

Diseño De Objeto De Aprendizaje Para La Protección
Sobrecorriente En Líneas De Distribución

Angie Stefany Rincón Higuera

Trabajo de Grado para Optar al Título de
Ingeniería Eléctrica

DIRECTOR

IVÁN DAVID SERNA SUÁREZ

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi familia, por ser mi pilar, mi fuerza y mi mayor fuente de inspiración, este trabajo es el reflejo de cada palabra de aliento, cada sacrificio y cada gesto de amor incondicional que me han brindado a lo largo de este camino. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mis propias capacidades. Su apoyo constante y su fe en mí han sido la luz que me ha guiado en los momentos difíciles y la motivación para seguir adelante. Este logro también es suyo, porque sin su amor, paciencia y comprensión, este sueño no habría sido posible.

A mis amigos, porque en más de una ocasión estuvieron estudiando y realizando trabajos conmigo, porque no me dejaron sola en los momentos difíciles y por qué estuvieron conmigo para celebrar las victorias.

También quiero dedicarle este logro a mi pareja que fue un apoyo importante en este proceso, gracias por acompañarme, por creer en mí y por no dejarme desfallecer en ningún momento, esto es gracias a ti, un gran logro tuyo y mío.

Mil Gracias

Agradecimientos

A el profesor Iván Serna, por que llego como un ángel en un momento muy difícil, porque me apoyo y creyó que yo si podía, muchas veces que pensé en desfallecer él estuvo hay para sacarme una sonrisa y darme una palabra de aliento. En algún punto del camino pensé que estar aquí sería imposible, pero el me dio esa motivación y mano ayuda que yo necesitaba para lograr esto. Gracias por compartir su experiencia y sabiduría, por motivarme a dar lo mejor de mí y por enseñarme a mirar los obstáculos como oportunidades de aprendizaje. Su compromiso y disposición para acompañarme en este proceso hicieron una gran diferencia en el resultado final de este proyecto. Este logro no habría sido posible sin su orientación y confianza. Me siento profundamente agradecida por haber contado con un mentor tan dedicado y profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Coordinación de Relé Sobrecorriente	14
2.1 Pasos para Coordinación del Relé.....	15
2.1.1 Corrientes de carga	16
2.1.2 Corrientes de cortocircuito.....	16
2.1.3 Corrientes de arranque	16
2.1.4 Corrientes en múltiplos de Pickup	16
2.1.5 Dial del Relé	17
2.1.6 Coordinación del siguiente relé	18
3. Descripción del objeto de aprendizaje	18
3.1 Simulación circuito base	18
3.2 Implementación del relé.....	24
3.3 Dashboard	30
4. Conclusiones	32
Referencias Bibliograficas	34
Apéndices.....	35

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Constantes de la ecuación exponencial según estándar IEEE</i>	14

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Curva de operación de un relé de tiempo muy inverso</i>	15
Figura 2: <i>Simulación Circuito Base creado en Simulink</i>	18
Figura 3: <i>Configuración de la fuente</i>	20
Figura 4: <i>Configuración de la línea</i>	21
Figura 5: <i>Configuración de las cargas</i>	21
Figura 6: <i>Configuración de las fallas</i>	22
Figura 7: <i>Medidor de corriente</i>	23
Figura 8: <i>Medidor de tensión</i>	24
Figura 9: <i>Circuito del sistema</i>	25
Figura 10: <i>Parámetros para configurar el Relé</i>	26
Figura 11: <i>Relé de sobrecorriente</i>	26
Figura 12: <i>Bloque Delay</i>	28
Figura 13: <i>Diagrama de flujo programación matlab funcion</i>	28
Figura 14: <i>Panel de control</i>	30
Figura 15: <i>Partes del panel de control</i>	31

Lista de Apéndices

Apéndice A. Objeto de aprendizaje Protección Sobrecorriente.....	
Apéndice B. Curvas características de tiempo para relés de sobrecorriente.....	
Apéndice C. Guía de aprendizaje Análisis de Impedancias	
Apéndice D Guía de aprendizaje Tiempos de Operación	
Apéndice E. Guía de aprendizaje Coordinación de Relés	

“Los apéndices están adjuntos”

Glosario

Dashboard: un dashboard o cuadro de mando es una herramienta visual que resume datos claves y métricas importantes para una empresa o proyecto, permitiendo una rápida comprensión y seguimiento del rendimiento.

Matlab: Es una plataforma de programación y cálculo numérico, un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, utilizado por ingenieros y científicos para desarrollar algoritmos.

Objeto de aprendizaje: unidad de contenido digital que se utiliza para enseñar y aprender, puede ser un concepto, una teoría, un problema o una habilidad.

Relé: es un interruptor eléctrico que se activa o se desactiva mediante señales eléctricas, lo cual permite controlar el flujo de corriente en un circuito eléctrico

Relé Sobrecorriente: dispositivo que puede proteger los sistemas eléctricos de corrientes excesivas que pueden dañar los equipos.

Simulink: Es una herramienta de programación gráfica que permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, está integrado con Matlab.

Resumen

Título: DISEÑO DE OBJETOS DE APRENDIZAJE PARA LA PROTECCIÓN SOBRECORRIENTE DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.¹

Autor: Angie Stefany Rincón Higuera ²

Palabras Clave: Objeto de aprendizaje, Matlab, Simulink, dashboard, protección sobre corriente.

