

espol



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL
ESTUDIO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON
LOOP AUTOMATION**

PROYECTO DE MATERIA INTEGRADORA

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Joffre Giovanni Bauer Magües

Andrea Daniela León Aguilar

Supervisado por:

PhD. Sífifo Falcones

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto y todo el esfuerzo dado durante mi carrera hacia Dios, quien me ha dado la fortaleza y me ha permitido mejorar día tras día para alcanzar mis metas. A mis padres, Giovanni Antonio y María del Pilar, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de mi vida, ya que, con su apoyo incondicional y paciencia, han sabido guiar mi camino. Con mucho cariño a mis hermanos, Nahim, Denisse, Giovanni y Giovanna, quienes siempre han estado prestos a ayudar en cualquier momento. A mi abuela Sylvia, por su entrega, motivación y confianza. A mis amigos, gracias a su gran apoyo brindado y grandes alegrías compartidas. Y a Danna, quien me ha brindado su apoyo de sobremanera, durante la realización de este proyecto.

Joffre Giovanni Bauer Magües

El presente proyecto lo dedico a mi hija por ser mi inspiración y motivación para seguir adelante cumpliendo metas, a mis padres Víctor León y Vilma Aguilar quienes son actores fundamentales en la realización de este sueño que un día me propuse cumplir, a mis abuelitos que los quiero y estimo mucho, gracias por sus consejos y brindarme todo su amor en todo momento.

Andrea Daniela León Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a cada una de las personas que han estado presentes en mi vida y me han permitido llegar a que este logro sea posible. Su apoyo, confianza, paciencia y entrega brindada me han impulsado a ser una mejor persona y un gran profesional. Me refiero a mi familia, a mis amigos, a Danna, a mis profesores de la carrera, a quienes con gran gratitud me dirijo. Sobre todo, a un gran maestro y una gran persona, como es nuestro tutor de tesis el Dr. Síxifo Falcones, a quién estimo mucho y agradezco su guía, y ayuda brindada, para la elaboración de este proyecto.

Joffre Giovanni Bauer Magües

Al finalizar una etapa más en mi vida quiero expresar mi gratitud a quienes hicieron posible este logro, aquellos que me brindaron su amor, apoyo y confianza. Esta mención es para Dios, mis padres, mis hermanos, mis tíos, mis abuelitos, mi esposo y mi hija. Muchas gracias a todos ustedes por demostrarme “El verdadero amor no es otra cosa que el deseo inevitable de ayudar al otro para que este se supere.” También quiero extender un agradecimiento especial a nuestro director de tesis, Dr Síxifo Falcones, quien nos guio de la mejor manera en el desarrollo del presente proyecto. Mi gratitud también a todos los docentes, quienes con sus enseñanzas constituyen la base de mi vida profesional.

Andrea Daniela León Aguilar

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Joffre Giovanni Bauer Magües y Andrea Daniela León Aguilar 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”

Joffre Giovanni Bauer Magües

Andrea Daniela León Aguilar

EVALUADORES

MSc. Fernando Vaca

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Sixifo Falcones

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el presente proyecto se propone un modelo de simulación mediante la aplicación de estrategias de Loop Automation, para el estudio de un sistema de distribución, en donde al no disponer de un simulador en tiempo real, se necesita realizar un modelo mediante la utilización del software MATLAB, empleando la herramienta SIMULINK. El modelo requerido también se lo emplea en el software LABVIEW para realizar la visualización gráfica que el operador verá en el SCADA.

Para lograr el modelamiento de la red, que sirve como banco de pruebas para el desarrollo, visualización y control del sistema, se establecieron escenarios de contingencia, mediante la utilización de IEDs y reconectores, que permiten restablecer el servicio de forma automatizada y sistematizada, con el fin de disminuir los tiempos de interrupción, y la cantidad de áreas afectadas sin el suministro de energía eléctrica, producto de la ocurrencia de una falla permanente o sostenida.

Como resultado se obtuvo la HMI del sistema SCADA, en la cual se puede observar en tiempo real, alarmas que indican el lugar de ocurrencia de la falla, así como también del bloqueo o desbloqueo del reconector. Además, del número de reconexiones realizadas, y a través del modo manual, se realiza la restauración del sistema. En LABVIEW se obtuvo el modelamiento de la HMI realizada en SIMULINK.

El modelo de Simulink incluye varios reconectores, los cuales, ante una falla temporal, realizarán hasta 4 reconexiones en un tiempo máximo de 2.1 segundos, exceptuando al circuit breaker, el cual no realiza este accionamiento. Y si existen más de 4, estos dispositivos quedan bloqueados, ya que se trata de una falla permanente, y se procede a realizar la reconfiguración del sistema que se demora 2.5 segundos. Los accionamientos y el abastecimiento de energía eléctrica mediante el Tie de enlace, verifica el desempeño del sistema, y se puede visualizar la respuesta obtenida. Así como también, el respaldo de las protecciones que mejoran la confiabilidad del sistema.

Palabras clave: Loop automation, Sistema de Distribución, Redes Inteligentes, SCADA.

ABSTRACT

This project proposes a simulation model through the application of Loop Automation strategies, for the study of a distribution system, where the lack of a real-time simulator requires a model using MATLAB software, using the SIMULINK tool. The required model is also used in the software LABVIEW to perform the graphical visualization that the operator will see in the SCADA.

To achieve the modeling of the network, which serves as a test bed for the development, visualization and control of the system, contingency scenarios were established, through the use of IEDs and reclosers, which allow the restoration of service in an automated and systematized way, in order to reduce interruption times, and the number of affected areas without power supply, as a result of the occurrence of a permanent or sustained failure.

As a result, the HMI of the SCADA system was obtained, in which alarms can be observed in real time, indicating the place where the fault occurred, as well as the blocking or unblocking of the recloser. In addition, the number of reconnections made, and through the manual mode, the system is restored. In LABVIEW, the HMI modeling performed in SIMULINK was obtained.

The Simulink model includes several reclosers, which, in the event of a temporary fault, will make up to 4 reclosings in a maximum time of 2.1 seconds, except for the circuit breaker, which does not make this operation. And if there are more than 4, these devices are blocked, since it is a permanent fault, and proceed to perform the reconfiguration of the system that takes 2.5 seconds. The actuators and the electric power supply through the Tie Wire, verify the performance of the system, and the response obtained can be visualized. As well as, the backup of the protections that improve the reliability of the system.

Keywords: Loop automation, Distribution System, Intelligent Networks, SCADA.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 Estructura del proyecto	4
CAPÍTULO 2.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Introducción	3
2.2 Smart Grid	3
2.3 Sistemas de Distribución	6
2.4 Loop Automation.....	7
2.5 Dispositivos empleados en Loop Automation.....	8
2.6 Restaurador o reconectador	9

CAPÍTULO 3.....	6
3. METODOLOGÍA.....	6
3.1 Introducción	6
3.2 Modelamiento en SIMULINK.....	6
3.2.1 Diagrama esquemático.....	11
3.2.2 Modelamiento de la red	12
3.2.3 Modelamiento del concentrador de datos de los IEDs	19
3.2.4 Actuación de los IED	20
3.2.5 Salidas del concentrador de datos	37
3.3 Modelamiento del HMI	40
3.3.1 Diagrama unifilar	40
3.3.2 Señal de fallas.....	41
3.3.3 Lógica del IED de lockout.....	42
3.3.4 Lógica para las imágenes usadas en el diagrama unifilar.....	43
3.4 Modelamiento en LABVIEW.....	44
3.4.1 Creación de un HMI	44
CAPÍTULO 4.....	47
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
4.1 Introducción	47
4.2 HMI (Human Machine Interface) en Simulink.....	48
4.2.1 Escenarios	49
4.3 HMI (Human Machine Interface) en Labview	61
CAPÍTULO 5.....	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
5.1 Introducción	46
5.2 Conclusiones	46

5.3	Recomendaciones	64
	BIBLIOGRAFÍA	59
	APÉNDICES	60
A.	Código de los parámetros del sistema de distribución	60

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HMI	Interfaz Hombre Máquina
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
IED	Dispositivo Electrónico Inteligente
AC	Corriente Alterna
CB1	Interruptor de Circuito (Disyuntor)
F1	Feeder 1
M1	Midpoint 1
M2	Midpoint 2
CB2	Interruptor de Circuito (Disyuntor)
F2	Feeder 2
M3	Midpoint 3
M4	Midpoint 4

SIMBOLOGÍA

ms	Milésima de segundo
s	Segundo
V	Voltios
kV	Kilovoltios
A	Amperio
W	Vatio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un sistema de distribución automatizado (DSA) [9].	7
Figura 2.2 Restaurador de línea [10].	9
Figura 3.1 Diagrama esquemático del SCADA implementado en SIMULINK.	11
Figura 3.2 Modelamiento de la red en Simulink.	13
Figura 3.3 Señal de accionamiento del circuit breaker del alimentador 1.	15
Figura 3.4 Señal de accionamiento de falla entre el circuit breaker 1 y el feeder 1.	15
Figura 3.5. Señales de accionamiento de los dispositivos.	16
Figura 3.6 Señales de accionamiento de falla.	16
Figura 3.7 Señales de corriente y voltaje.	17
Figura 3.8 Señales corriente y voltaje.	18
Figura 3.9 Señales enviadas al IED.	18
Figura 3.10 Dispositivos electrónicos inteligentes de cada restaurador.	19
Figura 3.11 Lógica de actuación por sobrecorriente del circuit breaker 1.	20
Figura 3.12 Lógica del accionamiento por sobrecorriente y reconexión del Feeder 1.	22
Figura 3.13 Lógica del contador para las reconexiones.	23
Figura 3.14 Lógica del contador y actuación de reconexión o lockout del feeder 1.	23
Figura 3.15 Lógica del envío de señal para el accionamiento del tie.	24
Figura 3.16 Lógica del envío de señal del número de reconexiones y ocurrencia de lockout, hacia el HMI.	25
Figura 3.17 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M1 mediante accionamiento de F1.	26
Figura 3.18 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M2 mediante accionamiento de F1.	27
Figura 3.19 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M2 mediante accionamiento del M1.	28
Figura 3.20 Señales de confirmación de 4 reconexiones de cualquier reconectador.	29
Figura 3.21 Confirmación de accionamiento del tie, mediante comparación de niveles de voltaje en el feeder 1.	30
Figura 3.22 Confirmación de accionamiento del tie, mediante comparación de niveles de voltaje en el midpoint 2.	30

Figura 3.23 Accionamiento del tie de enlace.	31
Figura 3.24 Lógica de accionamiento por sobrecorriente.	31
Figura 3.25 Lógica de accionamiento del circuit breaker.	33
Figura 3.26 Lógica de accionamiento del feeder 1.	33
Figura 3.27 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el feeder 1.	34
Figura 3.28 Lógica de accionamiento del midpoint 1.	34
Figura 3.29 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el midpoint 1.	35
Figura 3.30 Lógica de accionamiento del midpoint 2.	36
Figura 3.31 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el midpoint 2.	36
Figura 3.32 Lógica de accionamiento del tie de enlace.	37
Figura 3.33 Estados finales de los dispositivos de accionamiento.	38
Figura 3.34 Estados de los reconectores.	38
Figura 3.35 Número de reconexiones de los reconectores.	39
Figura 3.36 Corrientes instantáneas y RMS que serán enviadas al HMI.	39
Figura 3.37 Señales enviadas al HMI.	39
Figura 3.38 Interruptor abierto (verde) y cerrado (rojo).	40
Figura 3.39 Estado del alimentador.	40
Figura 3.40 Estado de la corriente que circula hacia la carga.	41
Figura 3.41: Señales de salida	41
Figura 3.42 Señales del estado de lockout de los IED.	42
Figura 3.43 Lógica de las imágenes del HMI.	43
Figura 3.44 Estructura de la lógica.	44
Figura 3.45 Cálculos de corriente y voltaje.	45
Figura 3.46 Diseño del diagrama unifilar.	46
Figura 4.1 Diseño de la Interfaz hombre-máquina.	48
Figura 4.2 Visualización desde el diagrama unifilar de una falla en la subestación.	50
Figura 4.3 Visualización general en el HMI.	51
Figura 4.4 Visualización de la reconfiguración con falla entre feeder 1 y midpoint 1. ...	53
Figura 4.5 Visualización general en el HMI.	54

Figura 4.6 Reconfiguración de la red eléctrica ante falla entre midpoint 1 y midpoint 2.56

Figura 4.7 Visualización de la red en el HMI.57

Figura 4.8 Reconfiguración de la red eléctrica ante falla entre midpoint 2 y tie.59

Figura 4.9 Visualización de la red en el HMI.60

Figura 4.10 Visualización del HMI en Labview.61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros del modelo del sistema de distribución.	14
---	----

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

1.1 Introducción

El uso de redes inteligentes ha ido aumentando debido al avance tecnológico, que, mediante la innovación y la búsqueda continua de mejorar el nivel de disponibilidad y confiabilidad de la red, tiene como primordial objetivo, mantener una operación segura e ininterrumpida, de calidad, y económica. Mediante la implementación de nuevos esquemas y estrategias, para poder monitorear y actuar rápidamente, se pretende evitar la interrupción del servicio eléctrico ante cualquier falla producida en el sistema de distribución, en lo posible, ya que se pueden tener varios escenarios de contingencias y con ello minimizar la cantidad de áreas afectadas [1].

La automatización tiene un papel clave, ya que, al mejorar la eficiencia de la red, se puede controlar la reconfiguración de los equipos de forma remota e instantánea. Se debe tener en cuenta, que debe existir otro tipo de fuente, que generalmente es un segundo alimentador, que se conecta a través de un reconector de enlace, el cual se encuentra normalmente abierto, para así poder energizar y abastecer a la mayor cantidad de usuarios que demandan la energía eléctrica. La automatización se realiza de forma sistemática, en donde el operador observe que la falla se mantiene y tenga que enviar a una cuadrilla a resolver el problema.

La presencia del sistema SCADA es esencial en un sistema de distribución, ya que al poseer una interfaz gráfica a través del HMI, le proporciona una lectura más rápida de lo que ocurre en el sistema al operador, ya que presenta el diagrama unifilar de la red, con información de mediciones en tiempo real, así como el estado de la posición de interruptores y alarmas cuando ocurren las fallas. Además, posibilita accionamientos de equipos, así como comunicación con los dispositivos electrónicos inteligentes del sistema de distribución [2] .

El estudio y comprensión de los sistemas de distribución de energía eléctrica, forma parte del pensum universitario de la carrera de ingeniería eléctrica, debido a que es un tema esencial en la formación universitaria. Por lo general, las industrias poseen dispositivos de protección y sistemas SCADA para el control de procesos, en los cuales pueden visualizar el estado de los dispositivos que conforman su sistema. De igual manera, se presenta la información para los operadores de la red, en donde los sistemas de distribución constituyen la parte final del sistema nacional interconectado, ya que enlazan el sistema de transmisión con los consumidores finales, es decir, permiten el abastecimiento de energía eléctrica a los usuarios.

1.2 Descripción del problema

Ante la pandemia ocasionada por la COVID-19, el uso de herramientas de simulación en tiempo real, como son los laboratorios, no se encuentran disponibles. Debido a esto, los estudiantes que requieran comprender los conceptos de distribución eléctrica, y quieran interactuar elaborando estrategias de automatización para mejorar la confiabilidad del sistema y verificar sus resultados, no podrán hacerlo. Además, es necesario realizar simulaciones, antes de implementar cualquier ajuste en la red, para verificar el desempeño del sistema y la respuesta obtenida. Se debe considerar, que las estrategias podrán ir mejorando, y mientras más avanzadas y complejas resulten, abren camino hacia temas de investigación que abarquen estudios de soluciones óptimas, que ofrezcan menores tiempos de interrupción del sistema, así como una reducción de costos, una automatización más eficiente, y sin el modelamiento del sistema, esto no sería posible.

1.3 Justificación del problema

Comprender el funcionamiento de las protecciones del sistema eléctrico de distribución ante una falla, permite establecer estrategias seguras para disminuir la cantidad de áreas afectadas por la desconexión producto de la falla. Establecer escenarios de contingencia para poder mejorar el nivel de disponibilidad de la red, permite restablecer el servicio a zonas por medio de un reconectador de enlace, para mejorar la confiabilidad del sistema. Esto se debe realizar de forma automatizada y

sistemática, para que la velocidad de reconexión en las zonas que pueden volver a tener el servicio eléctrico sea instantánea.

La automatización permite que el sistema sea más eficiente y rápido, ya que por medio de una comunicación entre los IEDs se ejecuta la acción sin permiso del operador. Mediante un sistema SCADA el operador podrá visualizar las perturbaciones que se presenten en el sistema, por lo que el monitoreo de mediciones en tiempo real y alarmas que anuncian la aparición de falla, permiten un control de la red, proporcionando un servicio de calidad, el cual no pudiera ser estudiado sin el modelamiento del sistema con su respectiva HMI, para la visualización del comportamiento del sistema.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de simulación mediante la aplicación de herramientas de software académico, que servirá como banco de pruebas para el desarrollo de estrategias de Loop Automation en los sistemas de distribución.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el modelamiento de la red y el control en MATLAB con su respectiva HMI.
- Desarrollar el modelamiento de la red y el control en LABVIEW con su respectiva HMI.
- Implementar la lógica clásica de Loop Automation.

1.5 Estructura del proyecto

Para el desarrollo del proyecto, se realiza una estructura que consta de 4 capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el Capítulo 1, se realiza el planteamiento y estructura de la tesis, exponiendo el problema y su respectiva justificación. Así como los objetivos que se persiguen en la realización de este proyecto.

En el Capítulo 2 se efectúa una revisión exhaustiva de la literatura por parte del marco teórico, utilizando la información más importante que se necesita para la realización de las simulaciones y el proyecto en general, en donde se exponen los conceptos de redes inteligentes, Loop Automation y sus configuraciones.

En el Capítulo 3, se presenta la metodología aplicada para el modelamiento del sistema de distribución a través de 2 fases. La primera, mediante la herramienta SIMULINK de MATLAB, presentando el diagrama esquemático del sistema, el cual, mediante lógicas de accionamientos, permiten la automatización del sistema.

Además, en el HMI se podrá visualizar el diagrama unifilar de la red, los estados de los dispositivos que conforman el sistema, los valores y curvas de corriente, voltaje y potencia que se obtienen en la simulación. La segunda fase es través del software de diseño y programación LABVIEW, en donde se podrá revisar la respuesta del sistema ante una perturbación en el HMI, así como los accionamientos de los dispositivos del sistema de distribución aplicando la metodología clásica de Loop Automation.

En el Capítulo 3, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones, junto al análisis de las mismas.

En el Capítulo 4, se presentan las conclusiones y recomendaciones encontradas, en base a los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

Para poder realizar el correcto modelamiento del sistema, se debe efectuar una revisión literaria exhaustiva, acerca de las estrategias que propone la metodología de Loop Automation, en donde se busca conocer los requerimientos y accionamientos necesarios de los dispositivos, para su correcta implementación en el software propuesto.

Además, se busca conocer el tipo de redes que utilizan esta metodología, así como también las bondades del avance tecnológico, que permiten su implementación en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

2.2 Smart Grid

Una Red Inteligente o Smart Grid es una estructura moderna de un sistema eléctrico de potencia, el cual consiste en monitorear, brindar protección y realizar una operación automática de los elementos interconectados [3].

Las redes inteligentes tienen como propósito hacer que una red eléctrica posea:

- **Mayor seguridad**

Lograr que las operaciones de los sistemas de potencia sean seguros es una condición muy importante para el suministro eléctrico, dado que disminuye el riesgo de accidentes como incendios o electrocución [4].

- **Mayor confiabilidad**

Mantener la confiabilidad en los sistemas de potencia es una necesidad, dado que permite suministrar el servicio eléctrico a los consumidores. En el caso de una falla esta puede ser detectada rápidamente y la red se puede reconfigurar automáticamente logrando que el sistema despeje la falla o si la falla persiste se puede enviar al personal al lugar donde ocurrió la falla para solucionar dicha avería [4].

- **Más económico**

Reducir las pérdidas de energía, resulta menos costoso para las empresas que suministran electricidad. La carga en la red varía continuamente, lo cual provoca que el sistema empiece a colapsar y se tenga ciertos disturbios entre los clientes al darse un aumento de carga, por ello es importante mejorar la eficiencia de operación [4].

2.3 Sistemas de Distribución

Los sistemas de distribución son los encargados de enlazar el sistema de transmisión con los consumidores finales, este sistema es aún más complejo que los sistemas de transmisión, debido a la gran cantidad de cargas dispersas en territorios variables [5].

Existen algunas empresas distribuidoras de electricidad que tienen como alcance satisfacer la demanda de energía eléctrica y brindar el servicio de electricidad a sus clientes. Para dicho control de calidad las empresas realizan ciertos ajustes y mejoras en las redes de distribución [6].

En la actualidad las redes de distribución están siendo automatizadas dado que se obtiene una mayor confiabilidad y eficiencia [7]. Además, resulta más económico, debido a la innovación tecnológica que se ha originado. Al implementar un sistema de control automático, se puede minimizar el número de interrupciones por fallas, el tiempo en reestablecerse el sistema es más rápido, y se puede aislar las fallas afectando la mínima cantidad de usuarios posibles [8].

La necesidad de mejorar los sistemas de distribución se debe al incremento de la demanda de energía que se da cada año, en donde siempre se tiene presente poder mejorar la calidad del servicio eléctrico. Para lograrlo, se utiliza las estrategias del modelo de Loop Automation [9].

2.4 Loop Automation

Para mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución se puede utilizar las estrategias que propone la metodología de Loop Automation, que trata de hacer una reconfiguración en el sistema en el caso de existir una falla, permitiendo de esta manera que se energice la parte afectada con una mayor rapidez y afectando al menor número posible de clientes [9].

