

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DE UN SIMULADOR
PARA EL ENTRENAMIENTO DE OPERADORES DE
CENTRALES ELÉCTRICAS”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD CON ESPECIALIZACIÓN EN
POTENCIA**

PAMELA RAQUEL RODRÍGUEZ SÁNCHEZ
SEBASTIAN ISRAEL SEGOVIA ORTEGA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, el Ing. Gabriel Rodríguez y la Tnlga. Clelia Sánchez por haber sido fuente de amor durante todo este recorrido, a mi familia por haber estado prestos a ayudar, y, a mi mentor el Ing. Edmundo Mendoza quien supo guiarme en cada paso de mi experiencia profesional y estudiantil, para hacer de mí una ingeniera de calidad. Dedico también este trabajo a todos mis amigos que fueron apoyo durante la carrera estudiantil, a mi abuelita Rosario quien siempre quiso verme ingeniera y a mi compañero de tesis Israel, por ser equipo durante el desarrollo de este proyecto.

Pamela Raquel Rodríguez Sánchez

Agradezco a Dios por haberme bendecido la vida y darme unos padres maravillosos, Lic. Narcisa Ortega y Lic. Ángel Segovia que se convirtieron en mis pilares durante este proceso de crecimiento profesional, ser mis guías, hoy cumple un sueño más. A mis familiares, y amigos por darme aliento y extenderme la mano siempre cuando lo necesite, por todo este tiempo juntos de apoyo.

Sebastián Israel Segovia Ortega

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por permitirnos llegar hasta este momento de nuestras vidas, culminar uno de nuestros sueños, logros y metas de nuestras vidas. A nuestro docente de materia integradora Ing. Fernando Vaca, nuestro tutor Ing. Johnny Rengifo por ser guía de la elaboración de este proyecto, Ph.D. Sixifo Falcones por la ayuda brindada, Al Ing. Jonathan Zurita por extender su mano cuando lo requerimos.

Agradezco a Dios, a mis padres y maestros, quienes me inculcaron valores como el respeto y la perseverancia, agradezco al sistema por haberme permitido la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa universidad, agradezco a todos quienes me animaron en mis momentos de desacuerdo, pero sobre todo agradezco a quienes me dijeron que esto no sería posible, fueron mi fuente de inspiración. PRRS

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Pamela Raquel Rodríguez Sánchez y Sebastián Israel Segovia Ortega* 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"

Pamela Raquel Rodríguez Sánchez

Sebastián Israel Segovia Ortega

EVALUADORES

Ing. Fernando Vaca

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Johnny Rengifo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto busca solucionar el actual déficit de una herramienta de entrenamiento para operadores de una central eléctrica, cuya carencia da lugar a posibles errores de maniobra. El objetivo general es desarrollar la arquitectura de un simulador para el entrenamiento de operadores de centrales de generación hidroeléctrica, para esto se implementa el modelo matemático de una central hidroeléctrica mediante el uso de Simulink de Matlab; se diseña una interfaz gráfica de control que permita la representación de una serie de datos en diferentes condiciones para el entrenamiento; se comunica la interfaz gráfica de control con el modelo matemático simulado, a través del servidor Opal RT y finalmente se elabora un manual de entrenamiento para operadores, basado en el simulador creado. El resultado que se espera de este proyecto permitirá reducir el tiempo de aprendizaje de un operador, en un ambiente seguro y controlado sin interferir con las operaciones normales de la empresa.

Se utilizó la herramienta Simulink de Matlab, NI LabVIEW y Opal RT. Se elaboró el modelo matemático de una central eléctrica mediante Simulink, se declararon las variables a través de Notepad, se diseñó la interfaz de entrenamiento en LabVIEW, se comunicó el modelo con la interfaz mediante Opal RT y se elaboró la guía para entrenamiento.

Los resultados obtenidos fueron un software para el entrenamiento de operadores de una central formada por cuatro generadores síncronos conectados a una subestación de configuración doble barra, la cual permite conectarse con una carga aislada y con el Sistema Nacional Interconectado. Además, la guía de entrenamiento que presenta al operador varios ejercicios para ejecutarlos en el simulador.

La utilización de software especializado permitió implementar el modelo matemático de una central e interactuar con él a través de un SCADA elaborado en NI LabVIEW cuya comunicación fue realizada mediante el servidor Opal RT.

Palabras Clave: Simulador, entrenamiento de operadores, Opal RT

ABSTRACT

This project seeks to solve the current deficit of a training tool for operators of a power plant, whose attention gives rise to possible maneuver errors. The general objective is to develop the architecture of a simulator for the training of operators of hydroelectric power plants, for this the mathematical model of a hydroelectric power plant is implemented through the use of Simulink by Matlab; a graphic control interface is designed that allows the representation of a series of data in different conditions for training; the graphic control interface is communicated with the simulated mathematical model, through the Opal RT server and finally an operator training manual is developed, based on the simulator created. The expected result of this project reduces operator learning time, in a safe and controlled environment without interfering with the company's normal operations.

The Simulink tool of Matlab, NI LabVIEW and Opal RT was used. The mathematical model of a power plant was developed using Simulink, the variables were declared through Notepad, the training interface was designed in LabVIEW, the model was communicated with the interface via Opal RT and the training guide was developed.

The results obtained were a software for the training of operators of a plant formed by four synchronous generators connected to a double bar configuration substation, which allows it to be connected with an isolated load and with the National Interconnected System. In addition, the training guide that presents the operator with several exercises to execute in the simulator.

The use of specialized software will implement the mathematical model of a plant and interact with it through a SCADA developed in NI LabVIEW whose communication was made through the Opal RT server.

Keywords: Simulator, operator training, Opal RT

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4.1. Proceso de generación eléctrica.....	5
1.4.2. Elementos que forman parte de la central.....	5
1.4.2.1. Turbina.....	5
1.4.2.2. Servomotor.....	6
1.4.2.3. Gobernador	7
1.4.2.4. Transformador.....	8
1.4.2.5. Sistema de excitación	9
1.4.4. OPAL-RT	10
CAPÍTULO 2	12
2. Metodología	12
2.1.1 Generador síncrono:.....	12
2.1.2 Turbina y gobernador	13
2.1.3 Sistema de excitación.....	13
2.1.4 Transformador elevador	14
2.1.5 Configuración de la central y subestación	14

2.2.1. Presentación	16
2.2.2. Emergencia.....	16
2.2.3. Central Hidroeléctrica	17
2.2.4. Generadores	18
2.2.5. Fallas.....	18
3. RESULTADOS	22
CAPÍTULO 4	28
4. Conclusiones y recomendaciones	28
Bibliografía.....	30

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

SNI Sistema Nacional Interconectado

SCADA Supervisión ,Control y Adquisición de Datos (por sus siglas en inglés
Supervisory Control And Data Acquisition)

OPC OLE for Process Control

SIMBOLOGÍA

MW Megavatio

GWh Gigavatio-hora

RPM Revoluciones por minuto

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Figura 1.2 Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente [1].....	1
Figura 1.3	Modelo matemático de la turbina.	5
Figura 1.4	Modelo matemático del servomotor	6
Figura 1.5	Modelo matemático del control de caída.....	8
Figura 1.6	Esquema del sistema SCADA.....	10
Figura 2. 1	Configuración doble barra.....	11
Figura 2. 2	Modelo matemático de la central y subestación	15
Figura 2. 3	Presentación de SCADA.....	16
Figura 2. 4	Pantalla de Emergencia.....	17
Figura 2. 5	Diagrama unifilar de la central	17
Figura 2. 6	Pantalla de generadores, SCADA	18
Figura 2. 7	Entorno de simulación de fallas.....	19
Figura 2. 8	Modelo de Matlab fragmentdo en subsistemas	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Parametrización del generador síncrono.....	12
Tabla 2. 2 Parametrización de turbina, gobernador y servomotor.....	13
Tabla 2. 3 Parametrización de sistema de excitación	13
Tabla 2. 4 Parámetros del transformador	14

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador se tiene una capacidad de generación eléctrica de 8.676,89 MW de potencia nominal y 8.062,58 MW de potencia efectiva, de los cuales 5.036,43 MW proceden de centrales hidroeléctricas, esto corresponde a un 63% de la generación total del país de acuerdo a datos tomados de estadísticas del año 2018.

En el año 2018 se contó con la participación de 49 empresas generadoras para obtener una producción total de 22.943,70 GWh, en donde predomina el grupo hidroeléctrico con el 81.58% correspondiente a 18.717,33 GWh.

A continuación, se expone una tabla en donde se aprecia la potencia nominal y efectiva, clasificada por tipo de fuente, en Ecuador en el año en 2018.

Tipo Fuente	Tipo de Central	Tipo de Unidad	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva		
			(MW)	%		
Renovable	Hidráulica	Hidráulica	5.066,40	5.036,43	62,58	
	Biomasa	Turbovapor	144,30	136,40	1,69	
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	27,63	26,74	0,33	
	Eólica	Eólica	21,15	21,15	0,26	
	Biogás	MCI	7,26	6,50	0,08	
Total Renovable			5.266,74	5.227,22	64,95	
No Renovable	Térmica	MCI	2.011,44	1.613,60	20,05	
		Turbogás	921,85	775,55	9,64	
		Turbovapor	461,87	431,74	5,36	
Total No Renovable			3.395,15	2.820,89	35,05	
Total general			8.661,90	8.048,11	100,00	

Figura 1.1 Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente [1]

La **Figura 1.1** muestra la potencia nominal y potencia efectiva a nivel nacional, por tipo de fuente energética; la potencia nominal hace referencia al valor para el cuál fue diseñada la central, en cambio la potencia efectiva es el valor real que la central puede entregar en su eficiencia máxima; en este caso es visible que de entre las centrales que generan con fuentes de energía renovable destaca la capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas que representa el 96.2%.

Las centrales hidroeléctricas se encuentran localizadas en la región interandina en nueve provincias, en la región costa en dos provincias y en el oriente en cuatro

provincias. La mayor concentración de potencia nominal se encuentra en la provincia del Azuay en donde se encuentra ubicado el complejo Hidroeléctrico Paute Integral conformado por las centrales: Molino que genera 4.614,25 GWh, Sopladora que produce 2.199,89 GWh y Mazar que genera 713.71 GWh, a continuación, Napo con la central Coca Codo Sinclair de la Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair que contribuye al SNI con 5.913,82 GWh; en tercer lugar, la provincia de Tungurahua con las centrales San Francisco, Agoyán, Topo y Pucará, aportando al SNI un total de 2.591,9 GWh.

