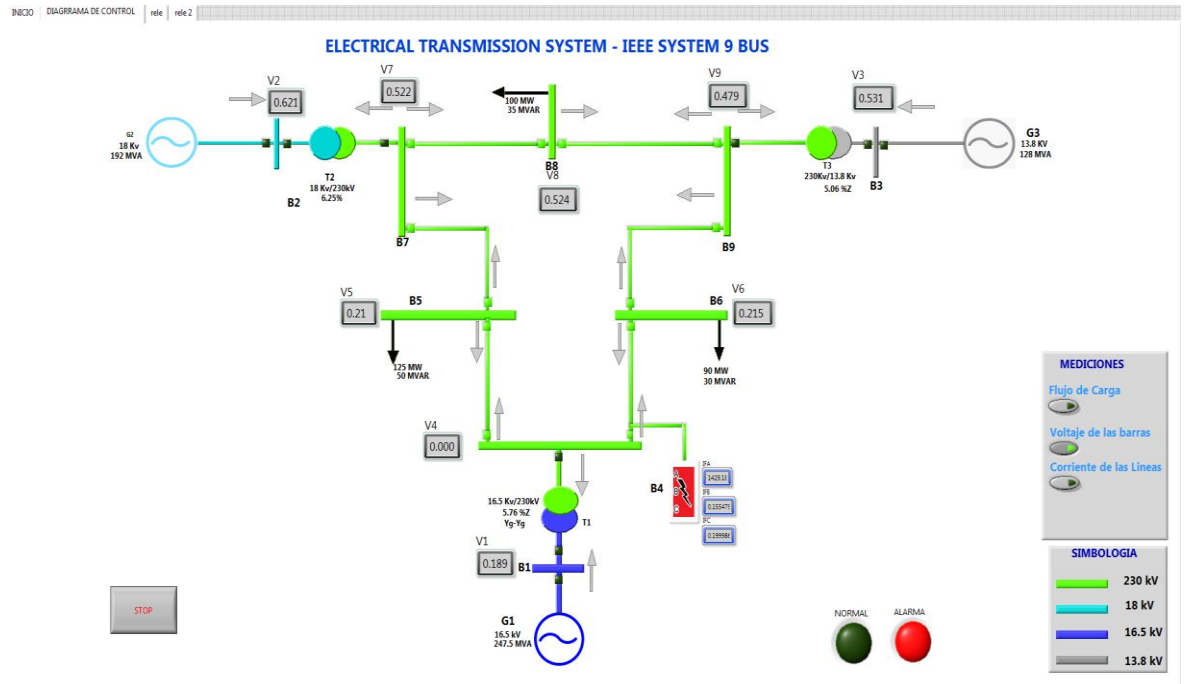


Fig 1. 29 Pantalla de Diagrama Unifilar ante la salida de la Línea 7 - 5.

### 3.4.2 Eventos de Fallas

Como primer lugar se efectúa una falla monofásica en la barra 4 del sistema de transmisión. Esta falla se realiza en la fase A de la línea de transmisión. A continuación, se observa la activación de la alarma integrada en el SCADA donde alerta al operador la ocurrencia del evento de falla, además incluye una alarma sonora que se activa automáticamente y de la misma manera se desactiva cuando la falla se ha despejado y el sistema operación en condicional normal nuevamente.



**Fig 1. 30 Pantalla de diagrama unifilar ante un evento de falla.**

Ante el evento de una falla, el sistema SCADA activa la alarma que se puede observar por el encendido de un indicador Led de color rojo en la parte inferior, además de la alarma de sonido que se activa automáticamente. También se observa que aparece una imagen que indica el lugar donde se produjo la falla. Es evidente, además, el cambio de los valores pu de los voltajes en las barras donde caen de su valor de operación normal y se restituyen cuando el evento de falla ha sido despejado.

En la figura 3.14 se muestra la pantalla de los generadores y se puede evidenciar el cambio de los fasores de voltaje de los generadores durante el evento de falla.