En la siguiente figura se muestra un esquema de DSA (Distributed System Automation).

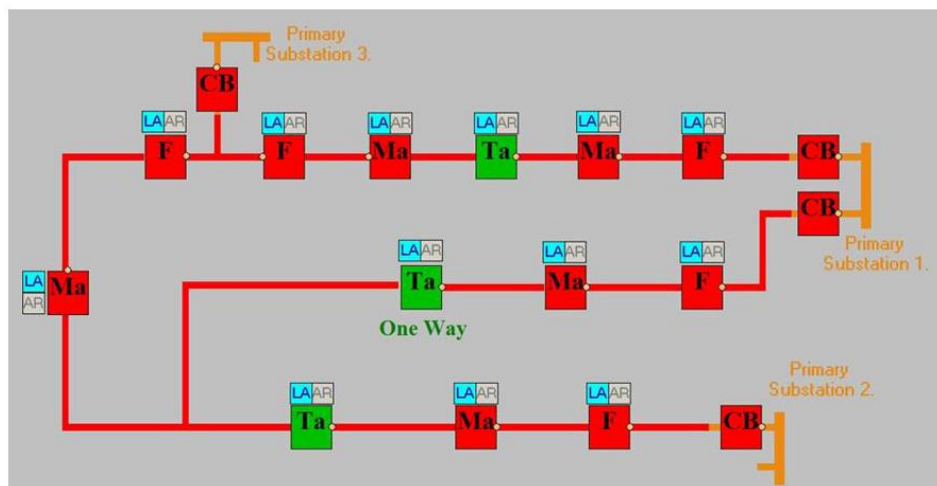


Figura 2.1 Esquema de un sistema de distribución automatizado (DSA) [9].

En la Figura 2.1 se muestra un esquema DSA, el cual indica una reconfiguración de la red, en donde se tendrá nuevamente el servicio eléctrico, en aquellas zonas donde haya desaparecido la falla y se hayan quedado sin suministro.

Existen dos tipos de configuraciones de Loop Automation, estas son: lógica clásica o lógica inteligente.

- **Lógica clásica de Loop Automation**

Consiste en el uso tradicional de Loop Automation, no permite una comunicación punto a punto, pero si la participación de un operador. Se puede utilizar comunicación SCADA, su principal aplicación son redes en anillo [9].

- **Lógica inteligente de Loop Automation**

Consiste en una innovación de la lógica clásica de Loop Automation, con esta configuración, si es posible la comunicación punto a punto entre dispositivos, esto ayuda a evitar que un equipo cierre ante la presencia de una falla cuando la red se está reconfigurando, es decir solamente se ve una vez la falla, y no dos veces como ocurría en el modelo clásico cuando actuaba el Tie de enlace [9].

2.5 Dispositivos empleados en Loop Automation

Un sistema de distribución con Loop Automation deberá tener dispositivos reconectores con diferente configuración cada uno, como se tiene a continuación:

- **Alimentador (Feeder)**

Es un dispositivo que específicamente se colocará cerca de la subestación, por cada fuente se utilizará un feeder [9].

- **Enlace (Tie)**

Es un dispositivo que se utiliza en una red que cuente con dos alimentadores, se encuentra ubicado entre un punto abierto de los alimentadores, servirá como enlace [9].

- **Mid-Point**

Es un dispositivo que se encuentra colocado en la red con cualquier ubicación, específicamente entre un alimentador y un empate. En la red pueden existir varios midpoint dependiente de los requerimientos [9].

2.6 Restaurador o reconectador

Los restauradores son equipos automáticos inteligentes, los cuales tienen la capacidad de contener protecciones eléctricas contra sobrecorrientes en su lógica, es decir pueden disparar o aislar la falla en el caso, que exista una distorsión en una línea, esta operación es una de muchas que pueden realizar, todo esto automáticamente [10].

Los reconectores o restauradores se encuentran conformados por sensores y medidores internos que permiten detectar las señales de corriente y voltaje, existen diferentes tipos de restauradores ya sea monofásicos o trifásicos [10].

Actualmente en algunos países se encuentran implementando estos equipos automáticos ya sea su ubicación en la línea o en la subestación, dado que permite conocer con precisión las mediciones de corriente, voltaje, potencia activa y reactiva de red eléctrica, ya que puede brindar a la empresa distribuidora una mejor calidad de servicio eléctrico a los consumidores [10].



Figura 2.2 Restaurador de línea [10].

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 Introducción

El modelamiento del sistema de distribución se lo realizó en 2 etapas. La primera, consta de la aplicación de la herramienta SIMULINK de MATLAB, donde se presenta el diagrama esquemático del nivel jerárquico del SCADA, en donde se expone el modelamiento de la red, así como también el modelamiento de los dispositivos electrónicos inteligentes, los cuales emplean la lógica clásica de Loop Automation.

De igual manera, ocurre con el modelamiento del HMI, en donde se puede observar y controlar los accionamientos, alarmas, estados de los dispositivos. Cada modelamiento presenta las señales de entrada y salida, así como los accionamientos ocurridos en cada nivel del esquema propuesto.

La segunda etapa consta de la aplicación del software LABVIEW, en donde se podrá visualizar la respuesta del sistema ante una perturbación en el HMI, así como los accionamientos de los dispositivos del sistema de distribución mediante la aplicación de la metodología clásica de Loop Automation.

3.2 Modelamiento en SIMULINK

Para realizar este proyecto se utilizó MATLAB versión 2016b, en la cual, diferentes librerías fueron utilizadas para lograr modelar la red de distribución con Loop Automation. El modelamiento constará de diferentes etapas que se presentaran a continuación.

3.2.1 Diagrama esquemático

El diagrama esquemático del nivel jerárquico mediante el cual, podemos observar el nivel de operación de los dispositivos en el sistema SCADA, se puede observar en la siguiente ilustración.

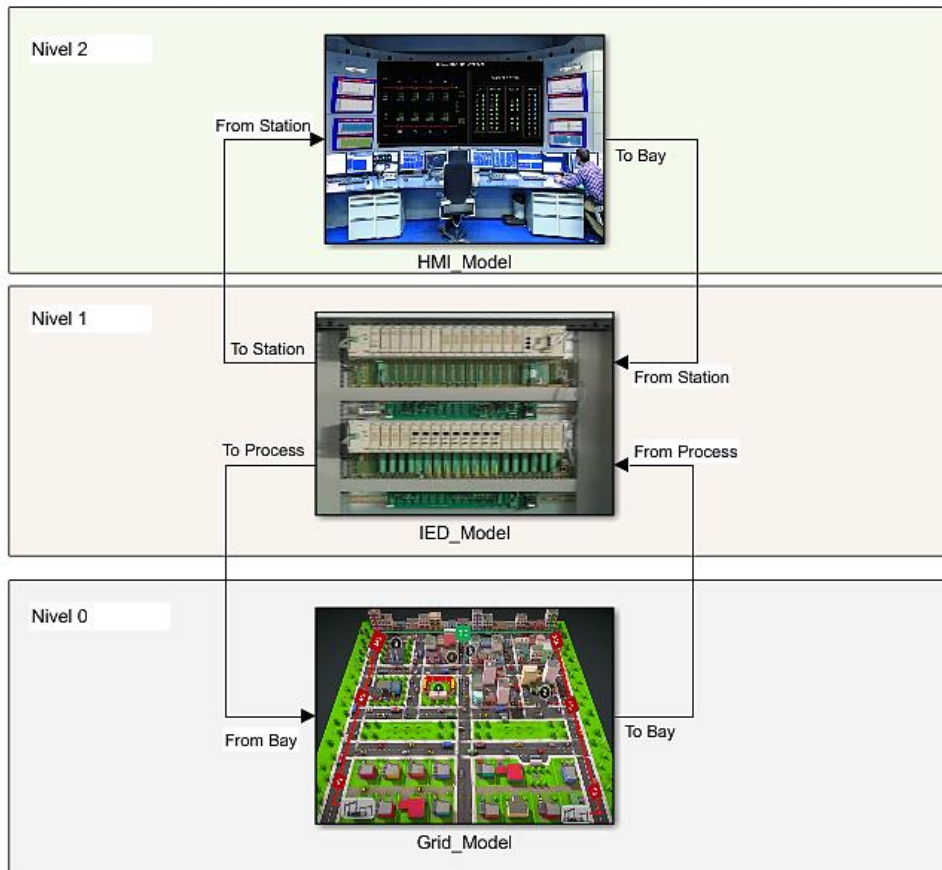


Figura 3.1 Diagrama esquemático del SCADA implementado en SIMULINK.

En la Figura 3.1 se puede visualizar la conexión del sistema a un nivel jerárquico del SCADA. En el nivel inferior se encuentra ubicada la red con todos sus dispositivos que la conforman, seguida por concentrador de datos en los cuales se encuentran ubicados los IEDs, y el nivel superior es ocupado por la interfaz del HMI.

El envío y recepción de datos se lo realiza de dos maneras diferentes:

- **HMI – RED**

A través del panel de control del HMI, se envían los accionamientos del operador de forma manual, los cuales llegan al concentrador de datos de los dispositivos electrónicos inteligentes, para poder llegar hacia la red y realizar los accionamientos requeridos en los dispositivos solicitados.

- **RED – HMI**

La información de los estados de los dispositivos, así como también los valores de corriente y voltaje que se tienen a lo largo de la red, es enviada hacia el concentrador de datos, en donde la información es analizada y posteriormente enviada hacia el HMI.

El nivel más importante, donde se realiza la lógica y automatización de la red, es el ocupado por el concentrador de datos de los IEDs. Una vez que la información de la red es enviada hacia este nivel, esta es procesada, y si algún accionamiento automático es necesario realizar, debido a algún disturbio en la red, este será enviado hacia el nivel inferior (red), para obtener así una retroalimentación del estado de los dispositivos y sus niveles de corriente y voltaje. Una vez que se confirma el accionamiento dado, se procede a enviar esta ocurrencia al HMI, en donde se podrá visualizar la incidencia dada, junto al accionamiento oportuno dado.

3.2.2 Modelamiento de la red

La red utilizada consta de 2 alimentadores monofásicos provenientes de una subestación cada uno, dichos alimentadores poseen dispositivos de accionamiento tales como son el circuit breaker, feeder, midpoint y tie de enlace. Además, cada alimentador posee 4 cargas conectadas entre cada dispositivo de accionamiento.

La representación gráfica de Simulink del modelo de la red, presenta al circuit breaker de color naranja, al feeder de color café, al midpoint de color rojo y tie de enlace de color verde. Además de los dispositivos de accionamiento, se encuentran los

dispositivos de medición. Los dispositivos de medición de corriente se encuentran de color turquesa, mientras que los de medición de voltaje se presentan con color amarillo. La fuente de voltaje se encuentra con color azul al inicio de cada alimentador. Para poder simular una falla monofásica, esta es representada por un switch que se encuentra de color morado.

La representación gráfica del modelo de la red en Simulink se puede observar en la siguiente Figura 3.2:

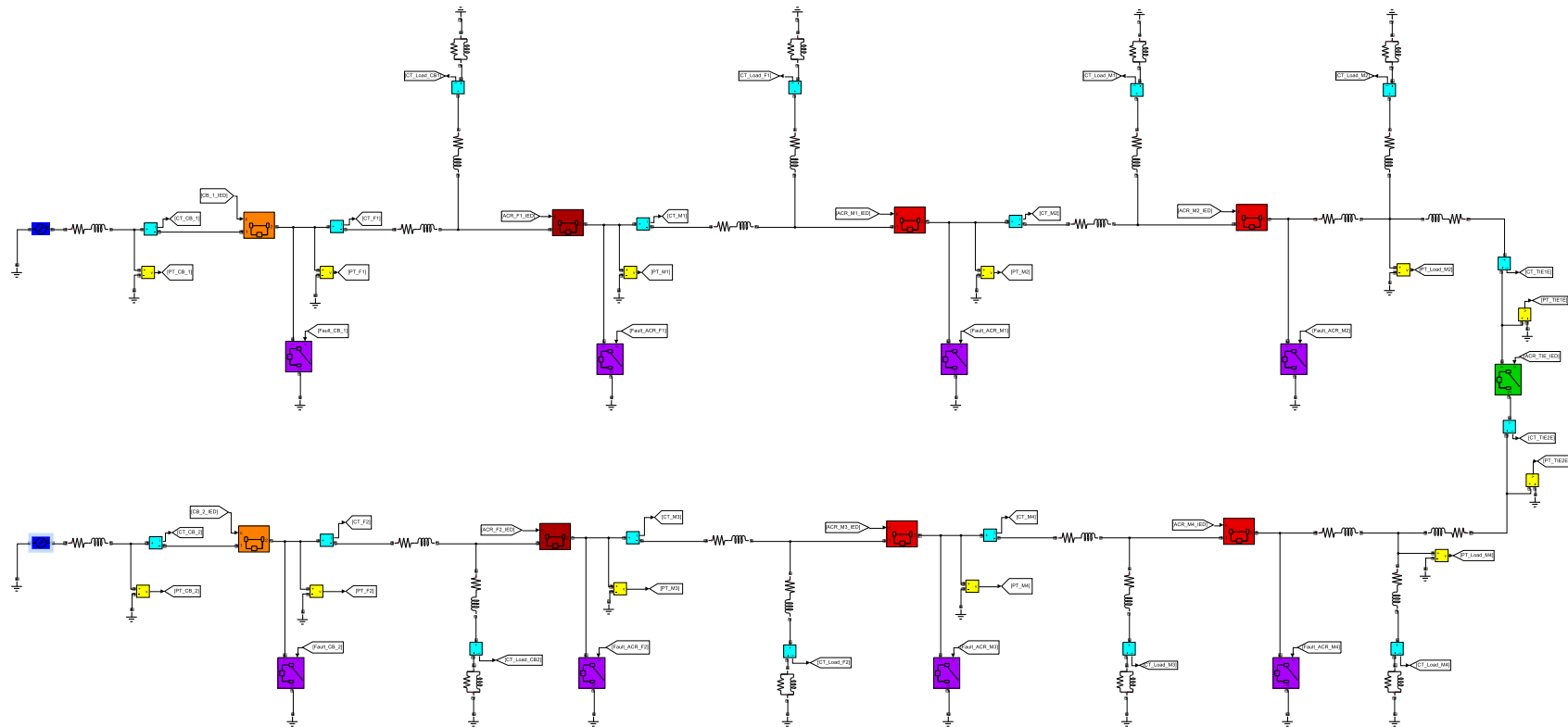


Figura 3.2 Modelamiento de la red en Simulink.

Al ser un sistema de distribución, la fuente de voltaje es el voltaje secundario del transformador de la subestación, dicho voltaje es de 13.8 [kV]. La resistencia de la línea es de 0.24874 [Ω] y una inductancia de 0.0023339 [H]. Las cargas consumen cada una potencia de 1 [kVA], es decir, 1 [kW] y 100 [VAR]. La frecuencia a la que se encuentra la red es de 60 [Hz]. Dichos valores se representan en la siguiente tabla:

Voltaje [KV]	13.8
Frecuencia [Hz]	60
Resistencia [Ω]	0.24874
Inductancia [H]	0.0023339
Carga [Kw]	1

Tabla 3.1 Parámetros del modelo del sistema de distribución.

3.2.2.1 Señales de entrada

Las señales de entrada son las que van desde el concentrador de datos hacia la red, estas señales llegan a los dispositivos de accionamiento y de fallas. Tal distribución se muestra a continuación:

3.2.2.1.1 Dispositivos de accionamiento

Cada dispositivo de accionamiento (circuit breaker 1 y 2, el feeder 1 y 2, el midpoint 1, 2, 3, 4, y el tie de enlace) posee una señal de actuación, la cual proviene del concentrador de datos de los IEDs. Esta señal, permite abrir o cerrar el paso de corriente, según los niveles de corriente y voltaje que detecten los medidores de corriente y voltaje. Esta representación se puede observar en la siguiente figura.

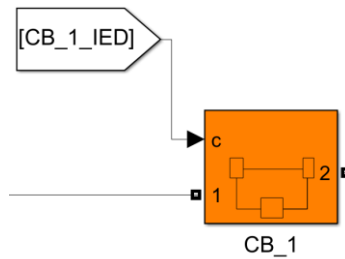


Figura 3.3 Señal de accionamiento del circuit breaker del alimentador 1.

En la Figura 3.3 se puede notar, que el interruptor va a abrir cuando se detecte una corriente mayor a la seteadada en los dispositivos de protección. Dicho accionamiento proviene del IED del circuit breaker 1.

3.2.2.1.2 Dispositivos de falla

Para poder simular una falla en el sistema, se envía una señal de accionamiento de falla desde el HMI, la cual va a ir hasta el concentrador de datos y finalmente llega al breaker de color morado. Se representa una falla de línea a tierra, debido a que es la falla de mayor porcentaje de ocurrencia, que puede ser temporal o permanente. Esta representación se puede observar en la siguiente figura.

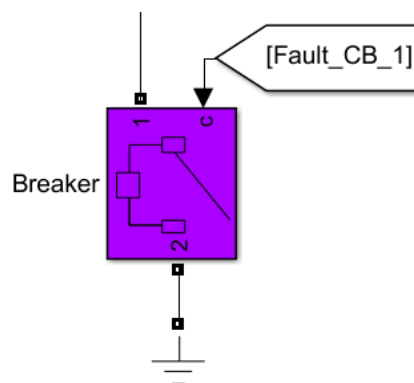


Figura 3.4 Señal de accionamiento de falla entre el circuit breaker 1 y el feeder 1

En la Figura 3.4 se puede notar que el interruptor se encuentra abierto, por lo que cuando se quiera realizar la simulación de la falla entre el CB 1 y el F1, la señal será enviada desde el HMI y este cerrará y provocará una corriente de falla en el sistema.

Las señales de entrada del modelo de red se muestran a continuación:

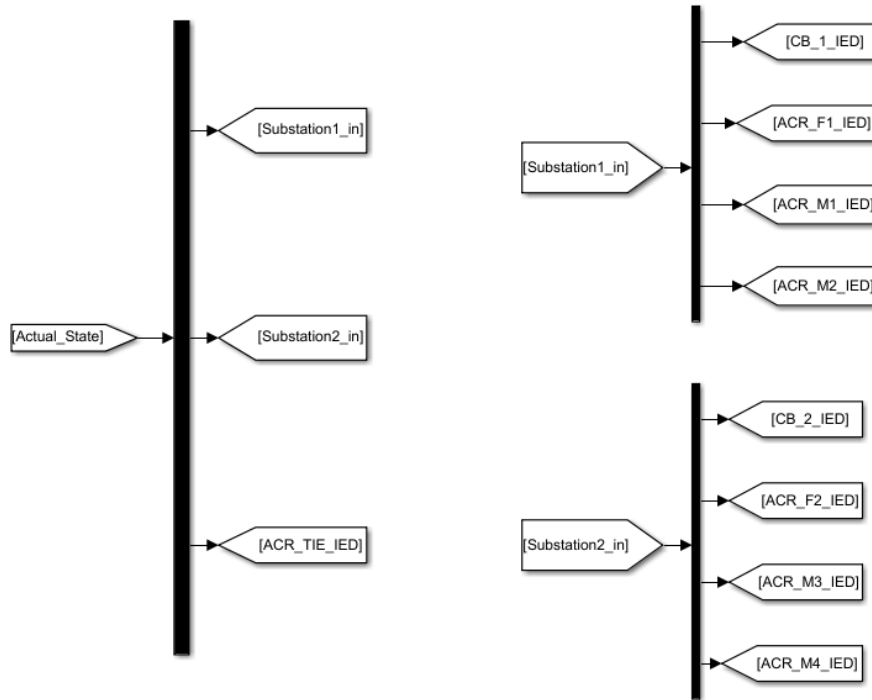


Figura 3.5. Señales de accionamiento de los dispositivos.

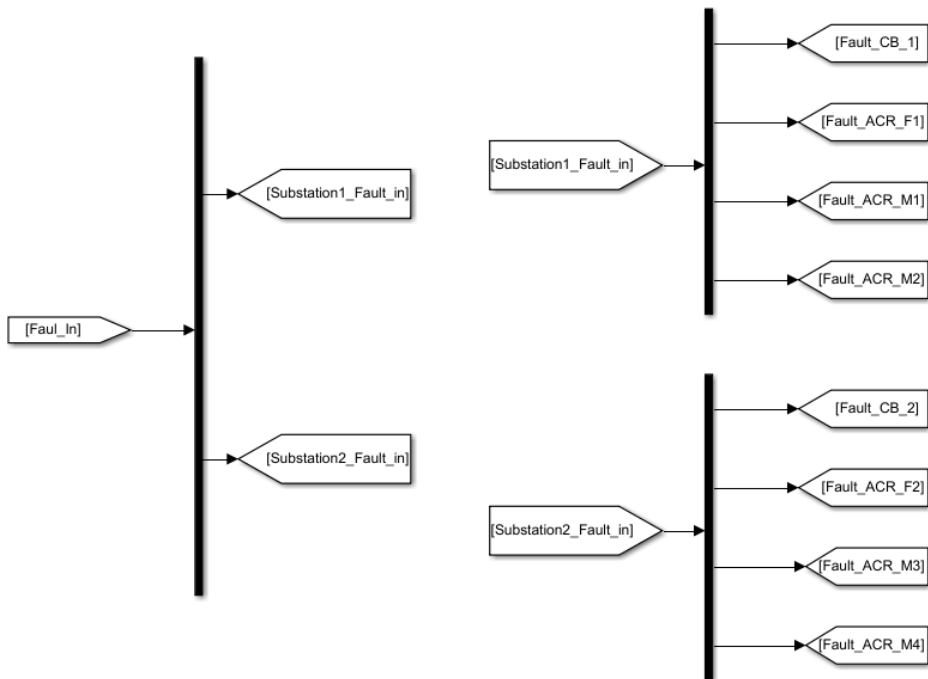


Figura 3.6 Señales de accionamiento de falla.