El recurso hídrico es por tanto crucial en el sistema de generación de energía eléctrica en nuestro país, es además un recurso renovable y el costo de operación de una central de este tipo es reducido en comparación con otro tipo de centrales que usan recursos de energía secundaria como son las térmicas. La carga ambiental que produce una central hidroeléctrica en su operación podría decirse que es nula, en consecuencia, es un tipo de generación limpia y amigable con el medio ambiente.

La energía eléctrica generada a través de centrales eléctricas es llevada hasta el punto de consumo por medio de redes y sistemas robustos que deben cumplir índices de calidad, confiabilidad, estabilidad y seguridad para la continuidad del suministro energético; esto se logra mediante un grupo de ingenieros que trabajan desde cada punto de generación controlando la cantidad de energía que se suministra a la red, a este personal se lo conoce como operadores de una central.

1.1. Descripción del problema

Actualmente el operador aprendiz no cuenta con una herramienta de entrenamiento para operar una central hidroeléctrica, por cuanto existe la probabilidad de que existan malas maniobras y errores humanos al momento de operar la central en tiempo real.

Los operadores más antiguos imparten conocimientos a los operadores aprendices, lo cual tiene un costo significativo si se analiza desde el punto de vista que considera que el operador antiguo descuida su trabajo para cumplir una función originalmente fuera de sus actividades, que es la de docente, más aun, descartando este inconveniente, durante el tiempo que el operador novato aprende es probable que no ocurran todas las posibles situaciones que

existen en una central hidroeléctrica. Cuando el operador ya se encuentre controlando sólo la central su tiempo de respuesta será lento o nulo en caso de haber un evento no practicado previamente o en el peor de los casos podrá ocasionar eventos cuando la central se encuentre en condiciones normales de operación.

Estos eventos tienen la capacidad de ocasionar daños en los equipos de la central hidroeléctrica, lo cual representa costos económicos para la empresa, más aún debido al tiempo que se debe paralizar las máquinas para hacer mantenimiento o reposición de los equipos dañados. Además, al estar la central interconectada con un sistema energético los problemas ocasionados por una mala maniobra afectan estentóreamente a los beneficiarios del suministro de energía eléctrica cubierto por dicha central, así por ejemplo, dependiendo de la gravedad del asunto pueden haber problemas como la desconexión de grandes ciudades, colapso de vías, pérdidas millonarias en industrias, pérdidas humanas en hospitales e incluido a nivel social un gran descontento por los efectos ocasionados por un apagón energético.

1.2. Justificación del problema

La manera en que actualmente se entrena a los operadores de centrales eléctricas es útil y ha funcionado durante muchos años, sin embargo, puede ser mejorada para que sea eficiente. Reducir el tiempo de aprendizaje de un operador permite administrar los recursos de manera efectiva ya que el tiempo que un operador antiguo le dedique al operador nuevo para su aprendizaje va a ser menor comparando con el que al presente existe, permitiendo que el primero realice su trabajo con menos presión y tenga menos asignaciones mientras el operador aprendiz se está preparando en el simulador desarrollado en este proyecto. Varios estudios han demostrado que la curva de aprendizaje se acelera cuando se enseñan habilidades técnicas a través de la simulación, en pregrado, especialización e incluso para la formación continua. [2] en ese sentido el desarrollo de este proyecto busca generar software que simula el sistema de monitoreo de la central eléctrica, que le permite al operador aprendiz correr simulaciones de posibles escenarios reales, para los cuales debe estar preparado,

ayudándolo a explorar, comprender y reaccionar física y psicológicamente en una situación real similar.

El resultado que se espera de este proyecto le da al operador la oportunidad de tener una visión más amplia de procesos y conceptos que en el mundo real no convendría que sean observados directamente debido a que implica riesgos para el personal. El operador podrá aprender en un ambiente seguro y controlado donde el error no tiene consecuencias reales, para dominar su área de adiestramiento sin interferir con las operaciones normales de la empresa ya que todo esto será realizado dentro de una computadora. Será útil además para que pueda identificar errores ocurridos durante la situación simulada, analizar el por qué y corregirlo, con la ventaja de que todos estos conocimientos son transferibles a la realidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar la arquitectura de un simulador para el entrenamiento de operadores de centrales de generación hidroeléctrica.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Implementar el modelo matemático de una central hidroeléctrica típica mediante el uso de Simulink de Matlab.
2. Diseñar una interfaz gráfica de control que permita la representación de una serie de datos en diferentes condiciones para el entrenamiento, que controle el sistema en Simulink.
3. Comunicar la interfaz gráfica de control con el modelo matemático simulado, a través del servidor Opal RT.
4. Elaborar un manual de entrenamiento para operadores, basado en el simulador creado.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Proceso de generación eléctrica

El proceso de generación de energía eléctrica en una central se origina desde una gran cantidad de agua acumulada en un embalse localizado a una altura considerable, que dependerá del tipo de la turbina a utilizar. El túnel de conducción conecta el embalse con la turbina, pasando el agua a presión para transformar la energía potencial del agua en energía cinética, la misma que al rotar la turbina se transforma en energía mecánica. La turbina al rotar en medio del estator del generador corta las líneas de campo magnético dando como resultado la inducción de una corriente en el devanado estatórico, que posteriormente será conectado al Sistema Nacional Interconectado para suministrar energía eléctrica.

1.4.2. Elementos que forman parte de la central

1.4.2.1. Turbina

Una turbina es un dispositivo mecánico rotacional capaz de transformar energía hidráulica en energía mecánica a través de un intercambio realizado por el agua que fluye a través de espacios existentes en ella, formados entre los **álabes**, y, la impulsa para que gire alrededor de su eje de simetría.

La turbina utilizada en este proyecto obedece al siguiente modelo no lineal:

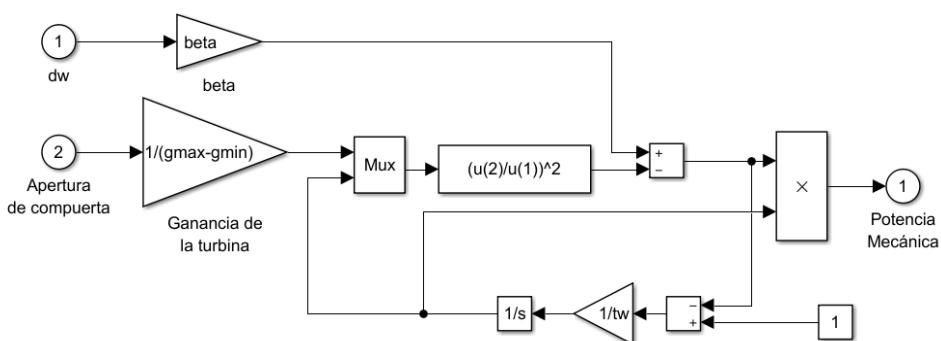


Figura 1.2 Modelo matemático de la turbina.

Donde:

beta: coeficiente de amortiguación de desviación de velocidad,

gmax: es el límite máximo de apertura de la compuerta,

gmin: es el límite mínimo de apertura de la compuerta,

tw: es el tiempo, con apertura de compuerta instantánea para acelerar la columna de agua de cero a una velocidad diferente,

dw: desviación de velocidad respecto a la referencia,

Apertura de la compuerta: el porcentaje de apertura de la compuerta.

La **Figura 1.2** muestra el modelo matemático de la turbina utilizada en este proyecto, de tal manera que la potencia mecánica a la salida de la turbina es función de la apertura de la compuerta y de la diferencia de velocidad, esta diferencia se calcula de comparar la referencia y la velocidad actual de la turbina mediante un bloque de realimentación externo.

1.4.2.2. Servomotor

La regulación de potencia se realiza a través de la variación del caudal que ingresa a la turbina, y esto es mediante la variación de la apertura de la válvula, realizada por orden del servomotor el cual tiene un sistema de segundo orden tal y como se lo muestra a continuación:

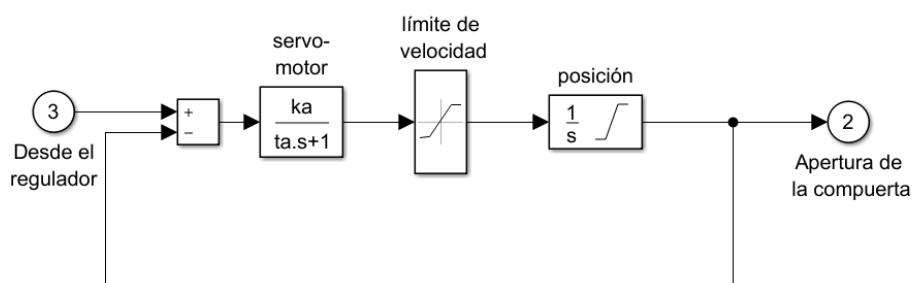


Figura 1.3 Modelo matemático del servomotor

Donde:

ka: ganancia del servomotor,

ta: constante de tiempo del servomotor en segundos,

Límite de velocidad: entre vgmax y vgmin hace referencia a las velocidades entre la velocidad máxima de apertura, y la velocidad mínima de apertura, en pu/s.

La **Figura 1.3** muestra el modelo matemático del servomotor, el cual recibe la señal del gobernador también llamado regulador. Su modelo tiene una retroalimentación que compara la apertura actual con la referencia dada por el regulador, también depende de las condiciones físicas constructivas del sistema, es así que depende en gran parte de las velocidades de apertura máxima y mínima y de la capacidad de apertura máxima y mínima.

1.4.2.3. Gobernador

El gobernador es un dispositivo cuya función es mantener la velocidad en la que opera el generador, independientemente de la carga que tenga conectada a él.

El sistema de control no tiene partes móviles, está formado por dispositivos electrónicos que comandan a los servomotores que mueven los alabes y la aguja de los inyectores. La velocidad está determinada por la referencia, en este caso es calculada de la siguiente manera:

$$n_s = 120 \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

Donde:

n_s : Velocidad síncrona de la máquina (RPM),

f : Frecuencia de operación del sistema (Hz)

p : número de polos de la máquina.

De tal forma que, si la máquina tiene 2 polos como en el caso de este proyecto, la velocidad de rotación, a una frecuencia de 60 Hercios sería de 3600 revoluciones por minuto. La referencia de velocidad del gobernador se cambia por retroalimentación desde la posición de la salida del gobernador.