Descripción: El presente proyecto de grado plantea desarrollar un objeto de aprendizaje para la formación en el análisis para la protección sobrecorriente de líneas de distribución para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la UIS. Esto dado que la materia de protecciones eléctricas no posee laboratorios en los cuales los estudiantes puedan ver y analizar el funcionamiento de una protección. Entonces, lo que se busca con este proyecto de grado, es crear un objeto de aprendizaje que le permitan a los y las estudiantes de la E3T un acercamiento más visual y práctico en el cual ellos puedan experimentar haciendo uso del simulador el cual les permitirá analizar bajo diferentes condiciones los elementos a proteger, y así, de primera mano observar las consecuencias a los diferentes cambios realizados. El proceso educativo constantemente está innovando y actualizando las estrategias y los recursos que usan los docentes, esto buscando mejoras sustanciales en el proceso de aprendizaje, en este ámbito se han realizado proyectos en diversas materias los cuales han permitido grandes avances que abren las puertas a la realización de proyectos didácticos que permitan a los estudiantes adquirir nuevos conocimientos sobre las distintas áreas de estudio, con base en esto, este proyecto quiere seguir innovando los procesos de aprendizaje académico brindando un objeto de aprendizaje al área de protecciones eléctricas resaltando que este es el camino correcto para mejorar las experiencias de aprendizaje en el aula, innovando y logrando avances en la mejora de recursos de aprendizaje.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Iván David Serna Suarez. Doctor en Ingeniería

Abstract

Title: Design of learning objects for overcurrent protection of distribution lines. ³

Author(s): Angie Stefany Rincón Higuera⁴

Key Words: Learning object, Matlab, Simulink, dashboard, over current protection, distance protection, differential protection

Description: This thesis aims to develop a learning object for training in the analysis of overcurrent protection for distribution lines for students in the School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E3T) at the UIS. This is because the subject of electrical protection does not have laboratories in which students can observe and analyze the operation of a protection device. Therefore, the aim of this thesis is to create a learning object that allows E3T students a more visual and practical approach, allowing them to experiment using the simulator. This simulator will allow them to analyze the elements to be protected under different conditions and thus observe firsthand the consequences of the different changes made. The educational process is constantly innovating and updating the strategies and resources used by teachers, seeking substantial improvements in the learning process, in this area projects have been carried out in various subjects which have allowed great advances that open the doors to the realization of didactic projects that allow students to acquire new knowledge about the different areas of study, based on this, this project wants to continue innovating the academic learning processes by providing a learning object to the area of electrical protections, highlighting that this is the right way to improve learning experiences in the classroom, innovating and achieving advances in the improvement of learning resources.

³ Degree Work

⁴ Faculty of Physics and Mechanics. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: Ivan David Serna Suarez. PhD in engineerin.

Introducción

Las protecciones eléctricas son dispositivos eléctricos que se utilizan para mitigar los impactos que tienen los eventos fortuitos, tales como corrientes de cortocircuito, sobre los equipos conectados en la red. Por lo tanto, las protecciones eléctricas son un elemento fundamental en todo sistema de potencia. De ahí la importancia de entender a fondo su funcionamiento y la necesidad de contar con ayudas pedagógicas en la formación de ingenieros electricistas.

El aprendizaje didáctico y pedagógico es una herramienta fundamental para explicar cualquier tema, llevar la teoría a la práctica, afianzar conocimientos y adquirir experiencia en los diferentes resultados posibles. El avance tecnológico actual permite acceder a una cantidad inigualable de herramientas para explorar con mayor profundidad el funcionamiento y manejo de las protecciones eléctricas.

En este sentido, los objetos de aprendizaje se convierten en herramientas valiosas, especialmente cuando se utiliza software como MATLAB, el cual cuenta con una herramienta de simulación llamada Simulink que permite diseñar sistemas con modelos multidominio, simularlos antes de implementarlos en hardware, y desplegarlos sin necesidad de escribir código.

Este trabajo de grado propone el diseño de un objeto de aprendizaje como herramienta didáctica para la clase de protecciones eléctricas, basado en los componentes tipo Dashboard de Matlab/Simulink. Los componentes tipo Dashboard son los que permiten organizar y presentar la información de manera que sea fácil de leer, creando paneles de control que sean interactivos y que ofrezcan una representación visual de la información para lograr uno o más objetivos. Esta información se consolida y se muestra en una sola pantalla, permitiendo un control y una comprensión global de la misma.

En el objeto de aprendizaje se analizará la protección sobrecorriente de líneas de distribución. Para las protecciones eléctricas de las líneas se tienen en cuenta las configuraciones de los relés en la línea, en particular, este proyecto se enfoca en los esquemas de relés de sobrecorrientes.

La protección contra sobrecorrientes se usa para proteger contra corrientes excesivas causadas por fallas eléctricas o por un pico de sobrecorriente, básicamente cuando se supera el umbral de corriente establecido el relé se dispara haciendo que el circuito se abra evitando daños en las líneas. Según la norma ANSI/IEEE C37.2-2008 define la protección de sobrecorriente como ANSI:50 para sobrecorriente instantánea y ANSI:51 para sobrecorriente temporizada.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un objeto de aprendizaje para la formación en el análisis de protección sobrecorriente de líneas de distribución mediante la herramienta Simulink

1.2 Objetivos Específicos

- Diseñar objeto de aprendizaje para la formación en el análisis de la protección sobrecorriente (51) utilizada en la protección de redes de distribución y transmisión utilizando elementos “Dashboard” de Matlab/Simulink.
- Diseñar guía de aprendizaje para la formación en el análisis de la protección sobrecorriente (51) utilizada en la protección de redes de distribución y transmisión distribución haciendo uso de un objeto de aprendizaje.

2. Coordinación de Relé Sobrecorriente

El relé de sobrecorriente es un tipo de dispositivo de protección que detecta corrientes excesivas y actúa para interrumpir el circuito. Por lo tanto, son especialmente fundamentales para garantizar la protección de los equipos y la seguridad y estabilidad de los sistemas eléctricos.

El relé de sobrecorriente de tiempo inverso opera inversamente proporcional a la magnitud de la corriente, lo cual indica que entre más alta sea la corriente más se reducirá el tiempo que tarda el relé en operar.

Los relés de sobrecorriente de tiempo inverso se clasifican en relés muy inversos, relés moderadamente inversos y relés extremadamente inversos en función de sus características de retardo de tiempo. Para cada uno de estos tipos de relés se tiene una curva de operación de relé de tiempo inverso, estas curvas se pueden observar en el Apéndice B, las curvas vienen definidas por la ecuación (1) y (2), siendo esta la ecuación característica del relé, tal como se muestra en la Figura 1. En dichas ecuaciones, se tiene que M es la corriente en múltiplos de pickup, la cual está descrita como la corriente crítica dividida en la corriente en el primario, y t el tiempo de operación. Se puede observar un ejemplo de una de las curvas en este caso la Muy Inversa.