3.2.2.2 Señales de salida

Las señales que se obtienen a través de los medidores de corriente y voltaje, son los valores que estos miden. Dichas señales se pueden visualizar en la siguiente figura:

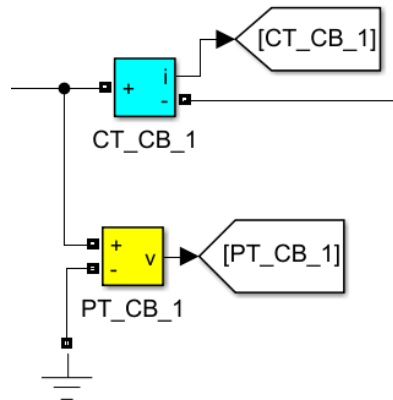


Figura 3.7 Señales de corriente y voltaje.

En la Figura 3.7 se puede apreciar los valores de corriente y voltaje que ve el circuit breaker 1.

Teniendo así que las señales de salida de las mediciones de las 2 subestaciones y del tie de enlace son las siguientes:

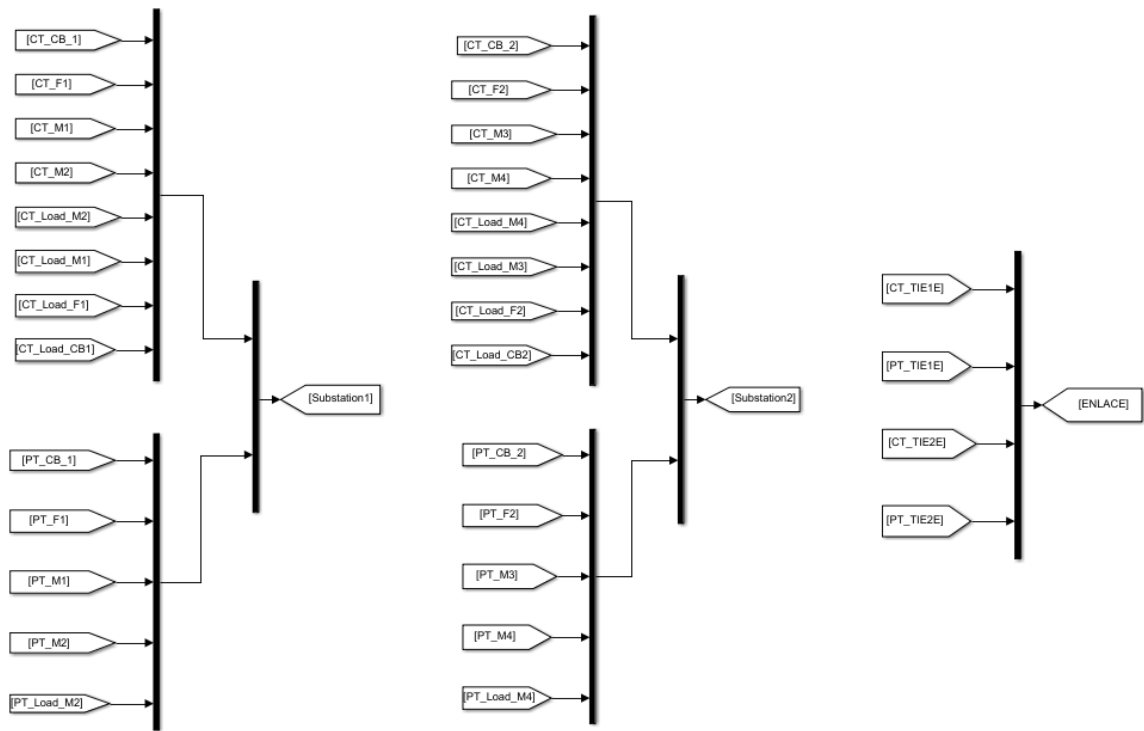


Figura 3.8 Señales corriente y voltaje.

Estas señales se pueden resumir en la siguiente figura:

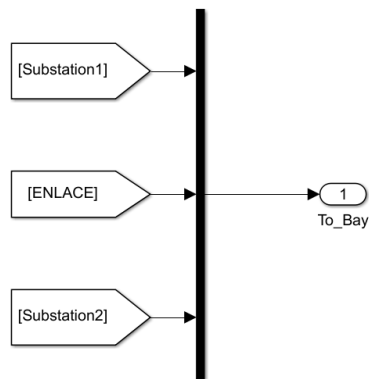


Figura 3.9 Señales enviadas al IED.

3.2.3 Modelamiento del concentrador de datos de los IEDs

En el concentrador de datos llega toda la información que se obtiene de la red, así como también los accionamientos manuales del operador por medio del HMI, razón por la cual, a través de la lógica de accionamiento propuesta por la estrategia del modelo clásico de Loop Automation, cada dispositivo tiene un IED enlazado, es decir, se tiene un IED para el circuit breaker, para el feeder, para los midpoint, y para el el tie de enlace, para cada alimentador, tal como se muestra en la siguiente figura:

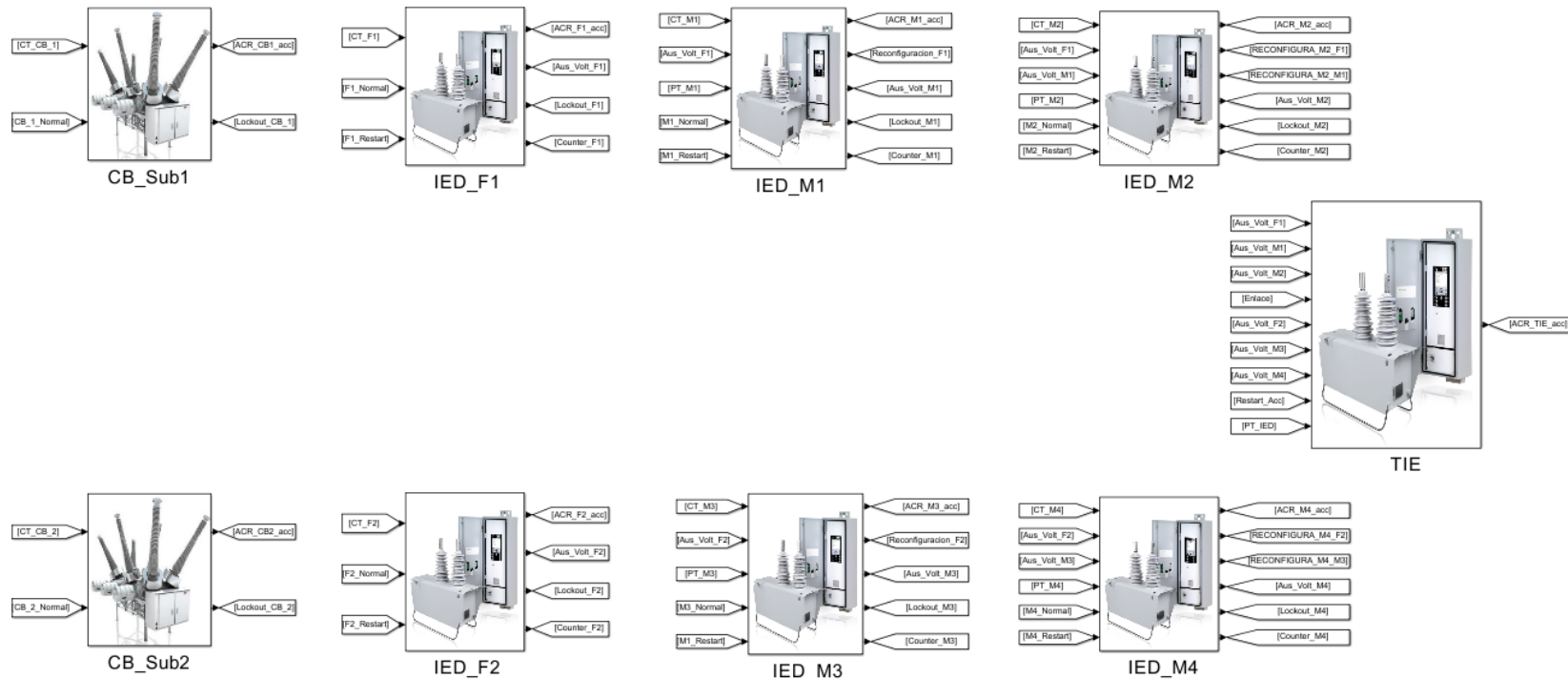


Figura 3.10 Dispositivos electrónicos inteligentes de cada restaurador.

3.2.4 Actuación de los IED

Cada dispositivo electrónico inteligente, al ser el cerebro del reconectador, permite que, mediante una lógica de accionamiento, el reconectador realice las siguientes tareas:

3.2.4.1 Actuación por sobrecorriente

Ante la perturbación de una falla, el valor de la corriente de falla es muy grande, por lo que pueden sobrecalentar los conductores y las bobinas de los equipos, pudiendo quemar a las líneas o máquinas. Además, se tienen fluctuaciones de voltaje y potencia, las cuales producen una inestabilidad y desbalance en el sistema, así como también se tiene el riesgo de accidentes, incluso de pérdidas humanas.

Al censar una corriente de falla, el IED envía la señal de interrupción del circuito a la red, esta señal llega al dispositivo de accionamiento, el cual envía la señal para abrir el interruptor, y así se evita que se siga alimentando a la falla, provocando la desconexión del servicio eléctrico.

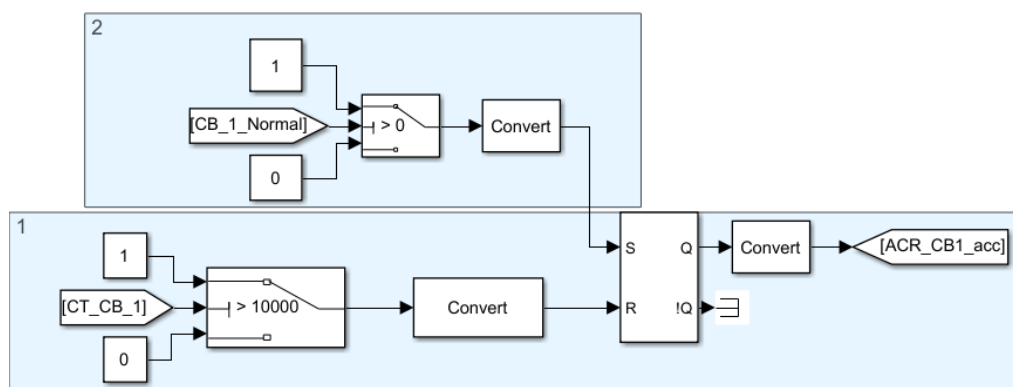


Figura 3.11 Lógica de actuación por sobrecorriente del circuit breaker 1.

En la Figura 3.11 se puede notar la utilización de un flip-flop, debido a que se debe tener memorizado el estado actual del circuit breaker 1, es decir, que cuando la corriente que circule en la red sobrepase al valor seteado, este interruptor se abrirá y mantendrá su estado. El seteo de esta corriente se realiza analizando el valor de corriente que se tiene ante la ocurrencia de una falla en ese punto. El cuadro superior

número 2, significa el regreso a la normalidad, es decir, que cambie de estado a cerrado. Esto se logra siempre y cuando se haya despejado la falla. Su accionamiento resulta cuando se quita la memoria del flip-flop, es decir, se quita el bloqueo o lockout que mantenía en la memoria.

El tiempo de apertura con el que se realiza este accionamiento es de forma rápida. Para cuando se realizan las reconexiones, este tiempo es de 100 ms, debido a que la velocidad de la simulación en el HMI, no es la misma a la de tiempo real, con lo que se asemeja el comportamiento real del sistema. Por lo general, dependiendo del interruptor de potencia, el tiempo de apertura puede ser mucho más rápido, por el orden de los 50 ms, pero los 100 ms se encuentran dentro del rango. Además, el tiempo escogido permite visualizar la actuación de la protección.

3.2.4.2 Reconexiones

El circuit breaker es el único dispositivo en el cual, el IED que no realiza reconexiones para poder restablecer el servicio eléctrico al sistema. Al decir reconexiones, se refiere al cambio de estado del dispositivo que actuó en la reconexión, para que después de un tiempo, este vuelva a cerrar. La lógica de este accionamiento es debido a que la mayor ocurrencia de fallas es de tipo temporal, como puede ser la caída de una rama, o la incidencia de animales sobre las líneas de distribución.

El número de reconexiones dependerá de la persona que programa al IED, para este caso se escogieron 4 reconexiones, ya que son las más recomendadas. Se saben elegir 2 reconexiones lentas, y 2 rápidas, pero para este caso, las 4 reconexiones van a tener la misma velocidad de reconexión. Se escogió un tiempo de 400 ms, debido a que se espera ver la actuación de las reconexiones en la simulación.

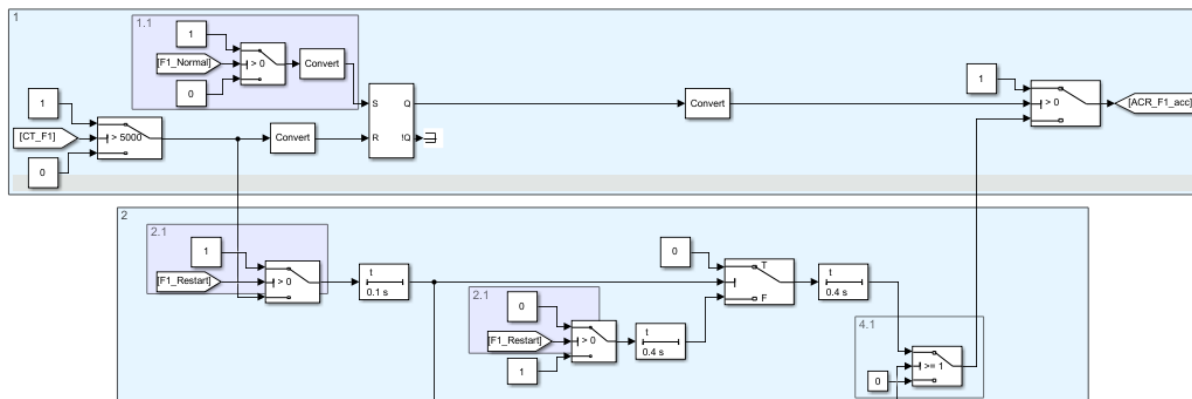


Figura 3.12 Lógica del accionamiento por sobrecorriente y reconexión del Feeder 1.

En el bloque superior número 1, se tiene la misma lógica que se presentó en la actuación del interruptor del circuit breaker, pero en este caso, el feeder 1 es un reconectador, en el cual, dicha lógica de reconexión se observa en el bloque 2. En donde se observa que las reconexiones se dan cada 400 ms, y que el tiempo de apertura por sobrecorriente es de 100 ms. En el bloque 2.1 se tiene la restauración del sistema, la cual ocurre una vez que se ha quitado la falla y se ha quitado el lockout de los reconectadores. Esta señal es enviada directamente del HMI.

3.2.4.3 Lockout

EL dispositivo se encuentra en lockout o bloqueado, cuando ya no realiza ningún otro accionamiento. Esto ocurre cuando actúa el circuit breaker ante la presencia de una falla, ya que este no realiza reconexiones. Una vez que se realizan las 4 reconexiones, los dispositivos electrónicos inteligentes bloquean al reconectador, es decir, se mantendrá el estado abierto del interruptor, esto debido a que ya no se trata de una falla temporal sino permanente, en donde se tendrá que enviar a una cuadrilla a solucionar el problema y a despejar la falla.

En la siguiente figura se puede observar el contador de las reconexiones.

3.2.4.4 Accionamiento del Tie

Este accionamiento se da, cuando se encuentra en lockout algún dispositivo, debido a la ocurrencia de alguna falla. Cuando actúa el circuit breaker, el tie no es accionado, debido a que este es la última protección de respaldo del sistema, ante la ocurrencia de fallas. Cuando se han realizado las 4 reconexiones, se envía una señal al tie, para que después de un tiempo, este cierre y energice la parte del sistema que ha recibido la desconexión. Al momento de que esto ocurre, se vuelve a ver la falla, por lo que el dispositivo que ve la falla actúa inmediatamente con la protección de sobrecorriente.

Cabe recalcar, que para que el tie cierre, primero se debieron haber cambiado las protecciones de los dispositivos de accionamiento que se desconectaron, para que cuando circule la corriente en sentido contrario, estos puedan actuar con un seteo diferente de corriente, ya que la corriente de falla no será la misma, ya que, al energizar desde otra subestación, se encuentra todo ese sistema conectado con la parte que se desconectó anteriormente.

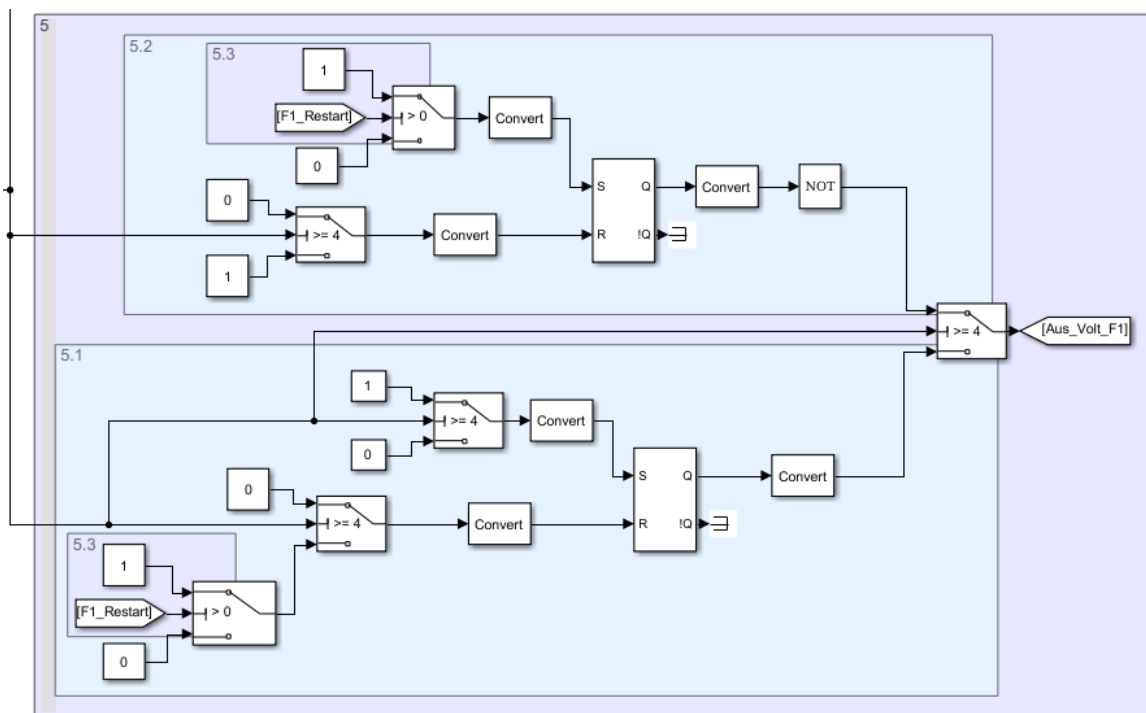


Figura 3.15 Lógica del envío de señal para el accionamiento del tie.

En la Figura 3.15 se puede visualizar que la señal que llega al bloque 5 es la del contador de pulsos, en donde se debe enviar una señal al TIE para indicarle que han ocurrido las 4 reconexiones. Se usan 2 flip-flop, debido a que se debe tener 0110, es decir, empezar sin enviar el accionamiento (envío 0), luego enviar y mantener la señal que se envía al TIE (envío 1), luego para la restauración regresar a la normalidad (envío 0).

En el bloque 5.1 inicialmente no existe ningún accionamiento, es decir ese envía un 0, y cuando ocurren las 4 reconexiones envía un 1. En el bloque 5.2 al llegar a las 4 reconexiones, el switch rápidamente permite enviar la señal de accionamiento (envía 1), y mantengo ese 1 por medio del flip-flop. Esta es la señal de accionamiento del Tie. En el bloque 5.3 se tiene la restauración a la normalidad del sistema, con lo que ya no se debe mantener la señal del tie, por lo que se quita la memoria y se envía un 0. Este accionamiento es enviado directamente del HMI.

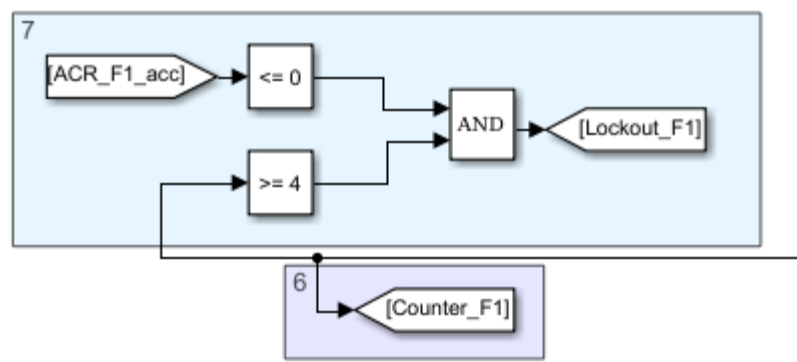


Figura 3.16 Lógica del envío de señal del número de reconexiones y ocurrencia de lockout, hacia el HMI.

En la Figura 3.16 se puede visualizar, que se envía hacia el concentrador de datos de los IEDs y posteriormente hacia el HMI, el número de reconexiones que ha realizado el reconectador, así como también la ocurrencia de lockout por parte del feeder 1.