El control que realiza el gobernador se llama de caída permanente, que permite que la cantidad de potencia utilizada se modifique de acuerdo con la variación de la carga. Esta función del regulador reduce la velocidad de referencia del regulador a medida que disminuye la carga.

Cuanto mayor sea la caída, menos sensible será la carga del generador a la configuración de velocidad. Sin embargo, la caída excesiva presenta la

posibilidad de exceso de velocidad si el generador se desconecta del sistema y queda en vacío. En la mayoría de los casos, el 4% de caída es adecuado para proporcionar estabilidad y también para permitir una carga precisa del generador. [3]

El modelo matemático utilizado en este trabajo es el siguiente:

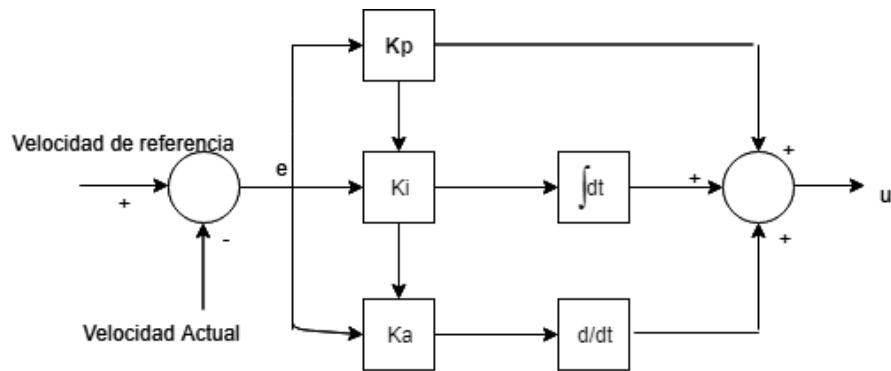


Figura 1.4 Modelo matemático del control de caída.

Donde:

Kp: Constante de proporcionalidad,

Kd: Constante de derivación,

Ki: Constante de integración.

1.4.2.4. Transformador

El transformador de potencia que se utiliza en este proyecto es de dos devanados, elevador de 13.8 a 230 kilovoltios, con el tipo de conexión Yg-Yg.

Se utiliza este nivel de voltaje en el primario debido a que en Ecuador se genera a este nivel, en el secundario es porque en el SNI tiene su anillo de transmisión operando a 230KV.

La conexión Yg tiene la ventaja de que sobre la bobina de cada fase se aplica un menor nivel de voltaje del que fuera si estuviera conectado en delta, en un factor de raíz de tres, lo cual repercute positivamente sobre la economía, debido a que se requiere un menor aislamiento en las bobinas. Una conexión sólida a tierra, del neutro del transformador, permite que a través de esta conexión fluyan las corrientes de terceros armónicos en lugar de crear

sobrevoltajes, además es un camino de corriente para los desequilibrios de la carga en caso de haber. [4]

1.4.2.5. Sistema de excitación

La función de la excitatriz es suministrar tensión y corriente continua al rotor del generador síncrono para generar el campo magnético necesario y regularlo, de esta manera se hace el control de factor de potencia de la máquina para que entregue o consuma reactivos manteniendo un voltaje constante e igual a un valor de referencia dado.

La tensión terminal en el generador se convierte en la entrada de la excitatriz y su salida es la tensión de campo lo cual es dirigida al rotor para así con el movimiento de este, induzca un voltaje terminal en el estator del generador.

1.4.2.6. Generador síncrono:

Se utilizó un generador síncrono de polos salientes cuyo modelo matemático de la parte eléctrica está dado en sexto orden. Se han especificado parámetros respecto a los devanados de campo, del amortiguador, y la relación estator-campo.

1.4.3. Sistema SCADA

Es un sistema de supervisión y adquisición de datos en cuyo entorno gráfico permite al usuario interactuar e inspeccionar la planta. Se hace el control y adquisición de datos desde una estación central que hace de Maestra y lo transfiere a varias unidades remotas. Este sistema utiliza automatización mediante la cual es posible encontrar métodos para que la planta responda más rápido y de manera eficaz, para lograr eficiencia en el servicio y rentabilidad.

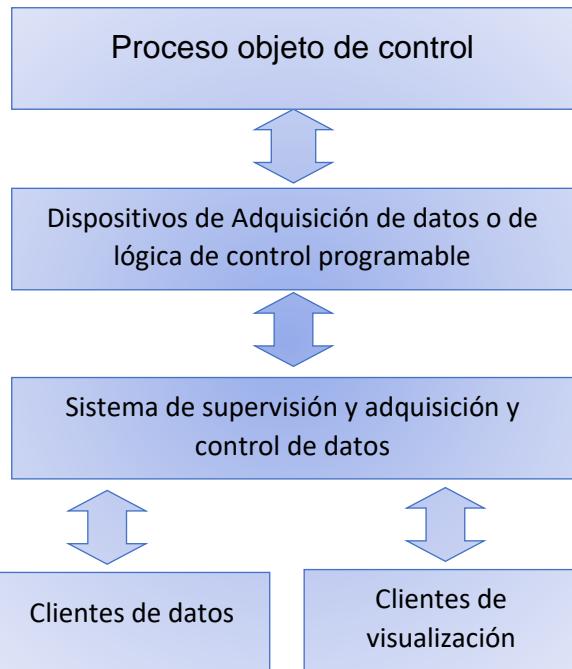


Figura 1.5 Esquema del sistema SCADA

La *Figura 1.6* muestra el sistema SCADA y cómo este permite interactuar a los visualizadores, con los controladores y los procesos controlados. Un operador es el encargado de la supervisión es quien toma la decisión en las operaciones que se estén realizando en el sistema.

1.4.4. OPAL-RT

Es un equipo que permite simular en tiempo real los distintos modelos de sistemas de potencia, admite además conectar protecciones, relés y controladores que están ligadas a sistemas eléctricos grandes sin ponerlos en riesgo. Hace posible la comunicación entre Simulink y LabVIEW mediante un método denominado Hardward in the Loop. Al ser un procesador de varios núcleos realiza las simulaciones en tiempo real, es decir que el tiempo de simulación es idéntico al tiempo en que se realizó la simulación, no siendo así si es que sólo se utiliza Simulink

1.4.4.1. OPC Server

OPC es un esquema de comunicación que se basa en el uso de una tecnología Microsoft, hace factible que varios componentes de software interactúen y compartan datos mediante una interfaz común proporcionada por OPC.

Servidor OPC realiza la función de interfaz de tal forma que comunica datos mediante el uso de protocolos con clientes OPC y un tipo de comunicación bilateral por medio del OPC.

1.4.4.2. Software in the loop

Es un componente que se encarga de probar las funciones de control en tiempo real, mostrando la respuesta del controlador sobre modelos en computadora.

Este Software reemplaza el uso de la arquitectura física presente por una simulación.

1.4.5. Subestaciones eléctricas

1.4.5.1. Subestación con configuración doble barra

Una subestación con esta configuración utiliza dos barras principales y cada circuito tiene posibilidad de conectarse a cualquiera de las barras.

Un disyuntor de acoplamiento permite conectar ambas barras entre sí, con lo cual es posible transferir un circuito de una a otra barra sin interrumpir el servicio, además los circuitos se pueden conectar a ambas barras si el disyuntor de acople está cerrado, a una sola barra o estar distribuidos entre ambas barras.

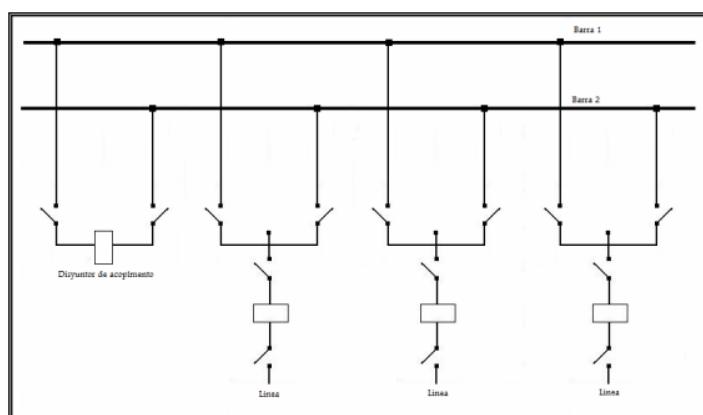


Figura 2. 1 Configuración doble barra

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Se realizó el modelo matemático en Matlab para una central de cuatro unidades de generación, sincronizada al sistema interconectado mediante una subestación de tipo doble barra a la cual también se conecta una carga pasiva. Se diseñó una interfaz gráfica para controlar el modelo matemático apoyados en el software LabVIEW, y se realizó la comunicación entre el SCADA y el modelo de la planta a través de OPAL-RT mediante el uso de Software in te loop.

2.1. Modelo matemático de la central

Se realizó el modelo matemático de la central a través de Simulink, considerando datos típicos para la parametrización de los elementos. Cada unidad de generación cuenta con un sistema de turbina y gobernador, un sistema de excitación, un transformador elevador y dos interruptores de potencia para conexión con el sistema, los datos que se utilizaron se detallan a continuación:

2.1.1 Generador síncrono:

Se utilizó un generador síncrono de polos salientes, con dos polos y con los siguientes parámetros en su configuración:

Tabla 2. 1 Parametrización del generador síncrono

Parámetro	Nomenclatura	Unidad (SI)	Magnitud
Potencia nominal	Pn	VA	100e6
Voltaje de línea a línea	Vn	Vrms	13800
Frecuencia	Fn	Hz	60
Reactancia de eje directo	Xd	pu	1.305
Reactancia de eje directo síncrona	Xd'	pu	0.296
Reactancia de eje directo sub síncrona	Xd"	pu	0.252
Reactancia de cuadratura	Xq	pu	0.474
Reactancia cuadratura subsíncrona	Xq"	pu	0.243
Reactancia de dispersión	Xl	pu	0.18

2.1.2 Turbina y gobernador

Para la turbina y gobernador se utilizó el bloque de Simulink de la librería Simscape llamado Hydraulic Turbine and Governor, con los siguientes parámetros:

Tabla 2. 2 Parametrización de turbina, gobernador y servomotor.