La ecuación (1), (2), la Tabla 1y la Figura (1) mostradas a continuación son adaptadas de (IEEE Power and Energy Society. Std C37.112, 2018).

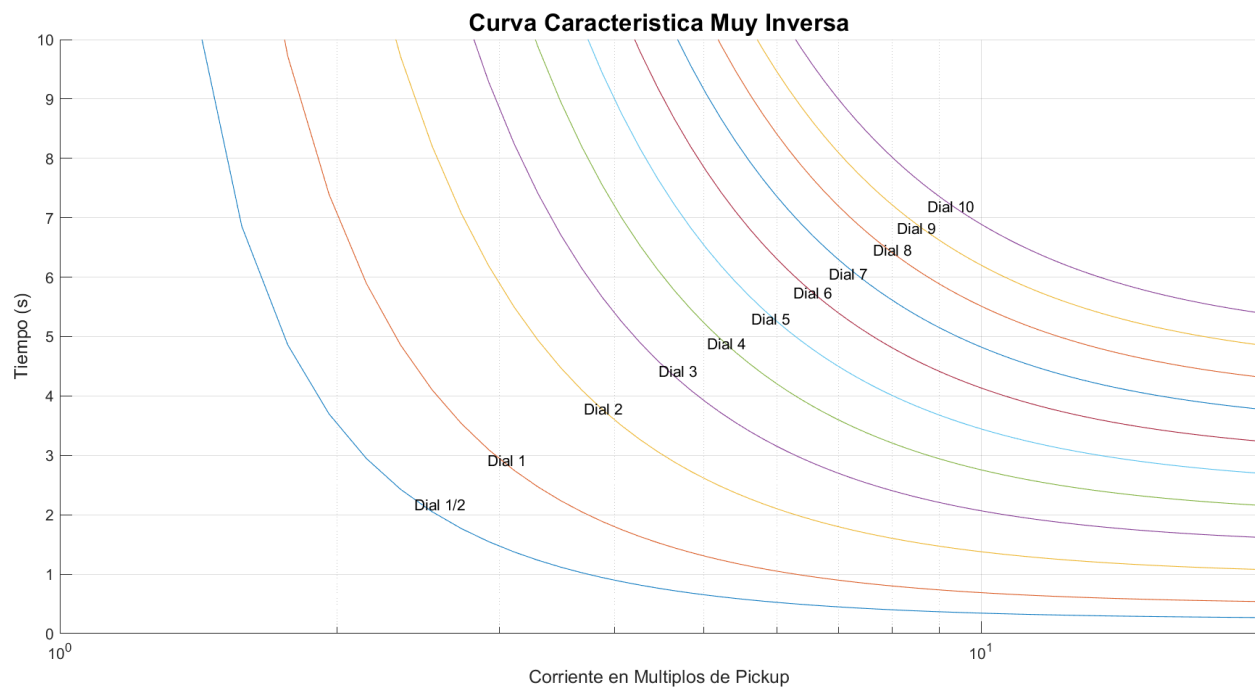
$$\text{Para } M > 1 \quad t = Dial * \left(\frac{A}{M^p - 1} + B \right) \quad (1)$$

$$\text{Para } 0 < M < 1 \quad t = Dial * \left(\frac{tr}{M^p - 1} \right) \quad (2)$$

Tabla 1

Constantes de la ecuación exponencial según estándar IEEE

Tipo de Relé de tiempo inverso	A	B	p	tr
Moderadamente Inversa	0.0515	0.1140	0.0200	4.85
Muy Inversa	19.61	0.4910	2	21.6
Extremadamente Inversa	28.2	0.1217	2	29.1

Figura 1**Curva de operación de un relé de tiempo muy inverso**

(Nota: Elaboración propia)

2.1 Pasos para Coordinación del Relé

Para encontrar los parámetros adecuados de coordinación se debe realizar un procedimiento con el cual los relés entran en operación en el momento indicado. Este procedimiento se realiza en cada uno de los relés que actúan en el sistema, empezando por el relé

que se encuentra en el extremo de la carga más aguas abajo del circuito y pasando por cada uno de los relés anterior a éste hasta llegar al más cercano a la fuente. Las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7) son tomadas como referencia del libro (Paul M. Anderson, 2022)

2.1.1 Corrientes de carga

Determinar las corrientes de carga observadas por cada uno de los relés estudiados, se debe seleccionar el valor de carga mínima observada por cada relé.

2.1.2 Corrientes de cortocircuito

Determinar las corrientes de cortocircuito o la corriente de falla en la barra donde se encuentra posicionado el relé, esto con el fin de encontrar el menor tiempo para la mayor corriente de falla.

2.1.3 Corrientes de arranque

Determinar la corriente mínima de funcionamiento del relé (MOC) también conocida como la corriente de arranque, esta corriente suele ser un porcentaje de la corriente de carga, con el fin de garantizar que el relé no dispare durante condiciones de carga máxima.

$$MOC = K * I_{carga} \quad (3)$$

Donde K es una constante que puede variar según condiciones del relé, pero garantizando que el MOC sea lo suficientemente mayor que la corriente de carga para lograr cubrir todas las sobrecargas según los pronósticos de demanda. Un valor posible a usar es K=2 que indica que el MOC es igual al 200% de la corriente de carga.

2.1.4 Corrientes en múltiplos de Pickup

La corriente mínima en el relé para la cual el relé se activará, abriendo el sistema para evitar afectaciones en el circuito.