3.2.4.5 Cambio del sentido de la protección y ajuste del relé de sobrecorriente

Cuando existe el accionamiento del Feeder 1 o del Midpoint 1, se tiene un cambio en el sentido de la protección, debido a que que el tie va a cerrar y va a provocar una corriente que va a circular en el sentido contrario, por lo que el ajuste de la corriente a la cual va a abrir el interruptor deberá de cambiar, ya que se trata de otro sistema con esta nueva reconfiguración.

3.2.4.5.1 Accionamiento del feeder 1

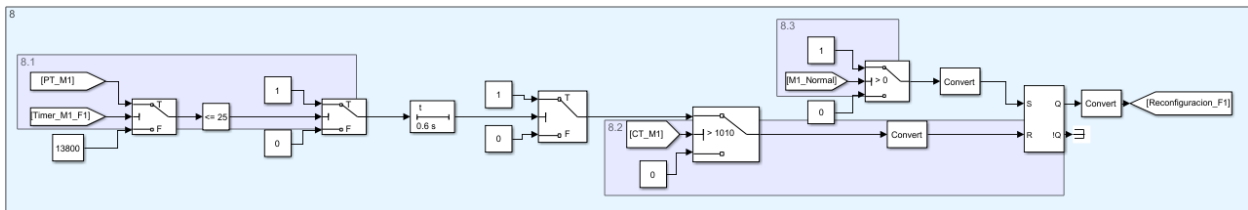


Figura 3.17 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M1 mediante accionamiento de F1.

En la Figura 3.17 se puede notar, que cuando se ha realizado el accionamiento del feeder 1 y queda este en lockout, la señal de ocurrencia es enviada al tie y también al midpoint 1, ya que este debe cambiar el sentido de su protección de sobrecorriente y realizar un ajuste en el valor al cual se va a disparar. Para poder realizar esto, el bloque 8.1 nos indica que una vez que se envía la señal del feeder 1, se procede a revisar el voltaje en el midpoint 1, en donde al ser menor o igual a 25 [V], la señal de accionamiento para abrir el interruptor por sobrecorriente está lista para enviarse.

Cuando el medidor de corriente del midpoint 1 detecta un valor de corriente elevado, esta señal es enviada, ya que ya se realizó el accionamiento del tie, ya que el sentido de la corriente ha cambiado y al no verse despejada la falla, esta será vista por el midpoint 1, provocando el accionamiento de apertura del interruptor, y así poder mantener con el aislamiento del sector en el cual se encontraba la falla permanente. El bloque 8.3 indica que cuando se quiera quitar el lockout del reconectador, esta señal

será enviada del HMI a través del concentrador de datos, para quitar la memoria y regresar al flip-flop a la normalidad.

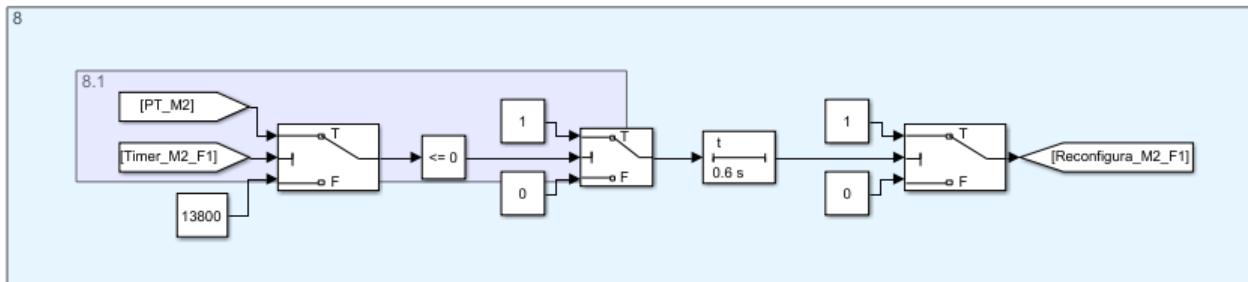


Figura 3.18 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M2 mediante accionamiento de F1.

De igual manera como ocurrió con el midpoint 1, el feeder 1 al quedar en lockout, envía la señal de cambio de protección al midpoint 2, ya que el sentido de la corriente va a cambiar, y este es el respaldo por si el midpoint 1 no llegase a actuar cuando vuelva a ver la falla que accionó al feeder 1. En el bloque 8.1, vemos que una vez que se envía la señal, se compara el voltaje en el que se encuentra el midpoint 2, en donde al ser cero este, significa que no tiene voltaje y que el tie va a cerrar el circuito, por lo que cambia de protección, es decir se reconfigura.

3.2.4.5.2 Accionamiento del midpoint 1

Cuando actúa el midpoint 1 y este queda en lockout, se envía la señal de cambio de protecciones al midpoint 2, ya que al cerrar el tie, la falla no se ha despejado y deberá actuar la protección por sobrecorriente y abrir el interruptor. Cuando esto ocurre, el tie queda cerrado, energizando la carga que se encuentra conectada luego del midpoint 2.

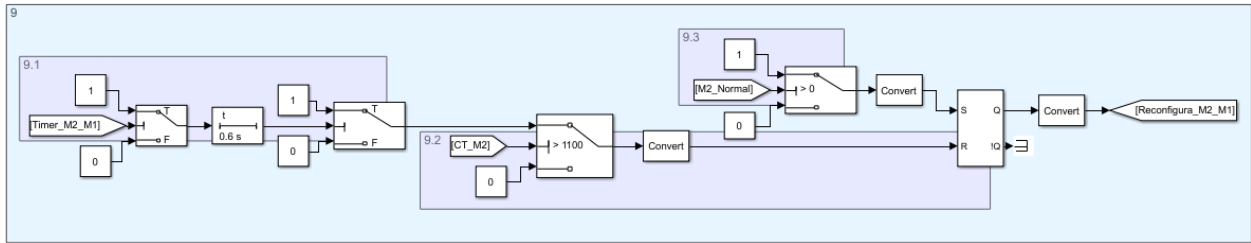


Figura 3.19 Cambio de protección y ajuste de sobrecorriente en el M2 mediante accionamiento del M1.

En la Figura 3.19 se puede notar, que cuando se ha realizado el accionamiento del midpoint 1 y queda este en lockout, la señal de ocurrencia es enviada al tie y también al midpoint 2, ya que este debe cambiar el sentido de su protección de sobrecorriente y realizar un ajuste en el valor al cual se va a disparar. Para poder realizar esto, el bloque 9.1 nos indica que una vez que se envía la señal del midpoint 1, se tiene que la señal de accionamiento para abrir el interruptor por sobrecorriente está lista para enviarse una vez que se detecte la falla que vió anteriormente el midpoint 1.

3.2.4.6 Accionamiento del midpoint 2

El caso del midpoint 2 es muy diferente a los anteriores IEDs, ya que este tiene las características de sobrecorriente, de reconexión, de lockout y de envío de señal al tie cuando se han realizado las 4 reconexiones. Ocurre algo particular, ya que, a través de la metodología, al encontrarse la falla entre el midpoint 2 y el enlace, el tie verá la falla cuando este cierre, por lo que, al ser un IED, este también tiene la protección de sobrecorriente y provoca que cambie nuevamente de estado, y el interruptor se vuelva a abrir.

Así como han ocurrido los accionamientos en la subestación 1, de la misma manera ocurren en la subestación 2. Al tratarse de configuraciones iguales, tendrán los mismos seteos y los mismos análisis. Solamente cambia el número del dispositivo.

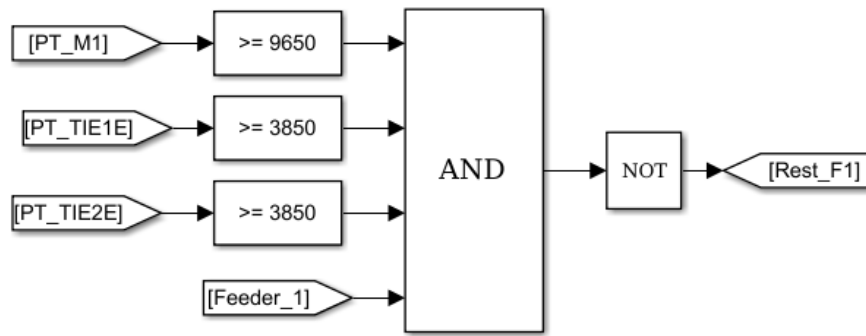


Figura 3.21 Confirmación de accionamiento del tie, mediante comparación de niveles de voltaje en el feeder 1.

En la Figura 3.21 se puede notar que, para que el tie accione, este debe de poder energizar una subestación con la otra, por lo que se verifica el nivel de voltaje de ambas subestaciones, para poder confirmar que el tie pueda cerrar y abastecer al sector afectado por la falla. De igual manera, se verifica el voltaje resultante en el dispositivo, para comprobar que este quedó en lockout y presenta una falla. La señal de voltaje de M1 se debe a que este se encuentra al mismo nivel de voltaje de donde ocurre la falla. En donde los seteos de estos voltajes resultan idénticos, exceptuando para el M2 y M4 que se presentan a continuación en la siguiente ilustración.

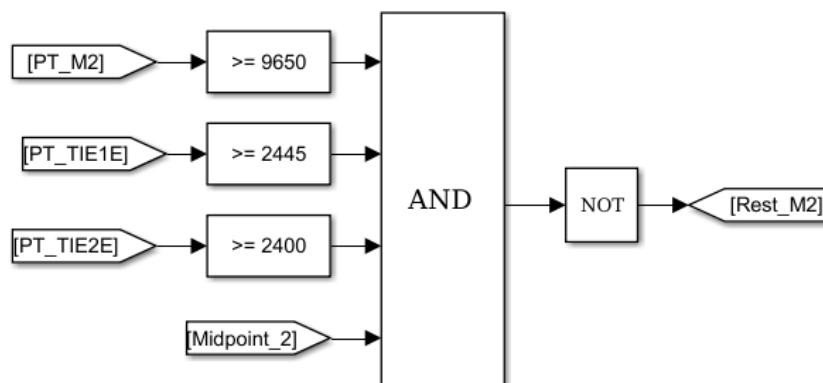


Figura 3.22 Confirmación de accionamiento del tie, mediante comparación de niveles de voltaje en el midpoint 2.

En la Figura 3.22, se puede notar que al ocurrir una falla entre el midpoint 2 y el tie, se tiene una caída de tensión, por lo que el voltaje que se tiene es menor a los otros dispositivos, como vimos anteriormente.

Se tiene el accionamiento del tie mediante la comparación de señales, tal como se muestra en la siguiente ilustración.

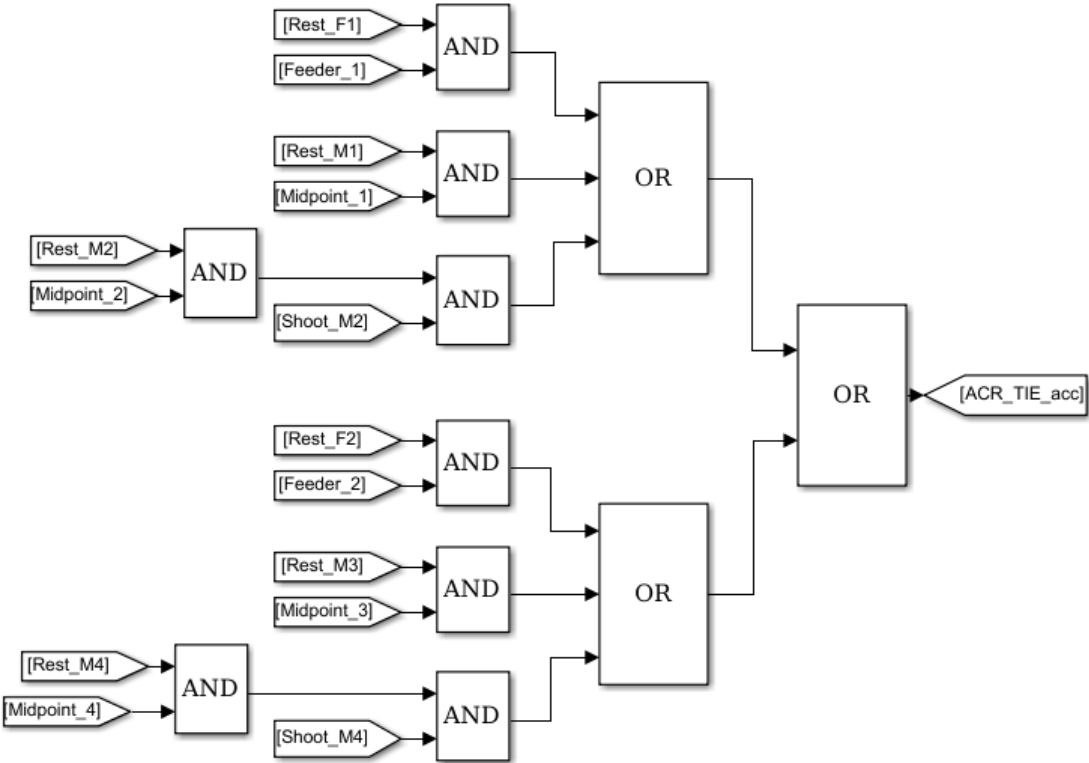


Figura 3.23 Accionamiento del tie de enlace.

En la Figura 3.23 se puede notar, que tanto como M2 y M4 presentan una señal más de comparación. Dicha señal es enviada por la protección de sobrecorriente, como se muestra a continuación en la siguiente figura.

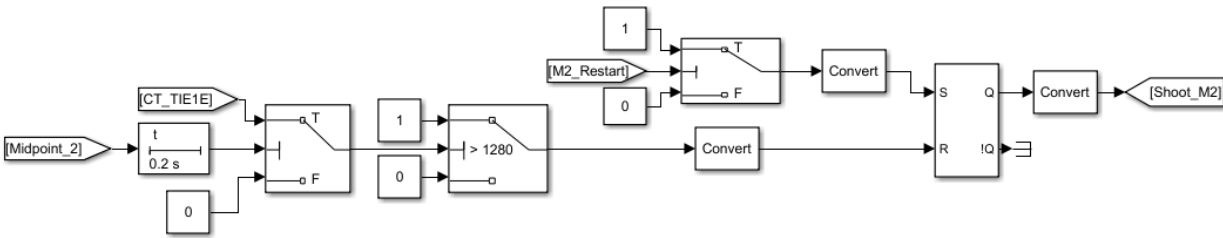


Figura 3.24 Lógica de accionamiento por sobrecorriente.

En la Figura 3.24 se puede notar, la apertura del tie por sobrecorriente. Esto se debe a que cuando se tiene la falla entre midpoint 2 y el tie, el enlace al cerrar ve la falla, lo cual acciona la señal de interruptor para que el tiempo de apertura sea de 200 ms, y así no se alimente la falla. De igual manera ocurre con el midpoint 4 y el tie. Se puede ver, además, que la señal de restauración del sistema quita la memoria del flip-flop lo cual regresa a la normalidad al tie.

3.2.4.8 Accionamientos de los IED

Una vez que se tienen las señales de salida de los IEDs en el concentrador de datos, se procede a revisar los accionamientos que realiza cada uno.

Se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- **Cuando se quita el lockout del dispositivo, esto no indica un cambio de estado.**

Esto se debe a que cuando ocurre una falla, el reconectador queda bloqueado, por lo que, si la falla es permanente, la cuadrilla se dirige hacia el lugar a arreglar la falla, y procede a quitarla. Con lo cual, se quita el bloqueo del dispositivo accionado, pero no se energiza en ese mismo instante, ya que, al quitar el bloqueo, el personal que se encuentra en el lugar, procede a revisar si sufrió alguna afectación el dispositivo, y esto no lo podría hacer si cuando se lo desbloquea se conecta directamente al sistema.

3.2.4.8.1 Circuit Breaker

Una vez que se tienen las señales de salida de los circuit breaker 1 y 2, se procede a realizar la siguiente lógica que permite el accionamiento del cambio de estado ante la ocurrencia de falla.

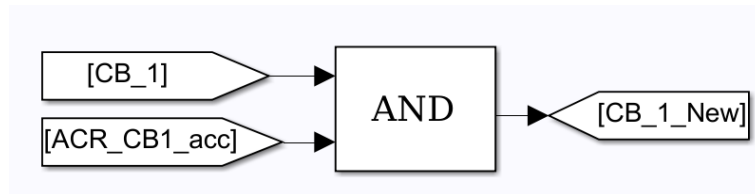


Figura 3.25 Lógica de accionamiento del circuit breaker.

En la Figura 3.25 se puede ver la señal del estado del circuit breaker, que proviene del HMI de forma manual por parte del operador, comparada con la señal de accionamiento ante la ocurrencia de una corriente de falla.

3.2.4.8.2 Feeder 1 y 2

Una vez que se tienen las señales de salida del feeder 1 y 2, se procede a realizar la siguiente lógica que permite el accionamiento del cambio de estado ante la ocurrencia de falla.



Figura 3.26 Lógica de accionamiento del feeder 1.

En la Figura 3.26 se puede visualizar la señal del estado del feeder 1, que proviene del HMI de forma manual por parte del operador, comparada con la señal de accionamiento ante la ocurrencia de una corriente de falla. Para esta señal, se debe de utilizar una lógica que permita quitar el bloqueo del reconectador sin que este cambie de estado. Además, cuando se quita la falla y el lockout, se realiza la restauración completa del sistema, lo cual también se considera en la aparición de esta señal. La siguiente lógica muestra de donde se obtiene esta señal.

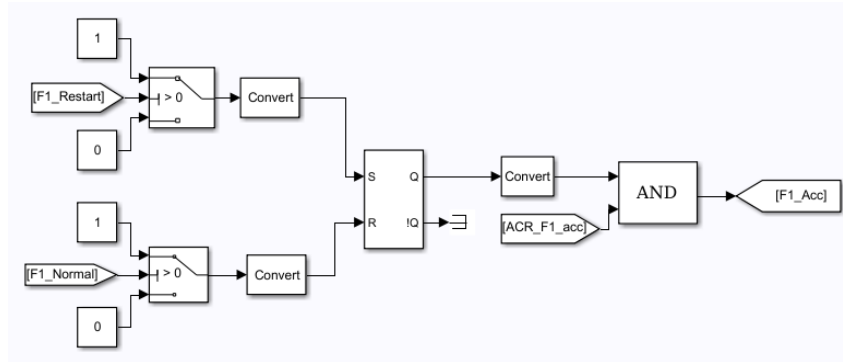


Figura 3.27 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el feeder 1.

En la Figura 3.27 se puede visualizar el accionamiento de desbloqueo del lockout en el que se encuentra el reconectador, esta señal es dada por F1_Normal desde el HMI y el ACR_F1_acc quita el lockout del reconectador. Además, se presenta la restauración total del sistema, en donde se procede a quitar la memoria en donde se tenía almacenado el desbloqueo del reconectador para volver a la normalidad.

3.2.4.9 Midpoint 1 y 3

Una vez que se tienen las señales de salida del midpoint 1 y 3, se procede a realizar la siguiente lógica que permite el accionamiento del cambio de estado ante la ocurrencia de falla.

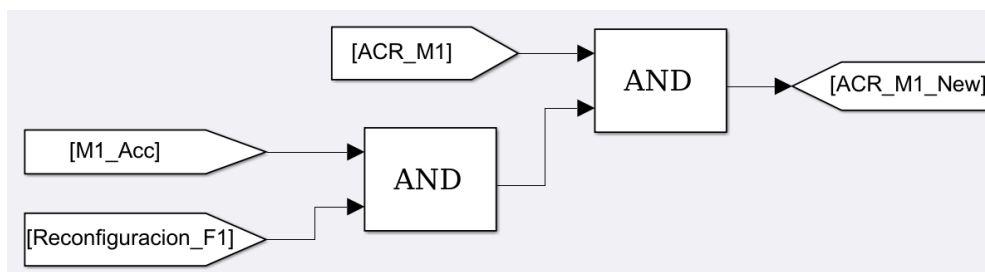


Figura 3.28 Lógica de accionamiento del midpoint 1.

En la Figura 3.28 se puede visualizar la señal del estado del midpoint 1, que proviene del HMI de forma manual por parte del operador, comparada con la señal de accionamiento ante la ocurrencia de una corriente de falla. Para este caso, la ocurrencia de falla compara a través de las 2 direcciones de protecciones, porque este

dispositivo verá los 2 sentidos de corriente. Además, para esta señal, se debe de utilizar una lógica que permita quitar el bloqueo del reconector sin que este cambie de estado. Cuando se quita la falla y el lockout, se realiza la restauración completa del sistema, lo cual también se considera en la aparición de esta señal. La siguiente lógica muestra de donde se obtiene esta señal.

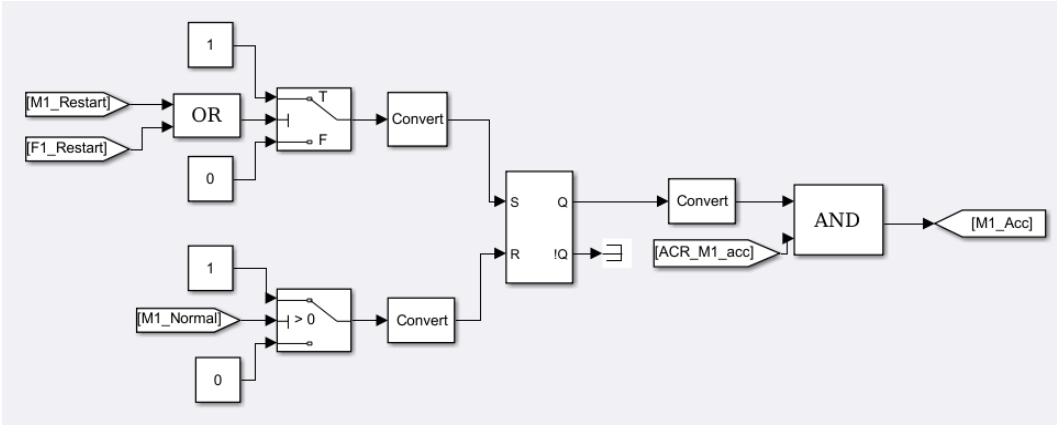


Figura 3.29 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el midpoint 1.