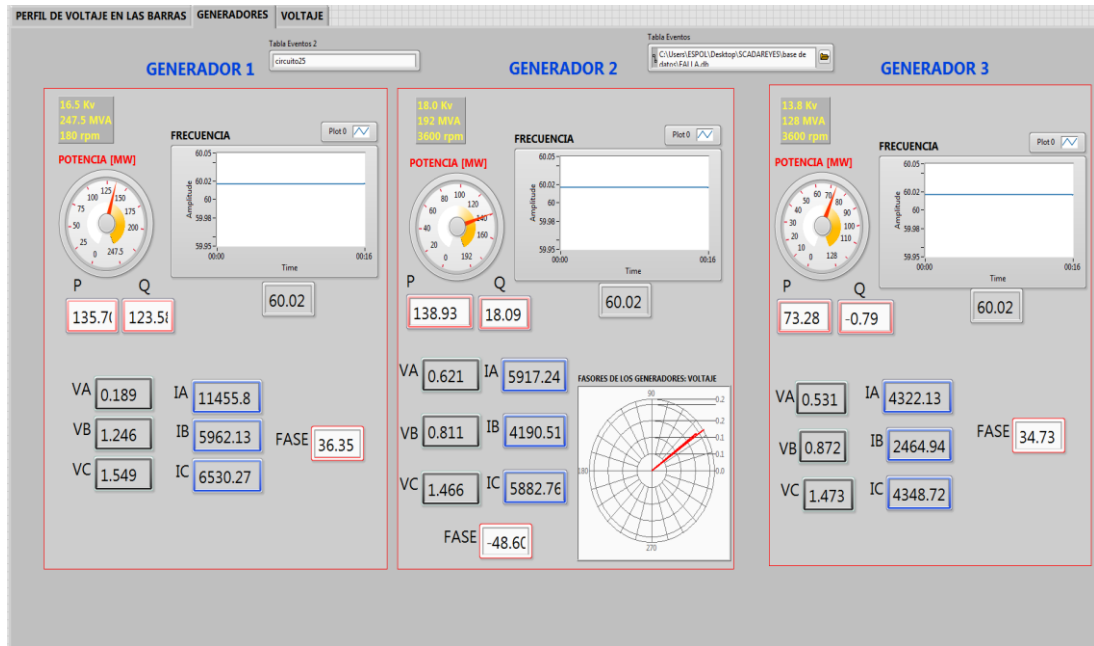


Fig. 1. 31 Respuesta de los generadores ante un evento de fall

En la figura 1.32, se puede observar el incremento de las corrientes de los generadores durante el evento de falla, así como la variación de los fasores de voltajes en el diagrama polar, además del cambio de la magnitud de los voltajes en las barras de generación.