RC = Relación de transformación

IP= Ajuste de activación (MOC) del relé en el primario

IS = Ajuste de activación (MOC) del relé en el secundario

Donde

$$I_P = I_S * R_C \quad (4)$$

Los relés se coordinan de dos en dos, el relé de aguas arriba se ajusta según el relé de corriente de aguas abajo, una vez seleccionada la corriente crítica o de falla, se convierte este valor de amperios en una corriente de múltiplos de pickup (XPU) este valor corresponde al eje horizontal de las curvas características del relé.

$$XPU_{CR} = \frac{I_{falla}}{I_P} \quad (5)$$

2.1.5 Dial del Relé

Las curvas características vienen dadas por un conjunto de curvas como se observa en la Figura 1 de las cuales cada una representa un ajuste diferente según su “Dial”. Para seleccionar el dial correcto de un relé, se calcula la XPU de corriente crítica dado un cortocircuito en el relé aguas abajo, esto para calcular el tiempo de operación de dicho relé, tal como se muestra en la ecuación (6) . Para referirse al relé aguas abajo se usará el subíndice D.

$$XPU_{D_{max}} = \frac{I_{D_{max}}}{I_{PD}} \quad (6)$$

El tiempo de funcionamiento del relé D ($t_{D_{max}}$), se encuentra al leer el correspondiente valor en el eje horizontal de la característica tiempo-corriente del relé. Por ende, el tiempo mínimo de funcionamiento para el relé que se encuentra aguas arriba de D será:

$$t_{CR} = t_{D_{max}} + CTI \quad (7)$$

Donde el CTI está dado por la suma del tiempo de activación del relé más el tiempo de interrupción del interruptor más el margen de error. Este valor suele encontrarse entre 0.3~0.4 segundos.

2.1.6 Coordinación del siguiente relé

Para lograr la configuración de cada uno de los relés del sistema vamos a repetir los pasos anteriores teniendo presente que el orden correcto siempre será primero el relé de aguas abajo y siguiendo la secuencia hasta llegar al relé aguas arriba.

3. Descripción del objeto de aprendizaje

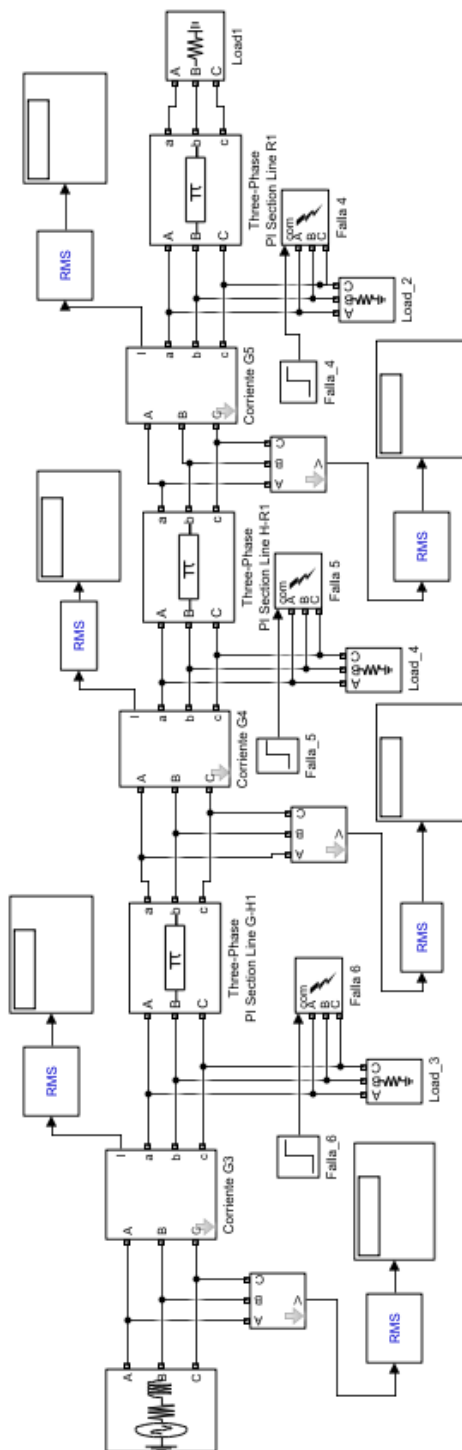
Para realizar el objeto de aprendizaje se optó por el programa Matlab (MATLAB SIMULINK, R2024b) haciendo uso de su herramienta (MathWorks, 2024) Simulink que permite realizar simulaciones de circuitos eléctricos. Esta simulación se enfoca tanto en simular el circuito como en crear un dashboard que permite hacer uso del circuito de una manera más compacta y didáctica. A medida que el capítulo avanza se desglosa la configuración del sistema presentado en el Apéndice A

3.1 Simulación circuito base

La primera etapa de la creación de esta simulación se enfoca en recrear el sistema de la Figura 2 haciendo uso de las distintas herramientas de la biblioteca (MATLAB SIMULINK, R2024b) Simscape/Electrical/Specialized Power Systems.

Figura 2

Simulación Circuito Base creado en Simulink

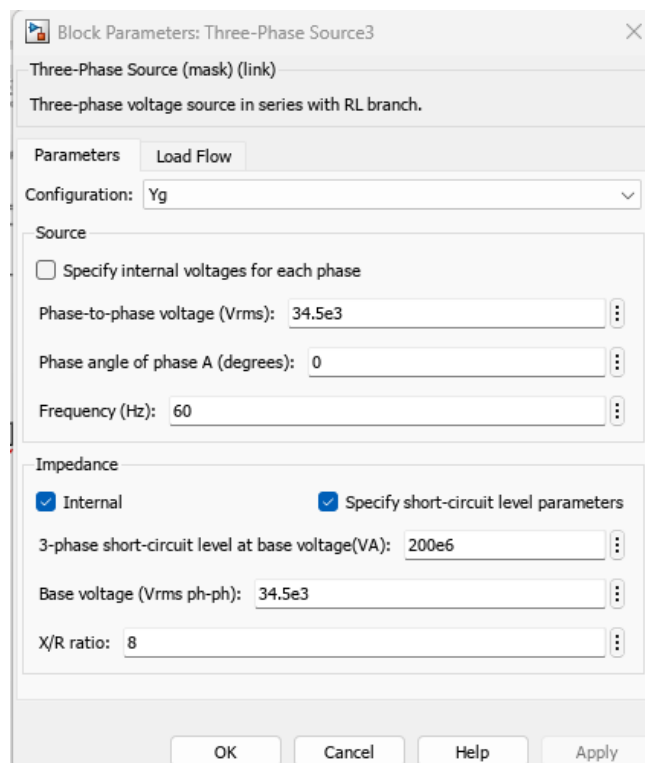


Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

El circuito base está formado por: La fuente representada por el bloque Three-Phase Source, configurada con un voltaje de 34.5 kV y en condiciones máximas a 200 MVA y a una frecuencia de 60 Hz que es la cual será utilizada en todo el sistema.