En la Figura 3.29 se puede visualizar el accionamiento de desbloqueo del lockout en el que se encuentra el reconector, esta señal es dada por M1_Normal desde el HMI y el ACR_M1_acc quita el lockout del reconector. Además, se presenta la restauración total del sistema, por parte de la restauración del midpoint 1, o del feeder 1, esta señal es enviada del HMI, pero antes de esto, se debe de quitar la memoria en donde se tenía almacenado el desbloqueo del reconector para poder volver a la normalidad.

3.2.4.10 Midpoint 2 y 4

Una vez que se tienen las señales de salida del midpoint 2 y 4, se procede a realizar la siguiente lógica que permite el accionamiento del cambio de estado ante la ocurrencia de falla.

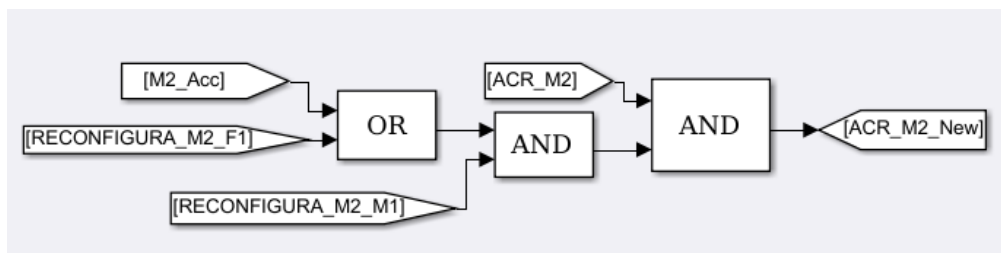


Figura 3.30 Lógica de accionamiento del midpoint 2.

En la Figura 3.30 se puede visualizar la señal del estado del midpoint 2, que proviene del HMI de forma manual por parte del operador, así como también la señal de cambio de protección debido al accionamiento del feeder 1. Cualquiera de estas 2 señales es comparado con la señal de cambio de protección debido al accionamiento del midpoint1, estos accionamientos se comparan finalmente con el accionamiento ante la ocurrencia de una corriente de falla.

Para este caso, la ocurrencia de falla compara a través de las 2 direcciones de protecciones, porque este dispositivo verá los 2 sentidos de corriente. Además, para esta señal, se debe de utilizar una lógica que permita quitar el bloqueo del reconectador sin que este cambie de estado. Cuando se quita la falla y el lockout, se realiza la restauración completa del sistema, lo cual también se considera en la aparición de esta señal. La siguiente lógica muestra de donde se obtiene esta señal.

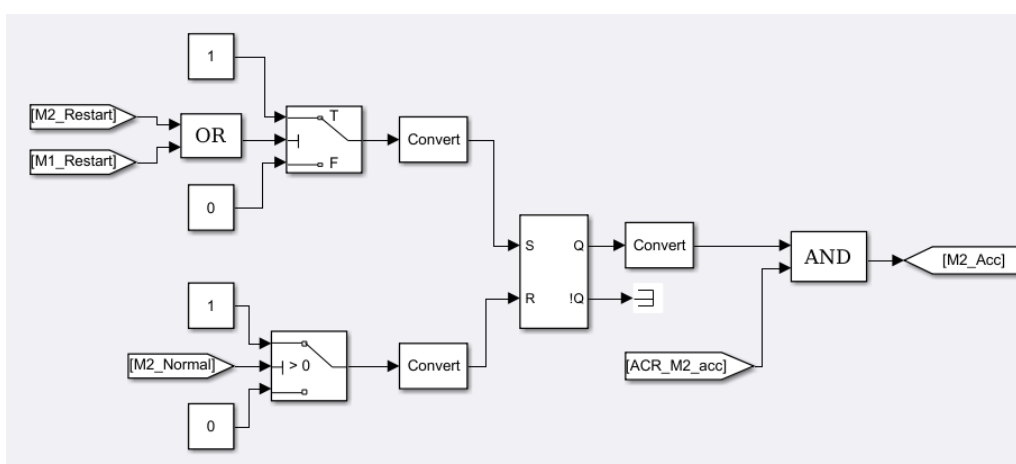


Figura 3.31 Lógica de accionamiento de la señal cuando ocurre desbloqueo y restauración en el midpoint 2.

En la Figura 3.31 se puede visualizar el accionamiento de desbloqueo del lockout en el que se encuentra el reconectador, esta señal es dada por M2_Normal desde el HMI y el ACR_M2_acc quita el lockout del reconectador. Además, se presenta la restauración total del sistema, por parte de la restauración del midpoint 1, o del midpoint 1, esta señal es enviada del HMI, pero antes de esto, se debe de quitar la memoria en donde se tenía almacenado el desbloqueo del reconectador para poder volver a la normalidad.

3.2.4.11 Tie de enlace

Una vez que se tiene la señal de salida del tie de enlace, se procede a realizar la siguiente lógica que permite el accionamiento del cambio de estado ante la ocurrencia de falla o de forma manual, tal como se muestra en la siguiente figura.

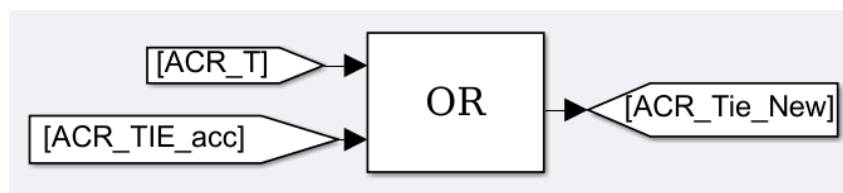


Figura 3.32 Lógica de accionamiento del tie de enlace.

En la Figura 3.34 se puede observar que el accionamiento del tie se puede dar de forma manual a través de la señal enviada del HMI, así como también se tiene el accionamiento resultante de la lógica del dispositivo eléctrico inteligente del tie.

3.2.5 Salidas del concentrador de datos

Una vez que se han obtenido las señales de los nuevos estados, procedemos a convertirlas a double, para que puedan ser enviadas al HMI y se pueda utilizar para la lógica de los estados de los dispositivos. Dicha compilación de señales se puede observar en la siguiente figura.

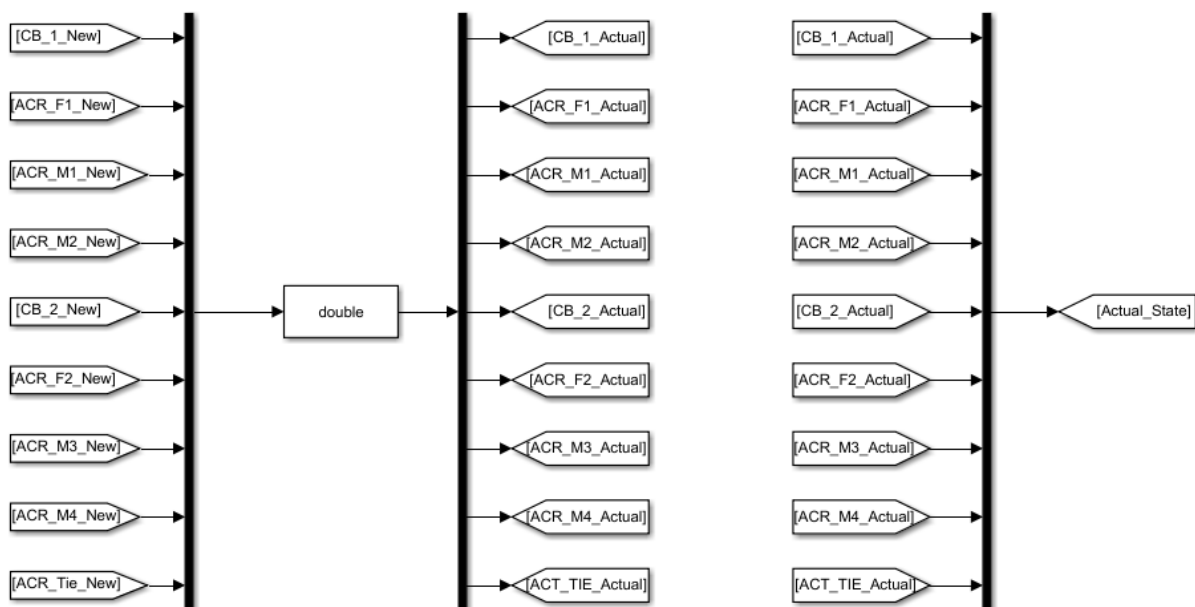


Figura 3.33 Estados finales de los dispositivos de accionamiento.

Se envía al HMI, la información de los estados de los reconectores, es decir, si se encuentra o no bloqueados, estos aparecerán como señal de alarma en el HMI.

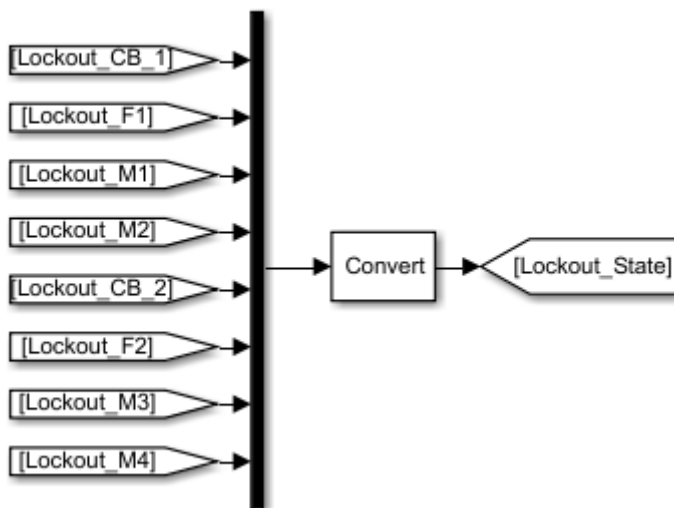


Figura 3.34 Estados de los reconectores.

De igual manera se envía al HMI el número de reconexiones que realizan los reconectores, como se aprecia en la siguiente ilustración.

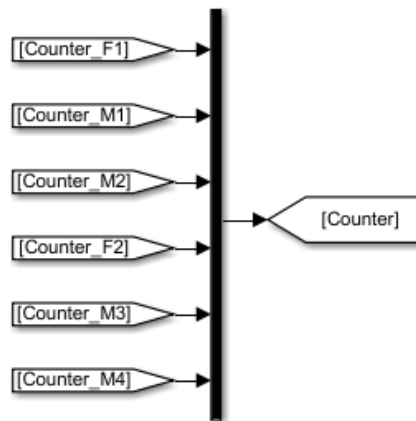


Figura 3.35 Número de reconexiones de los reconectores.

Los valores de las mediciones de voltaje y corriente son transformados en valores RMS, y así también son enviados con sus valores instantáneos hacia el HMI, para poder realizar el cálculo de potencia, y poder apreciar estas mediciones en el diagrama unifilar del HMI. Dichas señales se pueden visualizar en la siguiente figura.

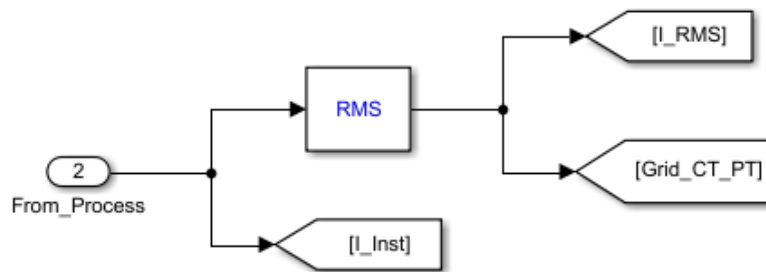


Figura 3.36 Corrientes instantáneas y RMS que serán enviadas al HMI.

De donde se tiene una simplificación de las señales enviadas al HMI a través del siguiente compresor de señales.

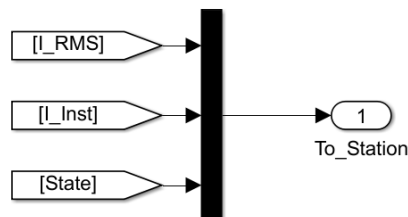


Figura 3.37 Señales enviadas al HMI.

3.3 Modelamiento del HMI

El HMI es el nivel superior de nuestro sistema SCADA, en el cual se visualiza el comportamiento del sistema, razón por la cual, debemos de tener señales de corrientes instantáneas, y RMS, así como también, los valores de voltaje, las señales de lockout de los reconectores, el número de reconexiones realizadas, y las señales de accionamiento de los IED.

Para el modelamiento del HMI, se utilizó las herramientas de la librería dashboard.

3.3.1 Diagrama unifilar

El diagrama unifilar del sistema fue desarrollado a través de lógica de imágenes. Las imágenes para utilizar junto a su significado son las siguientes:

- **Interruptor:** Indica el estado del dispositivo, sea este abierto (verde) o cerrado (rojo).

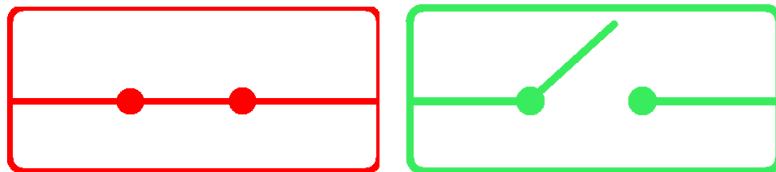


Figura 3.38 Interruptor abierto (verde) y cerrado (rojo).

- **Cables:** Indica el estado de la corriente que circula por el alimentador, sea este verde (corriente = 0), rojo (corriente = nominal), amarillo (corriente = falla).



Figura 3.39 Estado del alimentador.

- **Cargas:** Indica el estado de la corriente que circula hacia la carga.

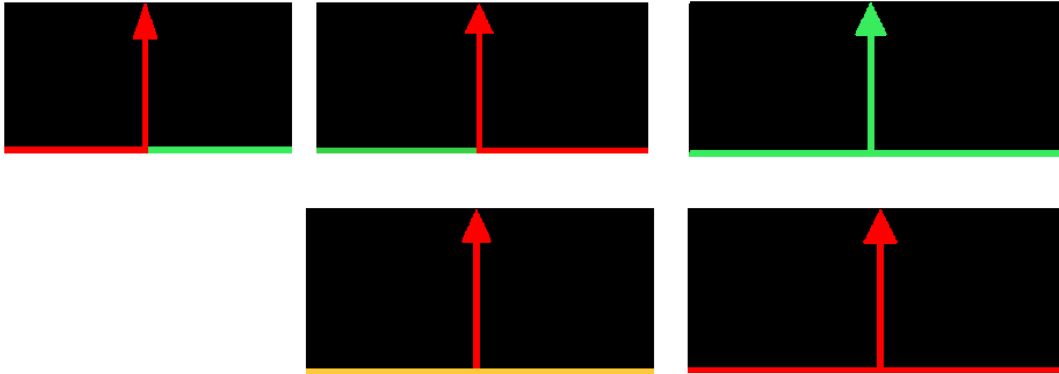


Figura 3.40 Estado de la corriente que circula hacia la carga.

3.3.2 Señal de fallas

La señal de existencia de falla es enviada del HMI hacia el concentrador de datos y posteriormente llega a la red. Dicha señal, indica el lugar de ocurrencia de falla.

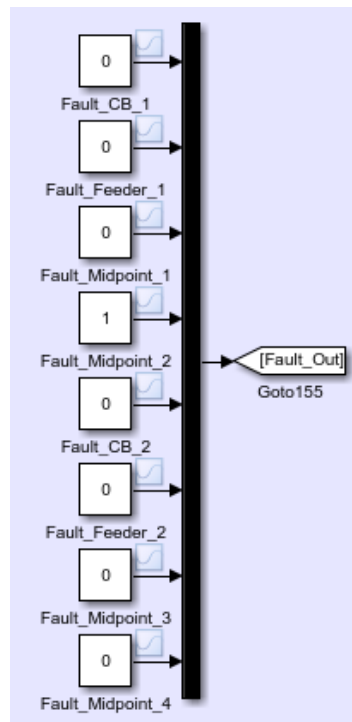


Figura 3.41: Señales de salida

En la Figura 3.41 se muestran las señales que son enviadas a la red, las cuales ocasionaran que exista una perturbación en el sistema.

3.3.3 Lógica del IED de lockout

En la siguiente figura se presentan las lógicas usadas para hacer que los IEDs se enciendan cuando indican que el IED se quedó en estado de lockout.

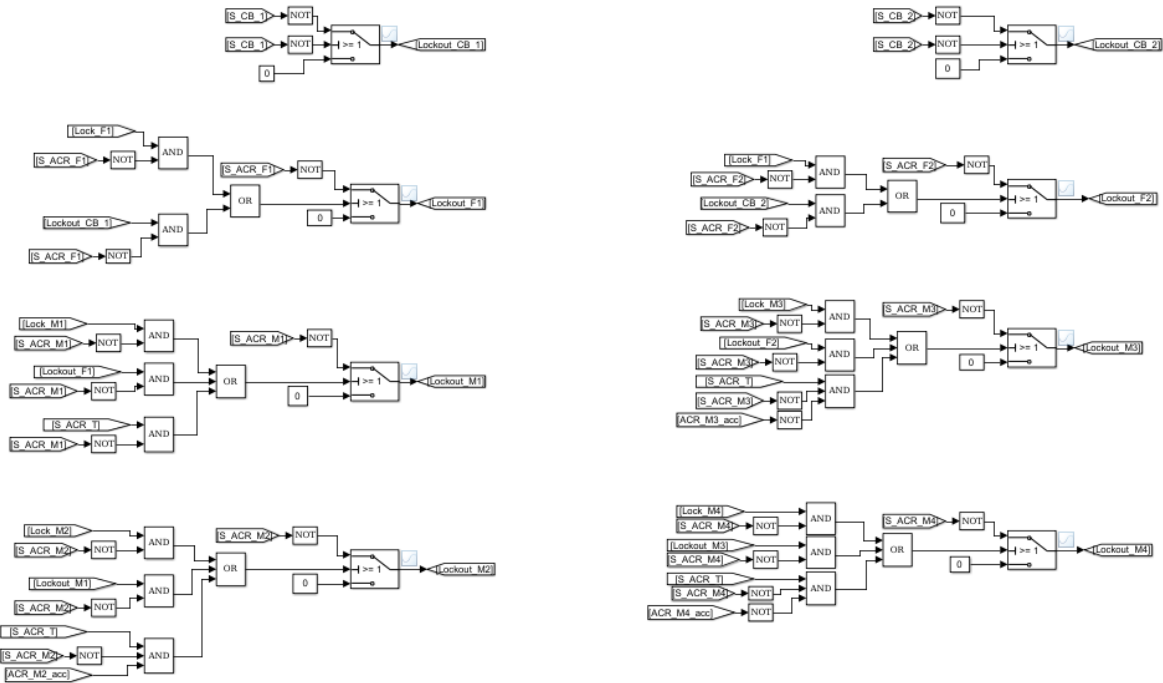


Figura 3.42 Señales del estado de lockout de los IED.

En la Figura 3.42 se muestra los bloques y lógica que fue diseñada para lograr visualizar en el HMI las alarmas activas cuando algún IED pase al estado de Lockout.

3.3.4 Lógica para las imágenes usadas en el diagrama unifilar

Para que las imágenes interactúen en el HMI se utilizó la siguiente lógica como se muestra en la figura.

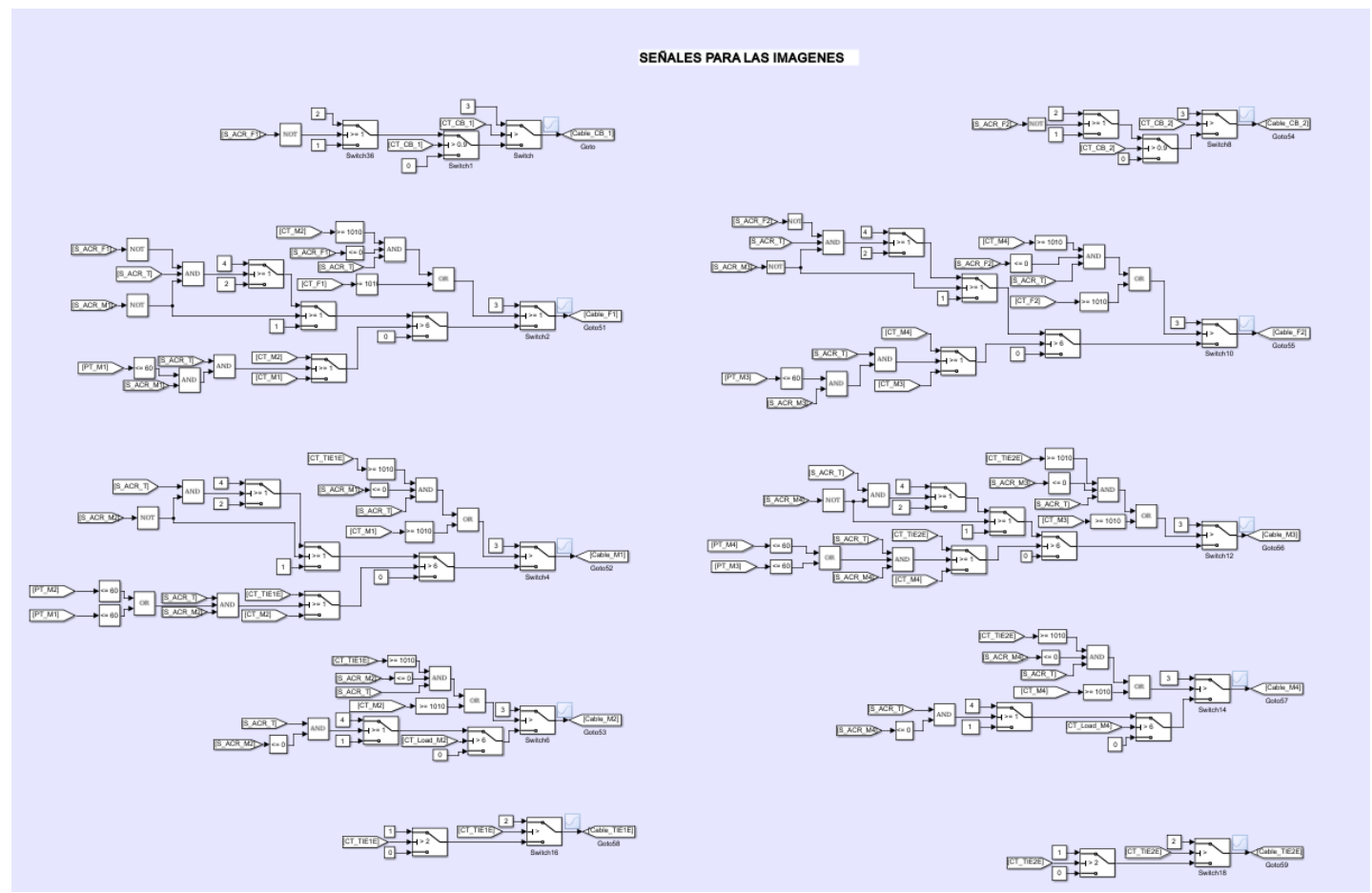


Figura 3.43 Lógica de las imágenes del HMI.