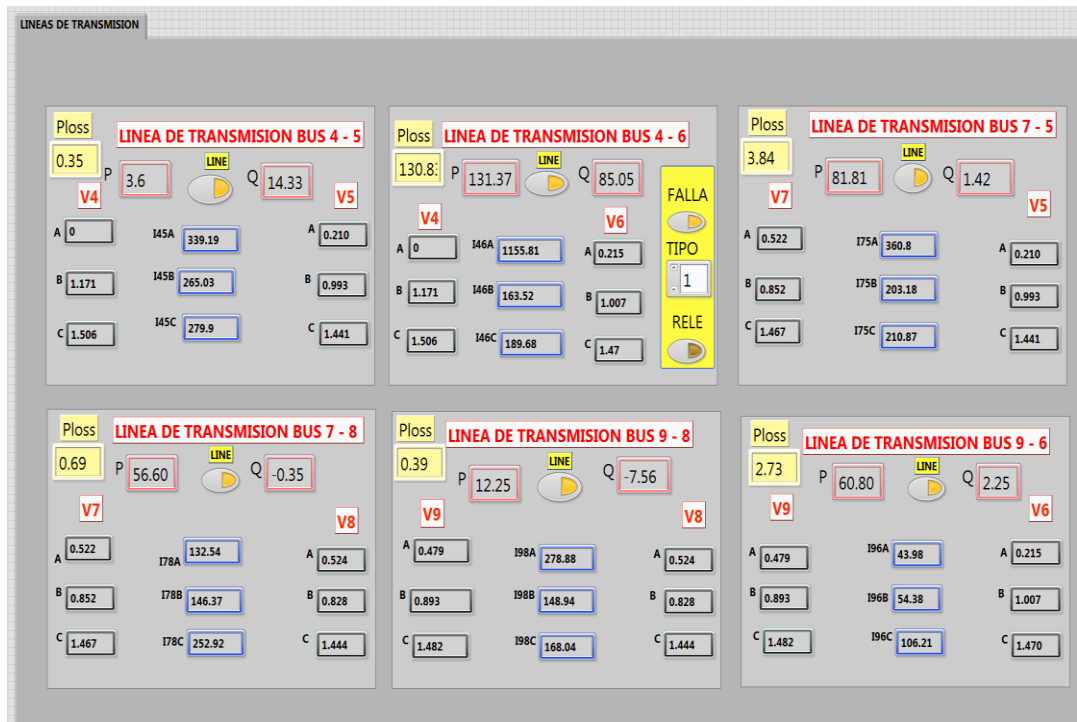


Fig. 1. 32 Mediciones de las líneas durante el evento de una falla.

Como se mencionó anteriormente, solo se gráfica y guarda una base de datos ante un evento de falla en el sistema. En la figura 3.16, se puede observar que la fase A en el gráfico de voltaje cae a cero y de la misma manera que la fase A en la gráfica de corriente se eleva. Esto sirve para tener un registro no solo numérico sino grafico de qué magnitud tuvieron tanto la corriente como el voltaje durante la ocurrencia de la falla. Los datos mostrados en la tabla en la presente pantalla son los datos que son exportados a la base de datos externa SQLite Studio con el propósito de tener un registro histórico de los eventos de falla en el sistema como se muestra en la figura 3.17.

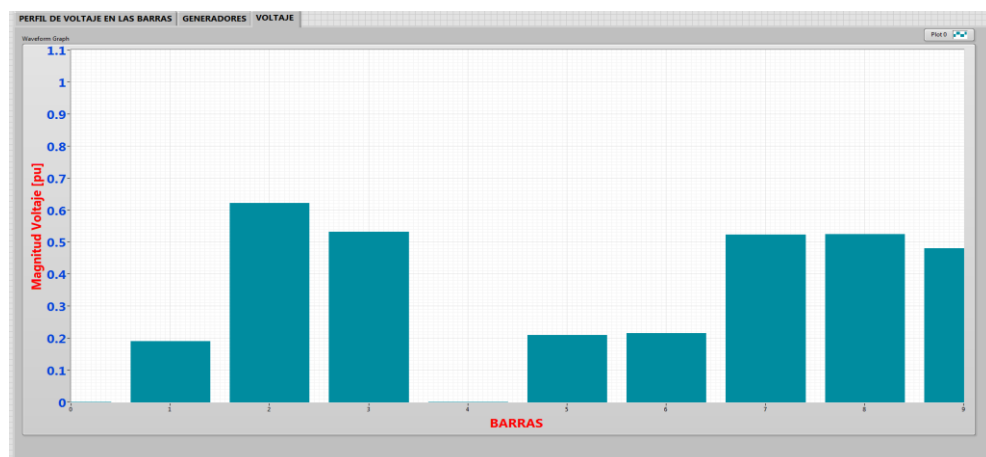


En esta base de datos externa se guardan los valores de los voltajes y corriente de las tres fases de la barra donde ocurre la falla, en este caso es el extremo de la línea de transmisión 4 – 6 cerca de la barra 4. Además, se guarda los valores de la potencia activa y reactiva como se muestra en la siguiente figura.

	V1	V2	V3	I1	I2	I3	P	Q	Hora	Fecha
1	1.02	1.02	1.02	79.74	79.73	79.74	32.42	1.35	10:50:12 PM	03/09/2018
2	1.02	1.02	1.02	79.74	79.73	79.73	32.42	1.35	10:50:43 PM	03/09/2018
3	0	1.27	1.64	1260.33	158.73	197.62	150.52	93.85	10:50:45 PM	03/09/2018
4	0	1.22	1.57	1202.6	168.33	196.55	142.17	91.74	10:50:47 PM	03/09/2018
5	0	1.21	1.56	1198.11	168.61	196.39	141.15	91.18	10:50:49 PM	03/09/2018
6	0	1.19	1.53	1173.79	167	193.36	135.52	87.76	10:50:51 PM	03/09/2018
7	0.96	0.96	0.96	81.88	81.89	81.6	31.03	4.15	10:50:53 PM	03/09/2018
8	0.97	0.97	0.97	80.03	80.03	79.79	30.58	3.28	10:50:55 PM	03/09/2018
9	0.99	0.99	0.99	75.59	75.59	75.55	29.65	0.84	10:50:57 PM	03/09/2018
10	0.99	0.99	0.99	75.41	75.41	75.39	29.64	0.69	10:50:58 PM	03/09/2018
11	1	1	1	75.46	75.46	75.47	30.04	0.26	10:51:00 PM	03/09/2018
12	1	1.01	1.01	75.54	75.55	76.28	30.56	0.26	10:51:01 PM	03/09/2018
13	1.01	1.01	1.01	76.37	76.36	76.39	30.62	0.39	10:51:03 PM	03/09/2018