Figura 3

Configuración de la fuente



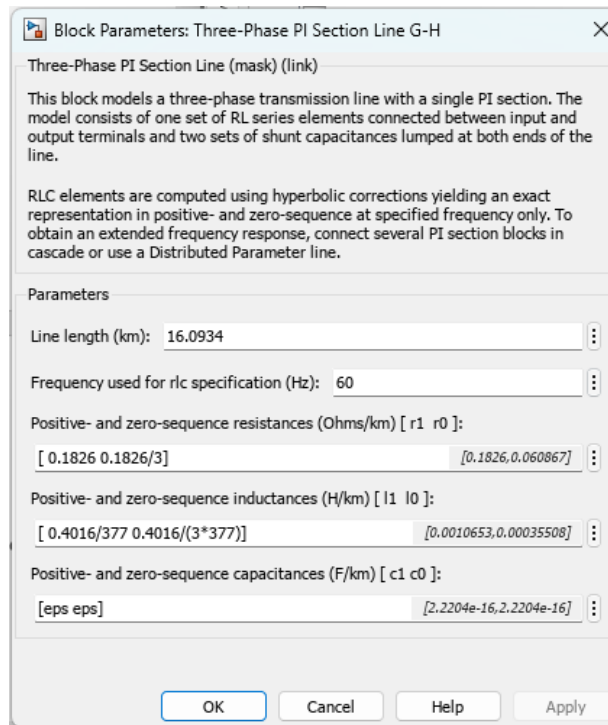
Nota: Block parameters:Three-Phase Source (MATLAB SIMULINK, R2024b)

La línea representada por el bloque Three-Phase PI Section Line se encuentra configurada con datos de resistencia, inductancia y capacitancia, dado que el sistema solo posee datos de resistencia e inductancia se define para la capacitancia un valor eps que es aproximadamente 2-52 lo cual no crea mayor afectación en el sistema. Los datos del sistema están en unidades de milla, en la simulación la unidad requerida son kilómetros, por lo tanto, se realiza la conversión de unidades $1 \text{ mi} = 1,60934 \text{ km}$.

Para cada tramo de la línea se realiza la misma configuración teniendo en cuenta que el tramo G-H mide 10 millas, el tramo H-R mide 20 millas y el tramo final mide 30 millas.

Figura 4

Configuración de la línea



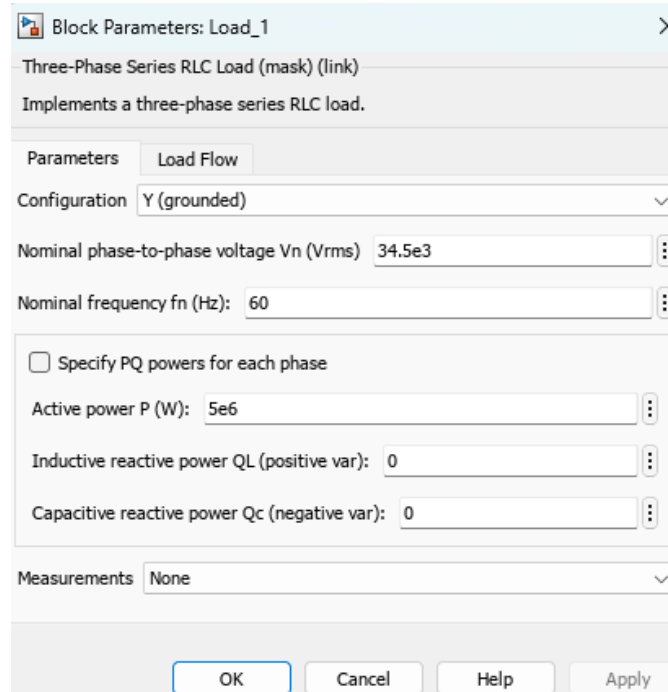
Nota: Block parameters: Three-Phase PI section Line (MATLAB SIMULINK, R2024b)

La carga representada por el bloque Three-Phase Series RLC Load está configurada con un voltaje de 34.5 kV y una potencia activa de 5MW.

El sistema consta de 4 cargas iguales, tres de ellas se reparten en cada uno de los barrajes y una última al final de la línea, se toma el valor de 5MW dado que se deben tomar las condiciones máximas a las que puede estar sometido el sistema.

Figura 5

Configuración de las cargas

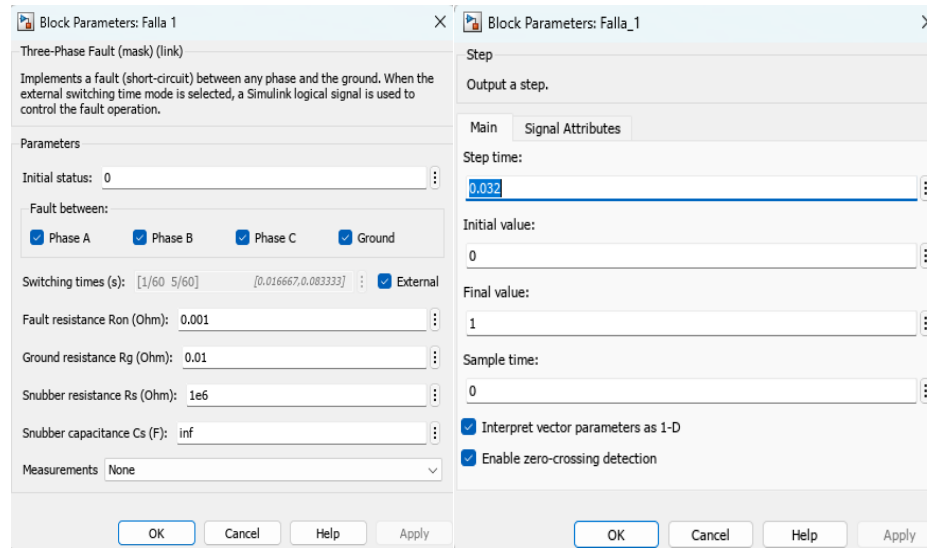


Nota: Block parameters:Three_Phase Series RLC Load (MATLAB, R2024b)

La falla está representada por el bloque Three-Phase Fault este bloque permite configurar un cortocircuito en alguna de las fases o tierra, también da la posibilidad de conectar un agente externo para recrear la falla, dicho modo de uso es el que se va a estar operando en el sistema haciendo uso de un segundo bloque un Step el cual permite mandar un pulso en un momento determinado que activará la falla. En el sistema tenemos un total de 3 fallas que no actúan en simultaneidad, sino que a diferencia podemos escoger cual actúa para así lograr un estudio en diferentes situaciones a las que se expone el sistema.