En la Figura 3.43 se tiene los bloques usados para diseñar la lógica que cada una de las imágenes tendrá, para ello se tiene que se usó señales de mediciones de corriente, voltajes y estados de los IED.

3.4 Modelamiento en LABVIEW

Para realizar esta segunda etapa se utilizó el Software Labview versión 2019, herramienta que fue utilizada para diseñar la interfaz de un HMI (Human Machine Interface), para ello se dio uso de diferentes bloques que se detallaran a continuación.

3.4.1 Creación de un HMI

En Labview se abren dos ventanas, la primera pantalla es un panel frontal y la segunda ventana se tiene la visualización de los bloques donde se creará el código para controlar el programa.

En la siguiente figura se presenta la venta de los diagramas de bloques.

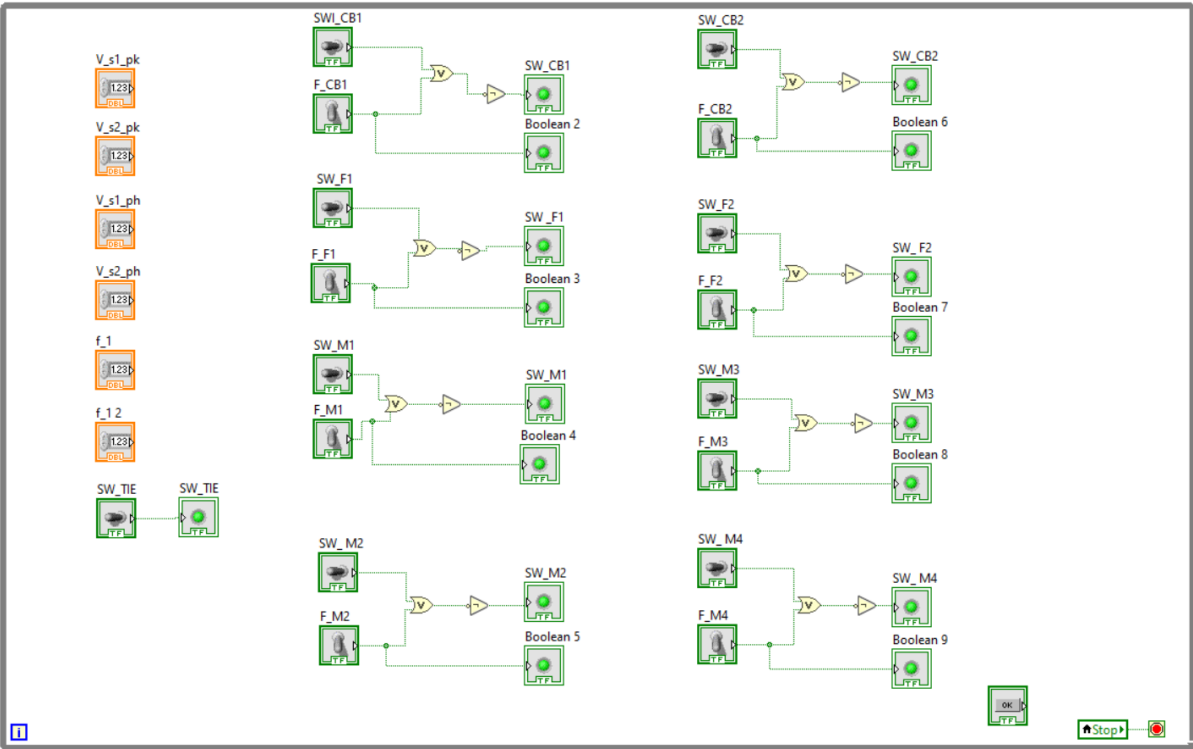


Figura 3.44 Estructura de la lógica.

En la Figura 3.44, se muestra la ventana de diagrama de bloques, en la que se presenta un lazo o estructura while loop, switches, led y algunos operadores lógicos como una or y not.

Una estructura while loop se usó para que los ciclos se repitan hasta que la condiciones se cumplan, en el mismo se encontraron los switches que representan cada dispositivo eléctrico inteligente(IED), estos switch son usados con un indicador led para visualizar el estado en que cada uno se encuentra, además se utilizó otros switch que enviaran señal para producir una perturbación en el sistema, por ello cuando exista una falla, el switch representante de los IED tendrá que actuar.

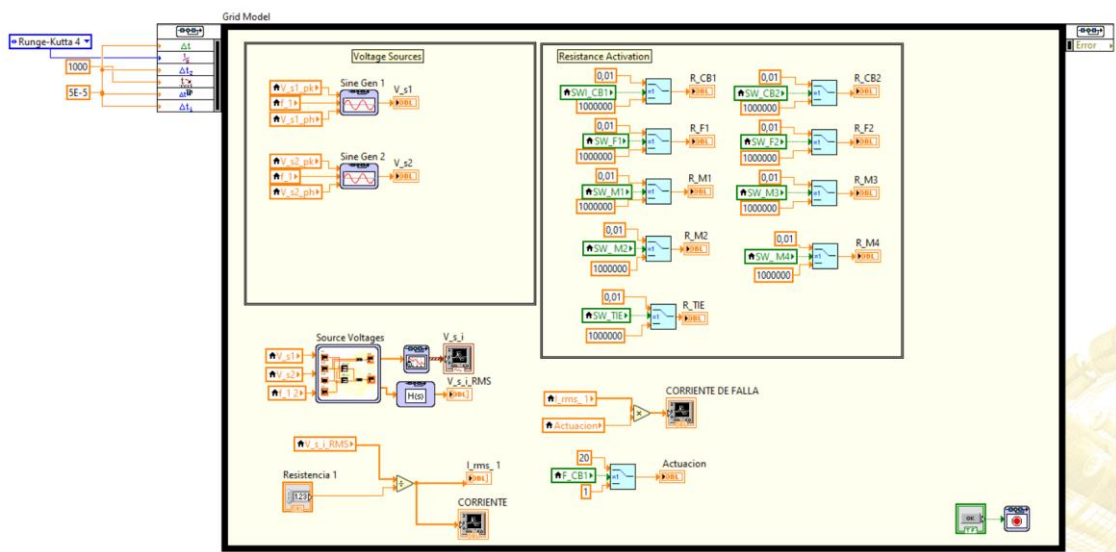


Figura 3.45 Cálculos de corriente y voltaje

En la Figura 3.45 se muestra la ventana de diagrama de bloques en la cual se encuentra los elementos que fueron usados para diseñar una fuente de voltaje y corriente. Como se presenta en esta ventana se tiene que la fuente es diseñada con diferentes señales, como frecuencia, ángulo etc. También se puede observar la selección de la resistencia que controlara el estado del switch es decir cuando tenga una alta resistencia el switch permanecerá cerrado, en cambio cuando el switch tenga una baja resistencia el switch podrá abrirse. Además, se tiene un bloque RMS el cual calculara automáticamente los valores de voltajes y corrientes existentes en la red.

Para lograr crear un HMI se diseñó un diagrama unifilar en Autocad, el cual se lo puede observar en la siguiente figura.

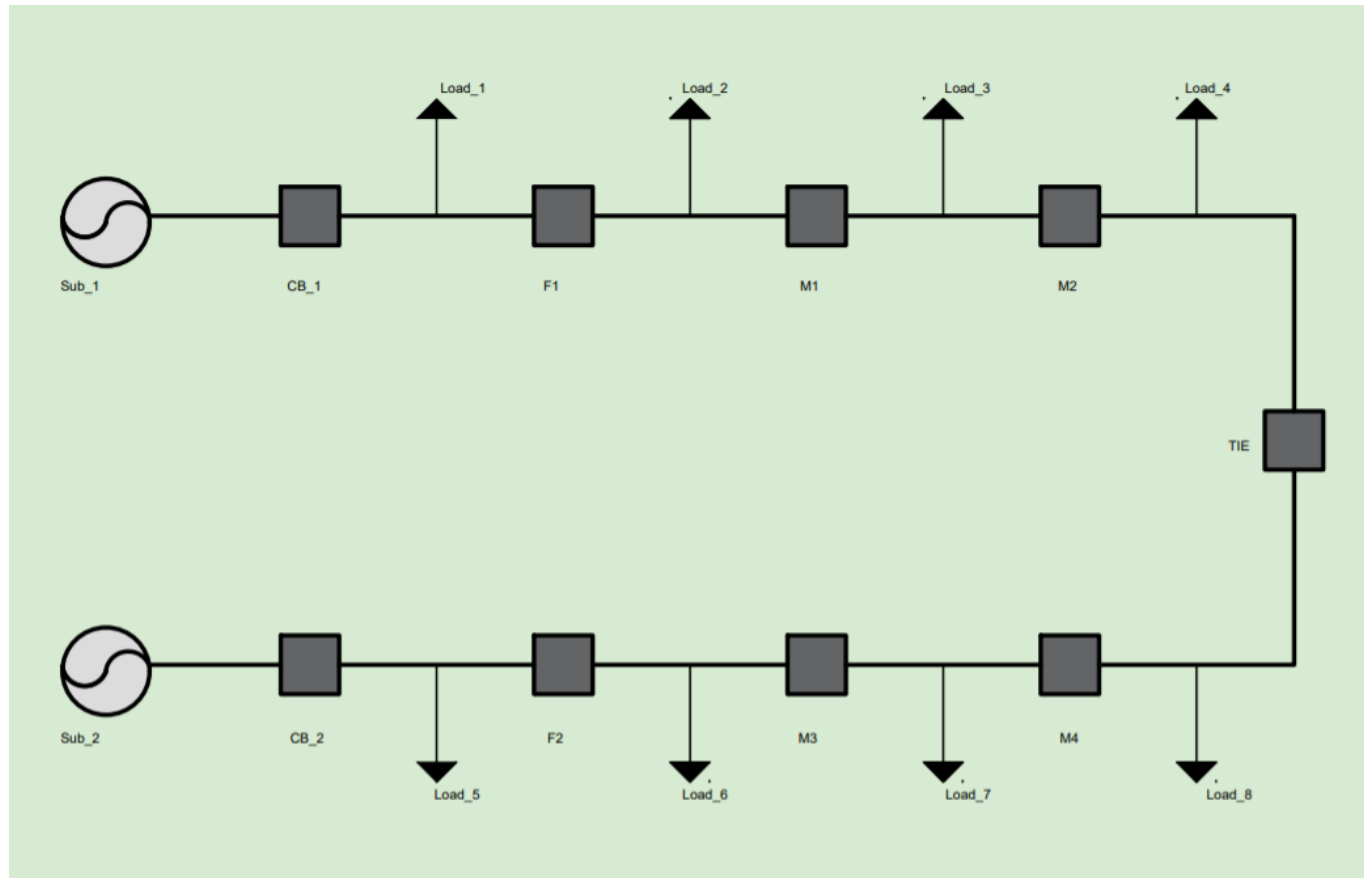


Figura 3.46 Diseño del diagrama unifilar.

En la Figura 3.46 se muestra el diseño del diagrama unifilar, en la cual se representan todos los elementos que se encuentran en la red de distribución anteriormente diseñada en Simulink.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Introducción

En el presente capítulo, se podrán visualizar los resultados obtenidos luego de haber modelado un sistema de distribución con Loop Automation clásico mediante el uso de la herramienta Simulink perteneciente al software Matlab y Labview, en donde se presentan los diferentes escenarios que fueron analizados con sus respectivas gráficas y también se tiene un HMI (Human Machine Interface) que cuenta con cuatro pantallas.

En la primera pantalla se tiene un diagrama unifilar del sistema de distribución donde se muestran valores de corriente, voltaje y potencia de cada dispositivo electrónico inteligente, también se tiene un panel de control que permite realizar las diferentes operaciones al sistema modelado.

En la segunda pantalla se mostrará un selector que permite tener ya sea un sistema automático o manual, además también se tiene un indicador de frecuencia y dos graficas que indican el estado de cada carga tanto como para la subestación 1, como para la subestación 2.

En la tercera se podrá visualizar las gráficas de Potencia activa y reactiva de cada uno de los dispositivos electrónicos inteligentes tanto para la subestación 1 así como también se tiene para la subestación 2.

En la cuarta pantalla se podrá visualizar la graficas de corriente y voltaje que circula por cada uno de los dispositivos electrónicos inteligentes.

4.2 HMI (Human Machine Interface) en Simulink

En la siguiente figura se muestra el diseño de la interfaz que fue obtenida después de haber modelado la red de distribución.



Figura 4.1 Diseño de la Interfaz hombre-máquina.

En la Figura 4.1 se puede observar el HMI del sistema SCADA en el que se presentó los resultados del modelamiento de la red de distribución en donde se pudo realizar operaciones tanto automáticamente como manuales.

Para ello se obtuvo 4 pantallas, como se indica en la Figura 4.1, las cuales encuentran enumeradas:

1. En esta pantalla se pudo visualizar el estado de cada dispositivo de control, en el cual por colores se presentó si se encuentra abierto o cerrado, es decir si el equipo o dispositivo electrónico inteligente se encuentre cerrado este tendrá un color rojo y si se encuentre abierto este mantendrá un color verde. Además contó con algunas alarmas que indicaron si ocurrió una falla o si se el equipo se encuentra en lockout, también se indicó el número de veces que hizo las reconexiones, es decir que intento despejar una falla.
2. En esta pantalla se tuvo la opción de seleccionar un sistema manual o automático, también se pudo visualizar la frecuencia del sistema y realizar una monitorización de las cargas que se encontraron conectadas en la red.
3. En esta pantalla se presentó las gráficas de potencias activa y reactiva de los dispositivos electrónicos inteligentes, permitiendo conocer el estado de cada uno de estos dispositivos.
4. En esta pantalla se presentó las gráficas de corriente y voltajes instantáneos que leía cada dispositivo de medición.

4.2.1 Escenarios

4.2.1.1 Falla en la subestación

Ante la presencia de una falla o perturbación que se da dentro de una subestación, se obtiene una elevación de la corriente, por lo que rápidamente actuaron las protecciones de sobrecorriente. Donde el disyuntor que se encontró dentro de la subestación se abrió o disparó, al detectar este incremento de corriente y de esta manera se evitó que se dañen el resto de los equipos que se encontraron aguas arriba.

En las siguientes figuras se mostraron los estados que se obtuvo de cada dispositivo.

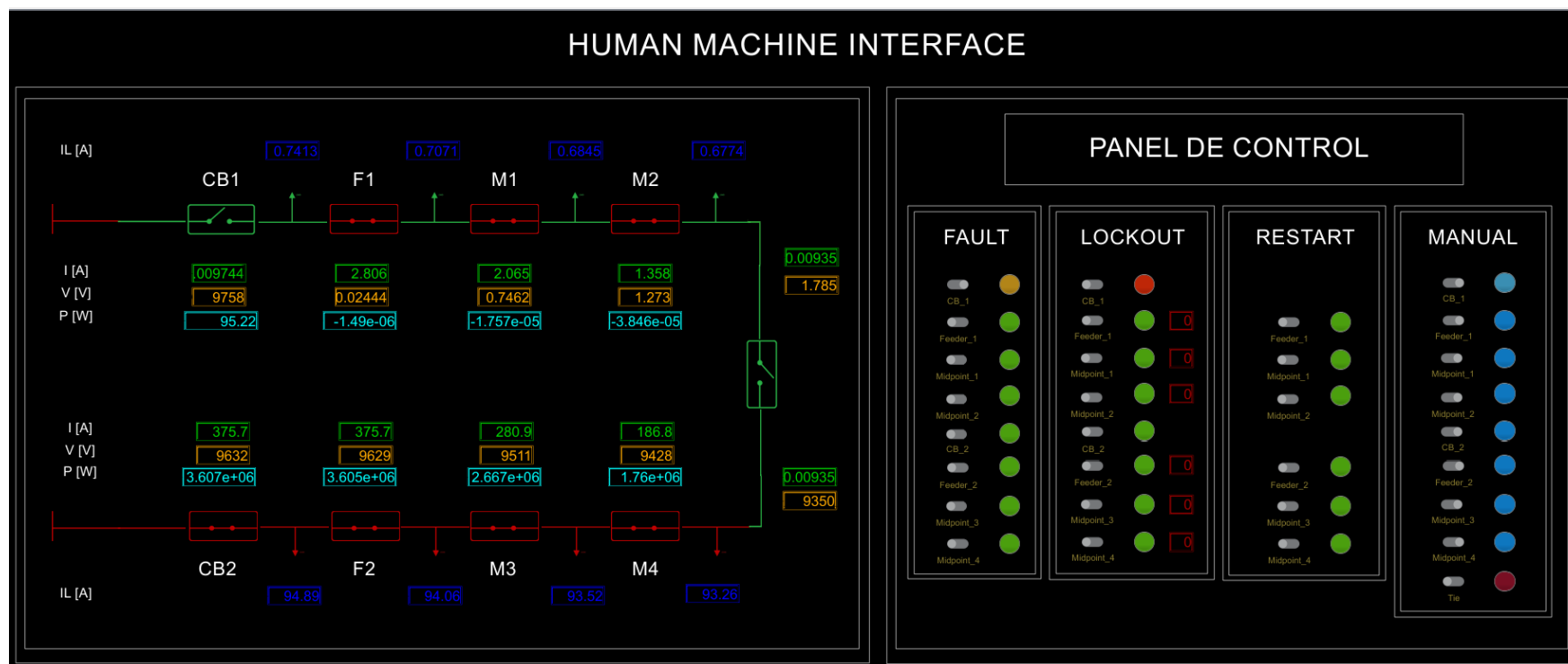


Figura 4.2 Visualización desde el diagrama unifilar de una falla en la subestación.

En la Figura 4.2 se obtuvo los valores de corriente en amperios, tanto de carga como de los dispositivos electrónicos, los valores de voltaje en voltios y los valores de potencia en vatios, durante la perturbación que hubo en el sistema.

Además, se pudo observar cuando el disyuntor disparó ante la presencia de la falla en el sistema hubo un cambio de color en la representación del dispositivo, este color fue verde indica que se encontraba abierto. Además, hubo la presencia de una alarma, la cual nos indicó que se ha quedado en lockout.

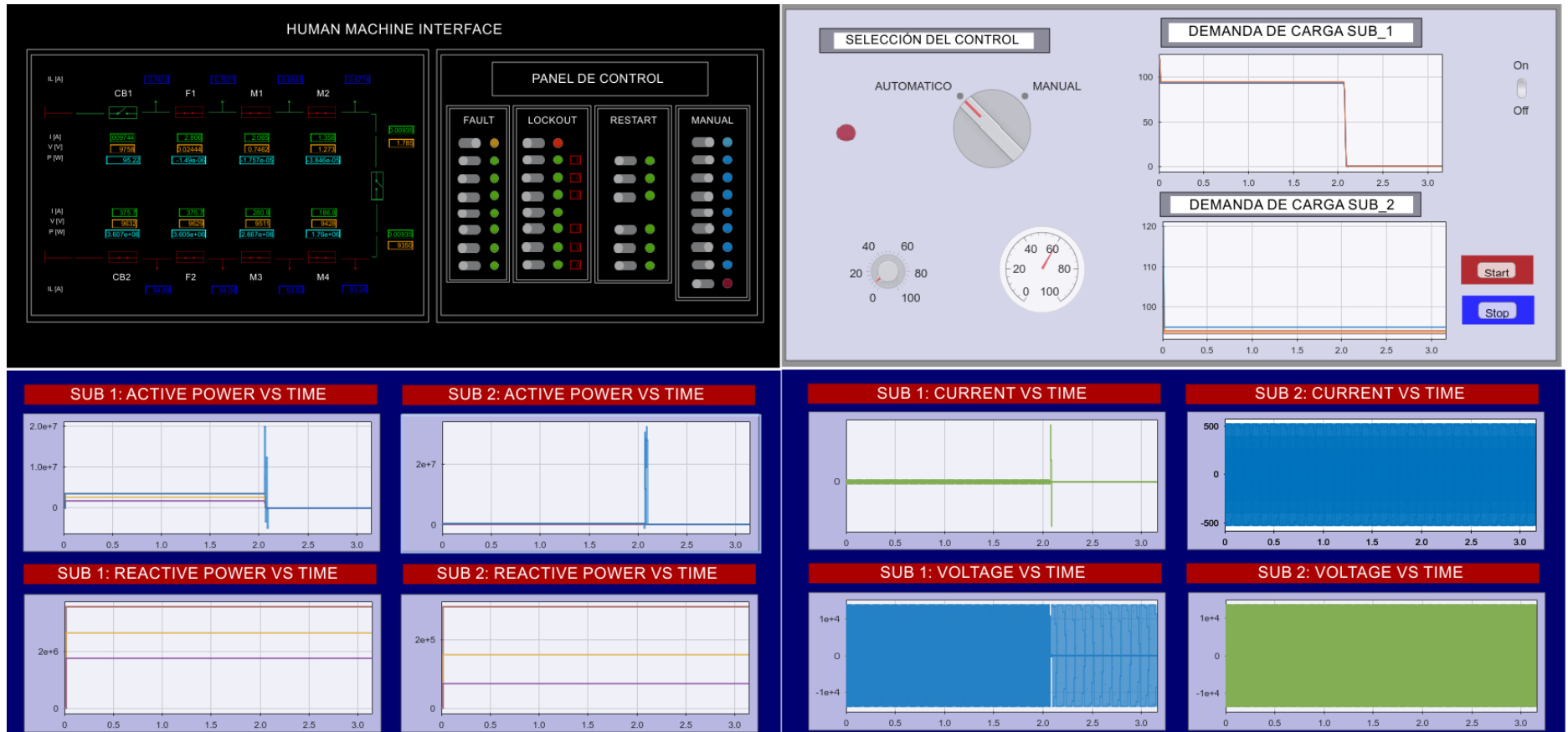


Figura 4.3 Visualización general en el HMI.