**Fig 1. 34 Exportación de datos a SQLite Studio ante ocurrencia de falla**

En la pantalla del gráfico de barras donde se muestran los valores pu de las barras el sistema de transmisión, se puede evidenciar el cambio de las magnitudes de los voltajes ante una ocurrencia de la falla.



**Fig 1. 35 Gráfico de los Voltajes en pu de las Barras del Sistema**

En este proyecto integrador tiene la finalidad comprobar resultados tanto teóricos como experimental (Opal - RT), ya que en muchas ocasiones se toma un tiempo en obtener un resultado teórico, es por esta razón que incorporan equipo de nueva tecnología que no solo realicen este tipo de operación, sino que puedan Simular modelos más extensos y actúen de forma rápida.

Además dará acceso a un Sistema SCADA implementado con un interfaz diseñado en LabVIEW, que brindará un alto beneficio para un operador ya que podrá realizar contingencia en cada una de las líneas y así mismo simular fallas. Por medio de este laboratorio virtual se pretende dar mayor motivación que se inculquen a usar la nueva tecnología que son trabajos de control parecido a lo que ocurre en la vida real de CNEL EP o CELEC EP.

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Este proyecto implementó un Laboratorio virtual para la simulación de un Sistema de Transmisión en condiciones normal, falla y contingencia, capaz de almacenar un histórico de evento en una base de dato SQL.
- Se comprobó que mediante el protocolo de comunicación OPC UA utilizado para realizar la comunicación entre RT-LAB (Host PC) y LabVIEW (Client PC), tanto Host PC y LabVIEW realizan funciones de igual similitud para maniobrar y al mismo tiempo controlar el modelo escogido. Para esto también presenta las cualidades suficientes para garantizar que el envío y recepción de información se realiza de manera rápida y confiable.
- Mediante un control el sistema SCADA implementado en el software LabVIEW permite al operador un fácil monitoreo de cómo está funcionando el sistema de transmisión eléctrica por medio de varias pantallas, ya que deja visualizar los voltajes en las barras, flujo de carga, las magnitudes eléctricas de los generadores, además de permitir la salida de líneas de transmisión de manera manual.
- Por medio de la manipulación del SCADA se pudo realizar fallas de manera manual, es decir controlada por el operador, es una ventaja ya que se puede comprobar los conocimientos acerca del análisis de cortocircuito de manera visual por medio de la respuesta de la simulación de tiempo real a través de la plataforma de SCADA.
- Se verifico que la alarma en el sistema SCADA es de mucha utilidad ya que avisa al operador, esta funciona cuando se encuentra por encima y por debajo del 30% de su voltaje nominal. En el caso que se presente una anomalía en el sistema de transmisión, la misma que se activa automáticamente ante la ocurrencia de una falla, y que se desactiva cuando el sistema vuelve a las condiciones de operación normal.

- Y finalmente según las pruebas realizadas se ejecuta la exportación de mediciones y magnitudes eléctricas a la base de datos externa SQL, permite al operador tener un registro histórico del funcionamiento del sistema eléctrico de potencia en la barra diseñada para que ocurre la falla.

