

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

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

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Presentado por:

Roger Alexis Ayala Moreira

Jaime Steven Hurtado Rojas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo dedicado al presente proyecto se lo dedico a mis padres Ing. Raúl Ayala y Sra. Angela Moreira; a mis hermanos Ing. Anjouli Ayala y Sr. Kenny Ayala; por su constante e incondicional apoyo, ya que sin ellos nada se hubiera forjado porque fueron pilar fundamental en mi crecimiento como profesional y persona de bien. A mis familiares más cercanos, mis buenos amigos encontrados en la universidad y aquellos encontrados durante mi vida; por estar siempre en los momentos adversos brindándome sus mejores deseos.

**Roger Alexis Ayala Moreira**

Este proyecto se lo dedico a mis padres Jaime Hurtado y Azucena Rojas, los cuales siempre me han brindado su apoyo incondicional toda mi vida. A mi novia Kelly Quimis la cual me dio la fuerza necesaria para terminar la carrera. A mis amigos, que junto a ellos superamos incontables adversidades que se nos presentaron durante la carrera.

**Jaime Steven Hurtado Rojas**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradecemos a Dios por permitirnos cumplir a cabalidad con nuestra carrera, darnos el día a día y por los logros que hemos obtenido. A nuestro profesor de la Materia Integradora, Ph.D. Sífifo Falcones por dirigirnos durante el desarrollo del presente proyecto integrador. A nuestro tutor Ing. Franklin Kuonquí por habernos apoyado en todo momento. A nuestros compañeros de la materia integradora Ing. Francisco Álvarez, Ing. David Plaza, Ing. Jonathan Zurita e Ing. José Reyes por su apoyo, la amistad brindada y por hacer de este proceso algo más llevadero. Y a los demás ingenieros que nos extendieron su mano cuando lo solicitamos, Ing. Livingston Miranda, MSc. Jimmy Córdova, Ing. Diana Cervantes, Ing. Erick Mejía e Ing. Julio Samaniego.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Roger Alexis Ayala Moreira* y *Jaime Steven Hurtado Rojas* 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"



---

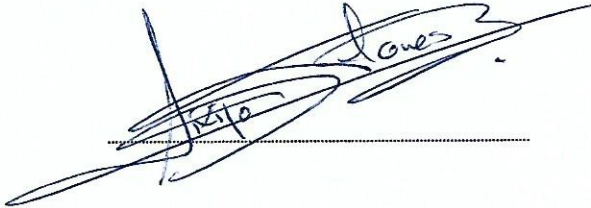
Roger Ayala Moreira



---

Jaime Hurtado Rojas

## EVALUADORES

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

**Ph.D. Sixifo Falcones.**

**PROFESOR DE LA MATERIA**

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

**Ing. Franklin Kuonquí.**

**PROFESOR TUTOR**

## RESUMEN

La Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) cuenta con un Laboratorio de Simulación en Tiempo Real y con una materia llamada Sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) la cual no cuenta con prácticas de laboratorio siendo de vital importancia para complementar los contenidos teóricos de la misma con los prácticos. Por esta razón el presente proyecto tiene como objetivo implementar un Laboratorio Virtual para el estudio de Sistemas SCADA en un Sistema de Generación Eléctrica.

El proyecto puede controlar y monitorear variables importantes que tiene un Generador a Diésel, implementando un laboratorio a base de simulaciones mediante el diseño de una interfaz SCADA para su control y supervisión con un control de lazo cerrado y registro de datos importantes; esto ayudará a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica para analizar características de componentes y comportamiento real de un sistema de generación eléctrica. Para la realización del presente proyecto integrador, se contó con la ayuda del Simulador de tiempo real OPAL-RT y RT-Lab, el software Tia Portal para la programación en el PLC, Matlab-Simulink™ para modelado, diseño de la interfaz en LabVIEW y SQL para la base de datos.

Se realizaron pruebas en diferentes casos de estudio para el análisis del sistema de generación eléctrica tales como comportamiento de generadores a diésel, sus controladores y protecciones en estado estable o ante una perturbación, en dónde se monitoreó y controló el sistema en tiempo real de una forma óptima mediante la interfaz SCADA. Revisando la operación normal del sistema se puede actuar de manera eficaz ante perturbaciones que existan en el sistema de generación eléctrica como lo es en el caso de que la red no pueda suplir la demanda y se vea en la necesidad de conectar generadores para suplir dicha demanda, registrando segundo a segundo parámetros en histórico de datos con el que se puede analizar de una mejor manera el sistema.

Además, se pudo comprobar controladores externos con ayuda del PLC, para verificar la actuación de este dentro de la simulación realizada, con esto el estudiante de Ingeniería estará preparado para analizar y solucionar problemas del ámbito profesional.

**Palabras Clave:** Generador a Diésel, SCADA, Control de Lazo Cerrado, PLC, Laboratorio Virtual.

## **ABSTRACT**

*The Faculty of Engineering in Electricity and Computing (FIEC) of the Polytechnic School of the Litoral (ESPOL) has a real-time simulation laboratory and a subject called SCADA Systems (Supervision, Control and Data Acquisition) which does not have practice laboratories, being of vital importance to complement its theoretical concepts with practical ones. For this reason, the current project aims to implement a Virtual Laboratory for the study of SCADA Systems in an Electric Generation System.*

*The project can control and monitor important variables that a Diesel Generator has, implementing a laboratory based on simulations by designing a SCADA interface for its control and supervision with a closed loop control and recording of important data; this will help Electrical Engineering students to analyze the characteristics of components and the actual behavior of an electrical generation system. For the accomplishment of this integrating project, we relied on the help of the real-time Simulator OPAL-RT and RT-Lab, the Tia Portal software for programming in the PLC, Matlab-Simulink™ for modeling, interface design in LabVIEW and SQL for the database.*

*Tests were carried out in different case studies analyzing the electric generation system, such as, the behavior of diesel generators, their controllers and protections in stable state or before a disturbance, where the system was monitored and controlled in real-time using the SCADA interface. While reviewing the normal operations of the system, it is possible to act effectively in the event of disturbances that exist in the electricity generation system, as in the case of when a network can not supply its demand and it is necessary to connect generators to supply said demand, therefore parameters are registered in data history for the system to be analyzed in a better way.*

*In addition, it was possible to check external controllers with the help of the PLC, to verify the performance of this within the simulation, with this the Engineering student will be prepared to analyze and solve problems in the professional field.*

**Keywords:** Diesel Generator, SCADA, Closed Loop Control, PLC, Virtual Laboratory.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
DECLARACIÓN EXPRESA.....	iv
EVALUADORES.....	v
RESUMEN.....	vi
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ABREVIATURAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación del problema .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Propuesta .....	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Smart Grid.....	5
1.5.2 Generación Distribuida .....	5
1.5.3 Sistemas SCADA.....	6
1.5.4 Simulador en tiempo real OPAL-RT.....	6
1.5.5 Control de Potencia y Frecuencia.....	7
1.5.6 Regulación primaria, secundaria y terciaria .....	8
1.5.7 Sistemas de excitación .....	10
1.5.8 Funciones de protección utilizadas.....	12



1.5.9	OPC Server.....	13
1.5.10	SQLite.....	14
1.5.11	Hardware in the Loop.....	14
CAPÍTULO 2.....		15
2.	METODOLOGÍA.....	15
2.1	Modelo de Sistema de Generación .....	15
2.2	Parametrización del generador síncrono.....	16
2.3	Parametrización del sistema de excitación.....	16
2.4	Parametrización del sistema de control de potencia mecánica .....	17
2.5	Diagrama de conexión del sistema de control Voltaje-Frecuencia .....	18
2.6	Modelamiento de funciones de protecciones .....	18
2.7	Modelamiento de Perfil de Carga simulado.....	19
2.8	Diseño del Sistema Modelado en Simulink™ para simulación en tiempo real..	19
2.9	Diseño del Sistema SCADA .....	29
2.10	Hardware In the Loop.....	36
2.11	Implementación de la Base de Datos .....	38
CAPÍTULO 3.....		40
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	40
3.1	Sistema de excitación y control de frecuencia.....	40
3.2	Respuesta de los controladores de los generadores ante una carga dinámica	41
3.3	Estado del Sistema para carga dinámica .....	42
3.4	Respuesta de los Generadores ante carga dinámica.....	43
3.5	Respuesta de los Transformadores ante carga dinámica .....	45
3.6	Respuesta de Voltaje y Corriente en la barra de carga ante una carga dinámica	46
3.7	Respuesta de los relés de protección en estado estable .....	46
3.8	Respuesta de los relés de protección ante la falla en la fase C de los Generadores .....	49

3.9	Conexión de la Barra Infinita .....	53
3.10	Comparaciones de Generador 1 y Generador 2 .....	54
3.11	Comparaciones de entradas y salidas de la ganancia $K=30$ del controlador del Generador 1 con PLC y Generador 2 con controlador totalmente simulado .....	56
3.12	Registro de la base de datos obtenida .....	57
CAPÍTULO 4.....		59
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
	Conclusiones.....	59
	Recomendaciones.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....		61
ANEXOS.....		63
PROGRAMACIÓN DE LA GANANCIA DEL CONTROLADOR DEL GENERADOR 1 EN PLC .....		63
FORMATO DE SCRIPT #1 PARA COMUNICACIÓN OPC.....		64
FORMATO DE SCRIPT #2 PARA COMUNICACIÓN OPC.....		65

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
FIEC	Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture (OLE para Procesos de Control Arquitectura Unificada)
OLE	Object Linking and Embedding (Incrustación y Enlazado de Objetos)
MTU	Unidad de Máxima Transferencia
RTU	Unidad Terminal Remota
AVR	Regulador Automático de Voltaje
FEM	Fuerza Electromotriz
DCS	Sistema de Control Distribuido
HMI	Interfaz Hombre-Máquina
HIL	Hardware In the Loop (Sistemas Físicos Embebidos)
SQL	Structure Query Language (Lenguaje de Consulta Estructurada)
XHP	Extra-High Performance (Rendimiento Extra Alto)

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Smart Grid. [2] .....	1
Figura 1.2 Diagrama de equipos y software a utilizar. ....	5
Figura 1.3 Constitución de un SCADA. [5] .....	6
Figura 1.4 Simulador en tiempo real OPAL-RT. [7] .....	7
Figura 1.5 Funciones de un control de sistemas de potencia. [9] .....	8
Figura 1.6 Regulación primaria y secundaria en un generador aislado. [10] .....	9
Figura 1.7 Regulación primaria, secundaria y terciaria. [10] .....	10
Figura 1.8 Sistema de Excitación Estático. [11] .....	11
Figura 1.9 Composición de un sistema de excitación de un generador. ....	12
Figura 1.10 Esquema de conexión OPC. [13] .....	13
Figura 1.11 Prueba de un equipo realizando Hardware In the Loop usando simulación de tiempo real. [16] .....	14
Figura 2.1 Diagrama Unifilar del modelo de Sistema de Generación .....	15
Figura 2.2 Modelo de generador síncrono en Simulink™ .....	16
Figura 2.3 Sistema de excitación en Simulink™ .....	17
Figura 2.4 Sistema de control de velocidad en Simulink™ .....	17
Figura 2.5 Esquema interno del sistema de control de velocidad .....	17
Figura 2.6 Control de voltaje y frecuencia de un generador síncrono .....	18
Figura 2.7 Relé SEL-787 y SEL-300G .....	19
Figura 2.8 Perfil de carga implementado .....	19
Figura 2.9 Capa Principal del modelo construido en Simulink™ .....	20
Figura 2.10 Esquema de red con dos generadores conectados junto a la barra infinita a cargas pasivas y dinámicas .....	22
Figura 2.11 Bloques OpComm, OpCtrl, AnalogIn, AnalogOut usados para la simulación en Tiempo Real. ....	24
Figura 2.12 OpInput y Opoutput usados para la simulación en Tiempo Real .....	24

Figura 2.13 Subsistema SS_CALCULOS bloques de protecciones, controles de excitación y potencia mecánica. ....	26
Figura 2.14 Subsistema SS_CALCULOS bloques de cálculos de variables para visualización en la Interfaz de LabVIEW, de control de carga variable y señales de disparo de disyuntores. ....	27
Figura 2.15 Subsistema SC_Interface.....	28
Figura 2.16 Bloque Connect.vi. ....	30
Figura 2.17 Bloque Read.vi. ....	30
Figura 2.18 Bloque Write.vi. ....	30
Figura 2.19 Ventana PRESENTACIÓN del sistema SCADA.....	31
Figura 2.20 Ventana GENERADOR 1 del sistema SCADA.....	32
Figura 2.21 Ventana GENERADOR 2 del sistema SCADA.....	32
Figura 2.22 Ventana TRANSFORMADOR 1 del sistema SCADA.....	33
Figura 2.23 Ventana TRANSFORMADOR 2 del sistema SCADA.....	34
Figura 2.24 Ventana UNIFILAR del sistema SCADA .....	34
Figura 2.25 Ventana CARGA del sistema SCADA .....	35
Figura 2.26 Ventana COMPARACIONES HIL del sistema SCADA .....	35
Figura 2.27 Esquema del circuito de control de potencia mecánica del generador 1, (a) Control con Ganancia K simulada en RT-LAB, (b) Control con Ganancia K programada en el PLC S7-200. ....	36
Figura 2.28 Esquema de Conexiones para Hardware in the Loop. ....	37
Figura 2.29 SubVI SQL.....	38
Figura 2.30 Diagrama de conexiones a los diferentes bloques de la base de datos. ....	38
Figura 2.31 Bloques de Creación de las variables a guardar en la base de datos. ....	39
Figura 3.1 Sistemas de control para generadores en el esquema de red .....	41
Figura 3.2 Curvas de frecuencia, potencia mecánica, voltaje de campo y voltaje total de ejes alimentando a un perfil de carga.....	42
Figura 3.3 Estado del Sistema para carga dinámica .....	43
Figura 3.4 Parámetros monitoreados del Generador 1 .....	44

Figura 3.5 Parámetros monitoreados del Generador 2 .....	44
Figura 3.6 Parámetros monitoreados del Transformador 1 .....	45
Figura 3.7 Parámetros monitoreados del Transformador 2 .....	45
Figura 3.8 Señales de Voltaje y Corriente de la barra de carga para carga dinámica...	46
Figura 3.9 Respuesta de los Relés de protección en estado estable .....	47
Figura 3.10 Respuesta de las funciones de protección internas del Relé de protección SEL-300G.....	48
Figura 3.11 Respuesta de las funciones de protección internas del Relé de protección SEL-787.....	49
Figura 3.12 Sistema en falla .....	49
Figura 3.13 Generador 1 en falla.....	50
Figura 3.14 Generador 2 en falla.....	50
Figura 3.15 Transformador 1 en falla .....	51
Figura 3.16 Transformador 2 en falla .....	51
Figura 3.17 Parámetros en barra de carga ante falla .....	52
Figura 3.18 Diagrama Unifilar luego de la falla.....	52
Figura 3.19 Conexión de la red del sistema para que supla a la carga .....	53
Figura 3.20 Parámetros de la barra de carga conectada a la red del sistema .....	53
Figura 3.21 Parámetros de los controladores de los Generadores 1 y 2.....	54
Figura 3.22 Comparación de potencias de los Generadores 1 y 2.....	55
Figura 3.23 Parámetros de los controladores de los Generadores 1 y 2, con este último trabajando a capacidad nominal.....	55
Figura 3.24 Comparación de potencias de los Generadores 1 y 2, con este último trabajando a capacidad nominal.....	56
Figura 3.25 Señales de entrada y salida de la ganancia K ejecutada en el PLC, del Generador 1 .....	56
Figura 3.26 Señales de entrada y salida de la ganancia K ejecutada en el simulador, del Generador 2 .....	57
Figura 3.27 Registro de la Base de Datos obtenida durante la simulación .....	58

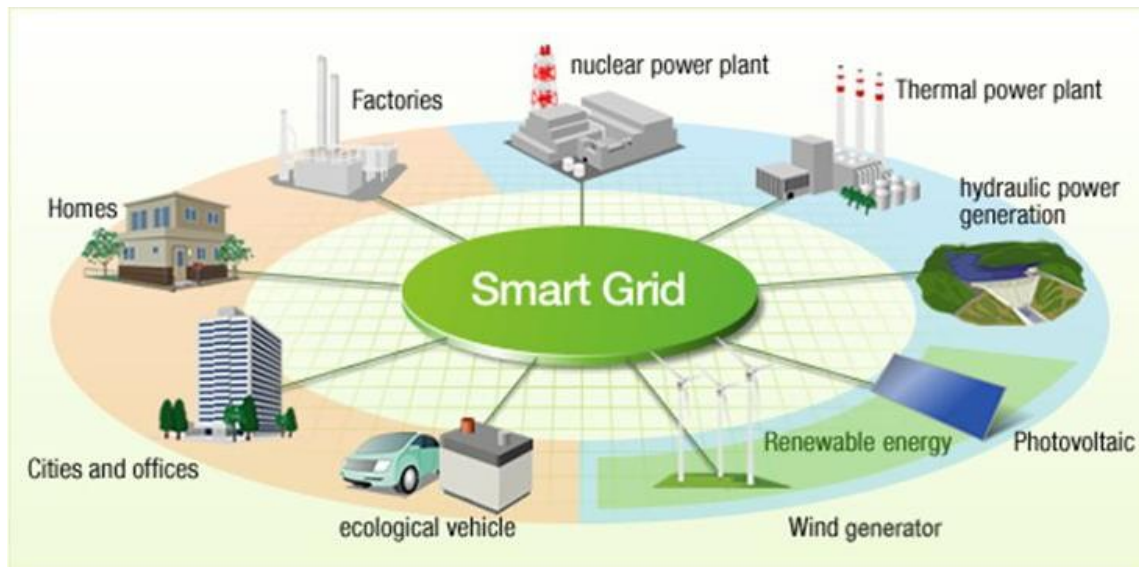
# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Generación de Electricidad es la parte medular en un Sistema de Potencia, es por esto que es indispensable su correcto funcionamiento; siempre se busca controlar y proteger las máquinas eléctricas que forman parte de sus procesos para que de esta manera se tenga un sistema operante y confiable.

Es importante conocer que una Red Inteligente integra de manera eficiente la forma en que se comportan los usuarios que la comparten como indica la figura 1.1, para de esta manera se tenga una red eficiente y sostenible, tratando en lo posible de reducir al máximo las pérdidas de energía y con altos estándares de calidad. [1]

Cada día las empresas generadoras de energía siguen avanzando en pro de tener un sistema con la mayor automatización posible, integrando todos sus componentes y coordinándolos entre sí para que estén siempre comunicados. Para esto se realiza el adelanto de nuevas tecnologías tanto de almacenamiento de información, capacidades dinámicas de una red y control y monitorización de sus componentes. [1]



**Figura 1.1 Smart Grid. [2]**

Es necesario implementar el Control y Adquisición de datos en tiempo real, debido a que poco a poco todos los sistemas, no solamente eléctricos, sino de varios tipos, se tienen que monitorear a larga distancia y obtener parámetros importantes que permiten el

correcto funcionamiento de estos y también posibles problemas que se puedan presentar, todo esto se logra a través de plataformas y software que permiten realizar simulaciones en tiempo real sobre un sistema en específico.

### **1.1 Descripción del problema**

Es necesario que los futuros profesionales, que estudian Ingeniería en Electricidad, estén capacitados en Sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) en el área de la Generación de Energía Eléctrica, es por esto que el presente proyecto al ver esta necesidad propone un Laboratorio Virtual para realizar prácticas de simulaciones dirigidas a un Sistema de Generación de Electricidad, con sus principales componentes y equipos, ajustándose lo más cercano posible a la automatización de los sistemas reales, y analizando parámetros de importancia en tiempo real, cual operador lo hace en una sala de control de alguna Central Eléctrica.

Al momento de contar con una práctica Laboratorio Virtual los estudiantes estarán en capacidad de analizar la respuesta de un sistema ante cambios en el mismo o en estado estable. Un Laboratorio de Sistema SCADA para el área de generación eléctrica, permite al estudiante desarrollar habilidades en este campo donde puede desarrollarse profesionalmente para de esta manera tener una formación íntegra.

### **1.2 Justificación del problema**

En los actuales momentos no se cuenta con un Laboratorio que permita desarrollar esta área de estudio, en la carrera de Ingeniería en Electricidad, debido a cuestiones de costos de equipos de control y es por esto que se lo implementará de manera virtual ya que no se dispone físicamente de un sistema de generación; esto es indispensable para la formación de los estudiantes de la carrera, que tengan que analizar el comportamiento de un sistema de generación de electricidad. La carrera de Ingeniería en Electricidad de la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC), se ve en la necesidad de formar a sus estudiantes en el ámbito de la Automatización de Sistemas Eléctricos de Potencia, dictando cátedra de la materia SCADA.

Es por esto que en el presente proyecto desarrolla una práctica de Laboratorio Virtual que permite al estudiantado entender las diferentes etapas de un Sistema de Control y Adquisición de Datos con ayuda del Simulador en tiempo Real OPAL-RT el cual fue adquirido por la Facultad con el fin de desarrollar habilidades en el campo de Simulaciones en tiempo real, es decir elaborar una práctica de un Sistema automatizado



capaz de responder frente a disturbios, y en casos fortuitos mostrar alarmas que permitan al usuario del Laboratorio Virtual tomar decisiones inmediatas de operación con ayuda de una interfaz que se desarrollará. Todo esto se logra con el uso de recursos de Laboratorio ya existentes, es decir Software tales como Matlab, LabVIEW, SQL, entre otros; así como dispositivos tales como relés de protección, Controladores Lógicos Programables (PLC), etc.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Implementar un Laboratorio Virtual para el estudio de Sistemas SCADA en un Sistema de Generación Eléctrica incorporando simulación en tiempo real, utilizando protocolo de comunicación OPC y controladores físicos, registrando parámetros en una base de datos.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

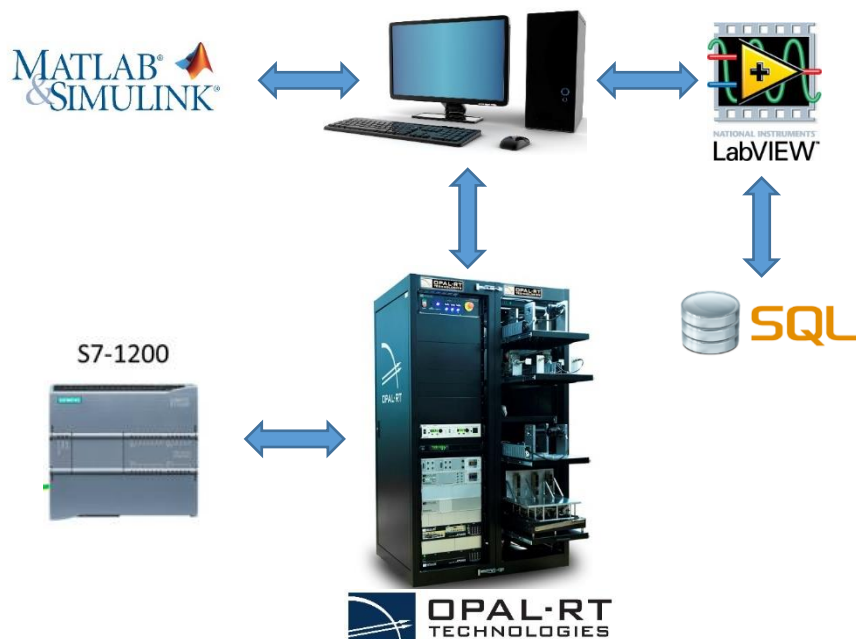
- Desarrollar un modelo de sistema de Generación Eléctrica, utilizando Matlab-Simulink™, parametrizando controladores existentes para lograr el correcto funcionamiento de las máquinas eléctricas.
- Implementar la comunicación de Simulink™ con el Simulador de tiempo real y este a su vez con el PLC S7-1200 (Hardware In the Loop); mediante bloques de comunicación existentes en la biblioteca RT-LAB.
- Diseñar una base de datos históricos, utilizando SQL, para que de esta manera se pueda analizar diferentes disturbios y fallas en un Sistema de Generación Eléctrica.
- Implementar un Sistema SCADA, utilizando LabVIEW con protocolo de comunicación OPC UA e integrando todos los componentes de simulaciones; para que de esta manera sean entregados para realizaciones de prácticas en el curso de SCADA dictado por la carrera Ingeniería en Electricidad.

## 1.4 Propuesta

El propósito del presente proyecto es de Simular un Sistema de Generación, utilizar y adecuar simulaciones de controladores de generadores existentes, implementar funciones de protecciones principales para cada máquina eléctrica y otras simulaciones que permitan analizar los principales componentes de un Sistema de Generación Eléctrica. Todas estas simulaciones se realizan con ayuda del software Matlab-Simulink™, una vez que se tiene este modelo funcionando de manera Offline, se procede a adecuar dicho modelo de tal manera que el Simulador en tiempo real Opal-RT, pueda cargarlo y simularlo.