En la Figura 4.3 como se puede observar, obtuvimos la monitorización completa de los dispositivos. En las gráficas que se mostraron en el momento que el disyuntor disparó y entró en lockout y pues al mismo tiempo se presentó una desenergización de las cargas que estaba alimentando en la subestación 1, es decir se quedaron sin energía estos sectores. Se pudo observar también la magnitud que tuvo dicho incremento de corriente y la pérdida de voltaje de los dispositivos que se encontraron aguas arriba.

4.2.1.2 Falla entre feeder 1 y midpoint 1

Ante la presencia de un evento de falla en el sector que se encontraba entre el feeder 1 y el midpoint 1 hubo un incremento de la corriente que circulo por el sistema, esta corriente se detectó por la protección de sobrecorriente ubicada en el dispositivo electrónico feeder 1, logrando que rápidamente actué y se evite provocar daños a la red eléctrica o incluso al mismo dispositivo electrónico.

Siendo este evento ocurrido se tuvo que el dispositivo electrónico intento volver a reconectar cuatro veces para despejar la falla, sin embargo, la falla se mantuvo persistente y el dispositivo entro en lockout, la ausencia de voltaje la detectaron los dispositivos que se encontraron aguas arriba, siendo necesario activarse el timer de estos dispositivos y reenergizar el sector afectado, por ello el midpoint 1 y midpoint 2 que se encontró aguas arriba cambiaron sus ajustes de protecciones.

El dispositivo de enlace que se encontró en la mitad de las dos subestaciones al detectar la ausencia de voltaje causada por el feeder 1, se cerró rápidamente para regresar el servicio eléctrico al sector no afectado por dicha falla, al cerrar este dispositivo se causó una segunda falla siendo la misma detectada por el dispositivo de mitad de línea es decir el midpoint 1.

En la siguiente figura se muestra los estados que se obtuvo en cada uno de los dispositivos.

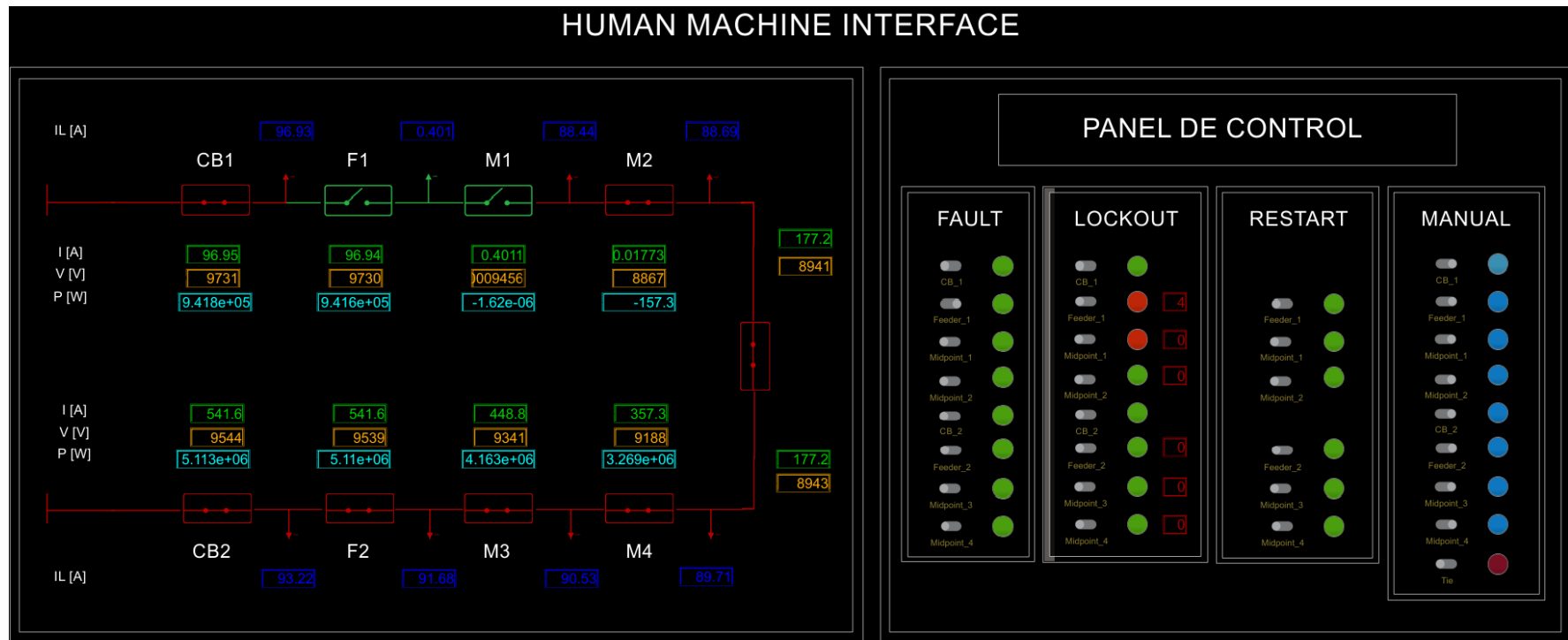


Figura 4.4 Visualización de la reconfiguración con falla entre feeder 1 y midpoint 1.

En la Figura 4.4 se puede observar que el feeder 1 y midpoint 1 se encuentran de color verde, indicando que estos dispositivos se encuentran abiertos. Además, se obtuvo que el reconectador de enlace (tie) se encuentra de color rojo, indicando que este dispositivo se encuentra cerrado, por lo que se dio una reconfiguración de la red. La reconfiguración ayudó a mantener aislado solo el sector donde se tiene la falla y el resto de la red eléctrica sigue operando normalmente, gracias a la ayuda del dispositivo electrónico de enlace.

También en la Figura se pudo observar las alarmas que se activaron, provocadas por la activación del lockout del feeder y midpoint. Para poder restablecer el suministro de energía en el sector con un evento de falla se tuvo que despejar la falla y sacar de lockout a los dispositivos que entraron en ese estado y manualmente se pudo restaurar la energía eléctrica en el sector que se dio la falla.

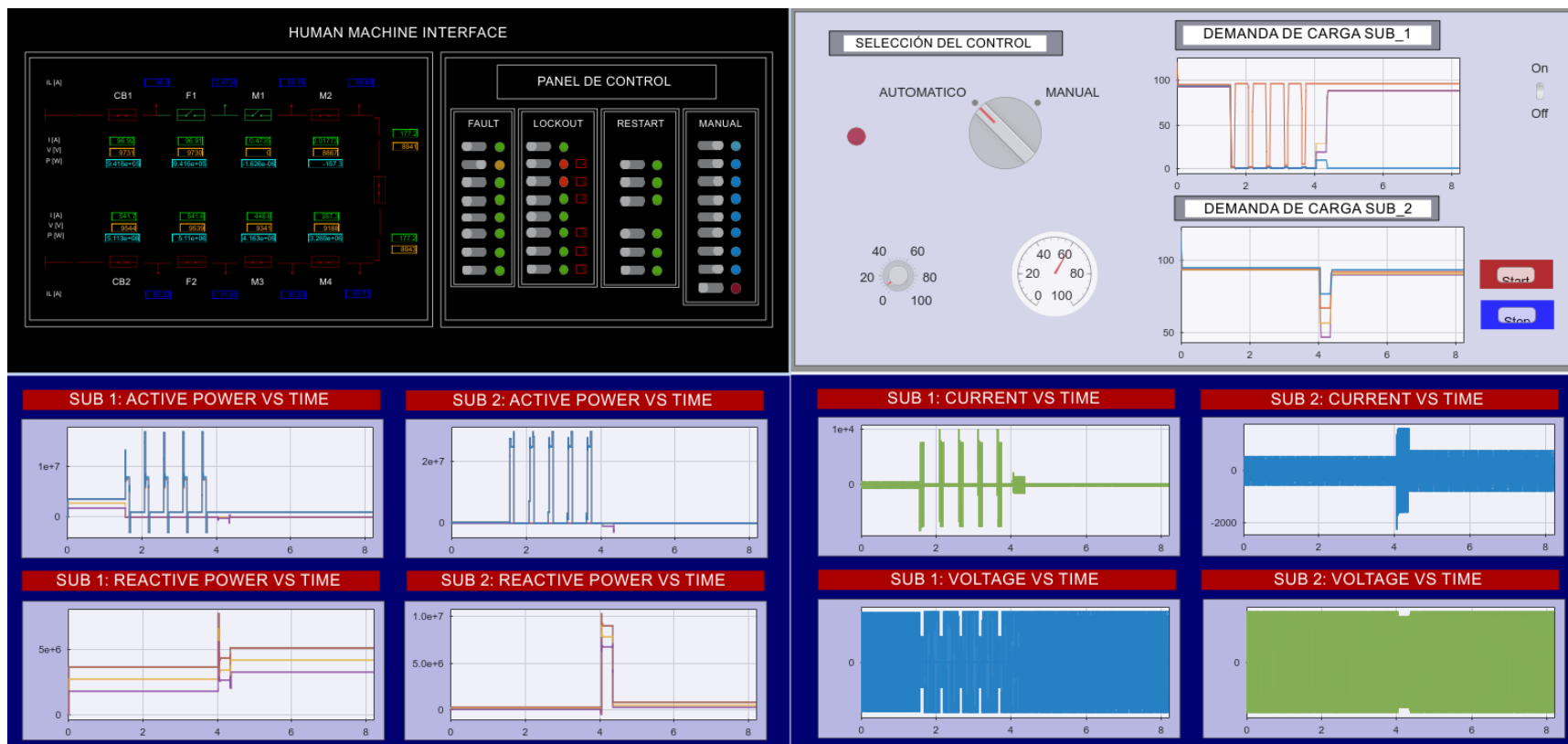


Figura 4.5 Visualización general en el HMI.

En la Figura 4.5 se pudo observar el estado de los dispositivos eléctricos a través de gráficas, es decir se tiene que el feeder 1 como se mostró en la gráfica de corriente de la subestación 1, hizo cuatro reconexiones, y pues al no lograr despejar la falla entró en estado de lockout, también hubo cambios en la potencia activa como se puede observar en la gráfica de potencia que indica que todas las reconexiones que se dieron permitieron que se produjera una disminución de potencia activa y un aumento de la potencia reactiva, también se puede observar como en el perfil de corriente de la carga se tuvo pérdidas de suministro de energía y al reconfigurar la red, solo se quedó sin energía la carga que se encontró en el sector afectado por la falla.

4.2.1.3 Falla entre midpoint 1 y midpoint 2

Ante un evento de falla entre el midpoint 1 y midpoint 2 se tuvo que se presentó un incremento de corriente, actuando las protecciones de sobrecorriente del dispositivo electrónico más cercano es decir el midpoint 1, es decir el dispositivo disparó por sobrecorriente, este dispositivo intentó despejar la falla cuatro veces siendo su operación sin éxito ya que la falla permaneció.

Cuando el dispositivo que disparó por sobrecorriente no logró despejar la falla entra en estado de lockout, en ese momento los otros dispositivos que se encuentran aguas arriba al quedarse sin voltaje hicieron un ajuste en las protecciones, activan su timer y el dispositivo de enlace se cierra después de haber transcurrido un pequeño tiempo al verificar la ausencia de voltaje.

Al cerrarse el dispositivo de enlace se produjo una segunda falla provocando que el midpoint 2 también dispare quedando en lockup. Con ello se logró reconfigurar la red para evitar que varios sectores se queden sin energía eléctrica, manteniéndose solo el sector donde ocurrió la falla sin el servicio eléctrico.

Para restaurar el servicio de energía eléctrica se despejó la falla y se quitó el lockout de los dos dispositivos que se quedaron abiertos, lograron restaurar el servicio.

En la siguiente figura se muestra los estados de los dispositivos electrónicos inteligentes (IED).

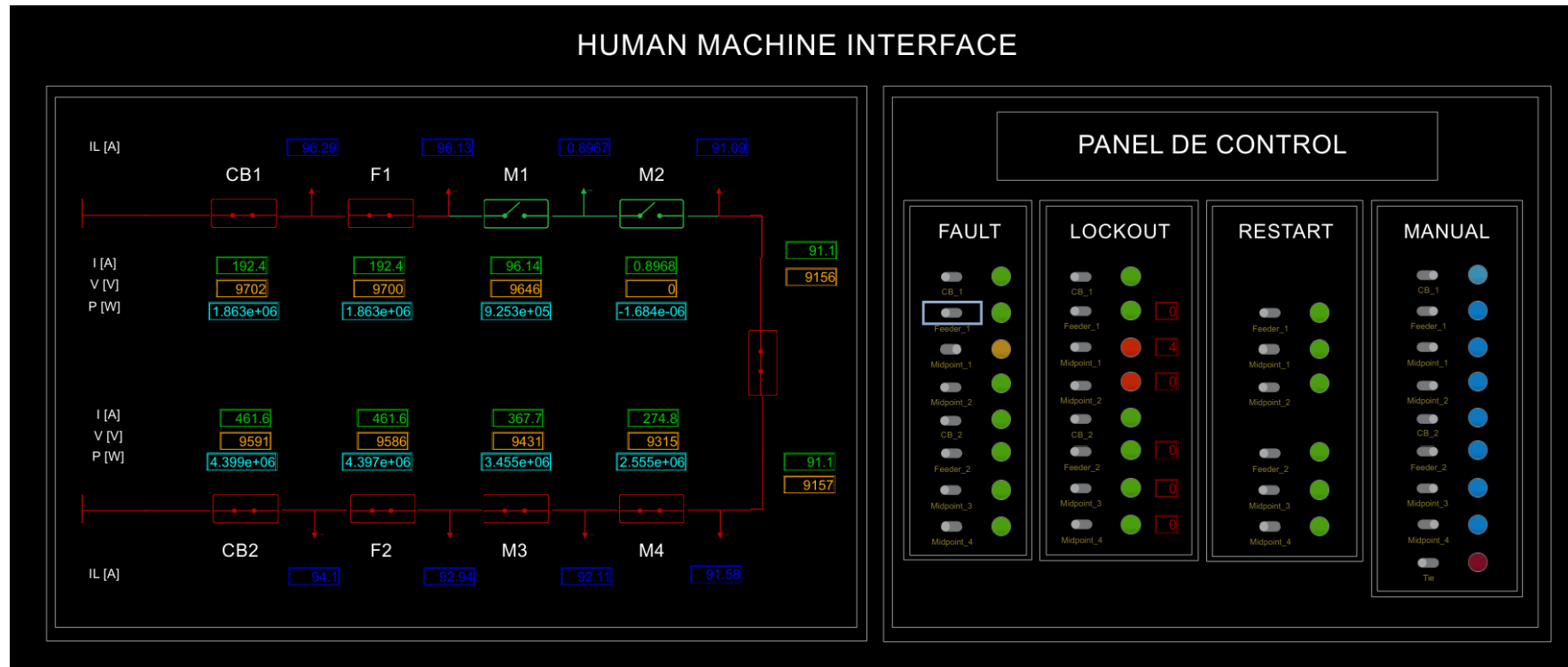


Figura 4.6 Reconfiguración de la red eléctrica ante falla entre midpoint 1 y midpoint 2.

En la Figura 4.6 se muestra los estados de los dispositivos electrónicos, es decir se tiene los valores de corriente, voltaje y potencia, también se muestra que el midpoint 1 y midpoint 2 se encuentran abiertos y el dispositivo de enlace Tie se encuentra cerrado, es decir se muestra la reconfiguración de la red, también se pudo observar las alarmas que se activaron, por los dispositivos que entraron en lockout. Se tuvo también el número de reconexiones que hizo el equipo en cuestión.

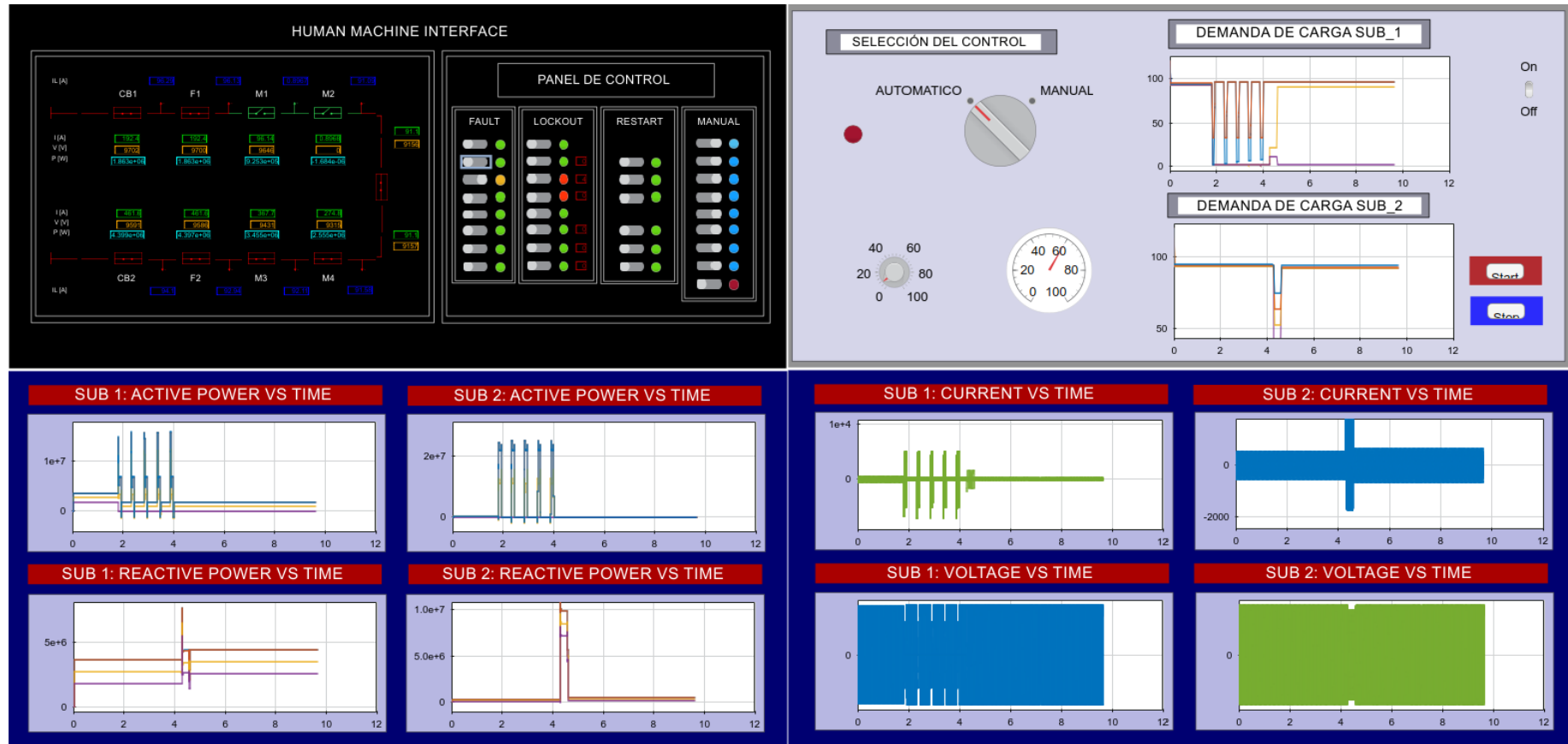


Figura 4.7 Visualización de la red en el HMI.

En la Figura 4.7 se tuvo en la gráfica de corriente indicando el número de reconexiones que hizo el reconectador y se pudo observar en la gráfica de voltaje la ausencia de voltaje al tener el midpoint 1 en lockout. En la gráfica de la carga se mostró el perfil de corriente que se tuvo en cada maniobra.