Parámetro	Nomenclatura	Unidad (SI)	Magnitud
Ganancia del servomotor	Ka	-	10/3
Constante de tiempo del servomotor	Ta	s	0.07
Límite de apertura máximo de la válvula	gmin	pu	0.01
Límite de apertura mínimo de la válvula	gmax	pu	0.97518
Velocidad máxima de apertura de la válvula	vgmin	pu/s	0.1
Velocidad mínima de apertura de la válvula	vgmax	pu/s	-0.1
Ganancia estática del gobernador	1/R	-	1/0.05
Ganancia proporcional del PID	Kp	-	1.163
Ganancia integradora del PID	Ki	-	0.105
Ganancia derivativa del PID	Kd	-	0
Constante de tiempo del filtro pasa baja.	Td	s	0.01
El coeficiente de amortiguación de desviación de velocidad	beta	-l	0
Tiempo de inicio de la salida de agua	Tw	s	2.67

2.1.3 Sistema de excitación

Para esto, aprovechando la facilidad de Simulink se utilizó el bloque de la librería Simscape denominado Excitation System, con los siguientes valores:

Tabla 2. 3 Parametrización de sistema de excitación

Parámetro	Nomenclatura	Unidad (SI)	Magnitud
Potencia nominal	Pn	VA	100e6
Voltaje de línea a línea	Vn	Vrms	13800
Frecuencia	Fn	Hz	60
Reactancia de eje directo	Xd	pu	1.305
Reactancia de eje directo síncrona	Xd'	pu	0.296
Reactancia de eje directo sub síncrona	Xd"	pu	0.252
Reactancia de cuadratura	Xq	pu	0.474

Reactancia cuadratura subsíncrona	Xq"	pu	0.243
Reactancia de dispersión	Xi	pu	0.18

2.1.4 Transformador elevador

El transformador fue parametrizado con los siguientes datos:

Tabla 2. 4 Parámetros del transformador

Parámetro	Nomenclatura	Unidad (SI)	Magnitud
Potencia nominal	Pn	VA	210e6
Voltaje de línea a línea	Vn	Vrms	13800
Frecuencia	Fn	Hz	60
Reactancia de eje directo	Xd	pu	1.305
Reactancia de eje directo síncrona	Xd'	pu	0.296
Reactancia de eje directo sub síncrona	Xd''	pu	0.252
Reactancia de cuadratura	Xq	pu	0.474
Reactancia cuadratura subsíncrona	Xq"	pu	0.243
Reactancia de dispersión	Xi	pu	0.18

2.1.5 Configuración de la central y subestación

Las unidades de generación fueron conectadas en paralelo, a una subestación doble barra a través de dos disyuntores trifásicos, uno para cada barra. Así mismo la subestación tiene un disyuntor de acople que permite que ambas barras se pongan al mismo nivel de voltaje, el sistema interconectado fue simulado mediante el bloque Three-Phase Source de la librería de Simscape, configurado con una conexión en estrella aterrizada, operando a 230KV, 60 Hertz y actuando como barra de oscilación para el sistema.

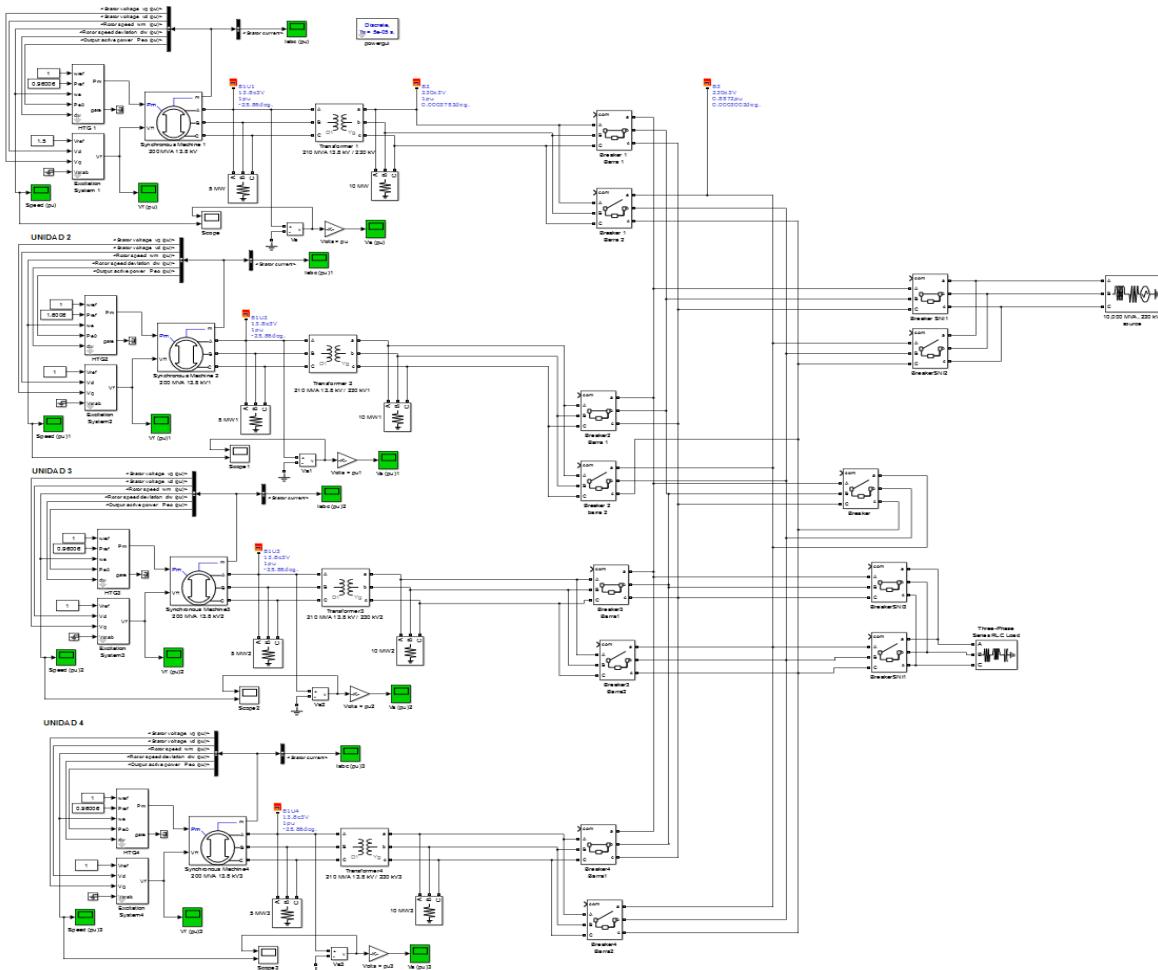


Figura 2. 2 Modelo matemático de la central y subestación
La Figura 2. 2! Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra la central implementada en Simulink, las resistencias que se observan conectadas en paralelo entre el generador y el transformador son resistencias parásitas para que el sistema pueda correr flujo de potencia y de esta manera se inicialicen los valores de las máquinas antes de empezar la simulación con el SCADA.

2.2. Arquitectura del SCADA

Se desarrolló la arquitectura del SCADA mediante el uso de LabVIEW, se elaboraron pantallas en donde el operador puede interactuar con el modelo matemático mediante botones virtuales siendo amigable y de fácil acceso y comprensión en la pantalla de LabVIEW.

En la pantalla se diseñaron las siguientes pestañas:

- Presentación

- Emergencia
- Central Eléctrica
- Generadores
- Fallas

2.2.1. Presentación

Se visualiza la información general del proyecto y nombre de los integrantes.



Figura 2. 3 Presentación de SCADA

2.2.2. Emergencia

El operador mediante esta ventana tendrá acceso al paro de emergencia, una vez presionado este botón, antes de la reposición de la planta deberá verificar el estado del sistema hidráulico, sistema de refrigeración y apertura de válvula de entrada.

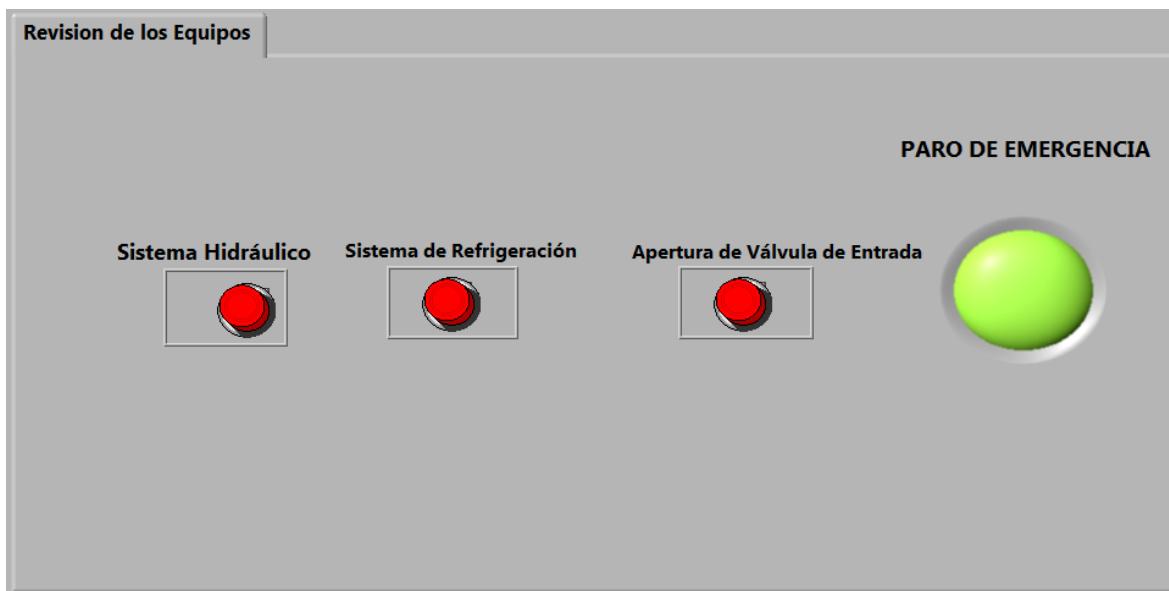


Figura 2. 4 Pantalla de Emergencia

2.2.3. Central Hidroeléctrica

El operador en esta ventana podrá visualizar el sistema ver los valores de voltaje y corriente por cada circuito que forme el sistema.