Teniendo este modelo cargado en el simulador, se procede a implementar interfaces de pantallas SCADA con ayuda del software LabVIEW y se procede a implementar las salidas y entradas que tendrá la simulación con ayuda del protocolo de comunicación OPC UA (OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control Unified Architecture) el cual se encarga de comunicar la simulación cargada en el simulador en tiempo real con LabVIEW. Estos datos que se muestran en la interfaz de LabVIEW se pueden guardar en una base de datos, que con ayuda del Software SQL ayudan a tener un registro de lo que pasa en los parámetros que se escojan con mayor importancia y los graba en una base de datos.

Luego viene la parte del HIL (Hardware in the Loop), que para este caso de opta por hacer una parte del control de uno de los Generadores con la ayuda del PLC S7-1200, el cual se conecta con el simulador en tiempo real y por medio de las entradas y salidas analógicas del simulador, se transmiten datos que son procesados por el PLC y regresan nuevamente a la simulación por medio de las entradas y salidas analógicas del PLC; la esquema de conexiones de los diferentes componentes a utilizar se lo indica en la figura 1.2. Una vez realizado el Control y Adquisición de datos se puede analizar el resultado de la simulación, observando oscilografías y parámetros que permiten a un estudiante determinar el estado de funcionamiento del sistema y su comportamiento en tiempo real.



**Figura 1.2 Diagrama de equipos y software a utilizar.**

## 1.5 Marco teórico

En esta sección se muestran los conceptos básicos y principales que se han utilizado para desarrollar el presente proyecto y se provee de referencias bibliográficas para que el lector pueda ahondar en algún tema de interés específico.

### 1.5.1 Smart Grid

Una red inteligente es aquella en la cual varios circuitos se pueden comunicar entre ellos y es capaz de vigilar diferentes parámetros, en este tipo de red se puede monitorear, medir el comportamiento eléctrico de cada equipo que se tenga conectado a la infraestructura de la red. Para que las redes inteligentes sean eficientes es necesario que se incorporen sistemas informáticos automatizados los cuales son importantes a la hora de responder frente a perturbaciones en la producción de la energía. [3]

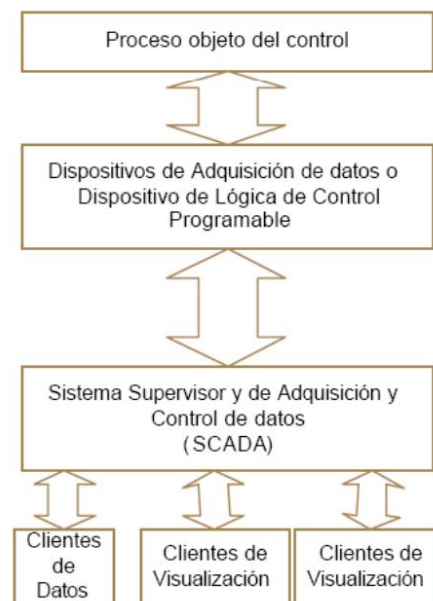
### 1.5.2 Generación Distribuida

Se define como Generación Distribuida a tecnologías de generación pequeña es decir a una escala menor que suministran electricidad a puntos más cercanos al consumidor final que la generación centralizada y se puede conectar directamente a la red de distribución o al consumidor. Si se consideran rangos de potencia se puede clasificar la generación en micro-generación a las generadoras de potencia inferior a 5 KW, mini-

generación entre 5 KW y 5 MW, y generación de media escala cuando la potencia este entre 5-50 MW y gran escala para sistemas cuya potencia esté entre 50-100 MW. [4]

### 1.5.3 Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA se implementaron con el objetivo de satisfacer las necesidades de un sistema de control enfocado, no solo en procesos industriales sino en los diferentes sectores eléctricos como generación, transmisión o distribución que se ocupan áreas geográficas extensas. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), se refiere como lo dice sus siglas a un sistema de adquisición de datos y control supervisor, el cual permite el supervisar un proceso a ser realizado mediante diversos dispositivos entre ellos se tiene la estación central que hace el papel de Máster (Unidad Maestra, MTU) y las unidades Remotas (RTUs) las cuales ejecutan el control o adquieren de datos desde/hacia el campo como se puede apreciar en la figura 1.3. [5]



**Figura 1.3 Constitución de un SCADA. [5]**

### 1.5.4 Simulador en tiempo real OPAL-RT

Para el presente proyecto se utilizará el Simulador en tiempo Real OPAL-RT (ver figura 1.4), el cual se diseñó para poder validar y desarrollar tanto como protecciones, controladores y relés que se asocian a sistemas grandes y extensos de redes eléctricas. De manera paralela permite simular distintos modelos de sistemas de potencia en tiempo real y poder conectar los distintos equipos de control que se deseen verificar. [6]

Es una metodología que se denomina Hardware in the Loop, la cual se ve en la necesidad de utilizar para implementarla en el laboratorio, lo que se desea realizar de manera física en una red real. Al hacer estas simulaciones en tiempo real permite reducir costos, tiempo y riesgos debido a las detecciones tempranas de posibles errores en el desarrollo de proyectos en un sistema de potencia. [6]

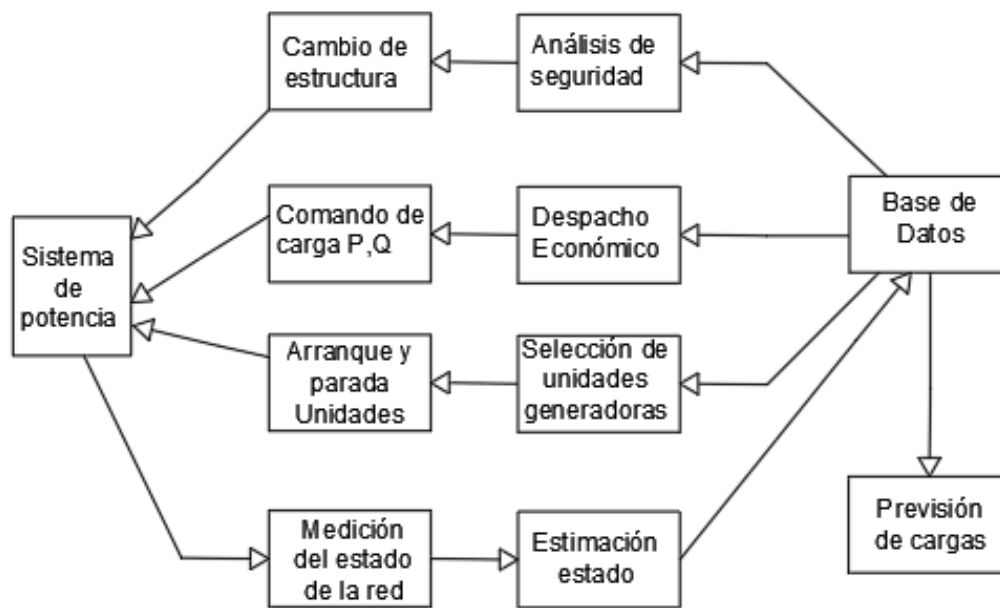


**Figura 1.4 Simulador en tiempo real OPAL-RT. [7]**

### **1.5.5 Control de Potencia y Frecuencia**

La frecuencia de una onda de voltaje en estado estable debe permanecer dentro de los límites establecidos para que el suministro de la energía eléctrica esté en condiciones de una calidad de energía aceptable, si la frecuencia se pasa de los límites establecidos puede ocasionar daños en los equipos industriales o residenciales debido al mal funcionamiento de estos, un ejemplo claro de lo que se realiza en un control de frecuencia se encuentra en la figura 1.5. [8]

El control de frecuencia se lo realiza en cada generador por separado y se tiene en cuenta las interacciones con los demás generadores del sistema; la ejecución del control se da en varios intervalos de tiempo que pueden variar desde segundos a minutos. [9]



**Figura 1.5 Funciones de un control de sistemas de potencia. [9]**

### 1.5.6 Regulación primaria, secundaria y terciaria

Como la frecuencia está ligada al balance de potencia activa, las variables a ser analizadas son la frecuencia del sistema y los flujos de potencia por las diferentes líneas, una ayuda que el sistema tiene para controlar estas variable son las potencias entrantes a los generadores; cuando el sistema se encuentra en régimen permanente la frecuencia es la misma en todos los nodos, si se estudia el control frecuencia-potencia, se asume que las desviaciones de frecuencia son pequeñas por lo tanto la frecuencia es la mismas en todos los nodos del sistema. [10]

Se debe tener en cuenta otros requerimientos a parte de la frecuencia en cada planta, es decir responsabilidad a compromisos adoptados a funcionamiento de mercados eléctricos. Estos compromisos se refieren tanto a la producción de cada planta como el intercambio de potencia entre áreas. Debido a la localización geográfica estas se dividen en áreas interconectadas para facilitar la administración técnica y económica. Cada transacción de energía está programada con anticipación y cada área debe disponer de reservas de energía para combatir ante posibles perturbaciones que se produzcan en el sistema. [10]

El control de frecuencia debe conseguir:

- Equilibrio entre generación y demanda
- Mantener la frecuencia de referencia del sistema

- Cumplan acuerdos de intercambio de energía inter-áreas
- Mantener suficiente energía de reserva

Para cumplir con los puntos anteriormente mencionados, el control frecuencia- potencia se organiza en tres diferentes niveles: primario, secundario y terciario. Cada nivel opera en un intervalo de tiempo a la vez que se tiene diversas variables provenientes de una parte del sistema. [10]

- El control primario es el más rápido entre los tres, tiene un intervalo de tiempo de 2-20 segundos. Actúa solo en la planta en donde se encuentra el generador síncrono, atendiendo la velocidad de giro del eje. Esta rapidez está limitada por la inercia del generador.
- El control secundario tiene un intervalo de tiempo de 20 segundos a 2 minutos. Actúa en el área de control atendiendo la frecuencia y el intercambio de potencia de áreas vecinas.
- El control terciario opera en el intervalo mayor a 10 minutos. Actúa en el sistema eléctrico en el ámbito interáreas, buscando reparto de cargas optimizado asegurando suficientes reservas de energía.

En la figura 1.6 se muestra el diagrama de bloques del modelo matemático para una regulación primaria y secundaria de velocidad de un generador aislado y en la figura 1.7 se presenta el diagrama de bloques para una regulación de velocidad con todos los niveles de control para un generador conectado a la red.

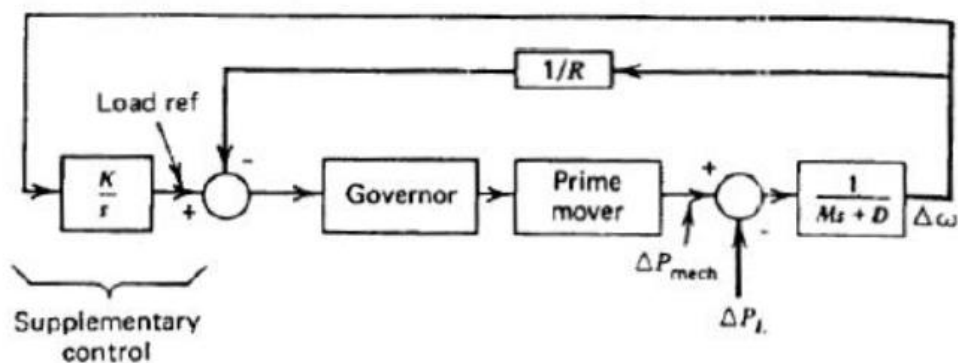


Figura 1.6 Regulación primaria y secundaria en un generador aislado. [10]

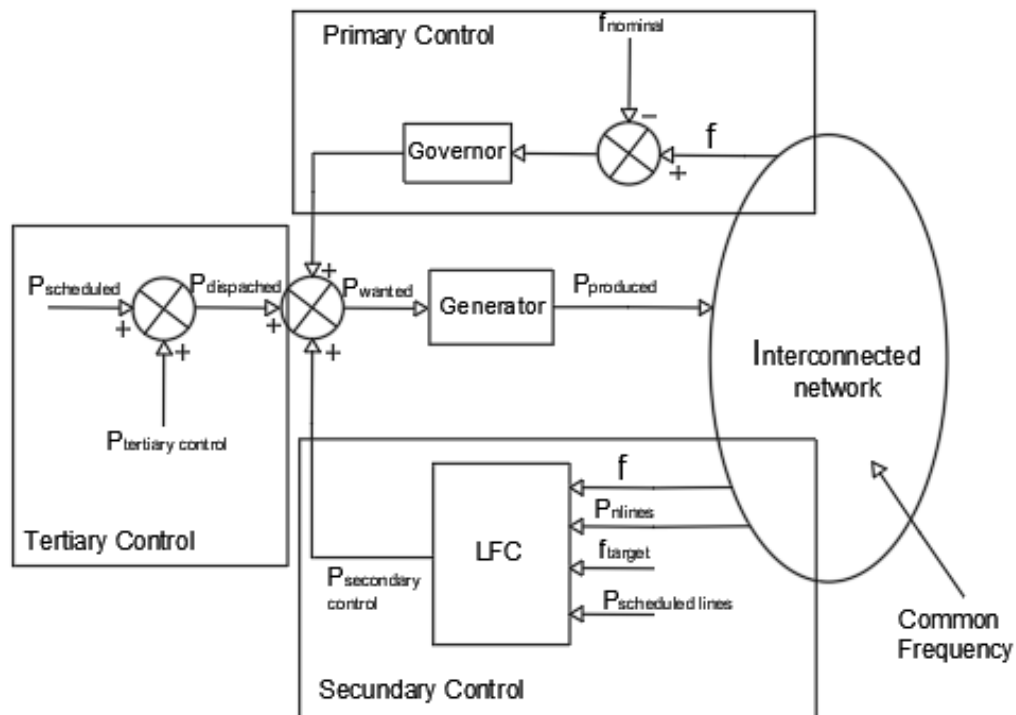


Figura 1.7 Regulación primaria, secundaria y terciaria. [10]

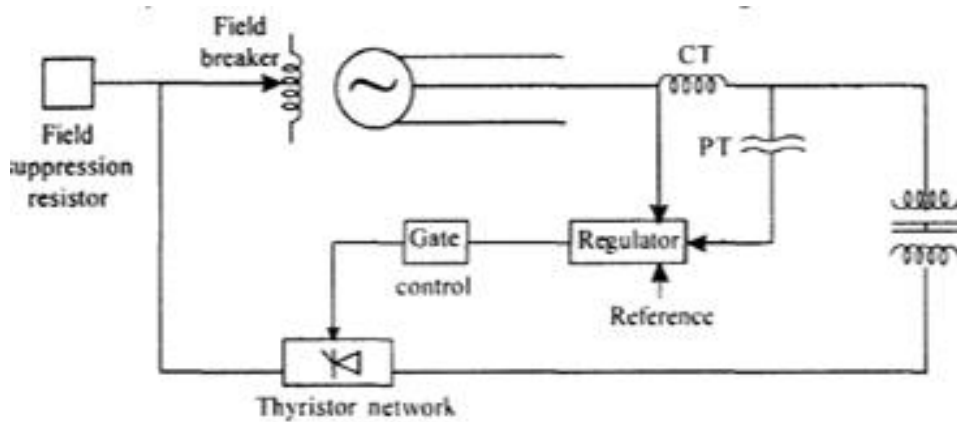
### 1.5.7 Sistemas de excitación

Las funciones del excitador incluyen el control del voltaje y de la potencia reactiva además de mejorar la estabilidad del sistema, estas funciones se realizan mediante la inyección de corriente directa al devanado de campo de un generador sincrónico. Estas funciones permiten que los límites del generador sincrónico estén en los rangos adecuados, estos equipos ayudan a que la magnitud de voltaje se mantenga y controlan el flujo de potencia reactiva en el sistema. [11]

El dispositivo que se utiliza para el control de la potencia reactiva de los generadores es el sistema de control de excitación usando el regulador automático de voltaje AVR (Automatic Voltage Regulator). La principal función del AVR es mantener la magnitud de voltaje en los terminales del generador en un rango establecido, cuando ocurre un incremento en la demanda reactiva de la mano se tiene un decrecimiento en la magnitud de voltaje en los terminales del generador. El proceso de regulación empieza detectando la magnitud de voltaje en uno de los terminales del generador, este voltaje se rectifica para compararlo con la señal de corriente alterna, esta señal se amplifica lo cual nos da una señal de error amplificada que controlará el devanado de campo y aumentará el voltaje en los terminales del excitador como se muestra en la figura 1.8. El incremento de voltaje se ve reflejado en la FEM (Fuerza Electromotriz) generada. La potencia



reactiva se incrementa y se alcanza un equilibrio a la vez que se aumenta el voltaje en los terminales del generador. [11]



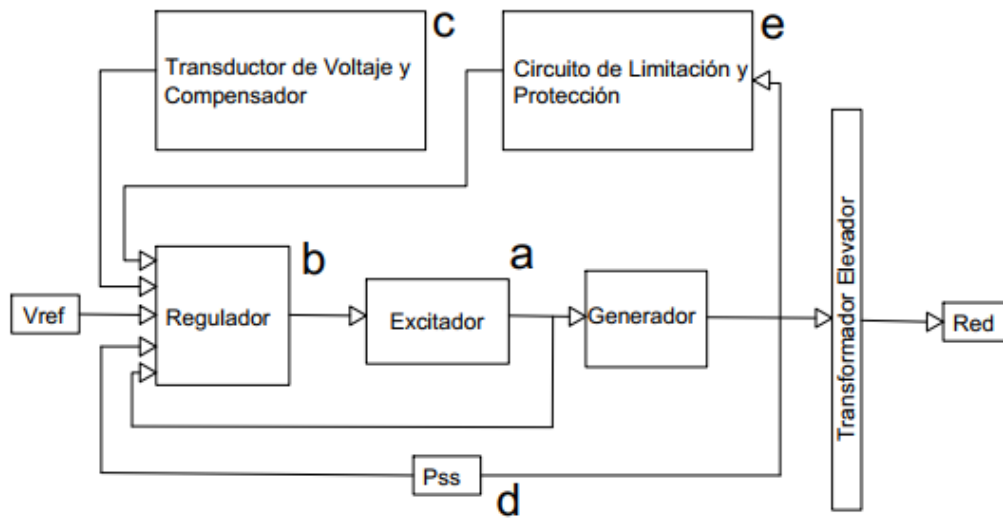
**Figura 1.8 Sistema de Excitación Estático. [11]**

El sistema de excitación debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- Satisfacer funciones de limitación y protección, para prevenir daños en el generador y otros equipos.
- Flexibilidad en la operación.
- Satisfacer fiabilidad y disponibilidad.

Elementos de los sistemas de control de excitación, figura 1.9: [11]

- a. Excitador: inyecta corriente directa al devanado de campo de la maquina sincrónica, constituye la etapa de potencia del sistema de excitación.
- b. Regulador: analiza y amplifica las señales de control de forma apropiada. Regula y estabiliza el sistema de excitación (retroalimentación y compensación atraso-adelanto).
- c. Transductor de voltaje en los terminales y compensador de carga: se encarga de monitorear, rectificar y filtrar el voltaje en los terminales a una corriente directa, además compara con el voltaje de referencia.
- d. Estabilizador de sistemas de potencia (PSS): amortigua las oscilaciones del sistema de potencia.
- e. Circuitos limitadores y de protección: imponen un rango de funciones de control y protección que aseguran límites de capacidad del excitador y del generador síncrono.



**Figura 1.9 Composición de un sistema de excitación de un generador.**

### 1.5.8 Funciones de protección utilizadas

Para la protección tanto del generador como del transformador del presente proyecto, se ha implementado las siguientes protecciones eléctricas, las cuales actúan en condiciones anormales de funcionamiento del sistema, los números indican el tipo de protección que ejercen y se encuentran normados con nomenclatura ANSI. Para el fin de proteger el sistema de generación implementado se ha usado las protecciones siguientes [12]:

- Relé de mínima tensión (ANSI 27): es aquel que actúa cuando el valor de la tensión del equipo a proteger desciende de un valor límite parametrizado.
- Relé instantáneo de sobre intensidad (ANSI 50): es aquel que actúa de manera instantánea cuando se excede de un valor parametrizado de intensidad de corriente.
- Interruptor (ANSI 52): es aquel que se usa para abrir o cerrar un circuito eléctrico bajo carga y actúa ante el disparo de las demás protecciones.
- Relé de sobretensión (ANSI 59): es aquel que actúa cuando el valor de la tensión del equipo a proteger asciende de un valor límite parametrizado.
- Relé de frecuencia (ANSI 81): es aquel que actúa cuando el valor de la frecuencia del equipo a proteger asciende o desciende de un valor límite parametrizado.

- Relé de protección diferencial (ANSI 87): es aquel que actúa sobre una diferencia cuantitativa de dos intensidades de corrientes o ángulos de fases, sobre un cierto porcentaje definido por la curva característica del relé.
- Seccionador (ANSI 89): es el que se usa para desconectar un circuito eléctrico, principalmente para aislarlo, y se lo recomienda operar sin carga.

### 1.5.9 OPC Server

El servidor OPC realiza la función de interfaz comunicando datos con uno o más fuentes usando sus protocolos nativos (PLCs, Sistemas de Control Distribuidos DCSs, básculas, Módulos I/O, controladores, etc.), en el otro lado de la comunicación se encuentran los Clientes OPC (SCADA, interfaz Hombre-Máquina HMI, generadores de informes, de gráficos, aplicaciones de cálculo, etc.) tal como indica la figura 1.10. La comunicación OPC es bilateral lo que significa que los clientes pueden escribir y leer en dispositivos a través del servidor OPC.

El Servidor OPC UA está basado en la especificación de arquitectura unificada y permite trabajar con cualquier tipo de datos, la función de los servidores es la de traducir datos de una fuente de datos en un formato OPC que sea compatible con una o más especificaciones OPC. [13]



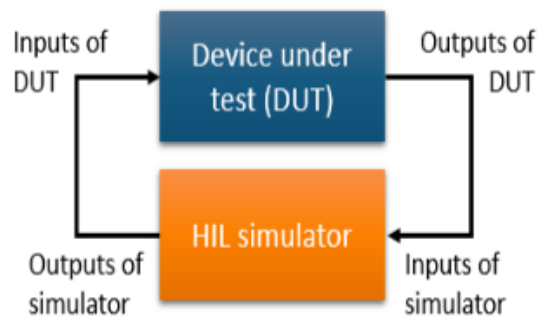
Figura 1.10 Esquema de conexión OPC. [13]

### 1.5.10 SQLite

SQLite es una biblioteca en proceso que implementa un motor de base de datos SQL (Structure Query Language) transaccional autónomo, sin servidor y de cero configuraciones. Es una base de datos, que no está configurada, lo que significa que, al igual que otras bases de datos, no es necesario que la configure en su sistema. El motor de SQLite no es un proceso independiente como otras bases de datos, puede vincularlo estática o dinámicamente según su requisito con su aplicación. SQLite accede a los archivos de almacenamiento directamente. [14]

### 1.5.11 Hardware in the Loop

Hardware In the Loop (HIL) es un tipo de simulación de tiempo real, puede ser usada para probar los diseños de los controladores además este tipo de simulación muestra la respuesta del controlador en tiempo real como una simulación virtual, La simulación de Hardware in the Loop reemplaza la arquitectura física presente por una simulación de esta como se muestra en la figura 1.11. [15]



**Figura 1.11 Prueba de un equipo realizando Hardware In the Loop usando simulación de tiempo real. [16]**

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se desarrolla la metodología que se siguió para la realización del proyecto, es decir la manera en la que se hizo cada parte del proyecto y los procesos para la elaboración del Laboratorio de Simulación en tiempo real, así como los principales componentes que interactúan entre sí.

### 2.1 Modelo de Sistema de Generación

Para el presente proyecto se desarrolla el modelo de la figura 2.1, y se implementa el sistema de Control y Adquisición de Datos de un Sistema de Generación a base de dos Generadores Síncronos conectados cada uno a su respectivo Transformador elevador conectados a una barra en común, la cual también está conectada por medio de una Línea de Transmisión a una barra infinita, con esto se puede suplir a la carga simulada en todo momento, pero cuando esta no se encuentra disponible, los generadores entran en línea.