Figura 6

Configuración de las fallas

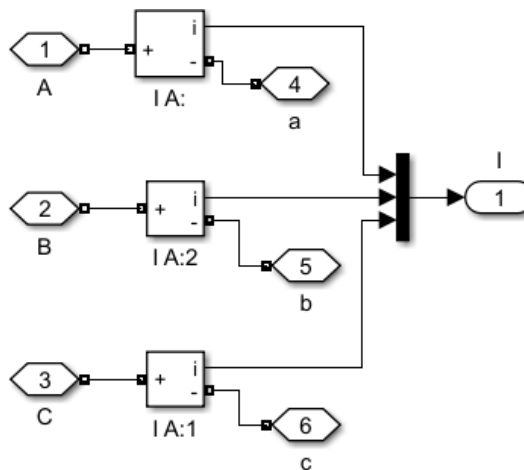


Nota: Block parameters: Three_Phase Fault and Step (MATLAB SIMULINK, R2024b)

Para realizar la medición de la corriente trifásica de la línea, se creó un medidor de corriente trifásico dado que el medidor de corriente que maneja Matlab es monofásico, para ello se utilizaron tres bloques Current Measurement que se encargan de leer la corriente en cada una de las fases, dichas señales de corriente se unen por medio de un Mux para enviar una señal que contenga las corrientes trifásicas del sistema.

Figura 7

Medidor de corriente

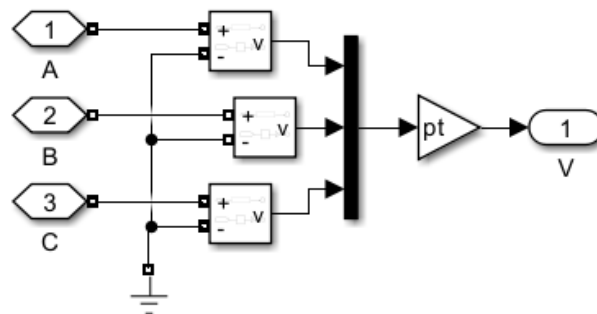


Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

Lo mismo sucede para el medidor de tensión, se deben conectar 3 bloques de Voltage Measurement los cuales están encargados de realizar la lectura de tensión en cada una de las fases y unirlos por medio de un Mux, para crear un medidor de voltaje que funcione en un sistema trifásico.

Figura 8

Medidor de tensión



Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

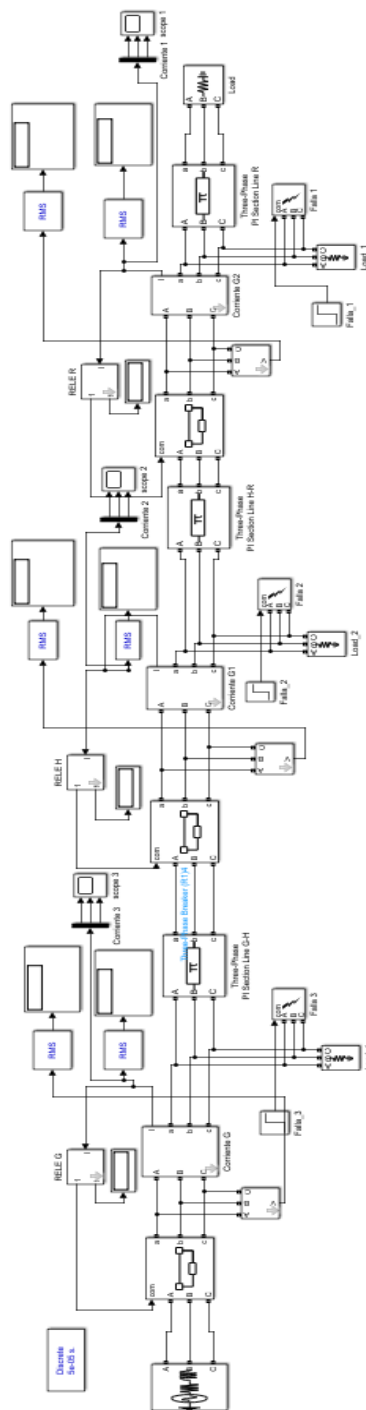
El circuito base permite verificar las corrientes de cortocircuito del sistema, si las corrientes dan valores similares a los cálculos de coordinación manual cuando se configuran los parámetros, se da por entendido que se trabaja con el mismo sistema.

3.2 Implementación del relé

El circuito cuenta con 3 relés R, H y G, Matlab no cuenta con un bloque específico para simular el relé de protección sobrecorriente, es por ello que se realiza un bloque que reconozca las corrientes vistas por el relé y suministrando la información necesaria logre calcular el tiempo de operación que necesita el relé para entrar en acción, al final este bloque enviará una señal al Breaker que será el encargado de abrir el sistema de ser requerido.

Figura 9

Circuito del sistema



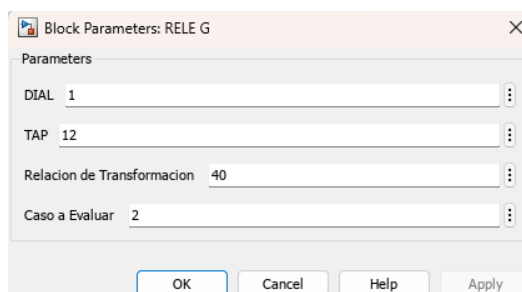
Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

El circuito de la Figura 9 cuenta con tres bloques Three-Phase Breaker cuenta con tres bloques Three-Phase Breaker que están encargados de recibir la señal enviada por el relé y decidir si abre o no el sistema.