Tiene la opción de que el operador opere los breaker, desconectar y conectar cargas, y conectarse o desconectarse del SNI

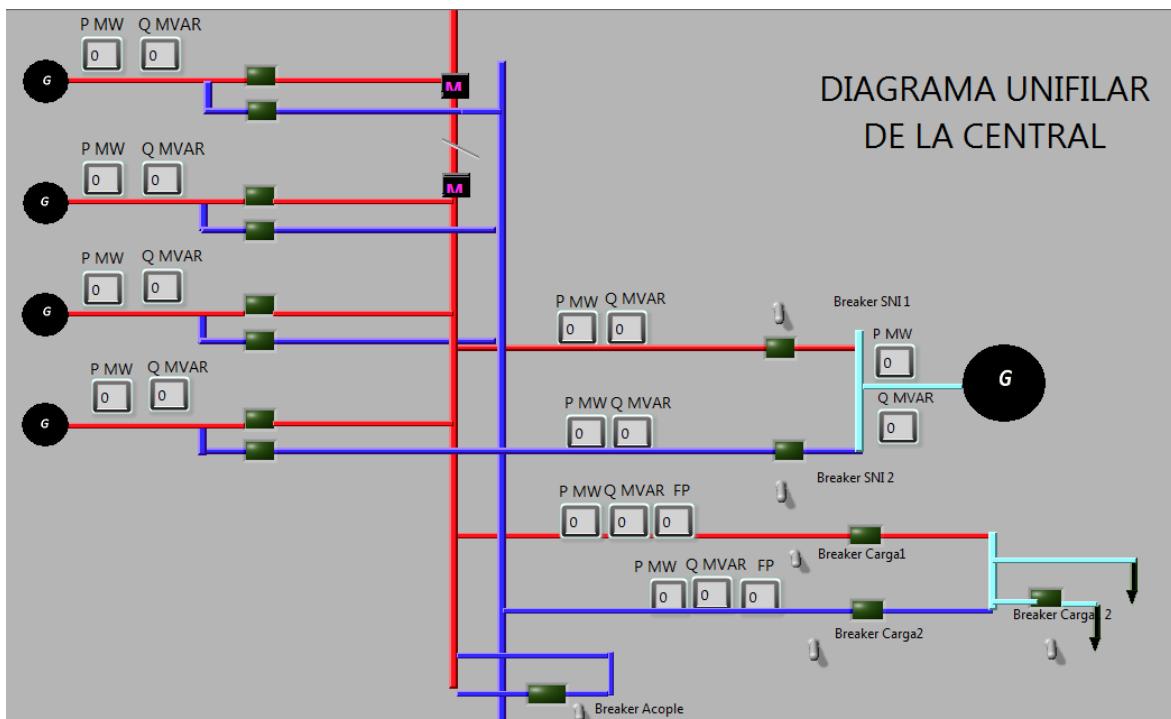


Figura 2. 5 Diagrama unifilar de la central

2.2.4. Generadores

En esta ventana el operador puede conectar y desconectar los generadores, además de hacer transferencia a la barra 1 o barra 2 a los cuatro generadores que forman parte de sistema.

Además podrá visualizar las corrientes (A) de las diferentes fases y voltajes (V) de las diferentes fases y su respectiva grafica de Voltaje Vs Tiempo y la potencia (MW).

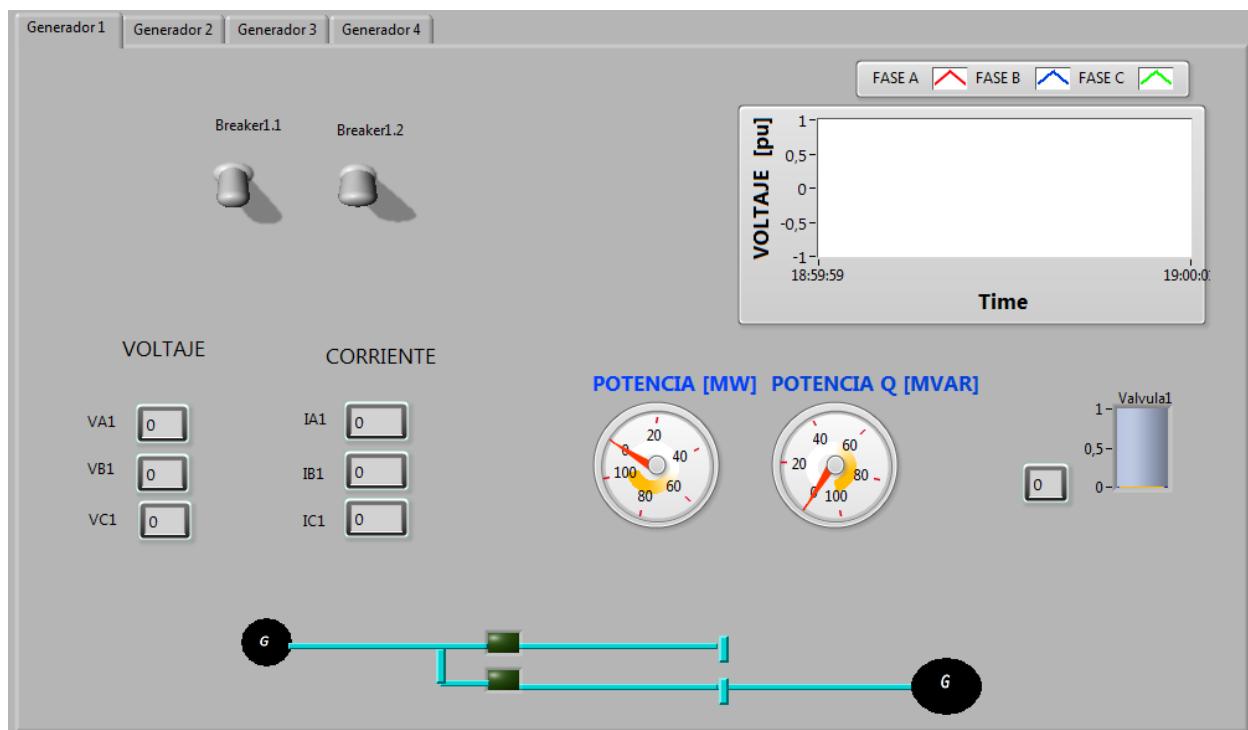


Figura 2. 6 Pantalla de generadores, SCADA

2.2.5. Fallas

En esta ventana el operador puede simular cualquier tipo de falla ya sea monofásica, bifásica o trifásica.

Si el botón se encuentra en verde quiere decir que no está activada la falla, si el botón está de color rojo quiere decir que la falla se encuentra activada.

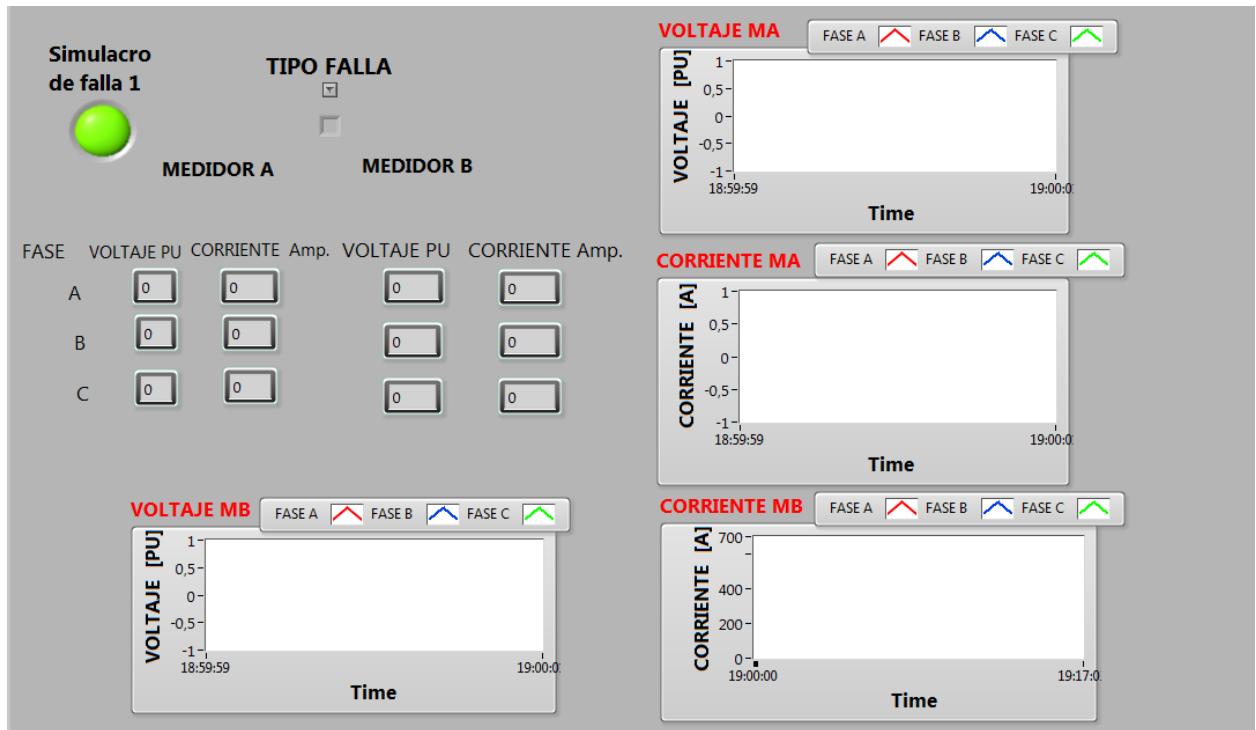


Figura 2. 7 Entorno de simulación de fallas

2.3. Esquema del sistema para simulación en tiempo real

Para la simulación en tiempo real se realizó un esquema para que el sistema pueda compilar. Se realizo acorde la guia de RT-LAB especifica de como lee el sistema elaborado en simulink.

Es importante que el sistema se encuentre clasificado en varios tipos de subsistemas, ya que el software RT-LAB solo lee subsistemas para poder leer analizar y así compilar. Estos subsistemas se clasifican en: Subsistema de cómputo, y subsistema de interfaz.

El subsistema de computo es el encargado de agrupar elementos del sistema para la comunicación con el Opal, salidas analógicas como (barras ,generadores, interruptores, transformadores y cargas), el nombre de este subsistema debe ser tipeado de la siguiente forma : SM_CualquierNombre, en nuestro proyecto se llama SM_MODELO, si se requiere agregar un subsistema de computo adicional se lo agrega con el siguiente nombre SS_CualquierNombre, en nuestro proyecto tenemos adicional SS_CALCULOS y SS_CALRMS.

El subsistema de interfaz es el que permite la interacción con los subsistemas de computo, este subsistema debe nombrarse esta forma SC_CUALQUIER NOMBRE, en nuestro proyecto se lo nombró SC_INTERFAZ, este subsistema contiene constantes, switches, y scopes.