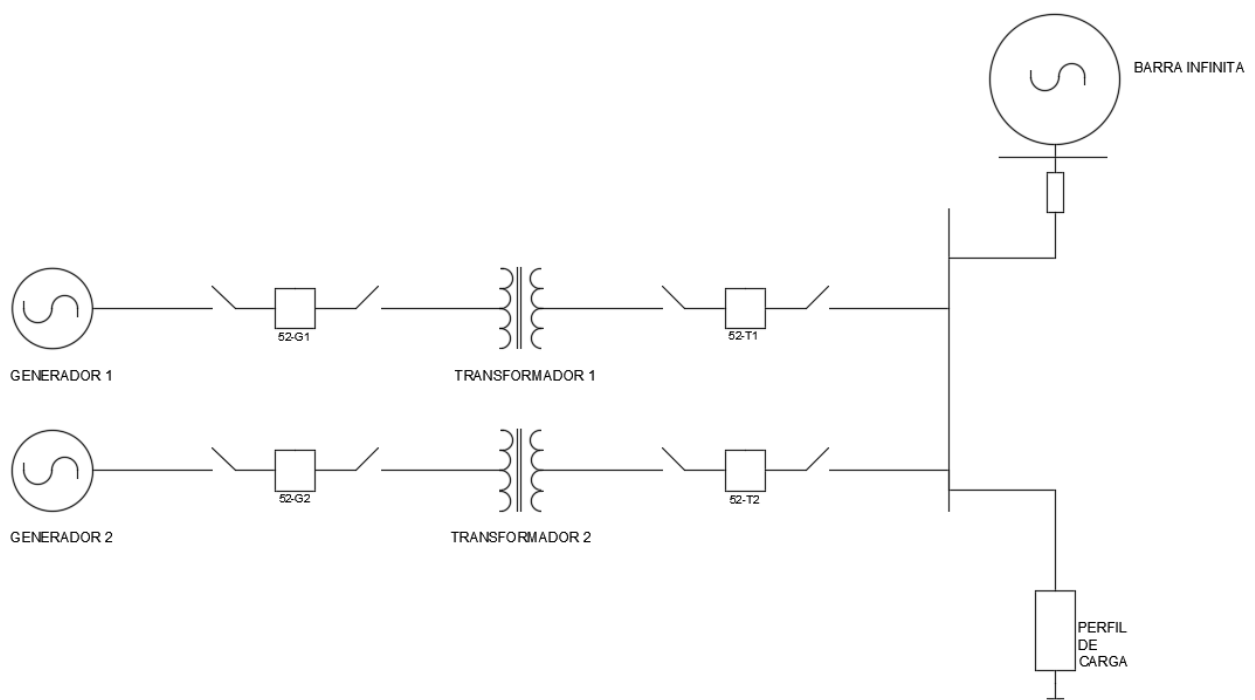
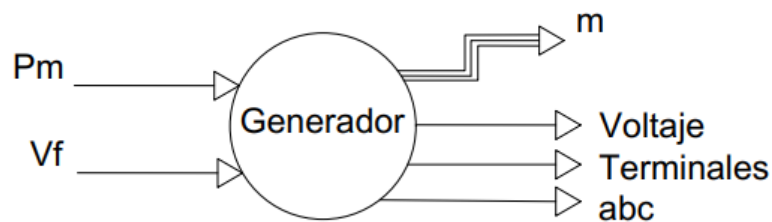


Figura 2.1 Diagrama Unifilar del modelo de Sistema de Generación

## 2.2 Parametrización del generador síncrono

Los parámetros que se tienen en el generador síncrono como entrada son el voltaje de excitación  $V_f$ , el cual proviene del sistema de control de excitación, además como segunda entrada tiene la potencia mecánica  $P_m$ , esta potencia la provee el sistema de control de velocidad junto a la válvula de control de Diesel del generador. Las salidas están representadas por un vector de datos llamado  $m$ , estas salidas son internas además de las tres fases ABC, que suministran la energía eléctrica a la red, figura 2.2.



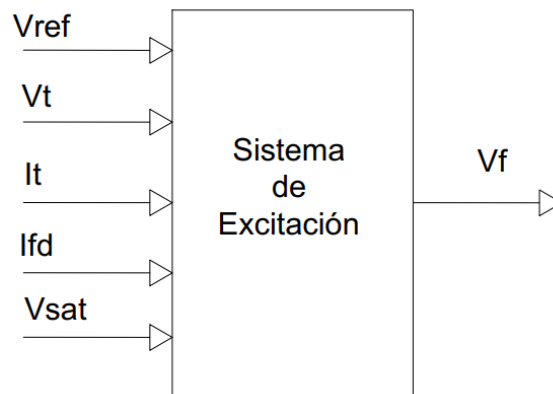
**Figura 2.2 Modelo de generador síncrono en Simulink™**

Con el fin de controlar nuestros generadores, en nuestro trabajo de simulación para el vector  $m$  se tomarán las siguientes variables:

- Velocidad mecánica,  $W_m$
- Voltaje de eje directo,  $V_d$
- Voltaje de eje de cuadratura,  $V_q$
- Corriente de eje directo,  $I_d$
- Corriente de eje de cuadratura,  $I_q$
- Corriente de campo,  $I_{fd}$

## 2.3 Parametrización del sistema de excitación

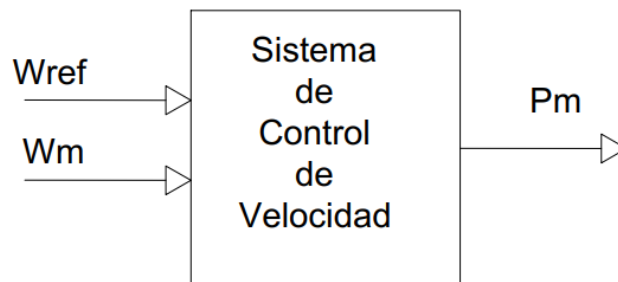
Este sistema controla el voltaje terminal del generador síncrono mediante el voltaje de excitación  $V_f$ , esto lo logra mediante un voltaje de referencia  $V_{ref}$ , el voltaje de salida del estator  $V_t$ , la corriente total del estator  $I_t$ , la corriente de campo  $I_{df}$  y voltaje de estabilización  $V_{sat}$ , estas variables se parametrizan en el excitador genérico para evitar oscilaciones del rotor del generador síncrono mediante el control de excitación, figura 2.3.



**Figura 2.3 Sistema de excitación en Simulink™**

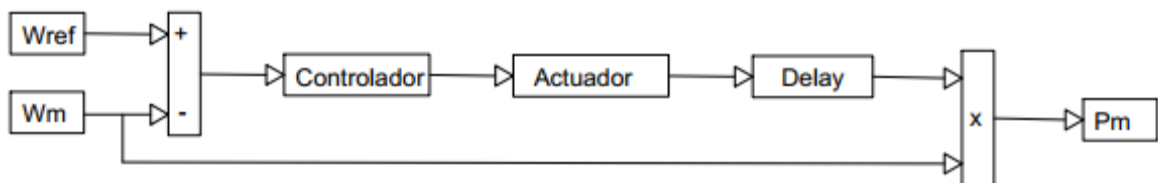
#### 2.4 Parametrización del sistema de control de potencia mecánica

En nuestro sistema utilizamos una turbina de gas junto a una válvula que permite controlar el flujo de combustible Diesel que se provee para el funcionamiento del generador. La potencia mecánica se la puede calcular a partir del error en la velocidad (diferencia entre la velocidad de referencia  $W_{ref}$  y la velocidad de salida del generador  $W_m$ ) o error en la potencia mecánica que da la turbina al generador y la potencia eléctrica a la salida del generador, el diagrama de bloques con las entras y salidas se lo puede observar en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Sistema de control de velocidad en Simulink™**

El esquema interno del control de velocidad se representa por:



**Figura 2.5 Esquema interno del sistema de control de velocidad**

A partir de la diferencia de la señal de referencia junto con la señal de velocidad mecánica de salida del generador se obtiene un error en la velocidad mecánica, esta señal pasa por un controlador que no es más que un par de polos y ceros que ayudan a que el sistema se estabilice, luego pasa por el actuador el cual puede ser equitativo a una válvula que provee el flujo a la turbina por último la señal para por un retardador que se representa como la inercia de la maquina finalmente se transforma por medio de una ganancia a una señal de potencia mecánica que es la salida del control de velocidad del generador.

## 2.5 Diagrama de conexión del sistema de control Voltaje-Frecuencia

El diagrama de control tanto de excitación y frecuencia en Simulink™ para el generador síncrono se lo puede representar como indica la figura 2.6:

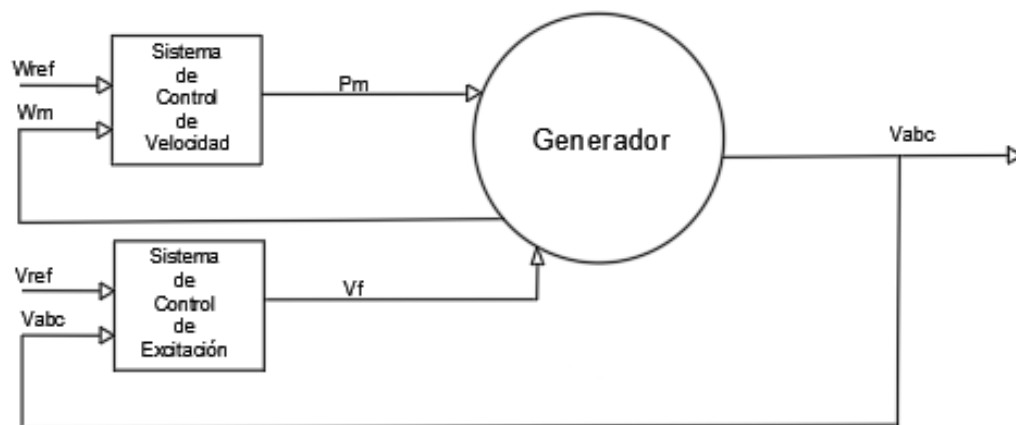


Figura 2.6 Control de voltaje y frecuencia de un generador síncrono

## 2.6 Modelamiento de funciones de protecciones

Para el modelamiento de las funciones de protecciones usadas tanto en los Generadores, así como en los Transformadores, se buscaron dos tipos de relé como indica la figura 2.7 y se implementaron con diagramas de bloques en Matlab-Simulink™ las principales protecciones que permiten el funcionamiento correcto de estas máquinas en rangos permisibles, parametrizando cada una de ellas con valores de parametrización propios los relés usados que se encuentran en sus respectivos manuales. Para la protección de los Generadores se implementaron las funciones de protecciones: ANSI 81, 50, 27, 59, 32; y para la protección de los Transformadores se implementaron las funciones de protecciones: ANSI 81, 50, 27, 59, 87.



## **SEL** SEL-787 Transformer Protection Relay



## **SEL-300G** Multifunction Generator Relay



Figura 2.7 Relé SEL-787 y SEL-300G

### 2.7 Modelamiento de Perfil de Carga simulado

Se modela un perfil de carga para poder analizar el comportamiento de los controladores del sistema ante variaciones de potencia requerida por los consumidores finales, el perfil simulado tiene la forma de la figura que se muestra a continuación en la figura 2.8.

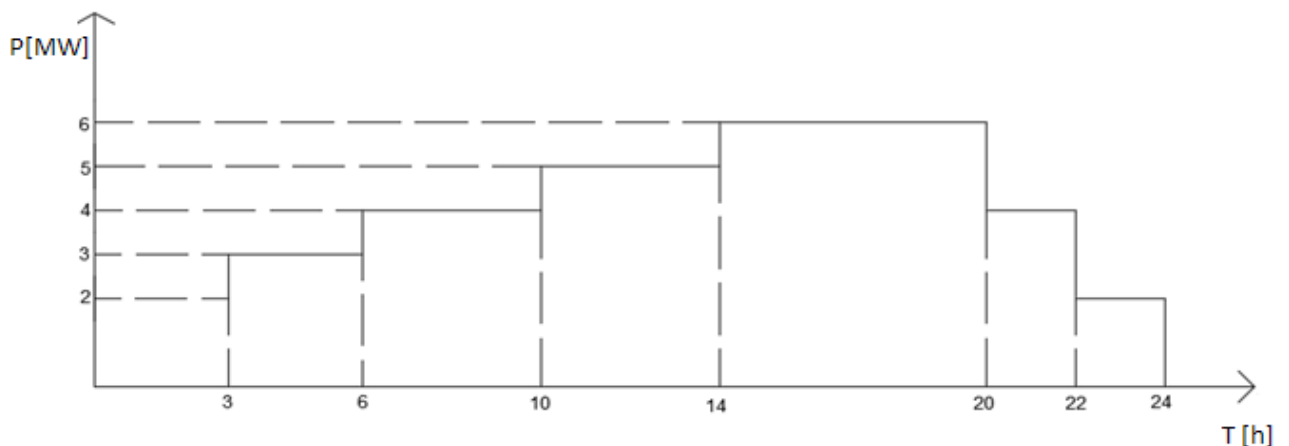


Figura 2.8 Perfil de carga implementado

### 2.8 Diseño del Sistema Modelado en Simulink™ para simulación en tiempo real

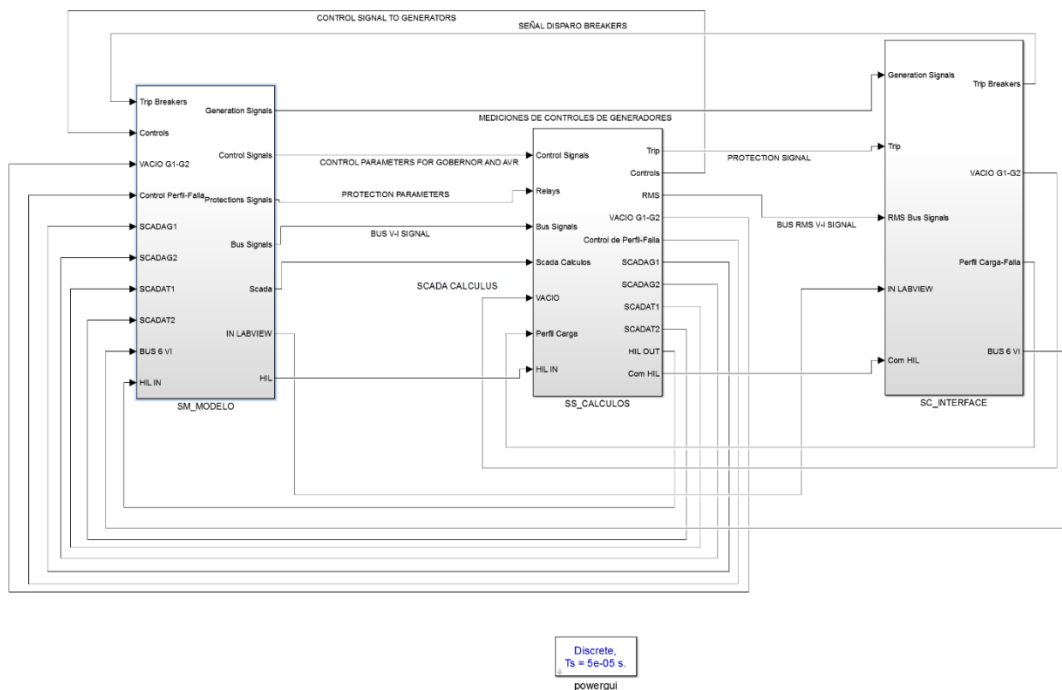
Para realizar el diseño preliminar para que el sistema compile y simule en tiempo real con el software del Simulador de Tiempo Real (RT-LAB), este debe ser implementado de acuerdo con lo establecido en la guía de usuario de RT-LAB. [17]

Para llevar a cabo la simulación en tiempo real es necesario separar el sistema modelado en Simulink™ en diferentes subsistemas. Esto se realiza porque el software RT-LAB solo distingue subsistemas en la capa superior del modelo para la respectiva compilación. Se debe asociar de tal manera que el modelo pueda ser seccionado en los tres tipos de subsistemas que el software RT-LAB reconoce.

Los sistemas anteriormente mencionados pueden ser clasificados en dos tipos, primero están los sistemas de cómputo el cual se encarga de incluir todos los elementos del sistema, operaciones matemáticas, generadores de señales, modelos físicos y bloques de entrada y salida de datos, bloques de entradas y salidas analógicas para Hardware in the Loop. Si el modelo se lo requiere como subsistema de computo debe de ser nombrado como *SM\_anyName*, el mismo subsistema usará un núcleo del CPU. Si se requieren más subsistemas deben ser nombrados como *SS\_anyName*, cabe recalcar que cada uno de estos subsistemas ocuparan un núcleo del CPU.

El otro subsistema se lo define como el subsistema de interfaz, este subsistema admite al usuario la interacción con los subsistemas de cómputo y mantiene la comunicación con los demás núcleos del Simulador de Tiempo Real. Este subsistema se lo debe nombrar como *SC\_anyName*, ocupa un núcleo en el CPU y se pueden colocar bloques de Simulink™ tales como: *scopes*, *displays*, *funciones de matlab*, *constants* y *switches*.

En la figura 2.9 se presenta la capa principal del modelo implementado en Simulink™. Se puede apreciar el subsistema de cómputo principal *SM\_MODELO*, un subsistema de cálculo adicional nombrado *SS\_CALCULOS* y el subsistema de interfaz nombrado *SC\_INTERFACE*, además del bloque “powergui” que es de suma importancia para la simulación.

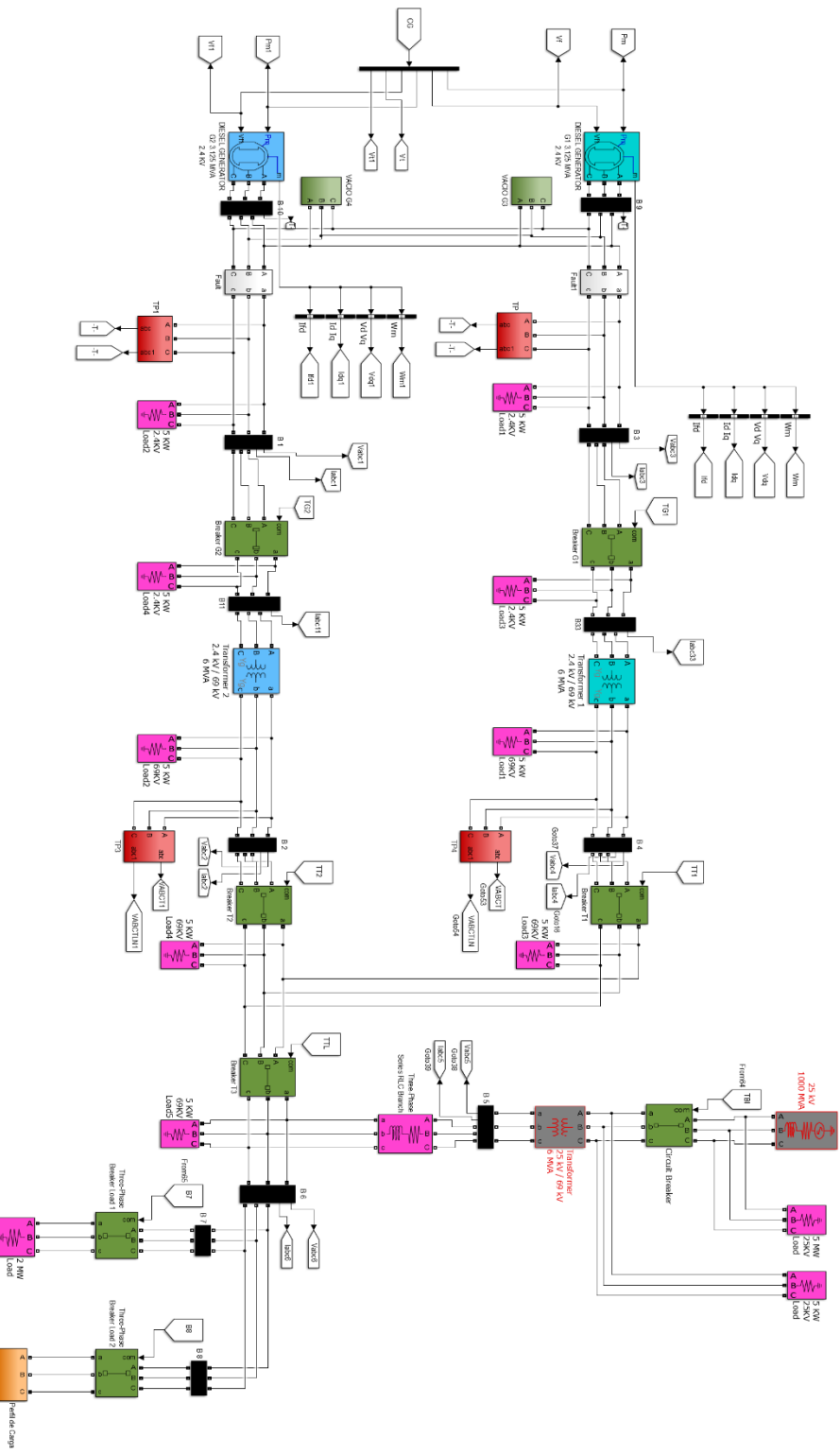


**Figura 2.9 Capa Principal del modelo construido en Simulink™**

El subsistema SM\_MODELO agrupa los bloques de los elementos de un sistema de generación tales como generadores, transformadores, barras, fallas, disyuntores, Transformadores de Potencial, modelo de línea de transmisión, una fuente de voltaje simulada como barra infinita, cargas resistivas, además de los bloques de entradas y salidas analógicas para el control por Hardware In the Loop como indica la figura 2.10.

Se utilizaron dos Generadores síncronos de polos salientes, estos generadores tienen una Potencia nominal de 3.125 MVA, voltaje nominal de 2.4 KV, frecuencia nominal de 60 Hz y 2 pares de polos, están conectados a su respectivo Transformador elevador de 2.4/69 kV conexión Yg-Yg y potencia nominal de 6 MVA, luego se interconectan a una barra infinita que posee su impedancia de línea y en la misma barra una carga dinámica (perfil de carga) que varía en el tiempo.

En el esquema de red que se planteó se pueden observar que existen cargas asociadas a cada disyuntor, esto se da debido a que cuando se ejecuta la simulación estos disyuntores actúan como fuentes de corriente y Simulink™ pide al usuario conectarle una carga paralela. Para cada disyuntor se muestran las señales de entrada que provienen de los relés de protección, así como las entradas de los parámetros de control para cada



**Figura 2.10 Esquema de red con dos generadores conectados junto a la barra infinita a cargas pasivas y dinámicas**

generador. Se tienen barras de medición para cada máquina y para la carga estas sirven para monitoreo del correcto funcionamiento del sistema. También el sistema posee bloques de transformadores de potencial, los cuales nos sirven para la medición de los voltajes de línea a neutro de cada una de las máquinas y estas lecturas nos ayudan a la parametrización de las funciones de protección asociadas, así como para el cálculo de las potencias de carga de cada máquina. Contiene unos bloques de falla para cada uno de los generadores, los cuales consisten en una falla monofásica de línea a tierra de la fase “C”. Esta falla permite mandar el voltaje de dicha línea a cero y con esto el aumento de su corriente, para lo cual dispararán las funciones de protecciones asociadas

En este subsistema, también se encuentran los bloques “OpComm”, “OpCtrl”, “AnalogOut”, “AnalogIn”, “OpInput” y “OpOutput”. El bloque OpComm es de vital importancia para ser usado por el simulador de tiempo real para realizar la comunicación entre los subsistemas de la capa principal como lo muestra en las figuras 2.11 y 2.12.