## **Recomendaciones**

- Se puede realizar la implementación de Hardware in the loop, que consiste en la interacción entre el simulador de tiempo real OPAL-RT y un dispositivo externo que puede ser un relé de protección o un PLC; a fin de que el simulador envíe una señal al dispositivo externo y asimismo el equipo pueda responder una señal al simulador a fin de que haya comunicación en ambas direcciones.
- Investigar acerca del uso de los múltiples núcleos que posee el simulador de tiempo real, a fin de que se pueda optimizar la estructura de los bloques de subsistemas en RT-LAB.
- El protocolo de comunicación que se utilizó en este proyecto fue OPC UA, pero también hay otros tipos de comunicación, por ejemplo: modbus; la recomendación sería establecer más de un sistema de comunicación en un mismo proyecto de trabajo.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1]H. G. Aghamolki, Z. Miao, y L. Fan, «A hardware-in-the-loop SCADA testbed», *2015 North Am. Power Symp. NAPS 2015*, pp. 1-6, 2015.
- [2]H. G. Aghamolki y Z. Miao, «Real-Time Digital Simulator Enabled Hardware-in-the-Loop Electric Machine Drive Lab», pp. 1-6.
- [3]«SQLiteStudio User manual», 2012.
- [4]S. Bogota, «Análisis de aplicaciones relativas a la estabilidad de sistemas de potencia basadas en unidades de medición fasorial germán eduardo velandía quecán», pp. 1-113, 2009.
- [5]I. John y D. Moncayo, «MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES TEMA : Caracterización de las redes eléctricas para su empleo en las redes energéticas inteligentes ( Smart Grids ). AUTOR : Magíster en Telecomunicaciones TUTOR : MSc . Manuel Romero Paz», 2017.
- [6]S. Barras, P. M. Anderson, R. F. M. Gonzalez-longatt, y D. Sistema, *Flujo de Potencia en el*. 2007.
- [7]«Simulink - Simulación y diseño basado en modelos - MATLAB & Simulink», 2018. [En línea]. Disponible en: [https://es.mathworks.com/products/simulink.html?s\\_tid=hp\\_products\\_simulink](https://es.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_products_simulink). [Accedido: 29-ago-2018].
- [8]«¿Qué es LabVIEW? - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>. [Accedido: 29-ago-2018].
- [9]Tutorial Point, «About the Tutorial Disclaimer & Copyright», *Organ. Behav.*, pp. 1-305, 2014.
- [10] «L90 Line Differential Relay »:
- [11] «Hardware in the loop | HIL simulation | OPAL-RT», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>. [Accedido: 29-ago-2018].
- [12] Velasco-Ramírez E; Ángeles-Camacho C; García-Martínez M, «Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos», vol. XIV, p. 8, 2013.
- [13] «OPC UA (Arquitectura Unificada)», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.matrikonopc.es/opc-ua/index.aspx>. [Accedido: 29-ago-2018].

- [14] M. I. Hernández Cevallos y D. A. Ledesma Marcalla, «Desarrollo de un sistema SCADA para la medición de voltajes con sistemas embebidos para el laboratorio de mecatrónica de la facultad de mecánica», p. 146, 2010.
- [15] J. Romagosa, D. Gallego, y R. Pacheco, «Miniproyecto Automatización Industrial ( Auti )», p. 66, 2010.
- [16] A. M. Zaw y H. M. Tun, «Design and Implementation of SCADA System Based Power Distribution for Primary Substation ( Monitoring System )», *Int. J. Science, Eng. Technol. Res.*, vol. 3, n.º 5, pp. 1542-1546, 2014.
- [17] «sysinviso-full3.jpg (800x600)», 2018. [En línea]. Disponible en: <http://sysce.com/recursos/sysinviso-full3.jpg>. [Accedido: 29-ago-2018].
- [18] KIOS Centre for Intelligent Systems & Networks. 2013. IEEE 9-bus modified test system. [ONLINE] Available at: <http://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/index.php/dynamic-ieee-testsystems/ieee-9-bus-modified-test-system>.
- [19] «Electrical Real-Time Simulation Systems », 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.opal-rt.com/simulation-systems-overview/> [Accedido: 29-ago-2018].
- [20] «SQLiteStudio », 2018. [En línea]. Disponible en: <https://sqlitestudio.pl/index.rvt> [Accedido: 29-ago-2018].
- [21] Aurea Javier, Analisis Comparativo de Lnea de transmision.
- [22] Novotek, «OPC and OPC UA explained,» Novotek, 13 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.novotek.com/en/solutions/kepware-communication-platform/opc-and-opc-ua-explained>. [Último acceso: 16 Septiembre 2019].