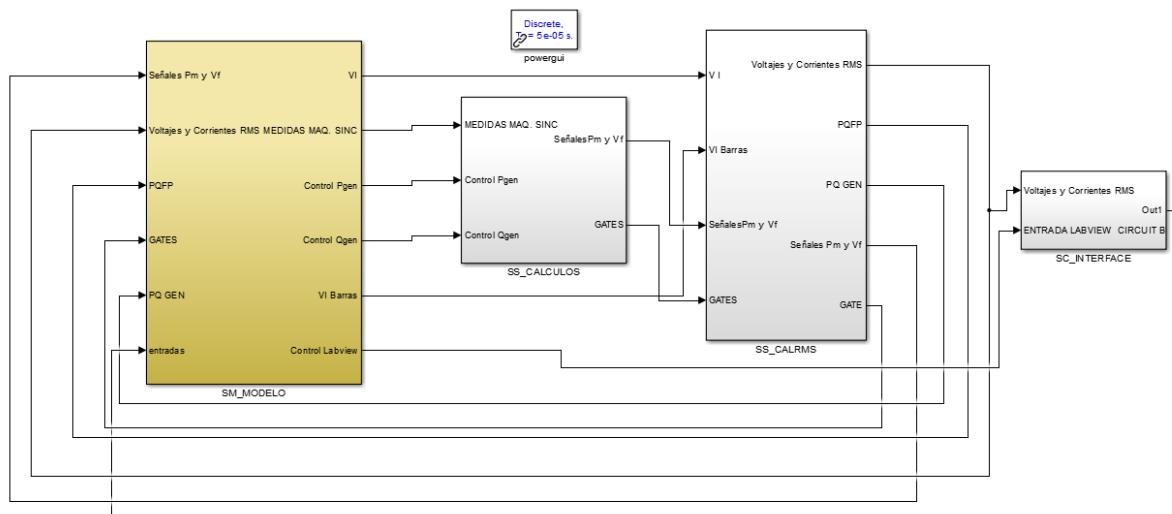


Figura 2. 8 Modelo de Matlab fragmentado en subsistemas

2.4. Bloques de RT-Lab Simulink

En nuestros subsistemas que creamos en este proyecto contamos con los bloques que la librería de RT-LAB SIMULINK nos facilita para la comunicación, estos bloques son: 'OpComm', 'OpMonitor' y 'OpComputer'.

El bloque ‘Opcomm’ es el encargado responsable de comunicar entre los subsistemas de interfaz y los subsistemas de computo. Este bloque siempre va en las entradas de cada subsistema de computo e interfaz, sen nuestro modelado tenemos varios subsistemas de cómputo por lo tanto utilizamos varios OpComm.

El bloque ‘OpOutput’: Este bloque se utiliza para enviar desde Simulink con el servidor OPC a labVIEW los datos. Estos bloques deben tener el mismo nombre con el archivo de configuración del servidor Opal para la identificación de los datos.

El bloque ‘OpInput’ Este bloque se utiliza para recibir desde el Simulink con el servidor OPC a labVIEW los datos y así mismo deben tener el mismo

nombre con el archivo de configuración del servidor Opal para la identificación de los datos.

En el momento que los bloques ya tienen su respectiva configuración, se elaboró los archivos de configuración que son connections opal y OPC_UA_Server_cfg.opal.

Los bloques que utilizamos para la comunicación del OPC son connect.vi , Read.vi ,y Write.vi.

Connect.vi es el encargado de la comunicación con el OPC UA, donde contiene entradas y una salida, como entradas tiene al server endpoint URL donde en esta se escribió la dirección IP del servidor y la segunda es la que se encarga de validar certificados, pero en este no se requiere ningún tipo de certificado por lo cual se pone none en la configuración. Y la salida tenemos al OPC client refnum out que es una relación en común para los bloques de labVIEW.

Read.vi es el encargado de leer el tipo de dato que se va a ingresar a los bloques, posee dos entradas, la señal de relación a y la otra que se encarga de la dirección del nodo.

Write.vi es donde se pone el tipo de dato que va a recibir, en que así mismo recibe dos tipos de entradas una para la dirección del nodo y otra de señal de referencia.

CAPITULO 3

3. RESULTADOS

Como resultado del presente proyecto se obtuvo el manual de entrenamiento para operadores de una central, en base al software elaborado.

GUIA PARA ENTRENAMIENTO DE OPERADOR PARA CENTRALES ELECTRICAS

El siguiente simulador sirve para entrenar a un operador de una central eléctrica, mostrándole variados eventos similares a los que se dan en la vida real, con la opción de que puede errar o provocar errores intencionalmente sin tener consecuencias reales, y así el operador explore, entienda, comprenda y adquiera la capacidad de reaccionar tanto física como psicológica para cualquier situación que se le presente.

También le permite al operador de la central realizar varios estudios acerca de lo que observa y provoca daños en los equipos de la central eléctrica y así dando problemas para los usuarios o el sistema.

Este manual está dirigido para que el operador de una central eléctrica se familiarice con el sistema eléctrico, y así entrene sin tener que parar la operación normal de la central eléctrica.

Requerimientos del sistema

Matlab, Simulink versión 2016b o versiones más recientes

Labview versión 2015 o más recientes

Iniciando en el simulador

La interfaz gráfica presenta de manera amigable el sistema de Control y Adquisición de Datos SCADA de la central, de tal manera se muestran las unidades de generación, los interruptores de potencia y la subestación.

En la parte superior de la pantalla principal se tienen menús en donde el usuario puede acceder a los múltiples ejercicios:



Interruptores:

Existen interruptores que son botones de acción , y también existen indicadores , ellos obedecen a la siguiente tabla:

Estado	Botón de acción	Indicador
Abierto		
Cerrado		

Además, existen visualizadores de corriente y voltaje  , y controladores de potencia.

1. Transferencia de Barra

- 1) Abra el archivo "Entrenamiento_para_operador_de_una_central_electrica" en LabVIEW.
- 2) Ir a la ventana "Generadores" y observara un submenú con cuatro generadores.

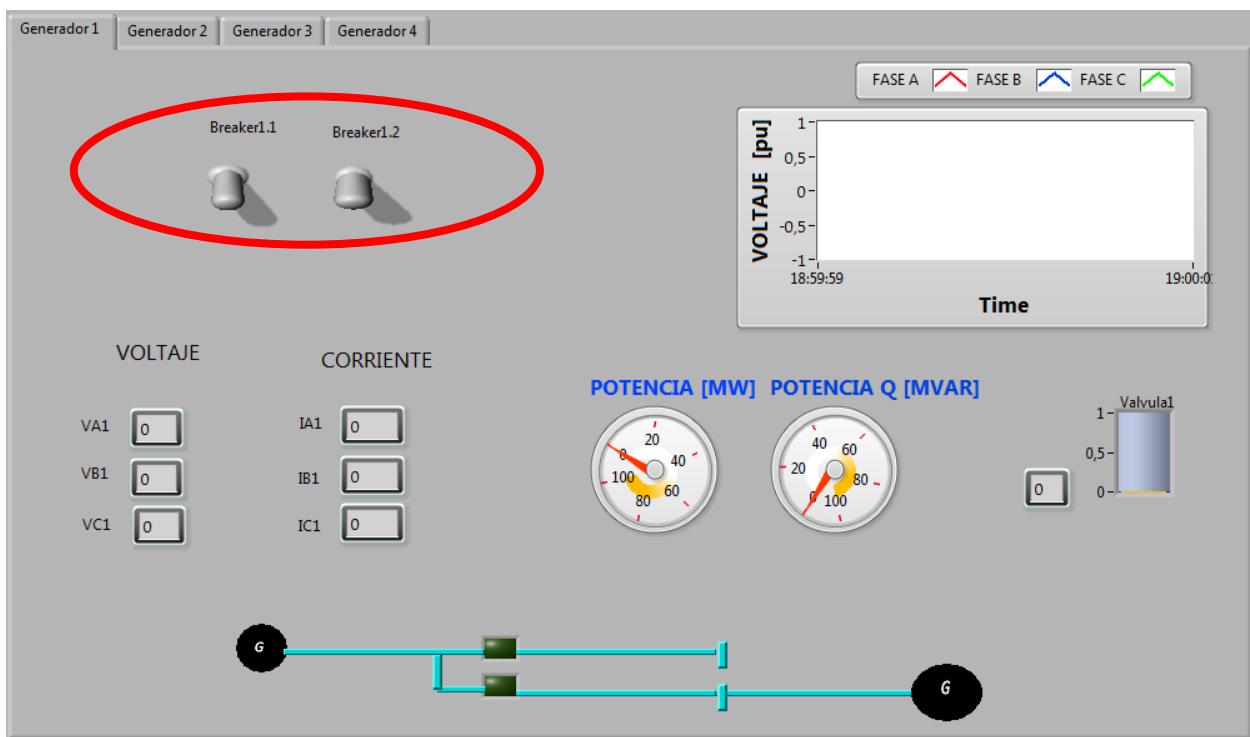


Ilustración 1 Transferencia de barra, interruptores

- 3) Al momento de escoger el generador, observará una pantalla con, entre otras herramientas dos interruptores.

Por ejemplo

Si se escoge el generador 1, verá dos suiches 1.1 y 1.2

- 1.1 conecta a la barra 1
- 1.2 conecta a la barra 2

El primer número indica el generador que escoge, el segundo número indica la barra a la cual se conecta

- 4) Si el generador 1 está conectado a la primera barra (que debe estar el primer interruptor 1.1 cerrado) y quiere hacer la transferencia a la segunda barra deberá cerrar el switch 1.2 y luego abrir el switch 1.1. verificando antes que el interruptor de acople esté cerrado.

2. Control de Potencia activa

- 1) En el simulador vaya al menú Generadores, seleccione el generador 1.
- 2) En el botón de control de potencia modifique, aumentando o disminuyendo la potencia del generador, siempre verificando que el valor en por unidad no salga de la banda de seguridad del 5%.