- *El bloque OpComm* debe ir a la entrada de cada subsistema, en nuestro diseño hemos empleado dos bloques OpComm uno que comunica entre subsistemas de cómputo y el otro que comunica con el subsistema de interfaz. [18]
- *El bloque OpCtrl* es el que controla la programación en una de las tarjetas OPAL-RT, inicialización y selección de modo de sincronización de hardware de la tarjeta. Maneja el enlace Send/Recv y solo debe haber un bloque OpCtrl para cada tarjeta usada, la tarjeta que se usa es la VC707. [19]
- *El bloque AnalogIn* adquiere los valores de voltaje DC en los canales de las entradas analógicas de una tarjeta física E/S, estas entradas analógicas permiten un rango de voltaje el cual está en +-16 VDC, el bloque AnalogIn permite escoger cuales entradas son la que se desea usar a la salida del OPAL-RT separando por grupos-módulos-subsecciones para la ubicación de los puertos de entrada. [19]
- *El bloque AnalogOut* transfiere de una tarjeta física de E/S valores de voltajes que serán aplicados a los canales de las salidas analógicas del OPAL-RT, estas entradas entregan voltaje en el rango de +-16 VDC. Este bloque también permite escoger la salida de voltaje en el OPAL-RT separando por grupos-módulos-subsecciones para la ubicación de los puertos de salidas. [19]
- *EL bloque OpOutput y el bloque OpInput* son los encargados de enviar y recibir datos entre el software RT-Lab y el servidor. El Simulador de Tiempo Real posee de manera integrada el servidor OPC UA, por lo cual LabVIEW actuará como

cliente. Los bloques se deben parametrizar con el nombre, que es usado dentro del archivo de configuración del servidor para el reconocimiento del tipo de dato, dentro del indicador. [18]

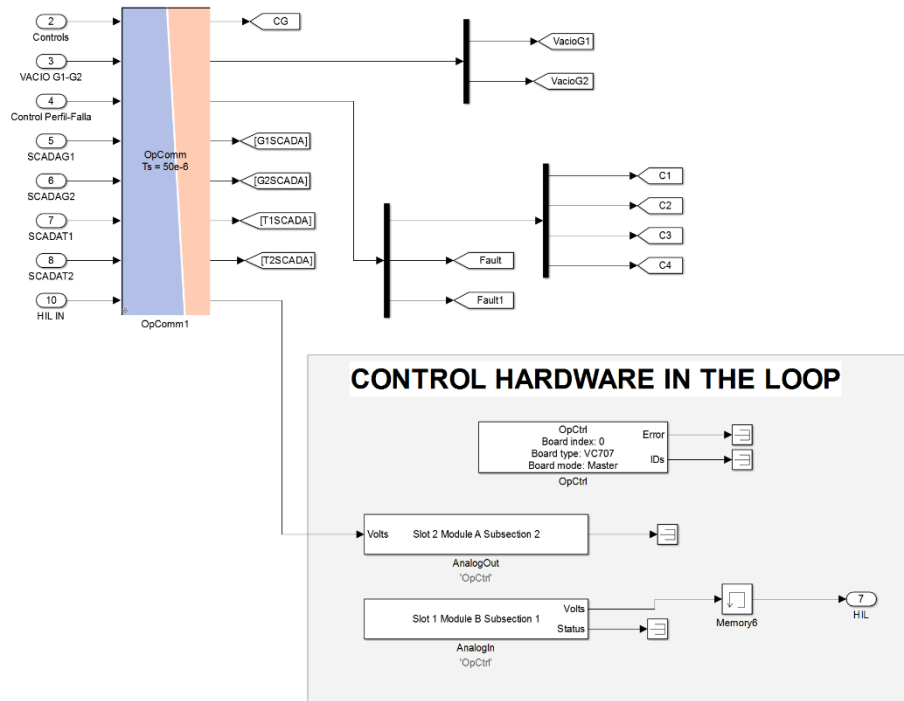


Figura 2.11 Bloques OpComm, OpCtrl, AnalogIn, AnalogOut usados para la simulación en Tiempo Real.

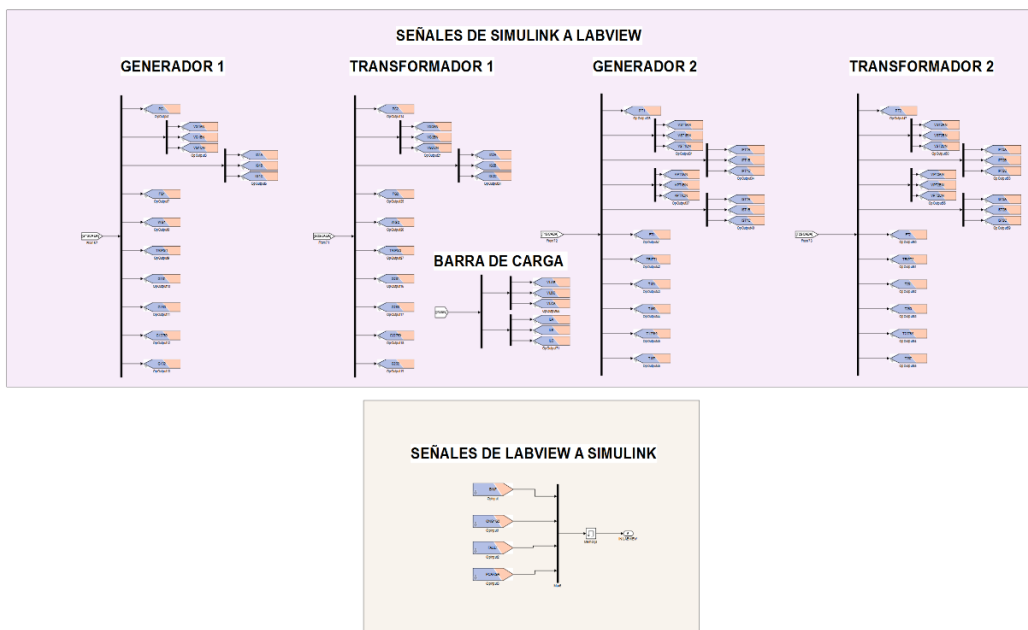


Figura 2.12 OpInput y Opoutput usados para la simulación en Tiempo Real.

En el subsistema SS\_CALCULOS, que se muestra en la figura 2.14, contiene el gobernador de diésel y el sistema de excitación para cada uno de los generadores, modelos de relé de protección con 5 funciones de protección para los generadores y transformadores, que mandan señales de apertura a su disyuntor asociado cuando ocurre algún evento de falla tal como indica la figura 2.13. Este subsistema también posee dos bloques OpComm para la comunicación con el subsistema SM\_MODELO y la comunicación con el subsistema SS\_Interface, tiene las señales de control del perfil de carga, y la conversión de las señales de onda sinusoidales a valores instantáneos o RMS y los cálculos para la presentación de los valores de voltaje, corriente, potencia y señales de disparo en la interfaz en el software LabVIEW.

El último es el subsistema de interfaz SC\_INTERFACE, que se muestra en la figura 2.15, contiene displays, scopes, manual switches y constant que permiten el monitoreo y el control de señales en el sistema de generación dentro del software RT-LAB. Al cargar la simulación el software RT-LAB abre un único subsistema que es el de la interfaz, en este sistema se hace la interacción con el modelo para obtener los resultados de acuerdo con lo que se quiera realizar.

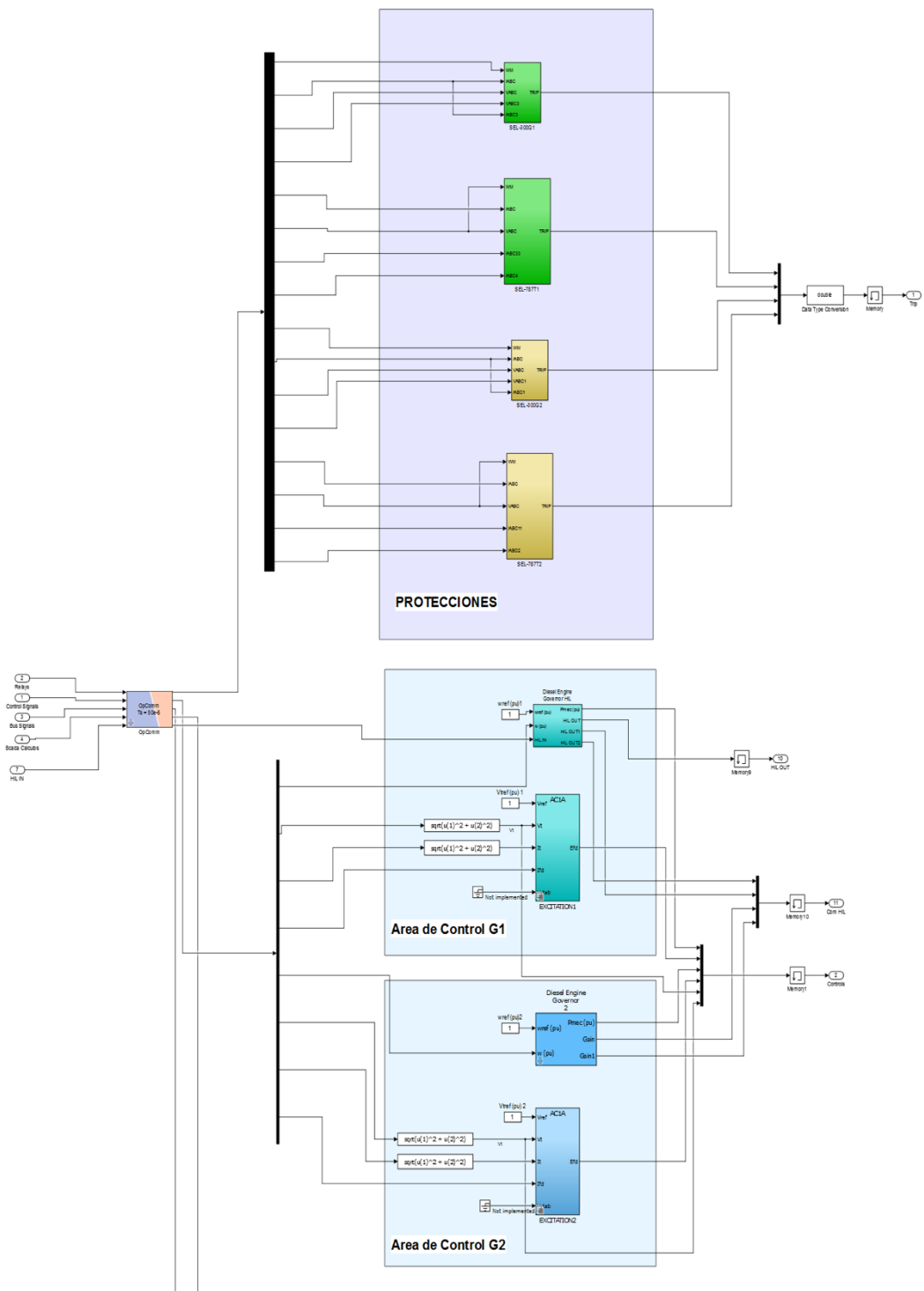
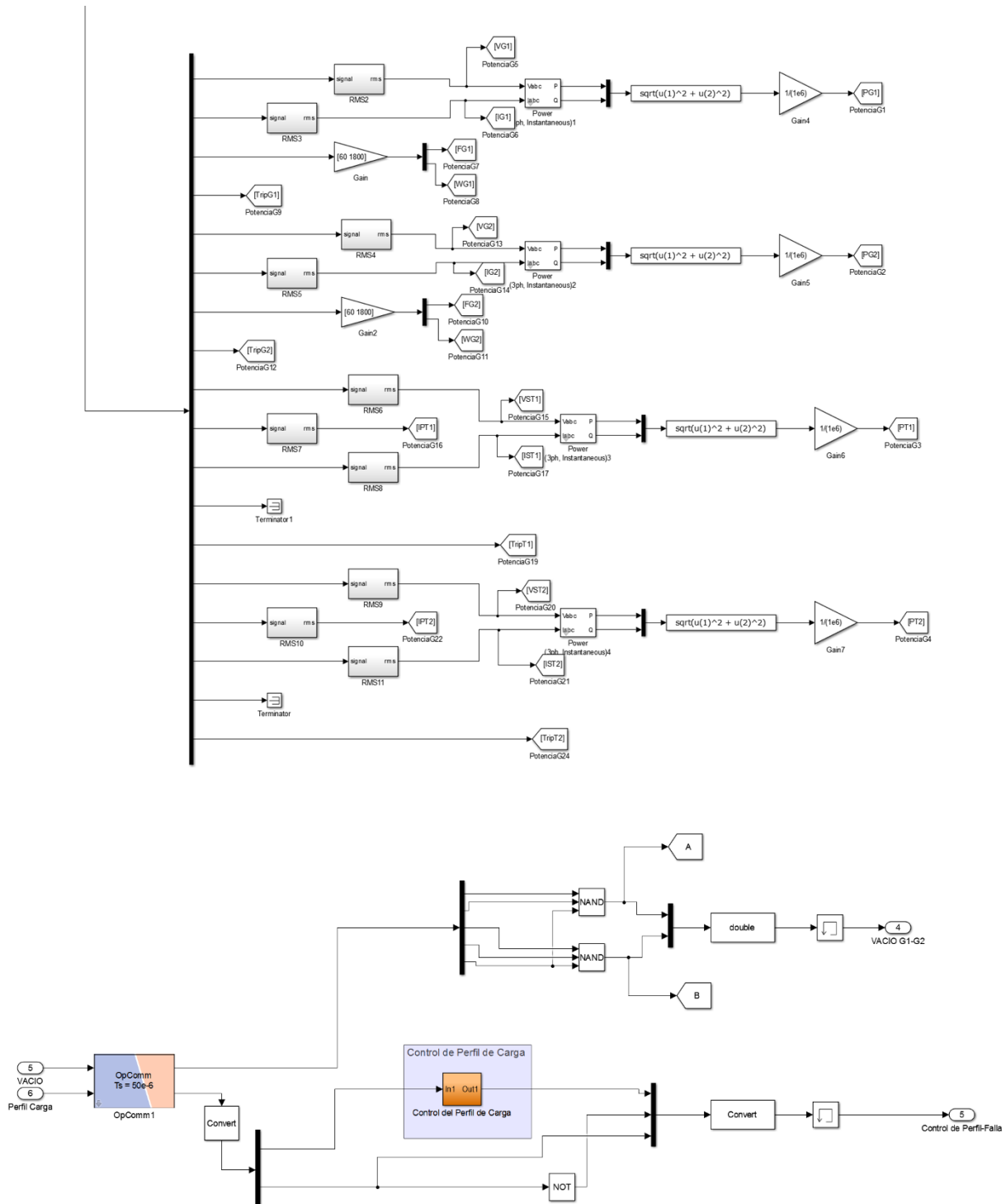


Figura 2.13 Subsistema SS\_CALCULOS bloques de protecciones, controles de excitación y potencia mecánica.





**Figura 2.14 Subsistema SS\_CALCULOS bloques de cálculos de variables para visualización en la Interfaz de LabVIEW, de control de carga variable y señales de disparo de disyuntores.**

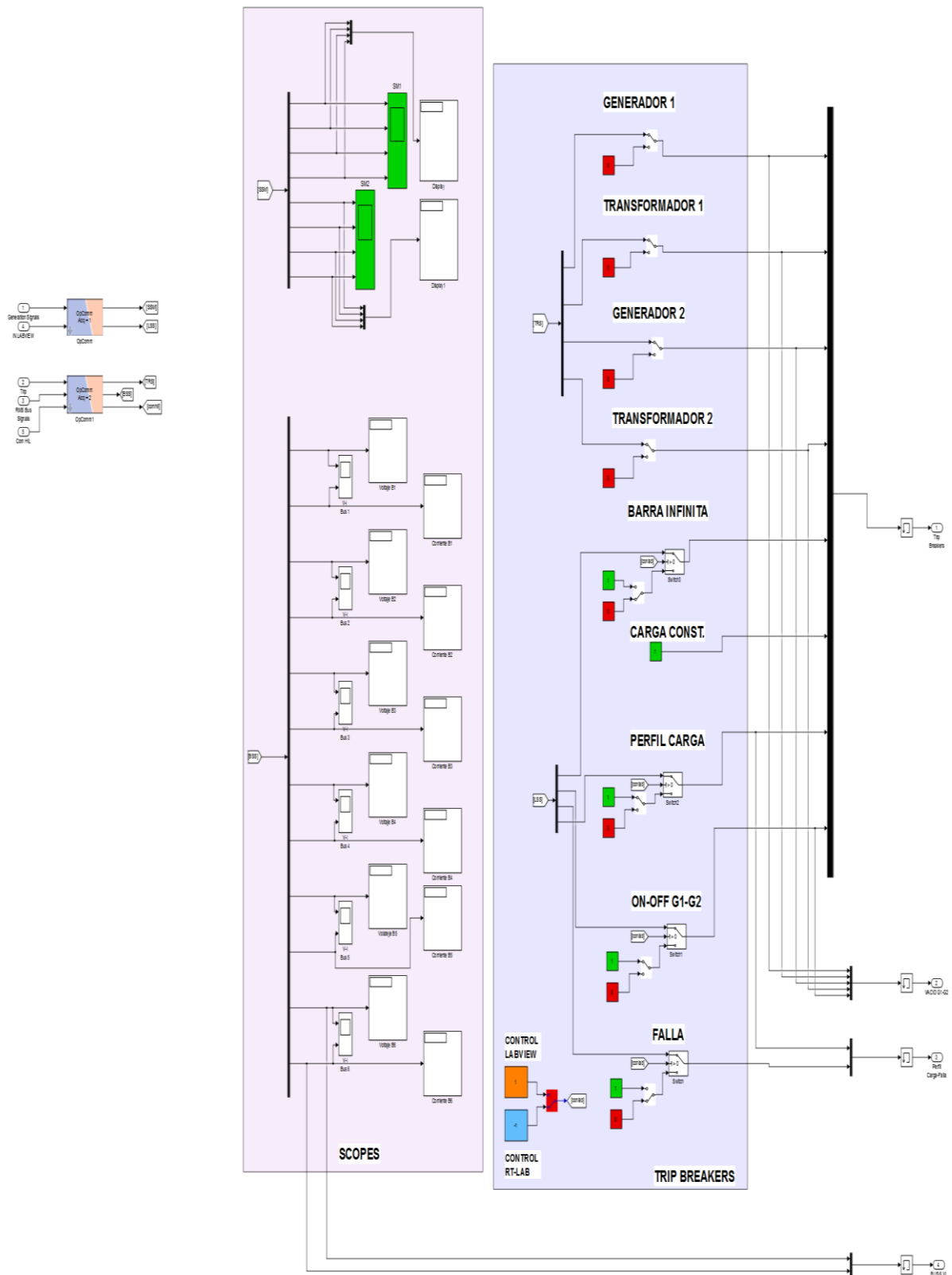


Figura 2.15 Subsistema SC\_Interface.

## 2.9 Diseño del Sistema SCADA

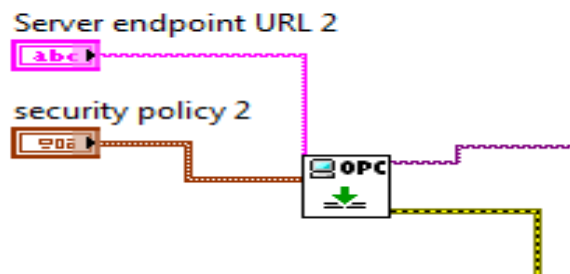
El sistema SCADA implementado en LabVIEW gestiona las mismas funciones que se pueden realizar en la interfaz del software RT-LAB. La diferencia entre las interfaces de los diferentes tipos de software a utilizar es que LabVIEW presenta una interfaz gráfica amigable con el operador, sencilla y ordenada para simplificar el manejo y monitoreo de los parámetros del SCADA.

La comunicación entre el Simulador de Tiempo Real y el software LabVIEW se la realiza por medio del protocolo OPC UA, trabajando con el esquema servidor-cliente. LabVIEW actuará como cliente porque el Simulador de Tiempo Real tiene integrado el servidor OPC UA; lo primero que se debe realizar al momento de querer enviar o recibir datos entre el modelo y el servidor es la configuración de los bloques OpInput/OpOutput, mediante la inserción del nombre de la variable en el indicador, además de la configuración del tipo de dato que se va a enviar o recibir este puede ser *double*, *boolean*, etc.

Cuando se colocan los bloques con su respectiva configuración se procede a elaborar los archivos de configuración con el servidor (*connections.opal* y *OPC-UA\_Server\_cfg.opal*). La configuración de estos archivos se la realiza basándose en la ejemplificación de un archivo propuesto por el software RT-LAB. Este ejemplo se lo encuentra al crear un proyecto en la dirección: *IO/\_Generic\_/OPC-UA\_Server/opc\_ua*.

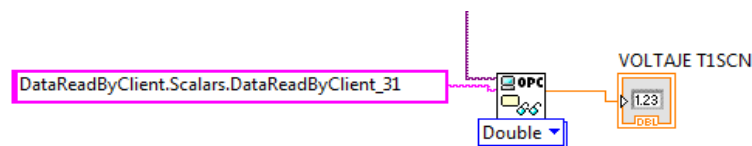
Se describen bloques necesarios para la comunicación OPC entre el modelo y el servidor:

- El bloque *Connect.vi*,, presentado en la figura 2.16, enlaza la comunicación con el servidor OPC UA, posee dos entradas importantes. *Server endpoint URL* es la primera entrada en la cual se escribe la dirección IP del servidor y la segunda entrada crea y valida certificados entre el servidor y el cliente. No usamos ningún certificado, así que se configura el parámetro como *none*. La salida importante es *OPC UA client refnum out* esta Salida es una referencia para los demás bloques del cliente OPC UA.



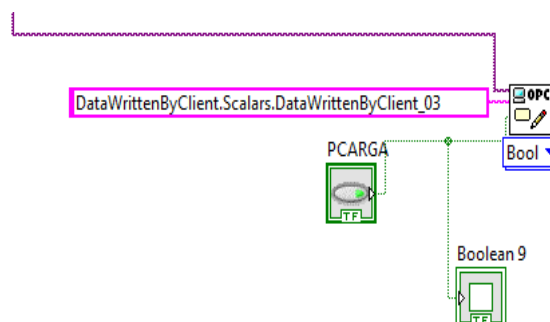
**Figura 2.16 Bloque Connect.vi.**

- El bloque Read.vi, que se presenta en la figura 2.17, lee un valor en un nodo, se tiene que seleccionar el tipo de dato que va a ingresar a este bloque. Además, posee dos entradas la primera es la de la señal de referencia y la segunda es la dirección del nodo del servidor a leer esta dirección se la realiza como “Device.Node.Set Point”.



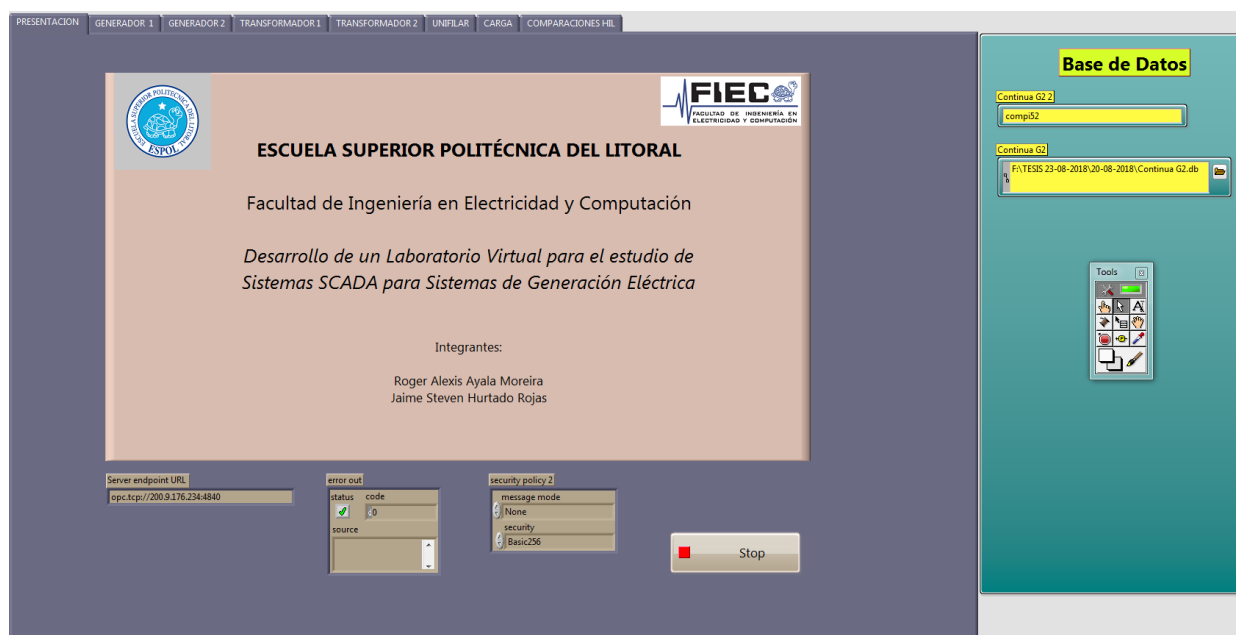
**Figura 2.17 Bloque Read.vi.**

- El bloque Write.vi, que se muestra en la figura 2.18, escribe un valor en un nodo. De la misma forma que el anterior bloque este presenta las dos entradas anteriormente descritas y recibe las mismas señales, también se configura el tipo de dato que se desea escribir.



**Figura 2.18 Bloque Write.vi.**

En la figura 2.19 se muestra la ventana PRESENTACIÓN. En esta ventana se observan los datos generales del proyecto en cuanto al nombre de este y los integrantes con un botón para detener la simulación, en el lado derecho se puede observar la ventana de la base de datos, en la parte inferior se encuentra la dirección del servidor OPC UA seguido por un cuadro donde se le puede dar seguridad al proyecto.



**Figura 2.19 Ventana PRESENTACIÓN del sistema SCADA.**

En la figura 2.20 se muestra la ventana GENERADOR 1. En esta ventana se observan las variables a ser monitoreadas del generador 1 dentro del modelo entre estas variables se presentan la potencia (MVA), Velocidad (RPM), Frecuencia (Hz), Voltajes de línea a neutro (V), Corriente de las diferentes fases (A) e indicadores leds los cuales están asociados a las diferentes protecciones que se implementaron así también como el estado del disyuntor del generador.