El bloque creado para simular un relé de sobrecorriente se alimenta con los datos, valores de Dial, del tap, de la relación de transformación y por último el caso a evaluar que es el que se encarga de configurar el tipo de relé siendo (1) Moderadamente inverso, (2) Muy inverso y (3) Extremadamente Inverso.

Figura 10

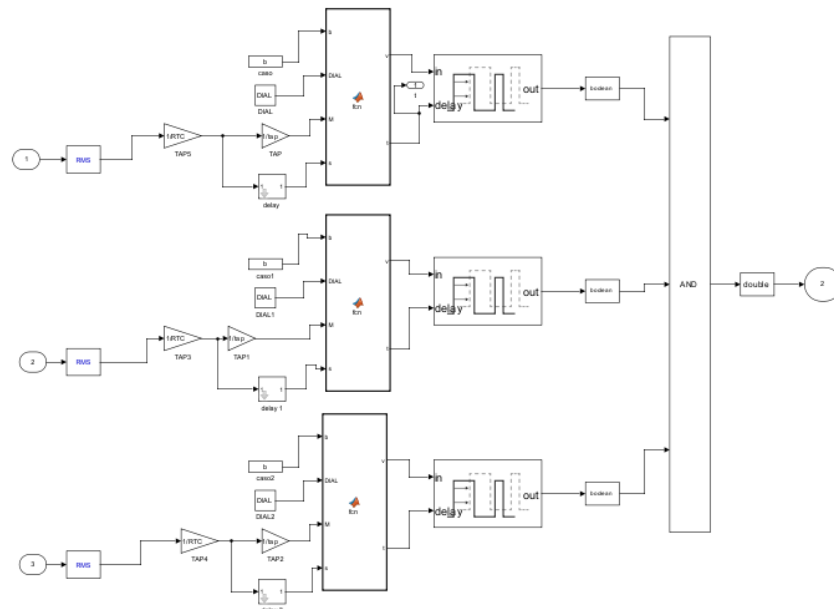
Parámetros para configurar el Relé



Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

Figura 11

Relé de sobrecorriente



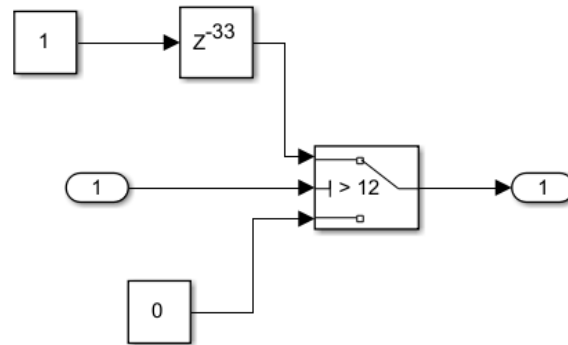
Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

El relé reconoce los datos con los que se configura y la corriente vista por relé en el barraje correspondiente, la corriente que ingresa al relé es una corriente trifásica, por esto dentro del relé se realiza el mismo procedimiento para cada una de las fases. El relé trabaja con la magnitud de la corriente en múltiplos de pickup, las cuales se calculan a partir de las señales de salida del bloque RMS por el cual se obtienen las magnitudes de las corrientes. Posteriormente, la magnitud de la corriente se somete a la relación de transformación y al tap lo cual permite obtener la corriente en múltiplos de pickup definida por la letra M, que es equivalente a usar la ecuación (5). Como se observa en la Figura 11, se tiene un bloque Delay. Este bloque se crea para recibir una señal de corriente y compararla con el valor del tap, esto para identificar la falla, ya que el valor del tap es el valor más grande admitido por el sistema sin fallar. El Delay se utiliza permitiendo que el sistema tarde un periodo en enviar la señal de corriente, esto con el fin de ignorar buena parte del transitorio que se producen en el instante que se produce la falla, y así permitir que los cálculos

hechos en clase (que se realizan con valores en estado estable) coincidan con los obtenidos en Simulink.