4.2.1.4 Falla entre midpoint 2 y tie

Ante un evento de falla en el tramo entre midpoint 2 y dispositivo de enlace se obtuvo una perturbación, la cual provocó un aumento en la corriente, en este caso la protección de sobrecorriente actuó, es decir hizo que dispare el dispositivo. El midpoint 2 empezó a realizar reconexiones con el fin de lograr despejar la falla, sin embargo, no lo pudo hacer, este dispositivo realizó cuatro reconexiones, donde en la última reconexión entró en lockout, el dispositivo de enlace verifica que se queda sin voltaje y cierra, al cerrar vuelve a provocar una segunda falla, es decir el dispositivo de enlace también se quedó en lockout. Logrando de esta manera realizar la reconfiguración de la red y evitando tener tramos sin energía.

Para restaurar el servicio se vio la falla y se sacó de lockout a los dispositivos que se encontraban involucrados dentro del problema.

En las siguientes figuras se mostrarán las operaciones realizadas por cada dispositivo electrónico.

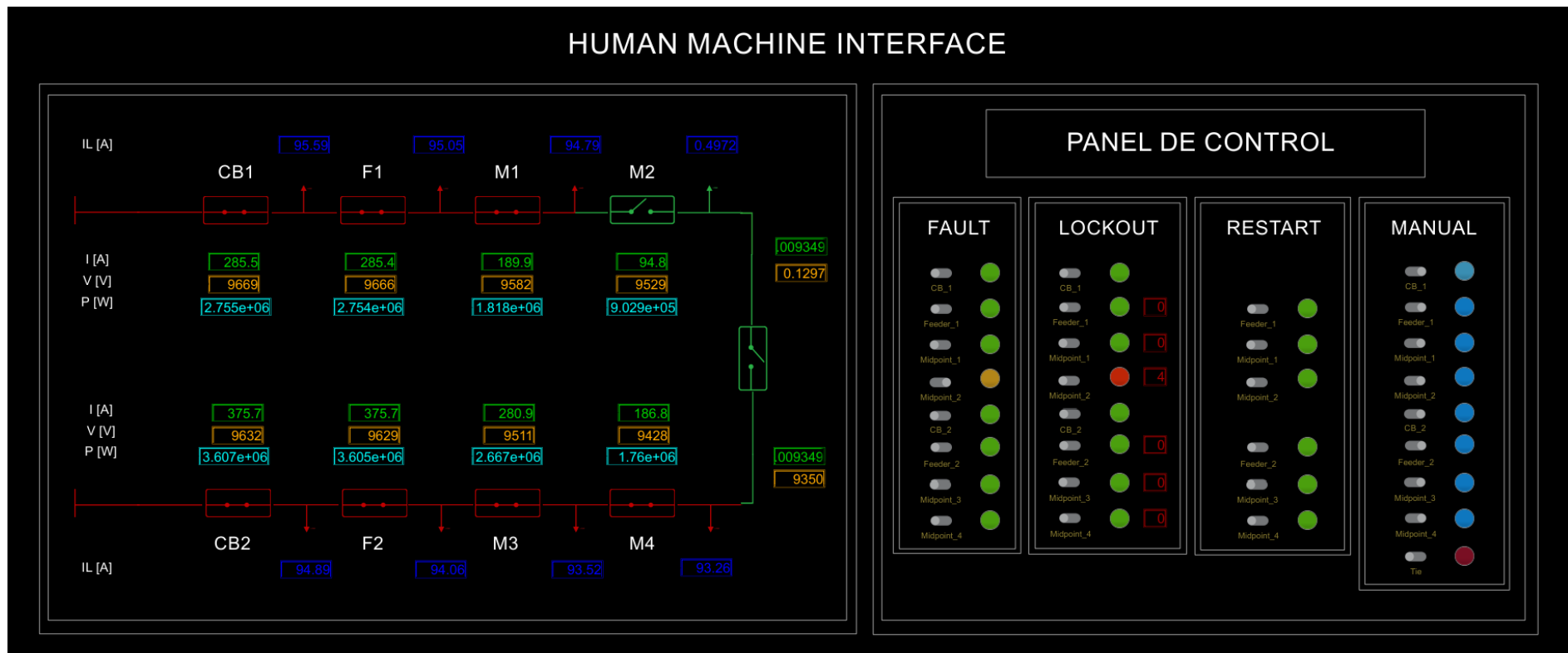


Figura 4.8 Reconfiguración de la red eléctrica ante falla entre midpoint 2 y tie.

En la Figura 4.8 se pudo obtener la reconfiguración de la red, para ello se obtuvo los valores de corriente, voltaje y potencia activa para cada uno de los componentes de la red eléctrica. Además, se pudo visualizar el estado de cada uno de los dispositivos en estudio, indicando que el midpoint (M2) y dispositivo de enlace (Tie) se encontraron abiertos, así mismo se observó que se activaron las alarmas indicando que existió una falla y que los dispositivos entraron en estado de lockout. Para restaurar sistema se debe despejar la falla y quitar el lockout o bloqueo a los dispositivos afectados y finalmente se logró restaurar la red eléctrica.

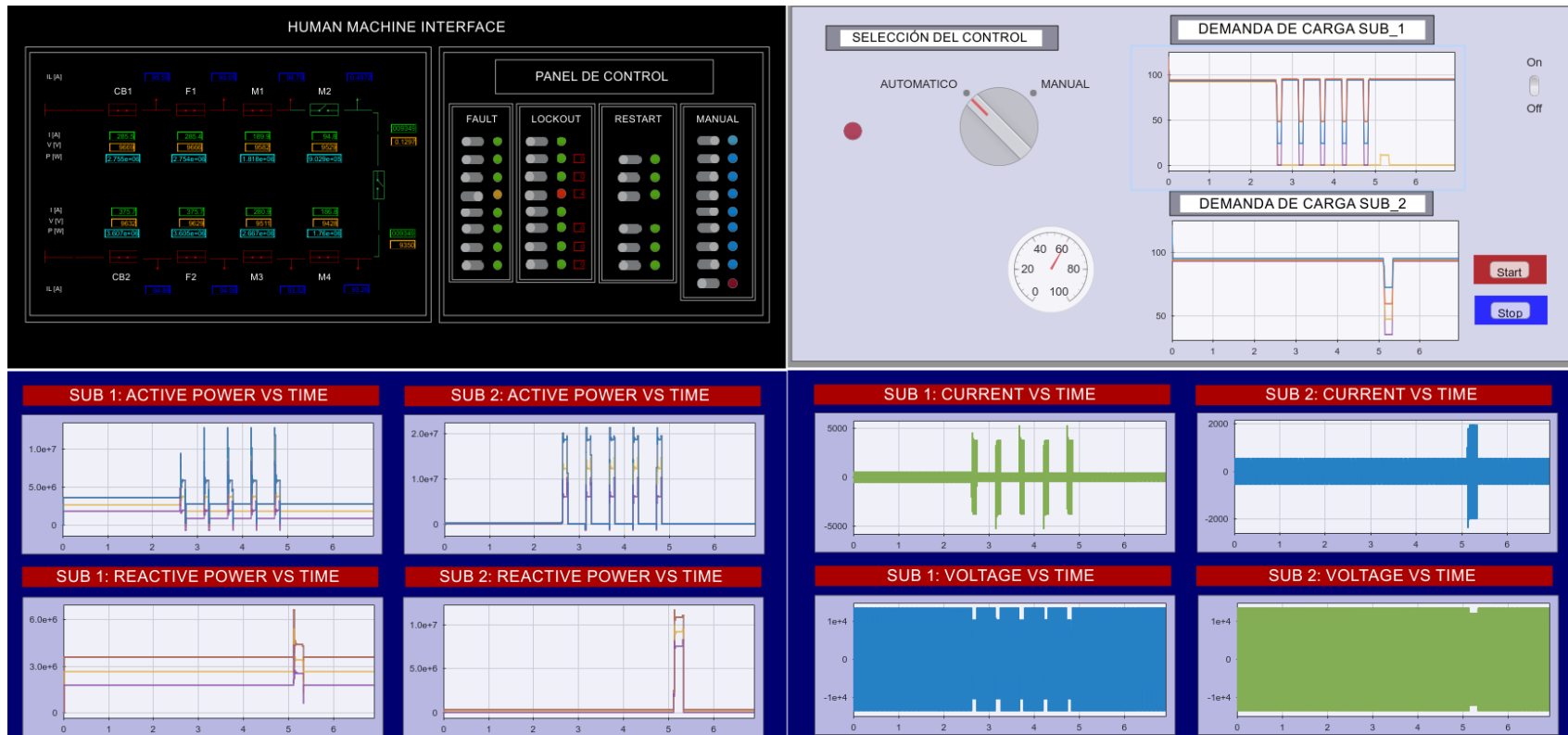


Figura 4.9 Visualización de la red en el HMI.

En la Figura 4.9 se indica la ocurrencia de cada dispositivo, en este caso, efectivamente existió un evento de falla en el midpoint 2 y hubo un disparo por sobrecorriente y cuatro reconexiones al tratar de despejar la falla. Sin embargo, esto provocó que pierda suministro eléctrico la carga que se encuentra a la derecha del dispositivo, por lo tanto, al tratar de alimentar esa carga, el dispositivo de enlace intenta conectarse o cerrarse y esto no fue posible, ya que existió una segunda falla y disparo al presenciar esta falla. En la gráfica de corriente para la subestación 1 y la gráfica de voltaje se puede observar lo anteriormente aclarado.

4.3 HMI (Human Machine Interface) en Labview

Del diseño del HMI en Labview se obtuvo el siguiente resultado como se muestra en la siguiente figura.

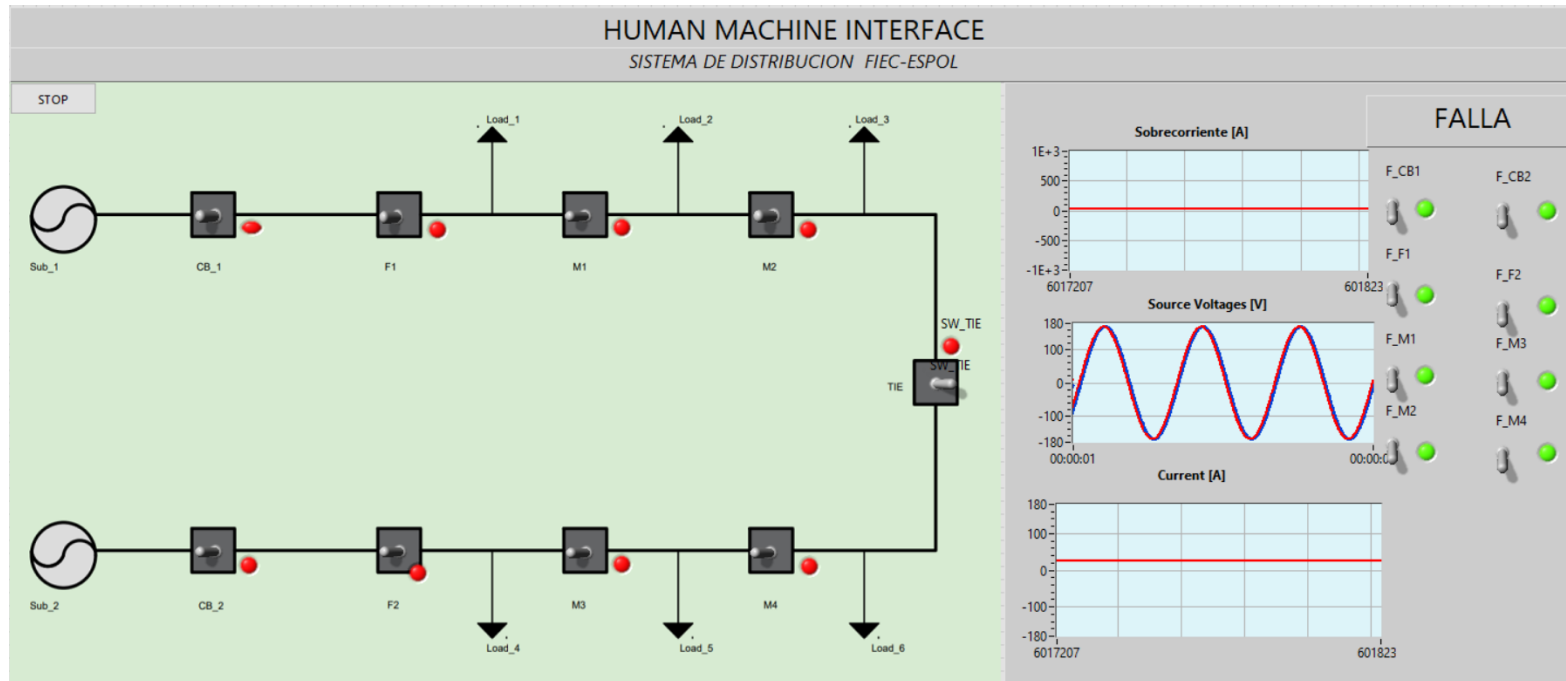


Figura 4.10 Visualización del HMI en Labview.

En la Figura 4.10 se puede observar la interfaz del HMI que fue modelada en Labview. Como se pudo observar los IEDs indicaron el estado de cada uno de los dispositivos que conforman el diseño de la red de distribución. Además, también se puede visualizar a través de un osciloscopio el perfil de voltaje y así mismo la monitorización de la corriente en cada instante, de esta manera el operador podría interactuar de una manera más eficaz ante posibles perturbaciones que llegasen a existir.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Introducción

En este capítulo se expondrán las conclusiones encontradas de acuerdo a las simulaciones obtenidas, donde, además, las recomendaciones propuestas, son para futuros trabajos, a fin de poder realizar estudios más avanzados y se obtengan soluciones óptimas mediante la utilización de la metodología de Loop Automation.

5.2 Conclusiones

De acuerdo con el modelo de simulación realizado con las herramientas de SIMULINK de Matlab, y las del software de diseño y programación LABVIEW, se pueden evidenciar las siguientes conclusiones.

- El tipo de actuación de la automatización del sistema depende del lugar de ocurrencia de la falla y del tipo de falla. Teniendo así que, ante una falla temporal, los reconectores realizan hasta 4 reconexiones, exceptuando al circuit breaker, el cual no realiza este accionamiento. Y si existen más de 4, estos dispositivos quedan bloqueados, y se procede a realizar la reconfiguración del sistema, en donde el tie de enlace, cambia su estado a cerrado y se podrá suministrar la energía eléctrica a través de otro alimentador de una subestación vecina.
- El tiempo de actuación de la automatización del sistema, es de 100 ms cuando se detecta la falla, 400 ms después, se realiza la reconexión, y luego de que se realice el lockout por parte del dispositivo electrónico inteligente, el tie de enlace cierra a los 300 ms, donde se vuelve a ver la falla y esta es despejada a los

100 ms. Razón por la cual, el tiempo de actuación ante falla entre circuit breaker y feeder es de 100 ms, entre el feeder 1 y el midpoint 1 es de 2.1 s. hasta el lockout, y 2.5 s. hasta terminar la reconfiguración, entre el midpoint 1 y midpoint 2 se tiene el mismo tiempo, y de igual manera, ante falla de midpoint 2 y tie de enlace, se tienen 2.5 s hasta terminar la reconfiguración.

- Ante la presencia de una falla en el sistema, el seteo de la corriente de falla del circuit breaker es de 10000 [A], mientras que la del feeder es de 5000 [A], la del midpoint 1 es de 2700 [A], y el midpoint 2 es 1355 [A]. Antes de que cierre el tie de enlace se debe tener el seteo para el cambio de protecciones, este tiene un valor de 1010 para midpoint 1, y 1100 [A] para midpoint 2. Con lo cual se puede observar el respaldo que tiene cada dispositivo en caso de no accionar, por el seteo del valor de la corriente de falla.
- Cuando se encuentra en lockout el reconectador, debido a la ocurrencia de falla, y se ha realizado la reconfiguración del sistema, el operador debe informar a la cuadrilla inmediatamente para que vayan a solucionar el problema, por lo que, al despejar la falla, se podrá desbloquear al dispositivo de accionamiento. Dicho desbloqueo no significa cambio de estado, por lo que el ingeniero a cargo puede revisar el dispositivo afectado en busca de alguna avería o falla, por lo que luego de que se notifique que se puede realizar la restauración a la normalidad, el operador mediante el HMI selecciona la opción de restauración, volviendo al sistema a la normalidad.
- El HMI posee alarmas que indican el lugar de ocurrencia de la falla, el número de reconexiones que se han realizado, una alarma que indica el bloqueo del dispositivo para que no realice más reconexiones, así como también la opción de desbloqueo del equipo, y la restauración del sistema. Además, cuenta con un modo automático en el que el operador no puede realizar ninguna maniobra, hasta que pueda cambiar el sistema a modo manual, en donde pueda realizar algún accionamiento de emergencia.
- Mediante el HMI del sistema SCADA, se pueden realizar mejores estudios de análisis de contingencia, a través de estrategias más avanzadas, que abarquen

soluciones más óptimas y complejas, donde se puede verificar el desempeño del sistema y la respuesta obtenida.

- La lógica utilizada, permite que el tie de enlace no cierre el interruptor si no se dispone de una fuente de abastecimiento de energía a través de la otra subestación, así como también, que esto ocurra cuando se hayan cambiado las protecciones para realizar la reconfiguración, es decir, cambiar los seteos del accionamiento por sobrecorriente. Además, permite una confirmación de que el tie, únicamente actúe cuando se han realizado las 4 reconexiones, y cuando exista una caída de voltaje en el punto donde ocurre la falla.
- La implementación de los flip-flop como memoria para las operaciones de lógica secuencial, permiten establecer el estado de lockout de los equipos, ya que cuando se lo requiere desbloquear, una señal es enviada a este para resetearlo al valor inicial. Cabe recalcar, que desbloquear el dispositivo, no significa un cambio de estado.

5.3 Recomendaciones

- El modelo utilizado realiza el accionamiento por sobrecorriente mediante un valor instantáneo de corriente, lo cual se asemeja a la protección de sobrecorriente instantánea, pero a través del boque look up table, se puede simular la curva del relé de tiempo definido, sea este el tipo de curva que uno desee, razón por el cual le permitiría realizar accionamientos de corriente, considerando en su análisis un respaldo con las características de la curva requerida.
- Para trabajos a futuro, se pueden establecer protocolos de comunicación, que permitan que se utilice el modelo inteligente de las estrategias de loop automation, debido a que, en el clásico, la falla es vista 2 veces por los reconectores, debido a que estos no se encuentran comunicándose entre sí, mientras que, con protocolos, esto no sucedería, porque cada uno sabría de la actuación y existencia de los demás IEDs.

- Se recomienda realizar el HMI a través de la librería dashboard al final, debido a que el programa se vuelve muy pesado y se va a tardar más en realizar las simulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Alvarado y B. Diaz , «Implementacion mediante programacion en matlab de la operacion del sistema de control automatizado,» ESPOL, Guayaquil, 2016.
- [2] E. Industria, «Soluciones tecnologia para mineria, energia e industria,» Abril 2012. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1817#:~:text=Para%20supervisar%20el%20estado%20de,del%20funcionamiento%20de%20la%20red..>
- [3] J. Fernandez y J. Menéndez, «60,» 1 mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/redes-inteligentes.pdf>. [Último acceso: 30 junio 2020].
- [4] SEL, «Automatizacion de red de distribucion,» 17 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://selinc.com/es/solutions/distribution-network-automation/>.
- [5] J. Valdez, Dirección, *El sistema de distribucion electrica*. [Película]. 2019.
- [6] B. Burbano, «ÓPTIMO DESPLIEGUE DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN BASE ANALISIS DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION,» Universidad Politecnica Salesiana, Quito , 2018.
- [7] K. Jure, «Digitalización de las redes eléctricas,» *Electro Industria*, vol. 1, nº 228, pp. 6-9, 2020.
- [8] W. Benalcázar, R. C. Robalino y S. Espinosa, Artists, *Estudio del sistema para la gestión de interrupciones OMS, en redes de distribución eléctrica y de los requerimientos para su implementación*. [Art]. INGENIUS, 2013.
- [9] Schneider, «Loop Automation-ADVC with flexVUE,» 2016.
- [10] Artech, «Restauradores/ reconectores,» Artech, [En línea]. Available: <https://www.artech.com/es/conoce-el-grupo-artech>.

APÉNDICES

A. CÓDIGO DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

```
% Parameters for sistema_distribucion_1.slx

clear variables
clc

%% Grid Parameters
%Substation 1
V_red_1 = 13800      %Voltaje in V subestacion 1
f_1 = 60;           %Frecuencia in Hz

%Substation 2
V_red_2 = 13800;    %Voltaje in V subestacion 2

%Breaker
R_sw_close = 0.01;  %Switch/Breaker closed-state resistance in
ohms
R_sw_open = 1e6;    %Switch/Breaker open-state resistance in
ohms

%Impedancia
R = 0.24874;        %Resistance in ohms
L = 0.0023339;     %Inductance in H

%Caracteristicas de la carga

P=10e3;             %Potencia Activa en Watt
Q=100;              %Potencia Reactiva en VAR
V=1000;             % Voltaje en V
```

```
%% Parameters for sistema_distribucion_1.slx
```

```
clear variables
```

```
clc
```

```
%% Grid Parameters
```

```
%Substation 1
```

```
V_red_1 = 13800; %Voltaje in V subestacion 1
```

```
f_1 = 60; %Frecuencia in Hz
```

```
%Substation 2
```

```
V_red_2 = 13800; %Voltaje in V subestacion 2
```

```
%Breaker
```

```
R_sw_close = 0.01; %Switch/Breaker closed-state resistance in ohms
```

```
R_sw_open = 1e6; %Switch/Breaker open-state resistance in ohms
```

```
%Impedancia
```

```
R = 0.24874; %Resistance in ohms
```

```
L = 0.0023339; %Inductance in H
```

```
%Caracteristicas de la carga
```

```
P=10e3; %Potencia Activa en Watt
```

```
Q=100; %Potencia Reactiva en VAR
```

```
V=1000; % Voltaje en V
```