En la figura 2.21 se muestra la ventana GENERADOR 2. En esta ventana se observan las variables a ser monitoreadas del generador 2 dentro del modelo entre estas variables se presentan la potencia (MVA), Velocidad (RPM), Frecuencia (Hz), Voltajes de línea a neutro (V), Corriente de las diferentes fases (A) e indicadores leds los cuales están asociados a las diferentes protecciones que se implementaron así también como el estado del disyuntor del generador.



Figura 2.20 Ventana GENERADOR 1 del sistema SCADA.



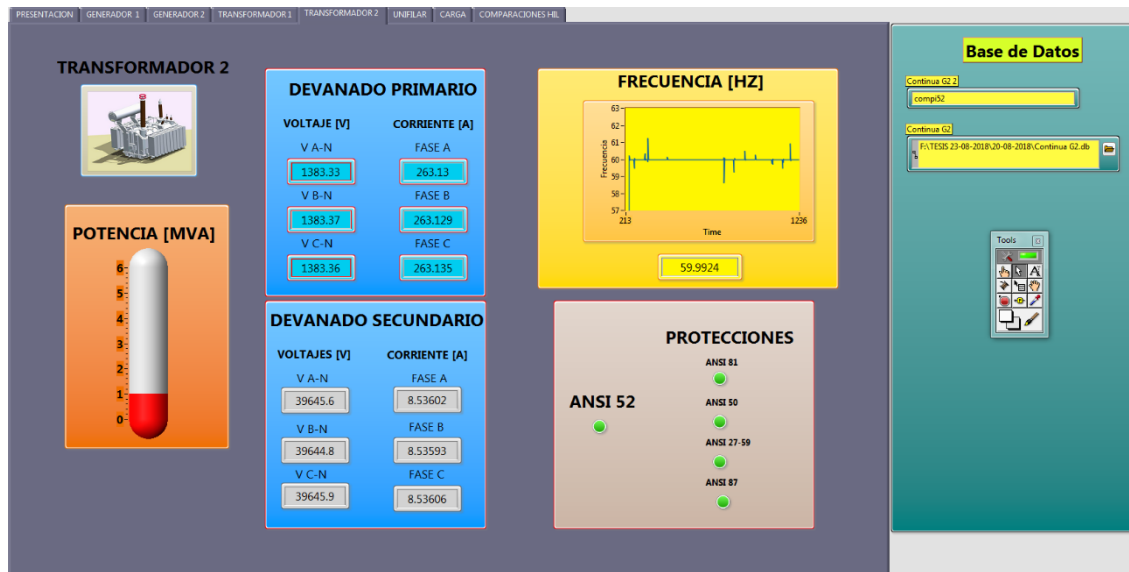
Figura 2.21 Ventana GENERADOR 2 del sistema SCADA.

En la figura 2.22 se muestra la ventana TRANSFORMADOR 1. En esta ventana se observan las variables a ser monitoreadas del Transformador 1 dentro del modelo entre estas variables se presentan la potencia (MVA), Frecuencia (Hz), Voltajes de línea a neutro en el primario y secundario del transformador (V), Corriente de las diferentes fases en el primario y secundario del transformador (A) e indicadores LEDs los cuales están asociados a las diferentes protecciones que se implementaron así también como el estado del disyuntor del transformador.



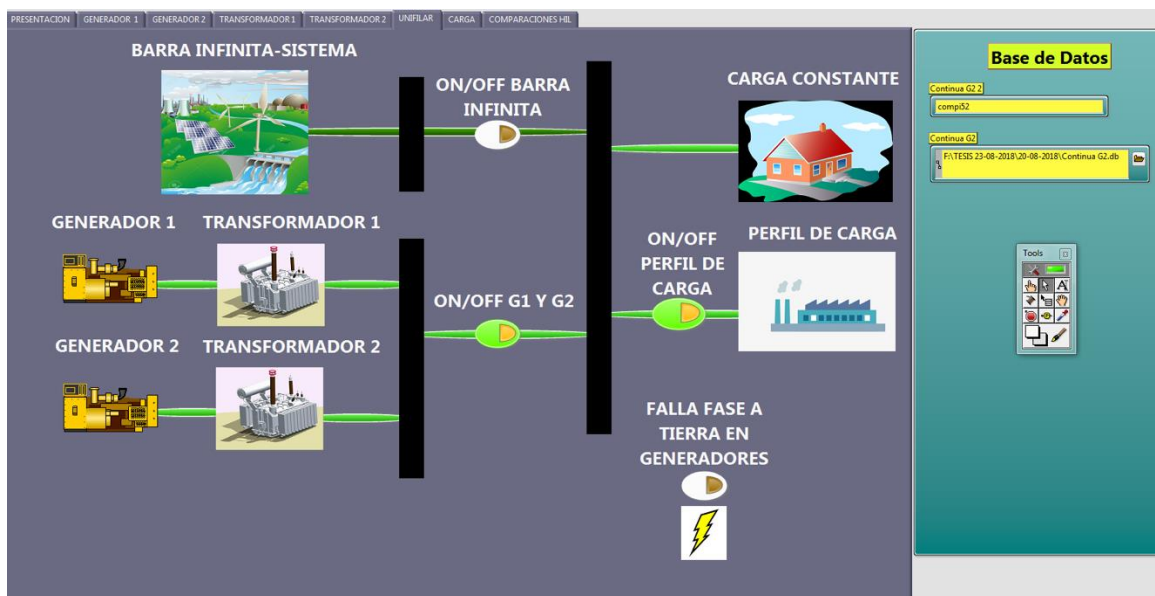
**Figura 2.22 Ventana TRANSFORMADOR 1 del sistema SCADA.**

En la figura 2.23 se muestra la ventana TRANSFORMADOR 2. En esta ventana se observan las variables a ser monitoreadas del Transformador 2 dentro del modelo entre estas variables se presentan la potencia (MVA), Frecuencia (Hz), Voltajes de línea a neutro en el primario y secundario del transformador (V), Corriente de las diferentes fases en el primario y secundario del transformador (A) e indicadores leds los cuales están asociados a las diferentes protecciones que se implementaron así también como el estado del disyuntor del transformador.



**Figura 2.23 Ventana TRANSFORMADOR 2 del sistema SCADA**

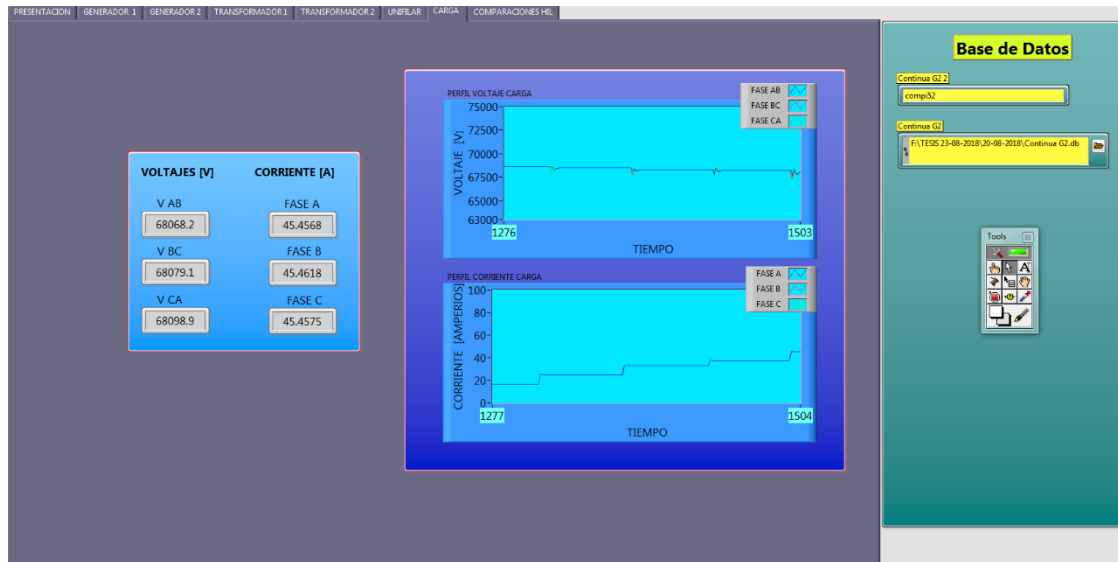
En la figura 2.24 se muestra la ventana UNIFILAR. En esta ventana se observan el diagrama unifilar comprendido de 2 generadores con sus dos transformadores, la barra infinita, carga constante y un perfil de carga, además en esta pestaña se puede abrir o cerrar los disyuntores para la generación de emergencia cuando la barra infinita deja de proporcionar suministro eléctrico, se puede activar y desactivar el perfil de carga y generar una falla monofásica.



**Figura 2.24 Ventana UNIFILAR del sistema SCADA**

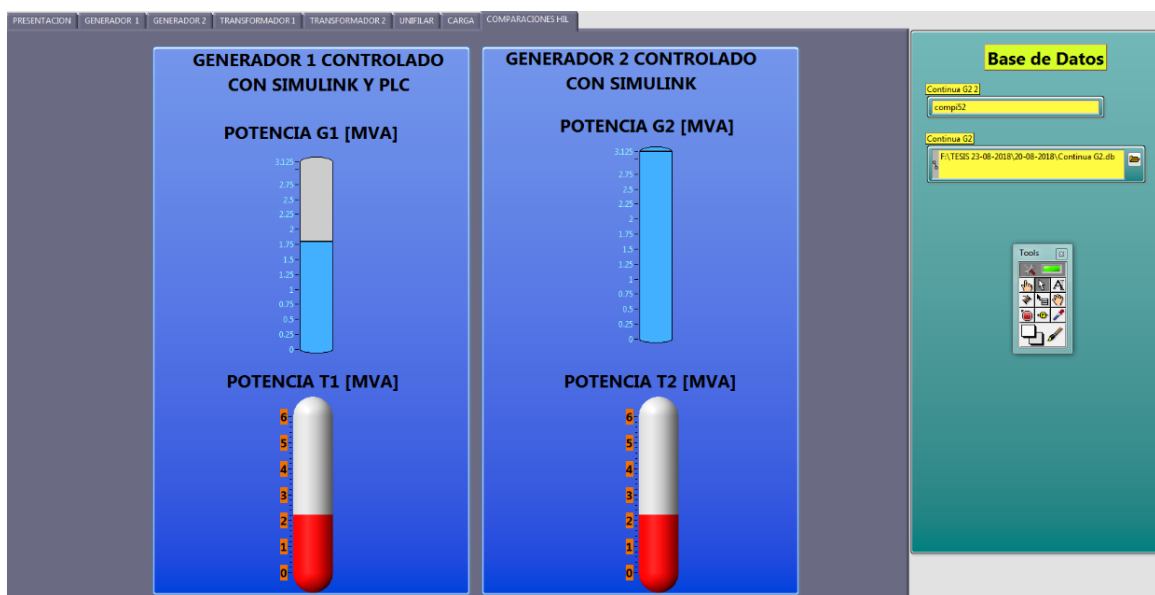


En la figura 2.25 se muestra la ventana CARGA. En esta ventana se observan las variables de voltaje línea a línea (V), corriente en cada fase (A) y un gráfico para monitorear como varia el voltaje y la corriente en el tiempo.



**Figura 2.25 Ventana CARGA del sistema SCADA**

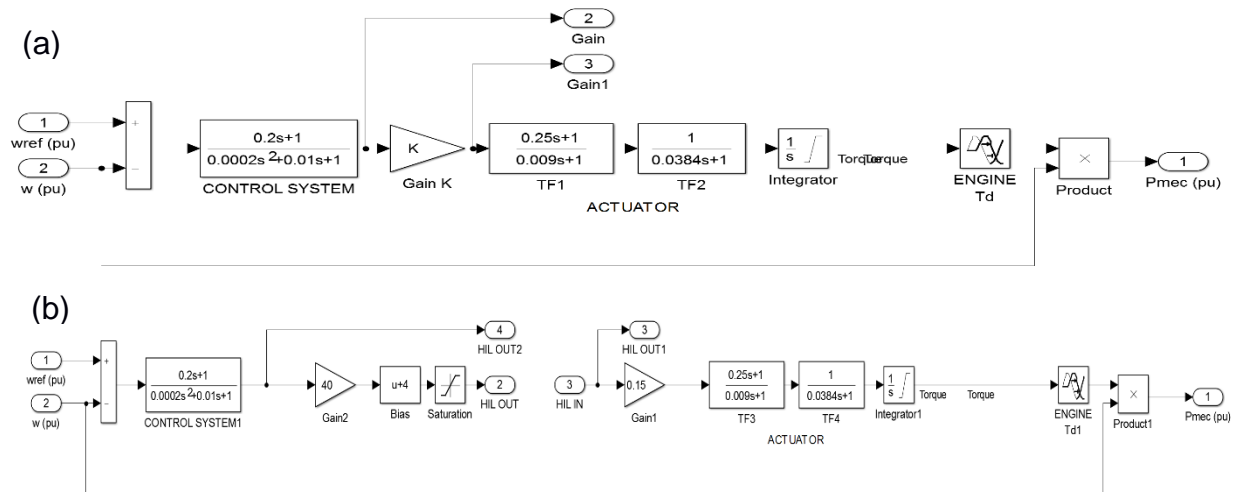
En la figura 2.26 se muestra la ventana COMPARACION HIL. En esta ventana se observan las variables de potencia de los generadores y de los transformadores, se hace la comparación entre el generador que posee un control con Hardware in the Loop y el generador que tiene un control simulado.



**Figura 2.26 Ventana COMPARACIONES HIL del sistema SCADA**

## 2.10 Hardware In the Loop

Se ha escogido el dispositivo PLC S7-1200 para reemplazar una parte del control de potencia mecánica de uno de los generadores. Lo que se reemplaza es la ganancia que está después del controlador en el sistema de control de potencia mecánica del generador o gobernador tal como se muestra en la figura 2.27.

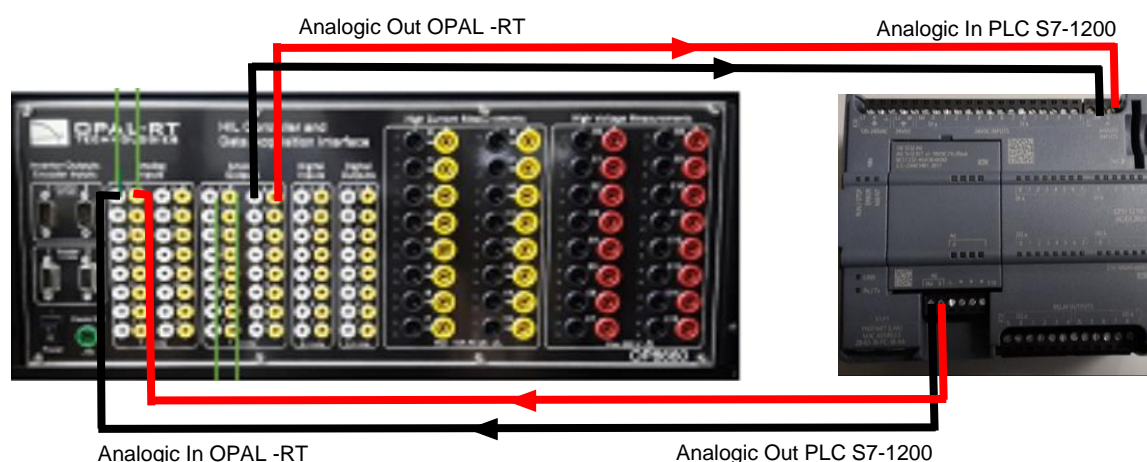


**Figura 2.27 Esquema del circuito de control de potencia mecánica del generador 1, (a) Control con Ganancia K simulada en RT-LAB, (b) Control con Ganancia K programada en el PLC S7-200.**

La salida del control del software Simulink™ hacia el PLC S7-1200 y la entrada del PLC S7-1200 hacia el control del software Simulink™ se la realiza mediante los bloques “AnalogOut” y “AnalogIn” adicional el bloque de control “OpCtrl” explicados anteriormente. La parametrización del Bloque “OpCtrl” se realiza mediante un archivo de flujo de datos “VC707\_2-EX-0001-2\_2\_6\_61-32AIO32DIOSel-01-01.bin” y un archivo de configuración “VC707\_2-EX-0001-2\_2\_6\_61-32AIO32DIOSel-01-01.conf” los cuales se encuentran dentro de uno de los ejemplos que el software RT-LAB posee.

El bloque “OpCtrl” debe recibir el nombre del archivo de flujo de bits “.bin” que utiliza para la configuración del mismo, este mismo bloque tiene un tiempo de muestreo por defecto se encuentra en el valor de 0 lo que significa que se encuentra operando de manera continua, entonces se debe cambiar este valor a un valor de muestreo fijo en nuestro caso a  $50e-6$  que es el valor del tiempo de muestreo que hemos usado para este proyecto; cabe recalcar que con estos tenemos acceso a la tarjeta “VC707” para encontrar la ubicación exacta de las entradas y salidas de voltaje DC, La configuración de la realiza mediante la división de grupos (Slots), módulos (Module) y subsecciones

(Subsection), adicional a esto es necesario que se indiquen cuantas entradas y salidas vamos a usar, para nuestro proyecto se escoge para una salida analógica la configuración número 4 que representa “Slot 2 Module A Subsection 2” la cual se ve reflejada en la salida analógica número 8 del OPAL RT y para una entrada se escoge la configuración número 1 que representa “Slot 1 Module A Subsection 1” esta se ve reflejada en la entrada número 1 de las entradas analógicas del OPAL RT, las conexiones para las entradas y salidas del OPAL-RT y del PLC S7-1200 se muestran en la figura 2.28.



**Figura 2.28 Esquema de Conexiones para Hardware in the Loop.**

Para correr el modelo en tiempo real en el software RT-LAB es necesario hacer ciertas configuraciones lo primero es revisar si el programa presenta “overruns” esto nos repercute a la hora de la simulación ya que el modelo corre demasiado lento lo que no puede dar en una simulación con hardware in the Loop, esto se puede corregir poniendo más sistemas de cálculo es decir utilizando más núcleos del simulador o usando la librería ARTEMIS que ayuda dividiendo el sistema para que el simulador no tenga que hacer muchos cálculos; el segundo paso es usar el modo “Extra High Performance (XHP)” en la configuración del RT-LAB, este modo permite un cálculo muy rápido del modelo en tiempo real en el sistema y recorta los gastos indirectos de programación a menos de un microsegundo; el tercer paso es cambiar la ejecución del modelo en las propiedades se debe seleccionar “Hardware Synchronized” y en asignación de propiedades “Enable XHP” [20], La configuración para realizar el bloque de ganancia como programación en el PLC S7-1200 se encuentra en anexos.

## 2.11 Implementación de la Base de Datos

Para la base de datos se usa la librería SQLite, en la figura 2.29 se muestra el subVI de los archivos de los bloques SQL, dentro de este subVI se encuentran los bloques necesarios para realizar el historial de datos.

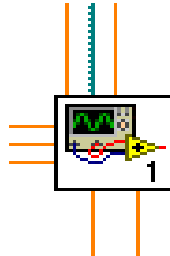


Figura 2.29 SubVI SQL.

En la figura 2.30 se puede observar cómo se conectan a los diferentes bloques variables que se guardaran la tabla a partir del tipo de estas, además se guarda la hora y fecha en la que se toma el dato.

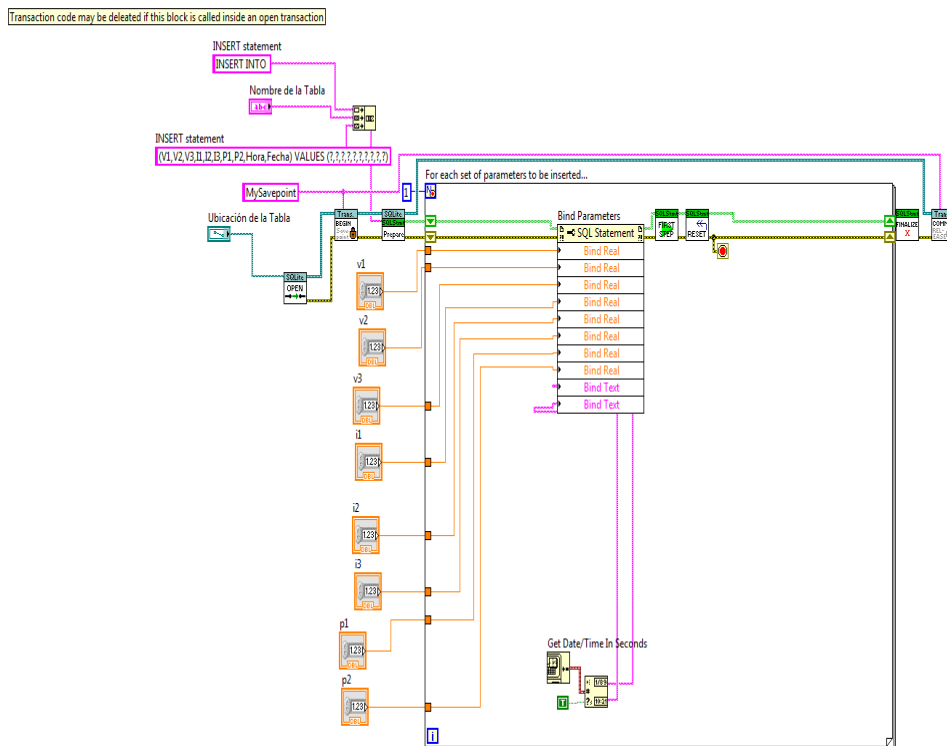


Figura 2.30 Diagrama de conexiones a los diferentes bloques de la base de datos.

Para la creación de la tabla se necesita especificar el nombre de la variable como un arreglo para que SQLite registre a la misma como se puede apreciar en la figura 2.31.

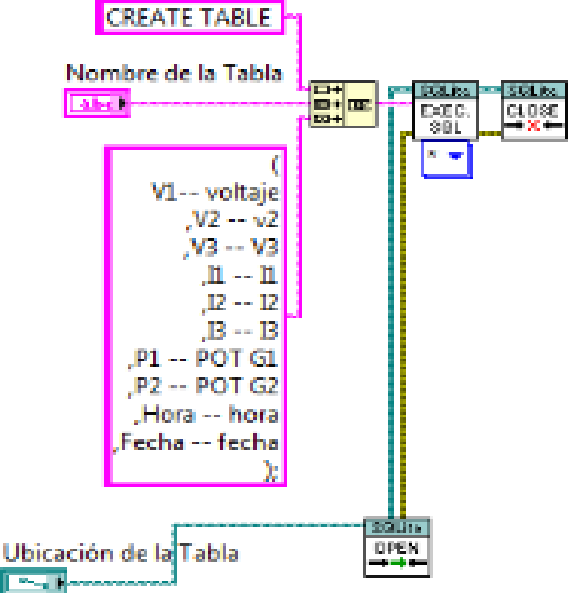


Figura 2.31 Bloques de Creación de las variables a guardar en la base de datos.

# CAPÍTULO 3

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

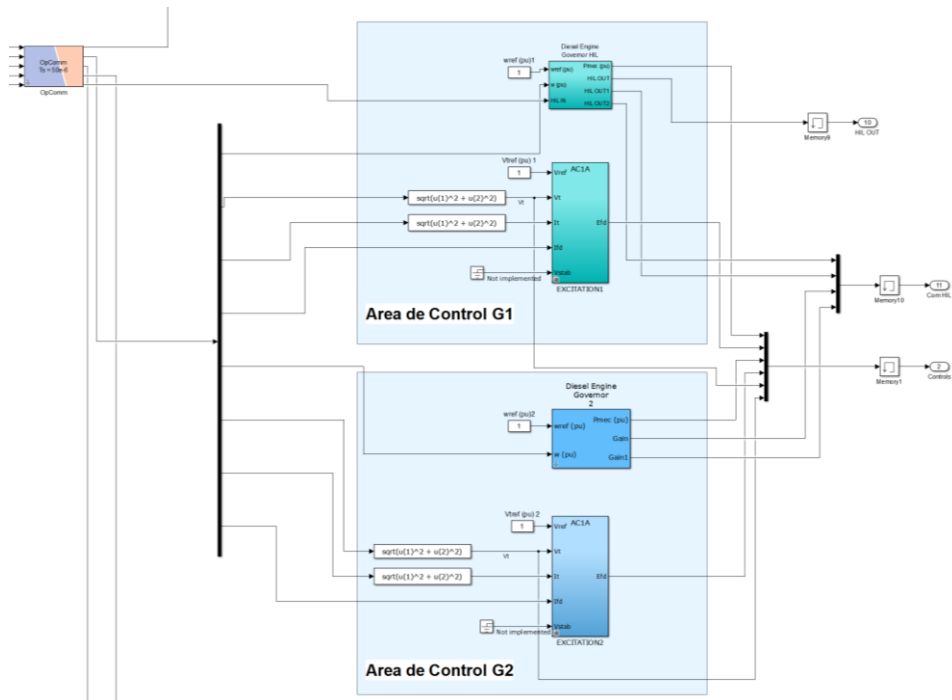
En el presente capítulo se muestran los resultados de las simulaciones cargadas al Simulador en tiempo real, esto es actuación de las protecciones, señales de los controladores de los generadores, las pantallas de la interfaz del SCADA con sus valores obtenidos mediante la comunicación OPC, comparaciones entre los generadores, diferencias entre los controladores cuando se usa el PLC en el controlador del Generador 1 y el registro de la base de datos que se genera.