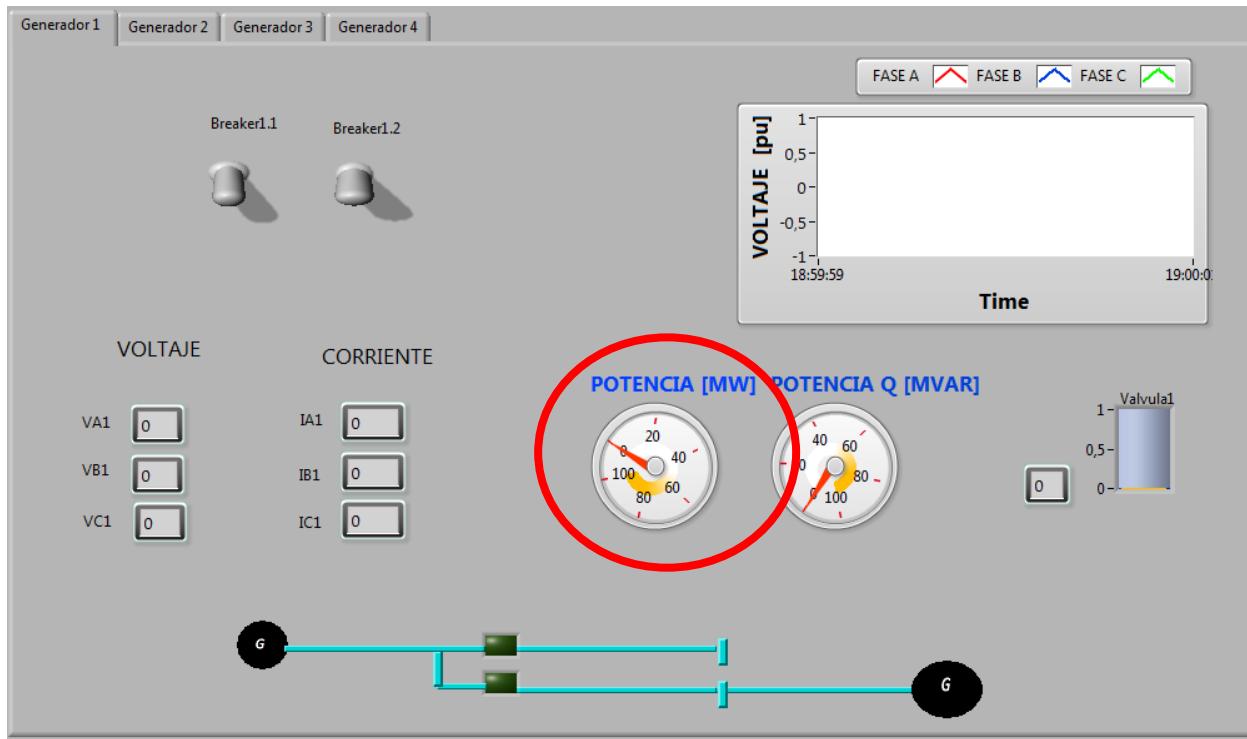


Ilustración 2 Control de potencia activa

3. Control de Potencia reactiva

- 1) En el simulador vaya al menú Generadores, seleccione el generador 1.
- 2) En el botón de control de potencia modifique, aumentando o disminuyendo la potencia del generador, siempre verificando que el valor en por unidad no salga de la banda de seguridad del 5%.

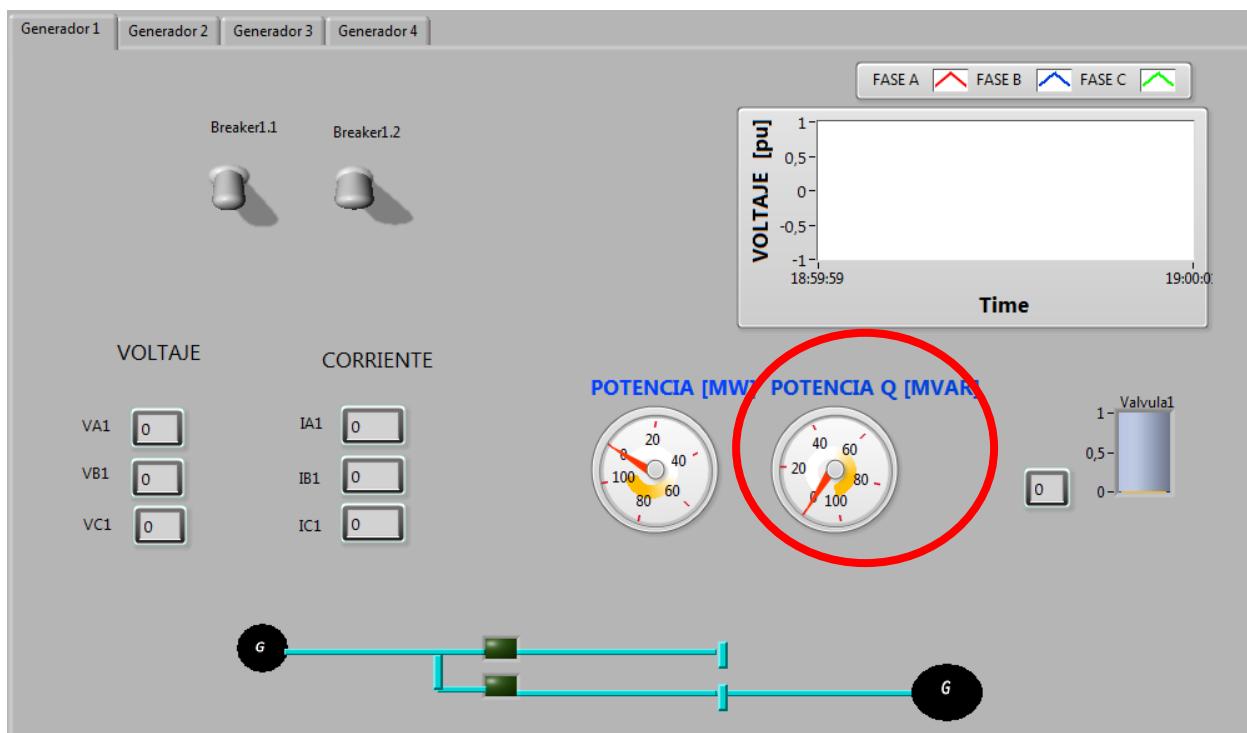


Ilustración 3 Control de potencia reactiva

4. Distribución de carga entre generadores

- 1) En el simulador vaya al menú Generadores, seleccione el generador 1, verifique que esté conectado a la misma barra del generador 4, de no ser, hágalo según el tutorial del ejercicio 1.
- 2) Empiece a elevar la potencia activa de este Generador 1, en pequeños pasos de 5%.
- 3) A medida que lo hace compense esta potencia disminuyendo la potencia del generador 4, modifique, aumentando o disminuyendo la potencia del generador, siempre verificando que el valor de voltaje en por unidad no salga de la banda de seguridad del 5%.

5. EMERGENCIA

En la ventana de Emergencia veremos los siguientes botones:

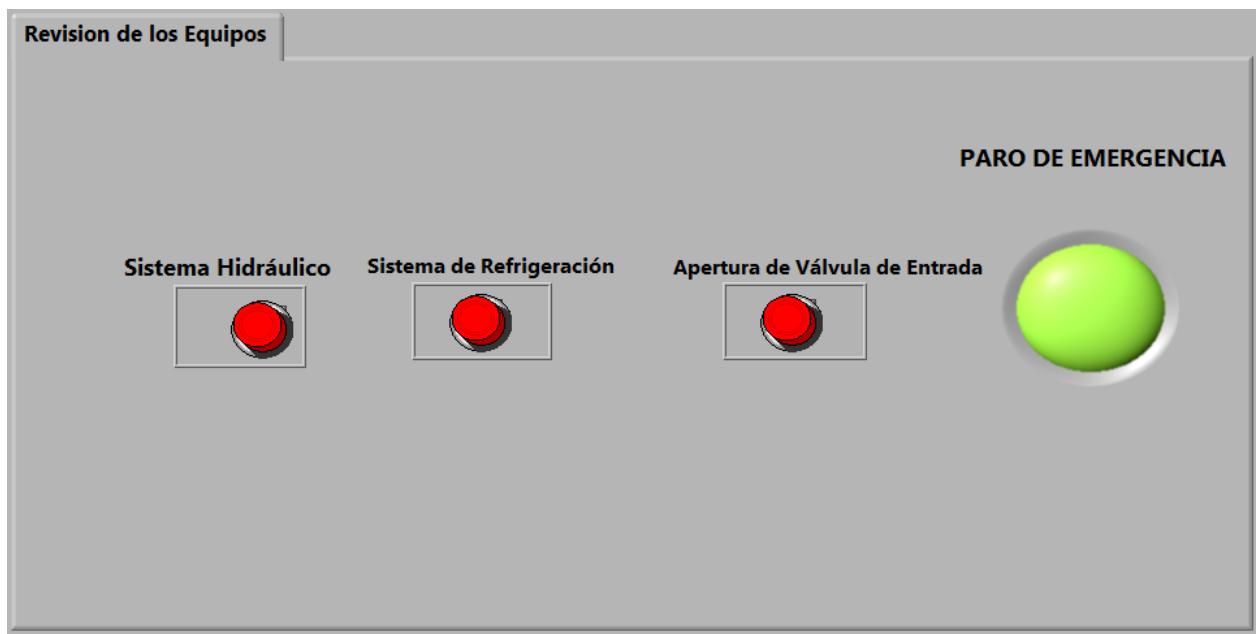


Ilustración 4 Pestaña de emergencia

Este botón verde se accionará solo si se quiere dar mantenimiento al sistema, al momento de presionarlo el sistema se quedará bloqueado por completo sin tomar alguna acción con respecto a este.

Para volver a operar en el sistema de nuevo y monitorear, deberá el operador apagar el botón luego de dar mantenimiento y verificar el estado del resto de sistemas.