### 3.1 Sistema de excitación y control de frecuencia

La simulación de los generadores con el control de excitación y frecuencia en tiempo real muestra el comportamiento de los generadores ante una carga pasiva. De manera que se observa como la regulación de voltaje y la aplicación de la potencia necesaria para abastecer dicha carga. En la figura 3.1 se puede observar el esquema de conexión en Simulink™ de los sistemas de control. Se aprecia al gobernador diésel y el sistema de excitación, junto a las variables que se controlan dentro de los generadores.

El sistema de frecuencia se ha parametrizado con los valores de defecto del excitador que se eligió, solo se cambió el valor de la ganancia a 30, de esta manera se pretende que se observe como la potencia mecánica varíe con respecto a la carga que el generador alimente para que el sistema se encuentre en un estado estable ante perturbaciones.

En el sistema de excitación se han tomado los valores por defecto de la librería de Simulink™, salvo por la ganancia y la constante de amortiguamiento, que son 400 y 0.02. Estos valores se mantendrán para todas las simulaciones, tanto para carga pasiva como para carga dinámica. Las cargas que hemos usado son de tipo resistivas, aunque se tiene en cuenta las inductancias del generador propia y de los transformadores ya que no son ideales.



**Figura 3.1 Sistemas de control para generadores en el esquema de red**

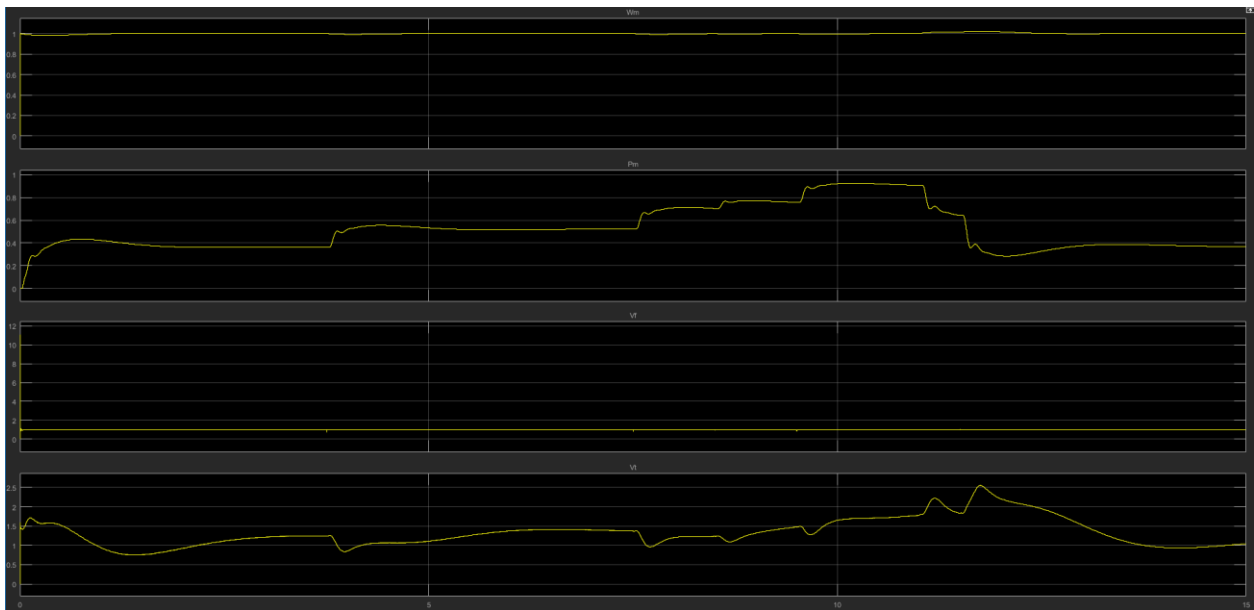
### 3.2 Respuesta de los controladores de los generadores ante una carga dinámica

La figura 3.2 muestra el comportamiento de uno de los generadores ante un perfil de carga la estabilización de la máquina síncrona se da a los tres segundos aproximadamente.

La primera gráfica representa la frecuencia de la red la misma que se encuentra en un rango de 1 pu aproximadamente con una banda de +/- 0.02 pu debido a que el controlador de velocidad del generador lo mantiene en este rango porque dicha máquina tiende a acelerarse cuando disminuye la potencia que requiere la carga y a desacelerarse cuando la potencia de la carga aumenta, la segunda gráfica representa la potencia mecánica que necesita el generador para abastecer la carga dependiendo del valor que tome en el tiempo para poder suplirla, la tercera gráfica muestra el voltaje de campo del generador el cual se encuentra en el valor de 1 pu, esto se ve afectado en los terminales del generador haciendo que el voltaje terminal se encuentre en su valor nominal 2.4 KV, la cuarta gráfica muestra el valor del voltaje total (de eje directo y cuadratura) este valor se ajusta con el controlador para mantener el voltaje de campo en 1 pu.

Se puede observar tanto en la gráfica de la frecuencia y el voltaje de campo permanecen en un valor estable, aunque la carga crezca o disminuya, esto quiere decir que el sistema tiene una frecuencia estable de 60 Hz y el voltaje terminal del generador se mantiene constante para cada paso de carga.

La potencia mecánica aumenta cuando la carga aumenta ya que se necesita generar más potencia activa para satisfacer la demanda, así mismo el voltaje total (eje directo y cuadratura) tiene que aumentar para que el voltaje de campo tenga un valor de 1 pu para los cambios de carga, cuando ocurre lo contrario, es decir la carga disminuye, la potencia mecánica disminuye y el voltaje total también, sin embargo se pueden notar pequeños picos en el voltaje de campo debido al cambio instantáneo en la carga pero se estabiliza en un corto tiempo.



**Figura 3.2 Curvas de frecuencia, potencia mecánica, voltaje de campo y voltaje total de ejes alimentando a un perfil de carga**

### 3.3 Estado del Sistema para carga dinámica

En la Figura 3.3 se muestra el estado del Sistema para cuando se requiere que alimente a una carga variable en el tiempo, podemos observar que ambos Generadores se encuentran operando y ambos Transformadores también. Se encuentra activada la entrada desde el LabVIEW (switch) que activa el disyuntor que da paso a estas máquinas eléctricas, también vemos que se encuentra activado el switch que da paso a encender el perfil de carga.



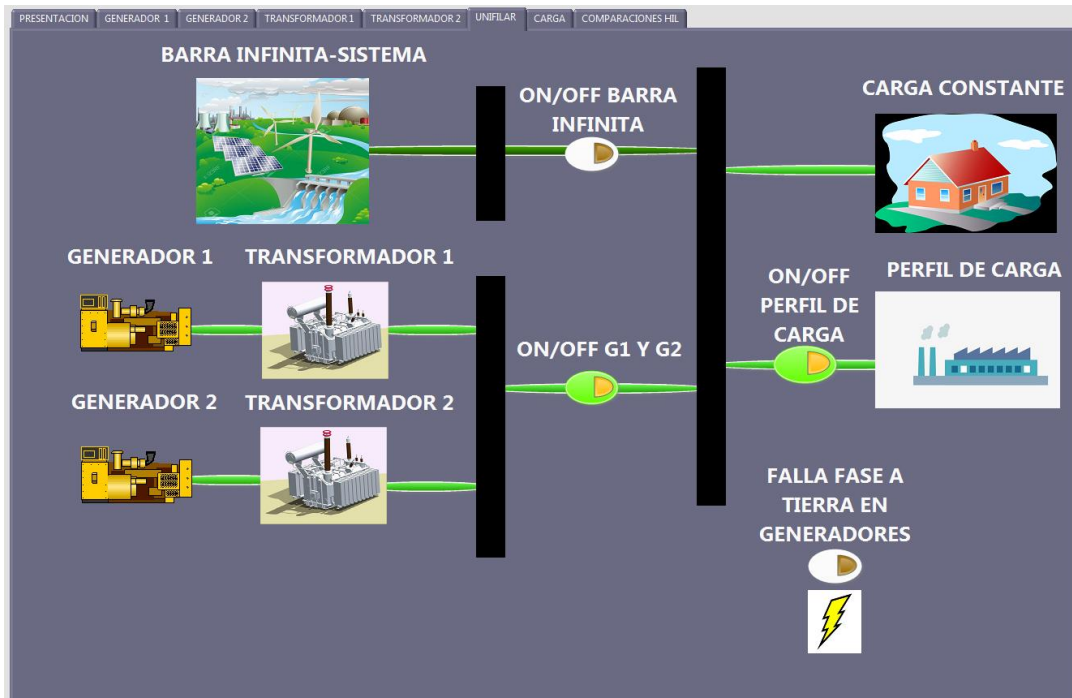


Figura 3.3 Estado del Sistema para carga dinámica

### 3.4 Respuesta de los Generadores ante carga dinámica

En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestran las pantallas del SCADA, presentando los valores más importantes de cada uno de los generadores que comparten carga, podemos observar que los controladores se encuentran funcionando de buena manera debido a que el voltaje terminal de cada uno de los generadores es muy parecido y la velocidad que ellos mantienen es similar. La diferencia de Potencia que se presenta se da debido a que el Generador 1 está siendo controlado parcialmente por el PLC, mientras que el Generador 2 su controlador es totalmente simulado. Podemos observar que el perfil de las frecuencias de cada uno y concluir que se encuentran sincronizados debido a que están en la misma barra conectados compartiendo carga. Observamos que las protecciones que los resguardan a cada uno se encuentran de color verde y esto es debido a que se encuentran trabajando normalmente sin ninguna anomalía.

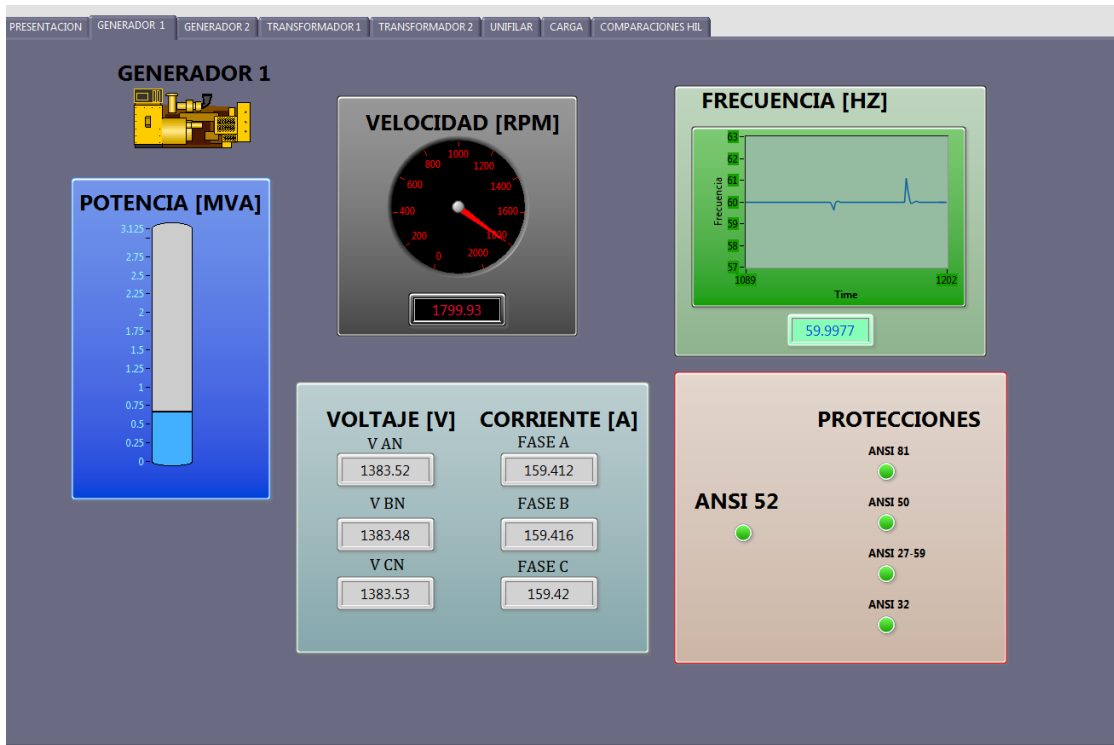


Figura 3.4 Parámetros monitoreados del Generador 1

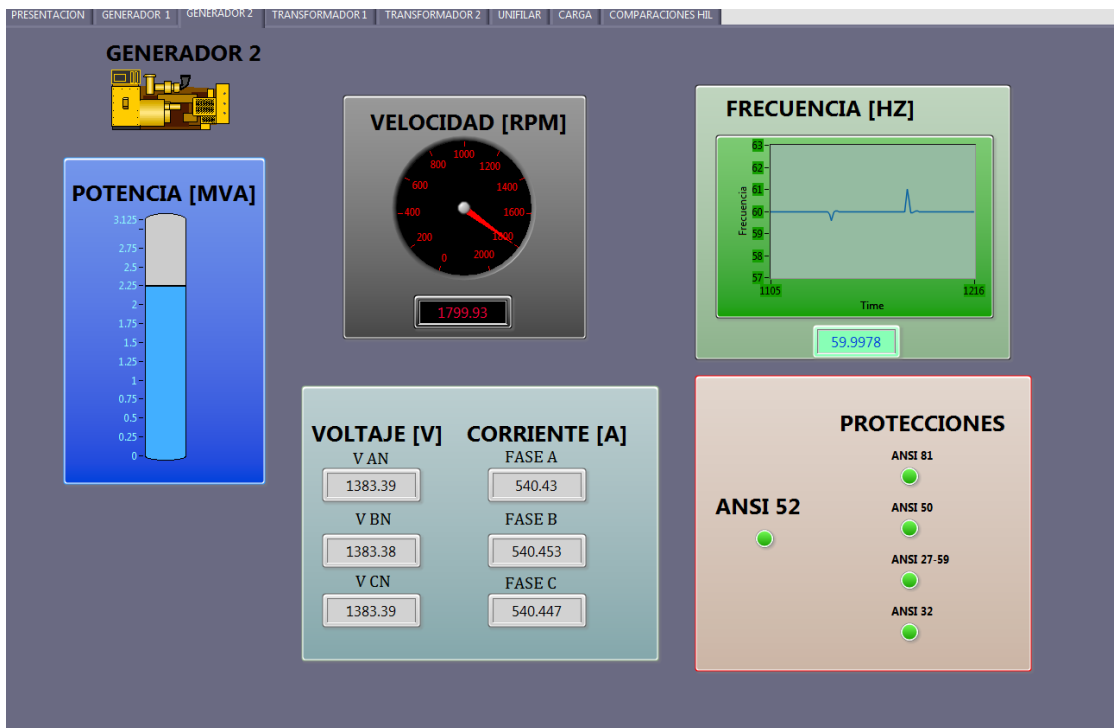


Figura 3.5 Parámetros monitoreados del Generador 2

### 3.5 Respuesta de los Transformadores ante carga dinámica

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran las pantallas del SCADA de los Transformadores, presentando los valores más importantes de cada uno de ellos. La diferencia de Potencia que se presenta se da debido a que el Transformador 1 está asociado al Generador 1 que está siendo controlado parcialmente por el PLC, mientras que el Transformador 2 está asociado al Generador 2 y su controlador es totalmente simulado. Observamos que las protecciones que los resguardan a cada uno se encuentran de color verde y esto es debido a que se encuentran trabajando normalmente sin ninguna anomalía.

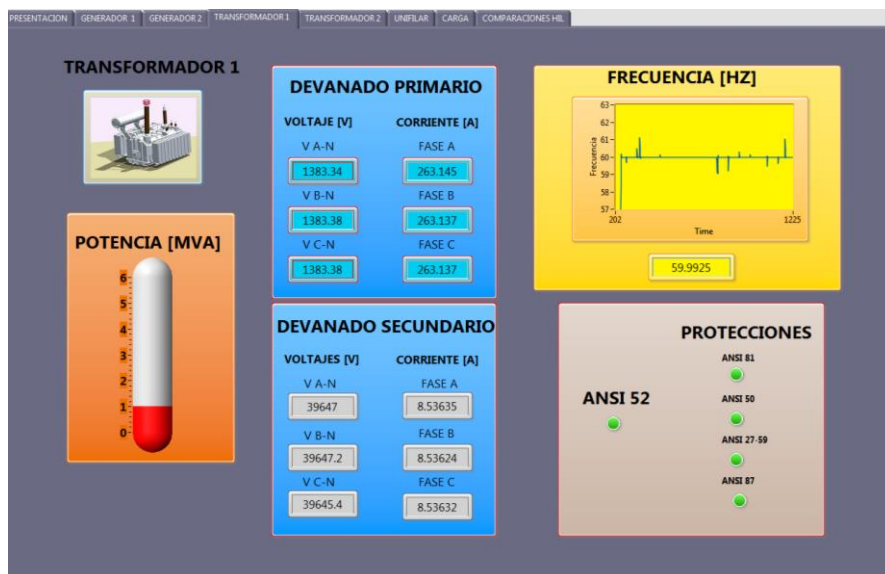


Figura 3.6 Parámetros monitoreados del Transformador 1

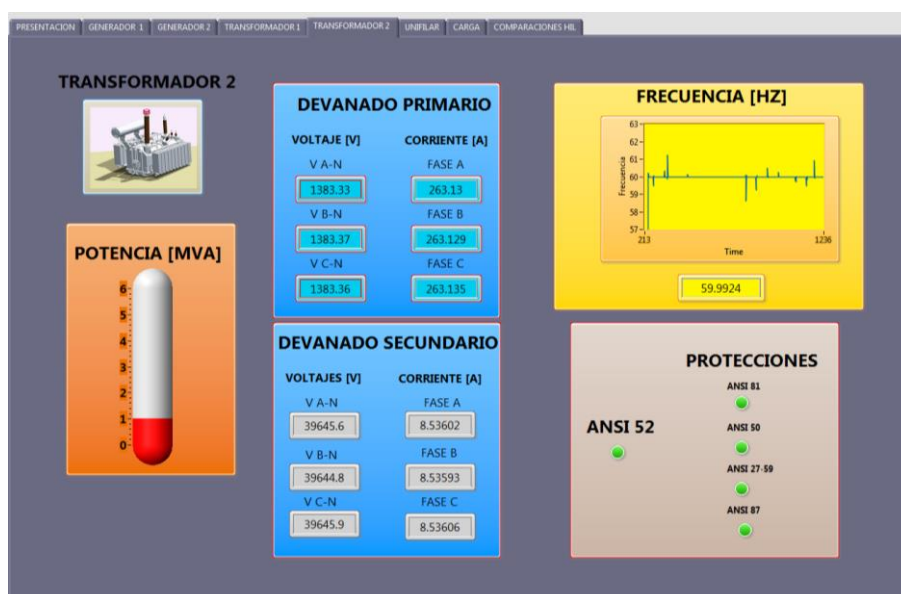


Figura 3.7 Parámetros monitoreados del Transformador 2

### 3.6 Respuesta de Voltaje y Corriente en la barra de carga ante una carga dinámica

En la figura 3.8 se observan las mediciones del voltaje y la corriente en la carga resistiva dinámica correspondiente al perfil de carga de la figura 16, al principio se produce un pico esto es debido al transiente que se genera al encender los generadores hasta que el generador obtenga la potencia suficiente para alimentar la carga correspondiente, luego se estabiliza en un valor constante y va a variar en el tiempo la magnitud de la corriente debido al perfil de carga.

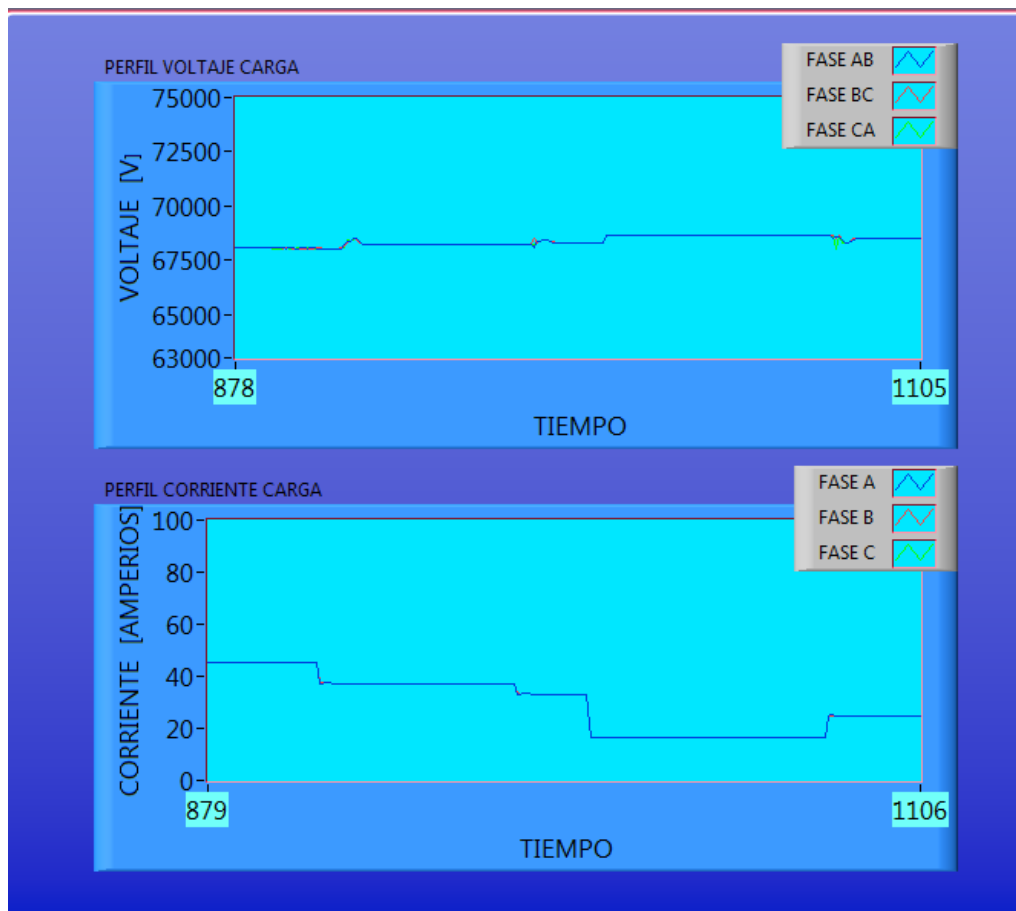
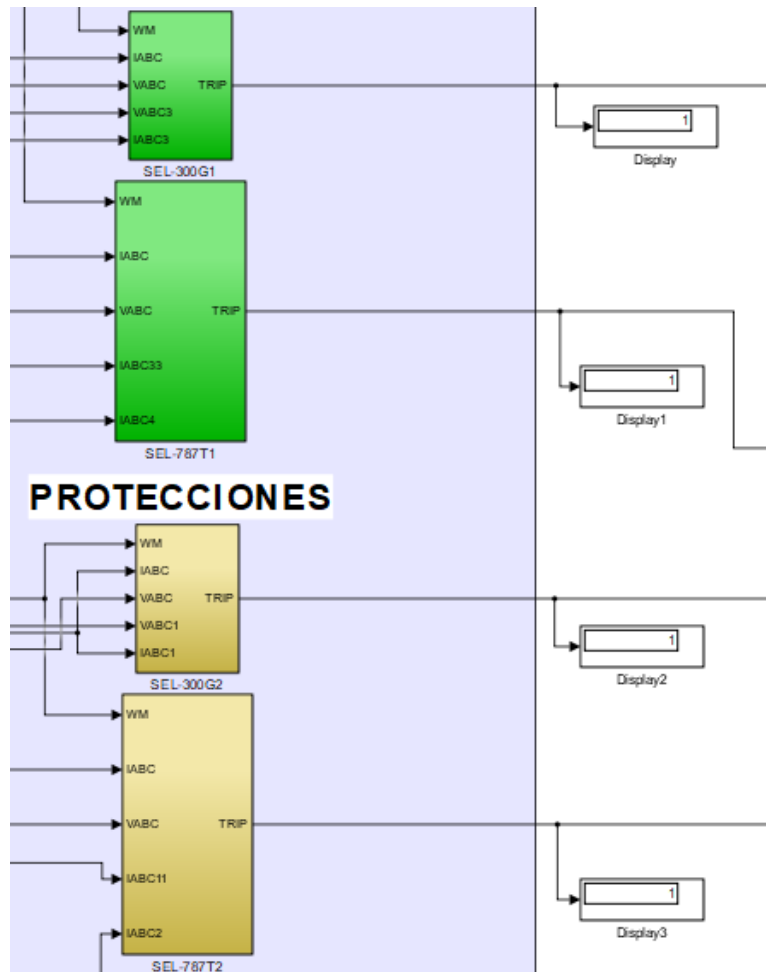


Figura 3.8 Señales de Voltaje y Corriente de la barra de carga para carga dinámica

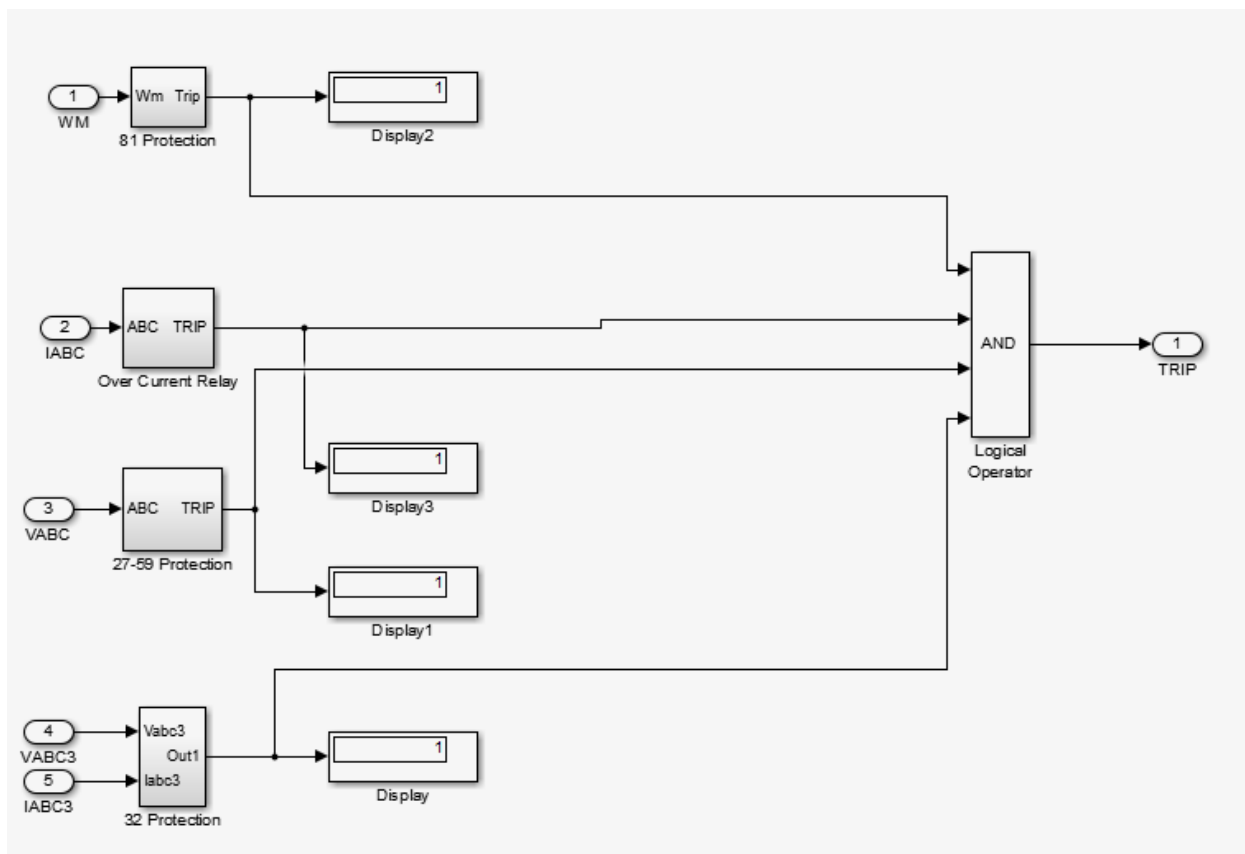
### 3.7 Respuesta de los relés de protección en estado estable

En la figura 3.9 se muestran las señales que emiten cada uno de los relés de protección, las cuales van a comandar su disyuntor asociado, con un 1 el disyuntor se mantiene cerrado debido a que indica que los valores que se encuentran censando los equipos de medición son adecuados, caso contrario cuando se encuentren mandando un 0 el disyuntor se abre y esto indica un estado de falla en el cual se dan valores censados peligrosos para la máquina eléctrica que protegen.



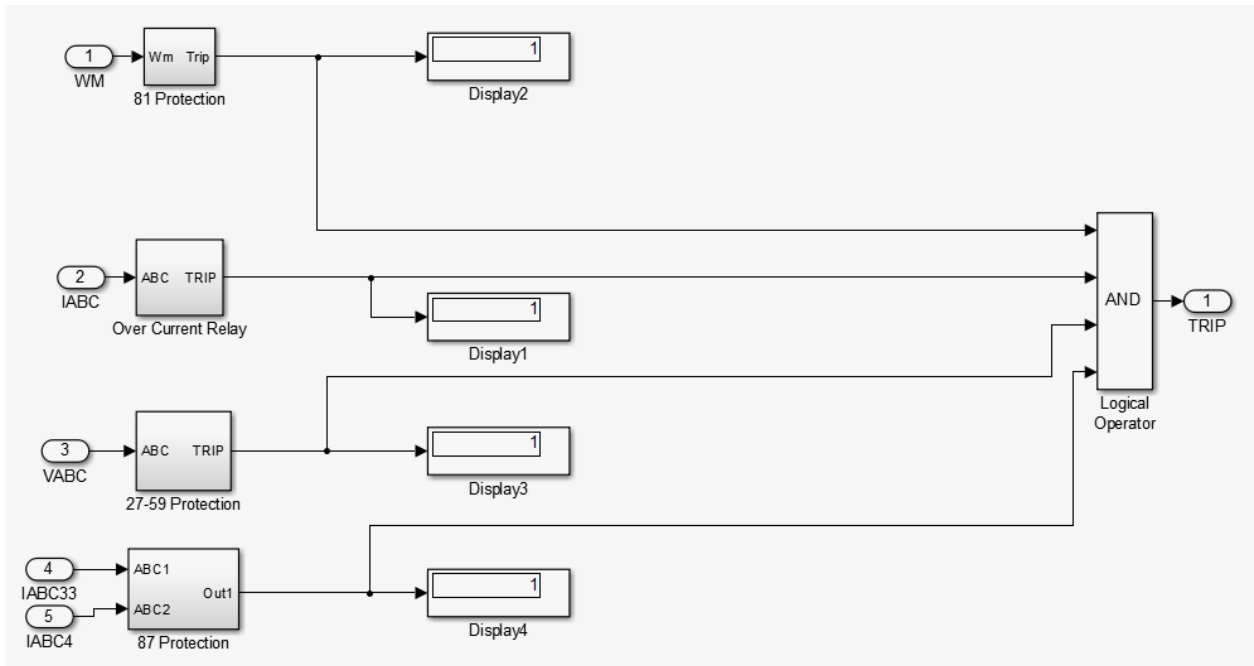
**Figura 3.9 Respuesta de los Relés de protección en estado estable**

En la figura 3.10 se muestran las funciones de protecciones implementadas para el Relé SEL-300G que protege al Generador asociado, como podemos notar son 5 estas funciones (ANSI 81, 50, 27, 59 Y 32) y cada una de ellas genera una señal de 1 o 0 las cuales son operación normal en rangos adecuados y estado de falla con valores fuera de límites aceptables para el buen funcionamiento del sistema respectivamente. Estas señales van hacia un operador lógico que es el AND y este genera un 1 cuando todas las funciones se encuentran en estado de operación normal, caso contrario si alguna de ellas se encuentra en 0 que es estado de falla, genera el mismo 0 y manda a operar su disyuntor asociado. Cabe recalcar que cada función de protección posee internamente un retardo de tiempo de actuación, esto es debido a que no debe disparar el disyuntor ante eventos normales como variaciones de carga, sino que espera un tiempo de espera que posee cada una de estas funciones de protección según sus manuales técnicos para diferenciarlos de un estado de falla y transientes normales.



**Figura 3.10 Respuesta de las funciones de protección internas del Relé de protección SEL-300G**

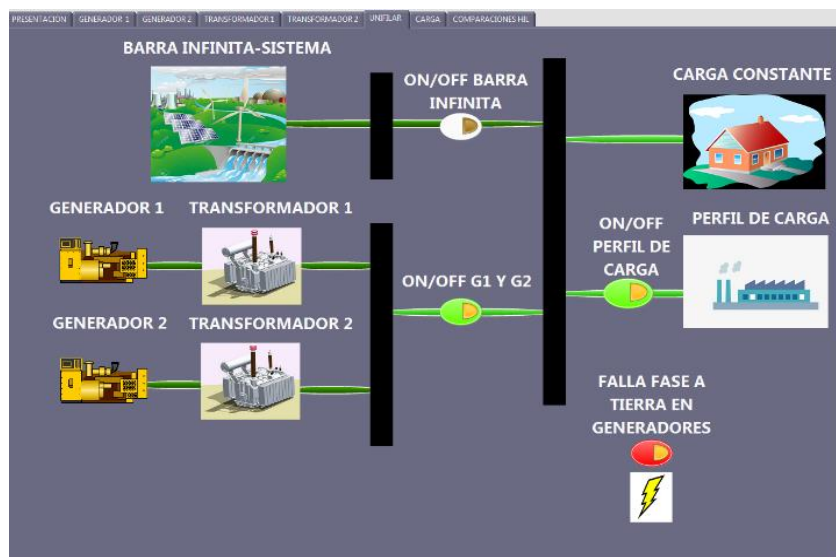
En la figura 3.11 se muestran las funciones de protecciones implementadas para el Relé SEL-787 que protege al Transformador asociado, como podemos notar son 5 estas funciones (ANSI 81, 50, 27, 59 Y 87) y cada una de ellas genera una señal de 1 o 0 las cuales son operación normal en rangos adecuados y estado de falla con valores fuera de límites aceptables para el buen funcionamiento del sistema respectivamente. Estas señales van hacia un operador lógico que es el AND y este genera un 1 cuando todas las funciones se encuentran en estado de operación normal, caso contrario si alguna de ellas se encuentra en 0 que es estado de falla, genera el mismo 0 y manda a operar su disyuntor asociado. Cabe recalcar que cada función de protección posee internamente un retardo de tiempo de actuación, esto es debido a que no debe disparar el disyuntor ante eventos normales como variaciones de carga, sino que espera un tiempo de espera que posee cada una de estas funciones de protección según sus manuales técnicos para diferenciarlos de un estado de falla y transientes normales.



**Figura 3.11** Respuesta de las funciones de protección internas del Relé de protección **SEL-787**

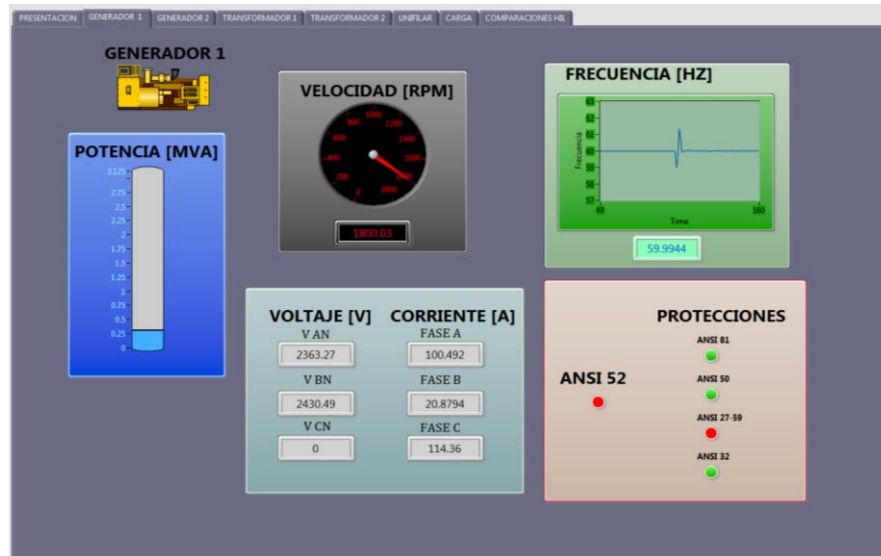
### 3.8 Respuesta de los relés de protección ante la falla en la fase C de los Generadores

Para aplicar la falla en cada uno de los generadores se procedió a utilizar un disyuntor que manda la fase C a tierra, como podemos notar en la interfaz de SCADA al presionar el Switch, se provoca la falla en el modelo y se enciende una luz indicando que esta activada (Figura 3.12).



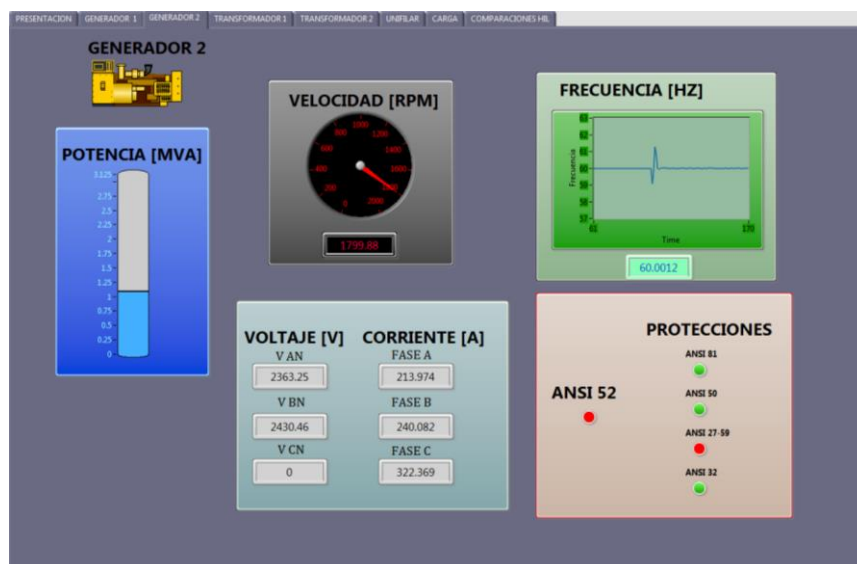
**Figura 3.12** Sistema en falla

Como podemos observar en la Figura 3.13 esta falla provoca que la protección ANSI 27 de bajo voltaje actúe debido a que el voltaje de la fase C se puso al mismo potencial de tierra y esto hace disparar al disyuntor del Generador 1.



**Figura 3.13 Generador 1 en falla**

Esta falla también se la aplica al Generador 2 (Figura 3.14) y provoca que la protección ANSI 27 de bajo voltaje actúe debido a que el voltaje de la fase C se puso al mismo potencial de tierra y esto hace disparar al disyuntor del Generador 2.



**Figura 3.14 Generador 2 en falla**

En la Figura 3.15 debido a que ya actuó el disyuntor del Generador 1, abriendo el circuito y dejando sin alimentación al Transformador 1, es por esto que actúan las funciones de



protecciones ANSI 27 de bajo voltaje y ANSI 81 de baja frecuencia, mandando a disparar al disyuntor.

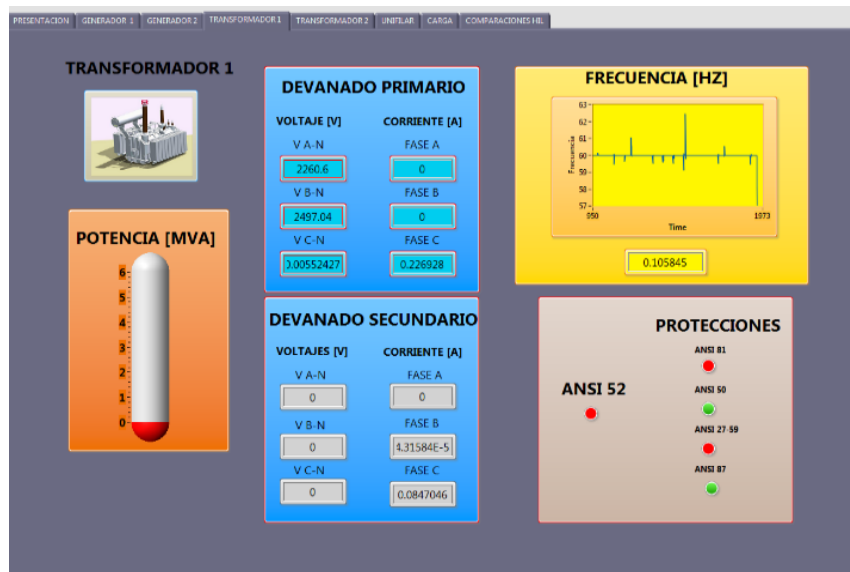


Figura 3.15 Transformador 1 en falla

En la Figura 3.16 debido a que ya actuó el disyuntor del Generador 2, abriendo el circuito y dejando sin alimentación al Transformador 2, es por esto que actúan las funciones de protecciones ANSI 27 de bajo voltaje y ANSI 81 de baja frecuencia, mandando a disparar al disyuntor.

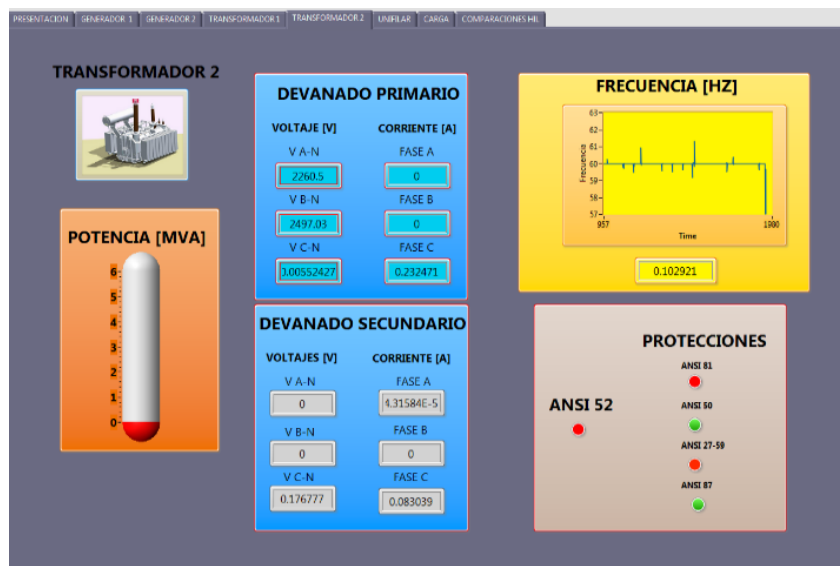
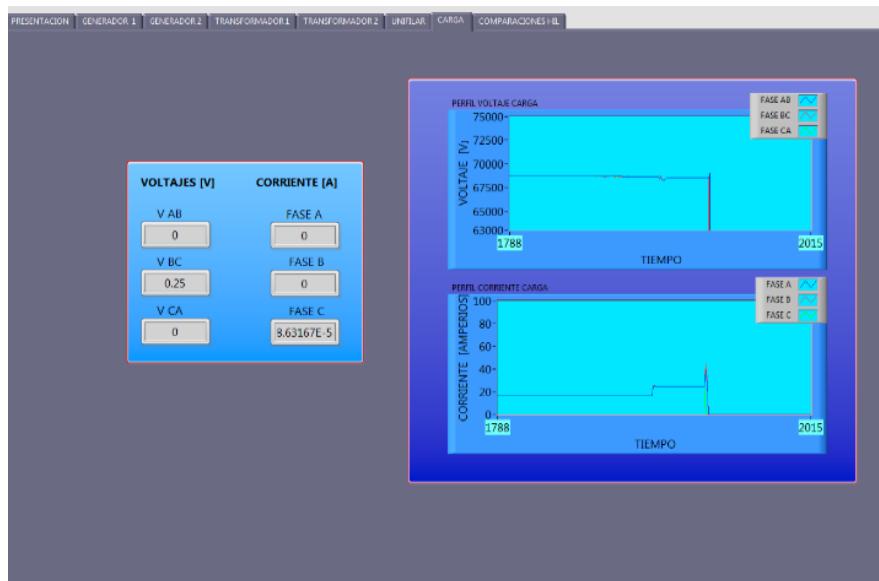


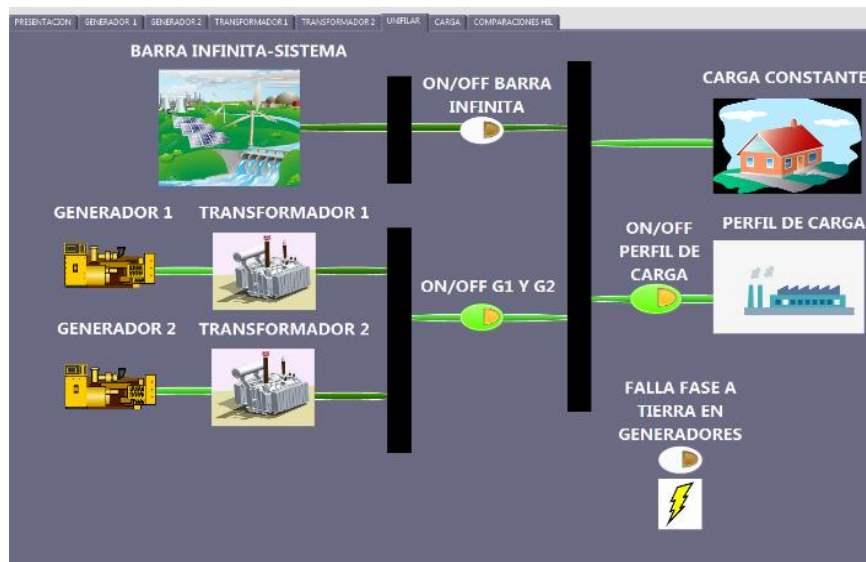
Figura 3.16 Transformador 2 en falla

En la Figura 3.17 se puede observar como el voltaje y corriente en la barra de carga caen a cero por la apertura de los disyuntores, desconectando así la carga.



**Figura 3.17 Parámetros en barra de carga ante falla**

En la Figura 3.18 ya una vez que se desactiva manualmente la falla en los Generadores, se apaga el LED y el sistema vuelve a conectarse a la carga.



**Figura 3.18 Diagrama Unifilar luego de la falla**

### 3.9 Conexión de la Barra Infinita

Para el presente proyecto se propuso que se representase como Generación Distribuida, en la cual, si los Generadores entran en mantenimiento, se pueda conectar la carga y que sea suplida por medio de la red del sistema.

En la simulación cuando se desconectan los generadores mediante un switch o ya sea por disparo de los interruptores, hay la posibilidad de conectar la red del sistema para que suplan la carga como se muestra en la figura 3.19.

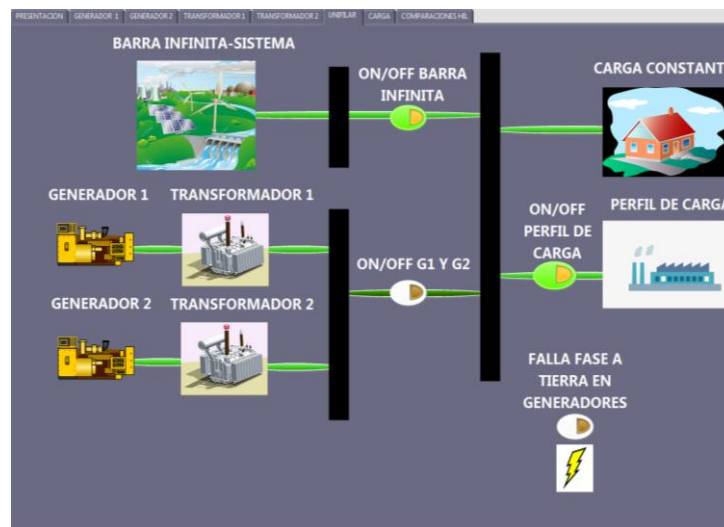


Figura 3.19 Conexión de la red del sistema para que supla a la carga

Para prueba de la conexión de la red del sistema para que alimente la carga, se muestra la Figura 3.20 y se puede observar en esta que se tiene el perfil de voltaje y de corriente requerido por la carga.