6. Entrada de carga

- 1) Diríjase a la pantalla de central hidroeléctrica y verifique que todos los generadores estén en Barra 1, de no estar haga la transferencia de cada uno a Barra 1
- 2) Accione el interruptor breaker carga 2 ubicado a la derecha.
- 3) Observe y analice los resultados

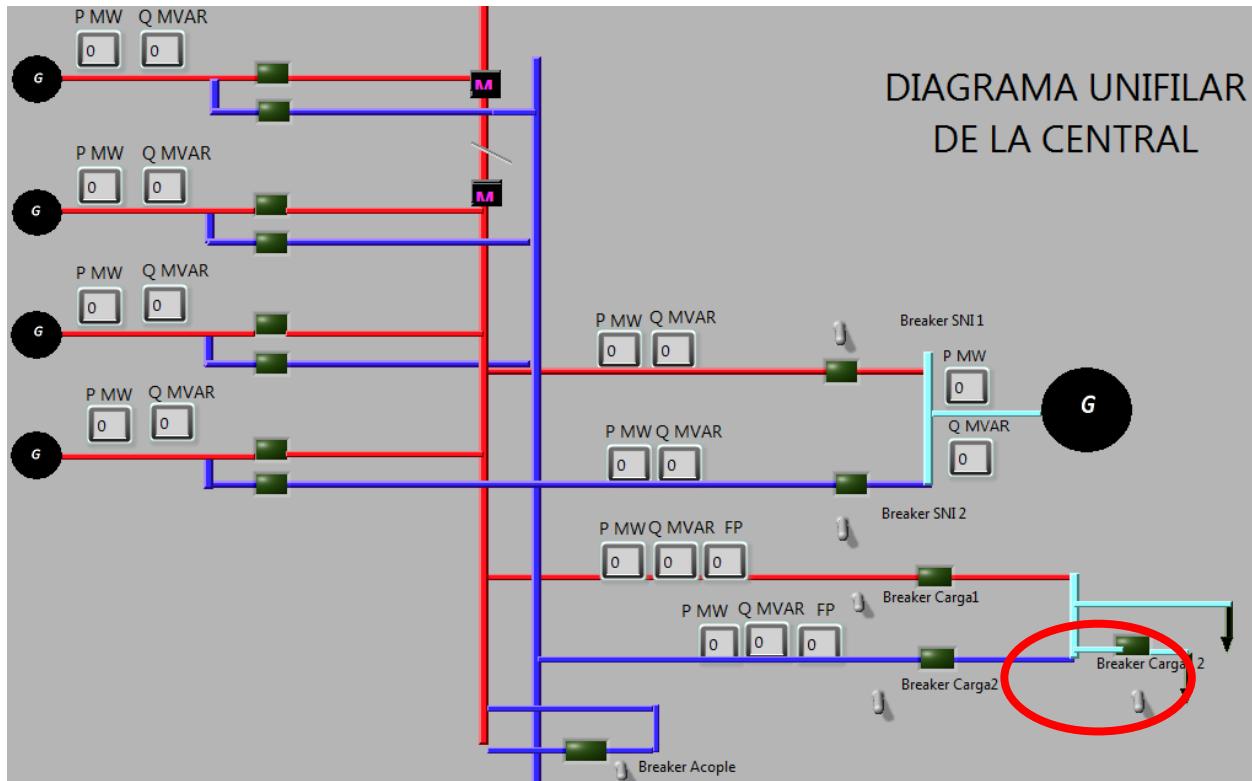


Ilustración 5 Conexión de carga

7. Desconexión de carga

- 1) Partiendo del ejercicio anterior, una vez estabilizado el sistema, desactive el interruptor Breaker Carga 2
- 2) Observe cómo cambia el factor de potencia en cada barra, y la oscilación de las corrientes.

8. Simulación de Fallas

En esta ventana, el operador podrá simular distintos tipos de fallas ya sea monofásica, bifásica o trifásica.

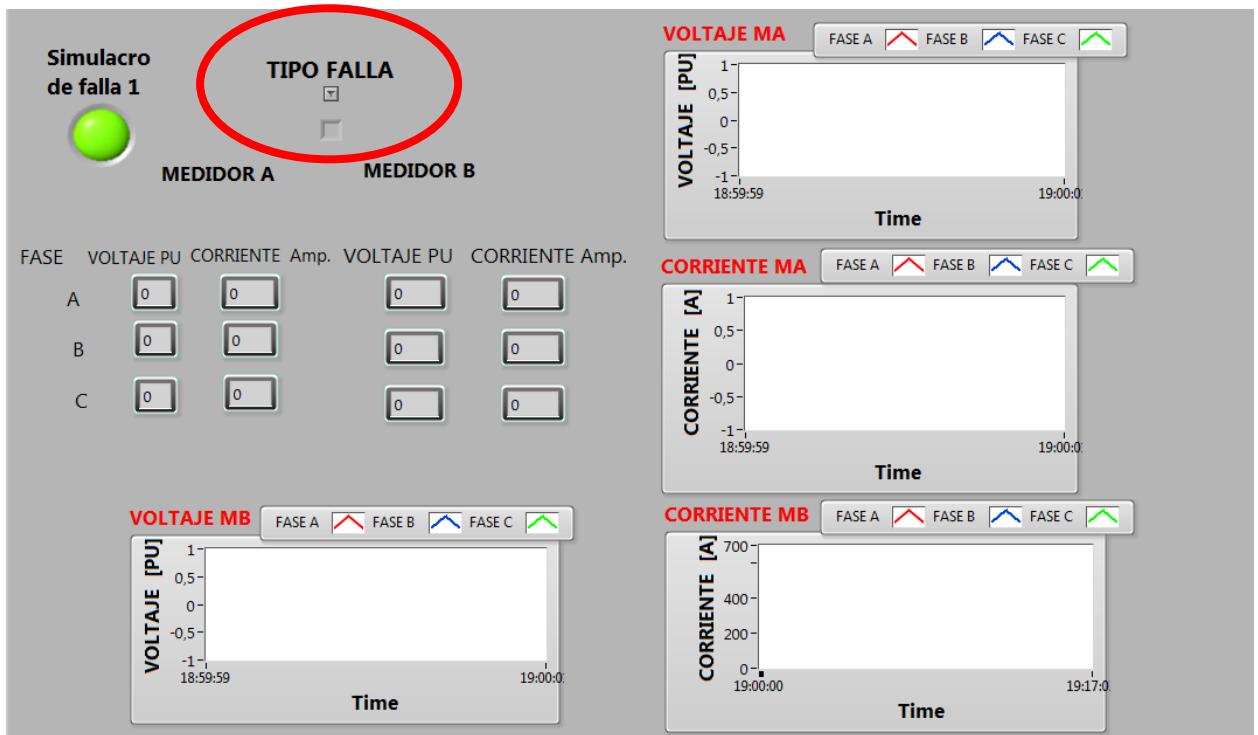


Ilustración 6 Simulación de fallas

Ensayar los siguientes eventos de simulación:

- Falla sin sistema
- Falla con sistema
- Falla con Carga
- Falla sin carga

1. Falla sin sistema

El sistema SIN esta desconectado, es decir los interruptores BREAKERSNI1 y BREAKERSNI2 se encuentran abiertos.

- 1) Verificar que el sistema SNI.se encuentra desconectado
- 2) Ir a la ventana de Fallas y escoger el tipo de Falla.
- 3) Presionar el botón para simular.
 - ROJO: existe falla
 - VERDE: No existe falla

2. Falla con sistema

El sistema SIN esta conectado.

- 1) Verificar que el sistema SNI.se encuentra conectado, para esto diríjase a la pestaña central eléctrica y verifique que el breaker SNI1 se encuentre cerrado.
- 2) Revise que los generadores se encuentren en la barra 1
- 3) Ir a la ventana de Fallas y escoger el tipo de Falla.
- 4) Presionar el botón para simular.
- 5) Observe y analice el aporte de los generadores y el SNI a la falla.

3. Falla con carga y sin carga

- 1) Partiendo de los ejercicios 6 y 7 simular la falla en ambas condiciones
- 2) Observar los osciloscopios para aprender a distinguir entre los tipos de fallas.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- 4.1.1. La utilización de software especializado permitió implementar el modelo matemático de una central e interactuar con él a través de un SCADA elaborado en NI LabVIEW cuya comunicación fue realizada mediante el servidor Opal RT.
- 4.1.2. A través de la herramienta Simulink de Matlab se realizó el modelo matemático de una central hidroeléctrica formada por cuatro generadores de 100 MW cada uno, generando a 13.8KV y transmitiendo a 230KV mediante un transformador elevador de 210 MW y una subestación con configuración doble barra con interruptor de acople.
- 4.1.3. Se diseñó mediante el uso de NI LabVIEW una interfaz gráfica que permite controlar la central y simular la existencia de un SCADA, da la posibilidad de ensayar varios escenarios sobre la central implementada.
- 4.1.4. Se comunicó el sistema con la interfaz gráfica por medio del servidor Opal RT, lo que da lugar a la obtención de una herramienta de entrenamiento para operadores de una central hidroeléctrica.
- 4.1.5. Se elaboró un manual de usuario para que el operador pueda ensayar los varios escenarios de entrenamiento en forma ordenada y guiada, y de esta manera estar apto para el control de una central real de similares características a la simulada.

4.2. Recomendaciones

- 4.2.1. Para estudiantes y personas quienes a futuro deseen replicar este trabajo se recomienda lo siguiente:

- 4.2.2. Al realizar el modelo matemático de la central, verificar el control de caída de voltaje, ya que al no tener buena configuración de la pendiente pierde estabilidad el sistema al quedarse un generador en vacío.
- 4.2.3. Se recomienda verificar que todos los bloques de Matlab tengan la capacidad de funcionar bien en tiempo discreto, dado que es así como el Opal opera.
- 4.2.4. Cuando se elaboren los subsistemas de Matlab verificar que el nombre de este no contenga caracteres especiales salvo el guion bajo que prosigue luego de las dos primeras letras.
- 4.2.5. Si ya se ha compilado por primera vez el archivo dentro del Opal RT y luego no funciona con el mismo archivo, es recomendable verificar la temperatura ambiente del laboratorio y reiniciar el servidor y la máquina.
- 4.2.6. Para complementar este trabajo es recomendable que se utilicen datos reales de una central hidroeléctrica y que se realice la función de sincronización con el sistema.
- 4.2.7. En LabVIEW verificar el etiquetado de las variables de entrada y salida, y que todas se encuentren conectadas al cable del OPC.

Bibliografía

- [1] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Estadística Anual y Multianual del sector eléctrico Ecuatoriano,» 2018.
- [2] L. R. L. O. P. L. S. L. Á. M. López Sánchez, La simulación clínica como herramienta de aprendizaje, 2012.
- [3] Woodward, Application Note 01302: Speed Droop and Power Generation, Fort Collins CO 80522-1519, USA : Revision NEW, 1991.
- [4] J. A. B. Gallegos y J. D. C. Cotrina, «Análisis de sistemas trifásicos de transformadores conexión Y - Y.,» , 2015. [En línea]. Available: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/10239>. [Último acceso: 3 9 2019].
- [5] M. E. P. Morales, M. Z. Cantó y A. . Rodríguez, «Caracterización paramétrica para un modelo de segundo orden del servomotor RC,» , 2019. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6959838>. [Último acceso: 3 9 2019].