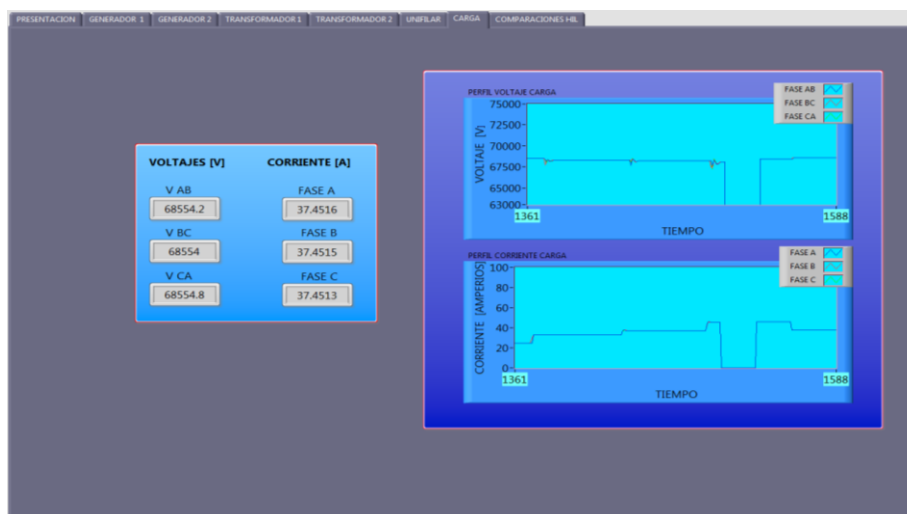
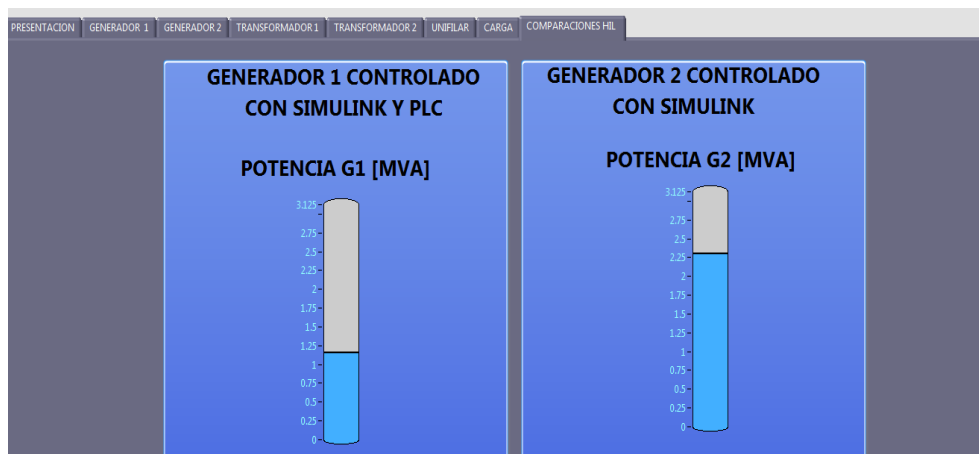


Figura 3.20 Parámetros de la barra de carga conectada a la red del sistema

### 3.10 Comparaciones de Generador 1 y Generador 2

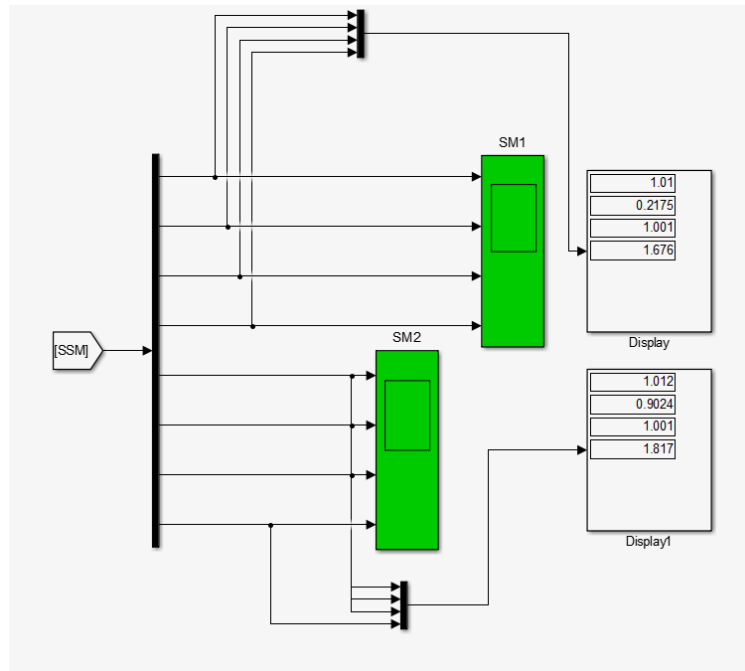
El modelo de generación que se presenta corresponde a Generación Distribuida, consiste en dos generadores que comparten carga, como ya se había mencionado, pero la potencia que entrega cada uno difiere debido a que el Generador 1, una parte de su controlador de velocidad por medio del PLC S7-1200; y en cambio el Generador 2 todo su controlador de velocidad es simulado, como se explica en el capítulo anterior.

Como podemos notar en los displays de la interfaz de Simulink™ el segundo parámetro es el de la potencia mecánica de cada Generador, se ve que el Generador 1 posee menor potencia mecánica que el Generador 2 y esto implica que tendrá menor potencia de salida. Esto se debe a que el Generador 1 parte de su controlador de velocidad se encuentra controlado con el PLC y al salir las señales analógicas del simulador en tiempo real, el procesamiento del PLC y la entrada de esta señal al simulador, se tiene un retardo de tiempo adicional, el cual se ve afectado en la potencia que inyecta cada Generador.



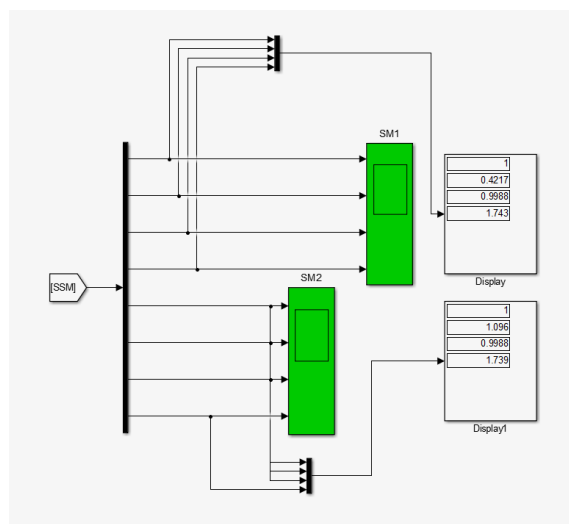
**Figura 3.21 Parámetros de los controladores de los Generadores 1 y 2**

Podemos observar en la figura 3.22 una comparación entre ambos Generadores en el SCADA, y se observa cómo se ven afectadas las potencias de cada Generador.



**Figura 3.22 Comparación de potencias de los Generadores 1 y 2**

En la Figura 3.23 se nota que el segundo parámetro del display SM2 se encuentra prácticamente en 1 pu, esto quiere decir que es la potencia mecánica máxima que puede recibir el Generador 2 (controlador totalmente simulado), y es por esto que la carga de aquí en adelante será suplida únicamente por el Generador 1 (controlador parcialmente simulado).



**Figura 3.23 Parámetros de los controladores de los Generadores 1 y 2, con este último trabajando a capacidad nominal**

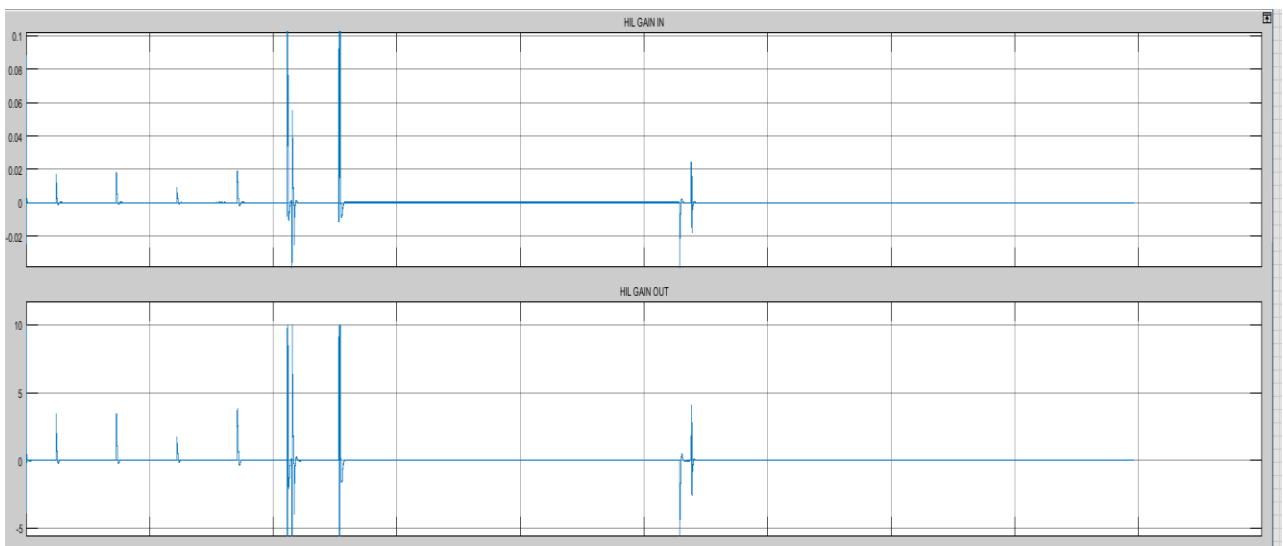
Notamos claramente en la Figura 3.24, que el Generador 2 se encuentra en su capacidad máxima de entrega de potencia, y quien ahora entrega potencia al sistema es el Generador 1.



**Figura 3.24 Comparación de potencias de los Generadores 1 y 2, con este último trabajando a capacidad nominal**

### **3.11 Comparaciones de entradas y salidas de la ganancia $K=30$ del controlador del Generador 1 con PLC y Generador 2 con controlador totalmente simulado**

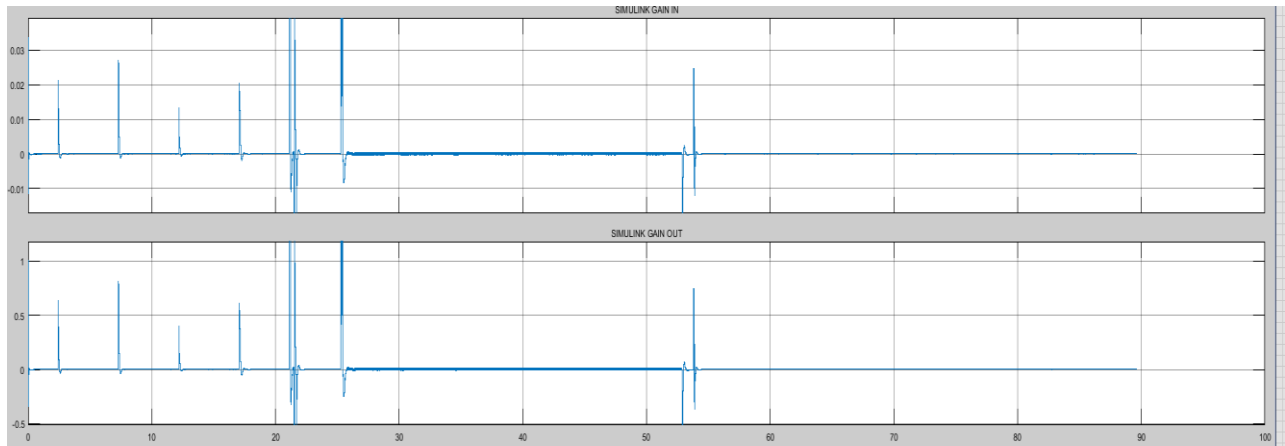
Como ya se ha venido diciendo una parte del controlador del Generador 1 se encuentra siendo realizada por el PLC, y las señales que se muestran en la figura 3.25, son las que entran y salen de la ganancia  $K$  que se encuentra siendo calculada con Hardware In the Loop por medio del microprocesador.



**Figura 3.25 Señales de entrada y salida de la ganancia  $K$  ejecutada en el PLC, del Generador 1**

La Figura 3.25 es la del controlador del Generador 2 que se encuentra siendo calculada totalmente por medio del simulador, y haciendo una comparación entre la figura 3.25 y la figura 3.26, podemos notar una diferencia en sus valores, y esto se debe a que el controlador del Generador 2 está trabajando más rápidamente y por esta razón es que

toma mayor carga que el Generador 1, porque este tiempo entre el envío y recepción de señales hacia el PLC, es mayor en tiempo que el controlador que se encuentra totalmente simulado.



**Figura 3.26 Señales de entrada y salida de la ganancia K ejecutada en el simulador, del Generador 2**

### 3.12 Registro de la base de datos obtenida

En la Figura 3.27 se encuentra el registro de la base de datos que fue guardada con la ayuda de los bloques de la librería SQL, podemos observar que se registran 8 variables de interés para nuestro sistema, las cuales son: 3 voltajes de línea a línea de la barra de carga, 3 corrientes de línea de la barra de carga, potencia del Generador 1 y potencia del Generador 2. Cada registro que se guarda, lo hace con la fecha en que fueron ejecutadas las simulaciones que se corrieron en el simulador de tiempo real.

Se puede ver que en un principio los datos se guardan con normalidad, pero luego se enceran o toman valores residuales, esto se da debido a que en este momento se produjo la falla en la fase C de cada uno de los generadores y al actuar las funciones de protecciones se disparan los interruptores abriendo el circuito y dejando a la carga desconectada del sistema; luego se observa que se guardan valores nuevamente, y esto se da porque se despeja la falla y los interruptores se vuelven a cerrar dando paso a alimentar a la carga.

Figura 3.27 Registro de la Base de Datos obtenida durante la simulación



# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se verificó el correcto funcionamiento de los sistemas de excitación y de control de potencia mecánica que requieren los generadores a diésel; pudiendo así reaccionar de manera efectiva ante perturbaciones en el sistema, como variaciones de carga y transientes normales en el proceso de aceleración de un Generador Eléctrico.
- Al implementar la interfaz del SCADA en LabVIEW, se pudo dar seguimiento a parámetros importantes en el sistema de generación propuesto, así como tomar decisiones con respecto a la conexión de los generadores para que de esta manera suplan la demanda de la carga cuando el sistema de generación centralizado no se encuentre con disponibilidad de entrega de energía.
- La simulación en tiempo real utilizando HIL permitió comprobar controladores sin ningún tipo de esquema físico, sino con modelamiento del sistema requerido para observar el comportamiento de estos. Para el proyecto propuesto se controló parcialmente el controlador de potencia mecánica de un Generador con ayuda del PLC S7-1200, y se comparó con el controlador de potencia mecánica simulado en su totalidad del otro Generador en línea donde se pudo verificar que se controla efectivamente dicho parámetro de entrada de la máquina eléctrica ante perturbaciones como variaciones de carga. Cabe recalcar que el controlador con HIL funciona de manera íntegra, pero al comparar respuestas con respecto al controlador simulado se puede concluir que responde con cierto retardo de tiempo, en contraste con el mencionado controlador simulado que responde de manera más ágil; lo que se ve reflejado en la compartición de la Potencia que entrega cada Generador a la carga.
- El registro de los parámetros indispensables para el correcto funcionamiento del sistema, se guardaron en un historial de base de datos, con esto se ayudó al operador del Sistema a analizar estadísticamente el crecimiento de la carga y posibles afectaciones que se encuentren repercutiendo en el sistema.

## Recomendaciones

- Se recomienda la implementación de un sincronoscopio, para que de esta manera se pueda realizar la sincronización de los Generadores, debido a que la falla que se hace en el presente proyecto se la hace a los dos generadores simultáneamente, pero con un sincronoscopio se podrían hacer de manera individual, e inclusive se puede conectar los generadores al sistema para que contribuyan con potencia.
- Es necesario utilizar otro PLC para también controlar parcialmente el otro Generador mediante HIL, debido a que aquí se utiliza únicamente un microprocesador y esto se ve afectado en los controladores de potencia mecánica y por ende en la potencia que inyecta cada Generador.
- Analizar la base de datos también se recomienda para poder tener un estudio estadístico de carga, y con esto se puede realizar una planificación de expansión en la generación debido al aumento de carga de un sistema además de registro de fallas para poder discutir la zona de mayor vulnerabilidad del sistema.
- Se recomienda utilizar un relé para que sea usado con HIL, para que de esta manera se pueda tener un funcionamiento en físico de las funciones de protecciones simuladas.

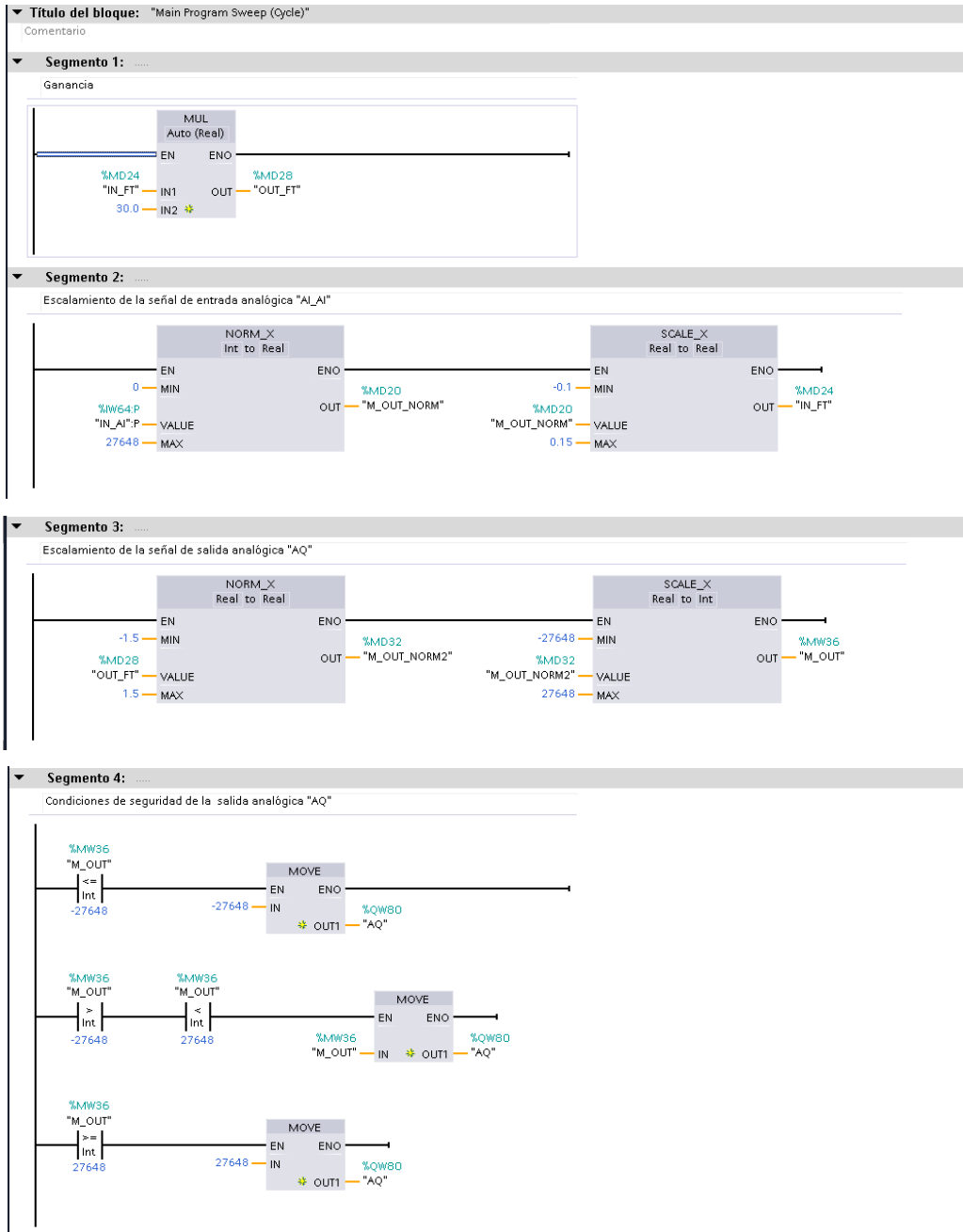
# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Red Eléctrica de España (2015). Las Smartgrids. [Online]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/red21/redes-inteligentes/que-son-las-smartgrid>
- [2] DDN. (2018). SMART GRID-LA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE DEL FUTURO [Online]. Disponible en: <http://www.ddn-eng.com/es/smartgrid-a-rede-eletrica-inteligente-do-futuro/>
- [3] NOVELEC. (2017, Abril 27). ¿Cómo funciona una Smart Grid (1st ed.) [Online]? Disponible en: <https://blog.gruponovelec.com/electricidad/como-funciona-smart-grid/>
- [4] FUNDACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID, “Guía Básica de la Generación Distribuida,” Energy Management Agency., Madrid, España, Rep. 2007.
- [5] Luis Corrales, PHD, “Sistemas SCADA,” Departamento de Automatización y Control Industrial., Diciembre, 2007.
- [6] Loyola and News. (2017, febrero 20). Seminario. Simuladores en tiempo real OPAL-RT para redes inteligentes [Online]. Disponible en: <http://www.loyolaandnews.es/evento/seminario-simuladores-en-tiempo-real-opal-rt-para-redes-inteligentes/>
- [7] AEROEXPO. (2018). OPAL RT TECHNOLOGIES [Online]. Disponible en: <http://www.aeroexpo.online/prod/opal-rt-technologies/product-173895-26139.html>
- [8] C. M. Herrador, “Modelado en Matlab-Simulink de Generadores Eléctricos conectados a la red,” Tesis de ingeniería, Dept. Ing. Elect., Univ. de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [9] Ramon M. Mujal Rosas, “Despacho Económico” en Tecnología Eléctrica, 1era ed. Cataluña, UPC, 2000, pp. 407.
- [10] Pablo Ledesma. (2008, Septiembre 25). Regulación primaria, secundaria y terciaria [Online]. Disponible en: [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II\\_OCSE\\_RFP/regulacion-primaria-secundaria-y-terciaria](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RFP/regulacion-primaria-secundaria-y-terciaria)
- [11] Javier Trujillo S., “Simulación del Control Potencia-Frecuencia en un Sistema Eléctrico de Potencia en Matlab,” Tesis de Grado, Ingeniería de Tecnologías Industriales, Dep. Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [12] “DESCRIPCIÓN DE LOS NÚMEROS ANSI / IEEE”, Schneider Electric.

- [13] MATRIKON. (2015, Febrero). ¿QUE ES UN SERVIDOR OPC? (1st ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.matrikonopc.es/opc-servidor/index.aspx>
- [14] Tutorials Point. (2018). SQLite Database Engine (1st ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.tutorialspoint.com/plsql/index.htm>
- [15] MATHWORKS. (2018). What is Hardware In the Loop Simulation? [Online]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>
- [16] T. VANGILDER. (2018, Febrero 26). What is Hardware In the Loop (HIL) Testing? (1st ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.winemantech.com/blog/what-is-hardware-in-the-loop-hil-testing>
- [17] RT-LAB Solution for Real-Time Applications-Guía RT-LAB
- [18] J. J. Samaniego, "Validación en Tiempo Real de un esquema básico de control para un Sistema de Distribución con Generación Distribuida," Tesis de ingeniería, Fac. Ing. Elect. Y Comp., Univ. ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [19] J. O. Williams, "Diseño e Implementación del control de voltaje de un Generador Síncrono utilizando simulación en Tiempo Real," Tesis de ingeniería, Fac. Ing. Elect. Y Comp., Univ. ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [20] OPAL-RT TECHNOLOGIES, "OP-105: Hardware and I/O management," en RT-LAB Solution for Real-Time Applications.

# ANEXOS

## PROGRAMACIÓN DE LA GANANCIA DEL CONTROLADOR DEL GENERADOR 1 EN PLC



# FORMATO DE SCRIPT #1 PARA COMUNICACIÓN OPC

OPAL-1.0 Object

OPCUAServer::OPCUAServerConfig {

networkInterface=eth0

cpuCore=0

pointsSetup {

item {

name=DataReadByClient\_00

type=double

direction=from\_server\_to\_client

arrayLen=0

path=/DataReadByClient/Scalars/

}

item {

name=DataWrittenByClient\_00

type=boolean

initialValues {

0.0

}

direction=from\_client\_to\_server

arrayLen=0

path=/DataWrittenByClient/Scalars/

}

}

## FORMATO DE SCRIPT #2 PARA COMUNICACIÓN OPC

OPAL-1.0 Object

```
List<SyncExchangerConnections> {
```

```
  item {
```

```
    configFile=OPC_UA_Server_cfg.opal
```

```
    id {
```

```
      OPCUAServer
```

```
    }
```

```
    outputs {
```

```
      item {
```

```
        dataInExchanger=/DataReadByClient/Scalars/DataReadByClient_00[0]
```

```
        dataInProcess=OpOutput:PG1[0]
```

```
      }
```

```
    }
```

```
    inputs {
```

```
      item {
```

```
        dataInExchanger=/DataWrittenByClient/Scalars/DataWrittenByClient_00[0]
```

```
        dataInProcess=OpInput:BINF[0]
```

```
      }
```

```
    }
```