Figura 12

Bloque Delay

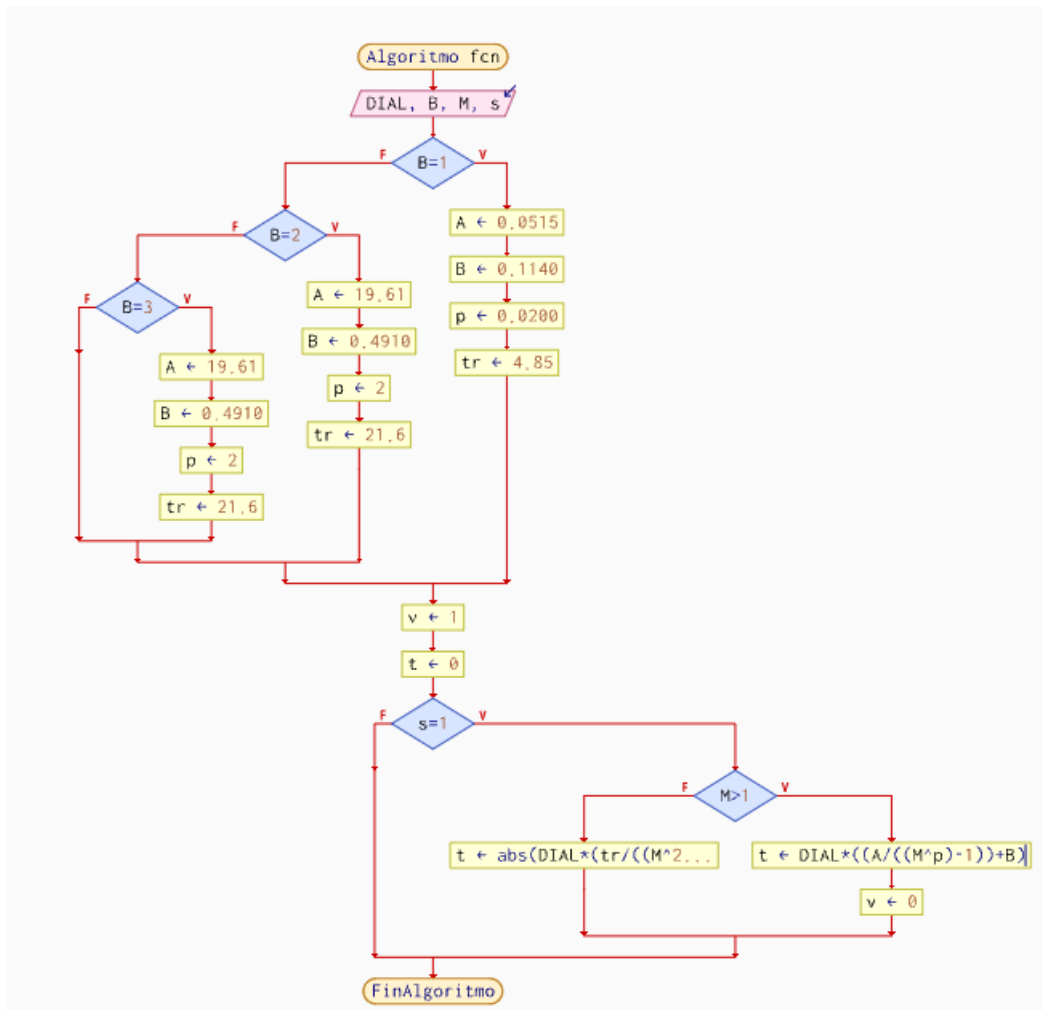


Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

Con ayuda del bloque Matlab Funcion se programa el relé siendo el valor de la variable de entrada b (1) si es Moderadamente inverso, (2) si es Muy inverso y (3) si es Extremadamente Inverso. La variable s recibe el pulso del Delay, el cual permite que la señal de corriente ingrese al relé. La variable M representa la corriente en múltiplos de pickup. En cuanto a las salidas del sistema, t es el tiempo de operación del relé y v es un pulso que envía un valor correspondiente a 0 y 1 y se encarga de abrir o cerrar el interruptor lo cual permite que el sistema se abra si v=0 y permanezca cerrado si v=1.

Figura 13

Diagrama de flujo programación matlab funcion



Nota: Creación propia, implementando PSeInt (Novara, 2025)

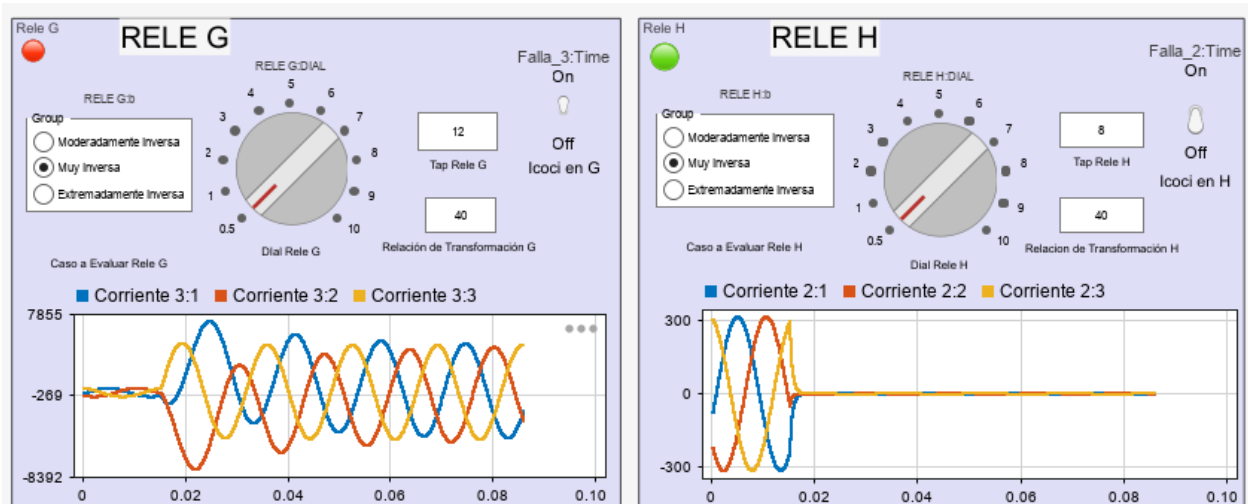
Ya que el bloque Matlab Funcion cumple con su función de encontrar el tiempo de operación, se utiliza el bloque Variable Pulse Delay como muestra la Figura 9 para convertir este valor de tiempo en un pulso, siendo 1 o 0, donde 0 será el encargado de abrir el sistema. Este pulso tendrá un retardo igual a al tiempo de operación del relé. Al final del sistema se obtienen 3 pulsos dado que el Breaker solo recibe información de 1 o 0 para abrir o cerrar el Breaker, estos 3 pulsos obtenidos se convierten en valores tipo Booleana y se ingresan a una compuerta AND de tal manera que si alguna de las 3 fases o las 3 se encuentran en falla el relé reciba el pulso para abrir el sistema.

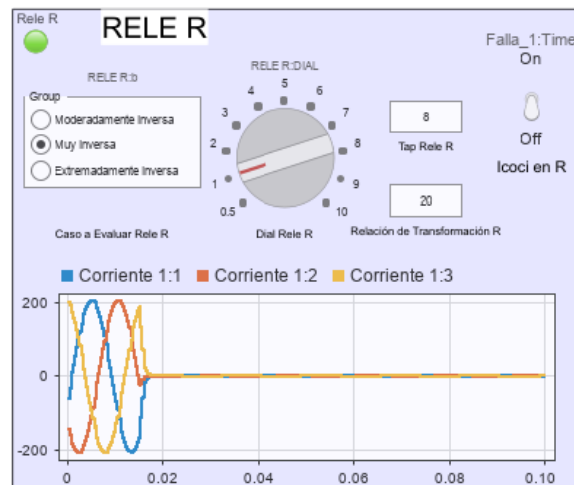
3.3 Dashboard

Un objeto de aprendizaje es un contenido digital que se utiliza para enseñar y aprender, por medio de un dashboard o cuadro de mando que es una herramienta visual que resume la información más importante, lo cual permite una rápida comprensión y seguimiento del rendimiento. Es por esta razón que se plantea un tablero o panel de control como se puede ver en la Figura 14 en el cual se ingresan los datos y se obtiene la información necesaria para entender lo que le está pasando a el sistema.

Figura 14

Panel de control





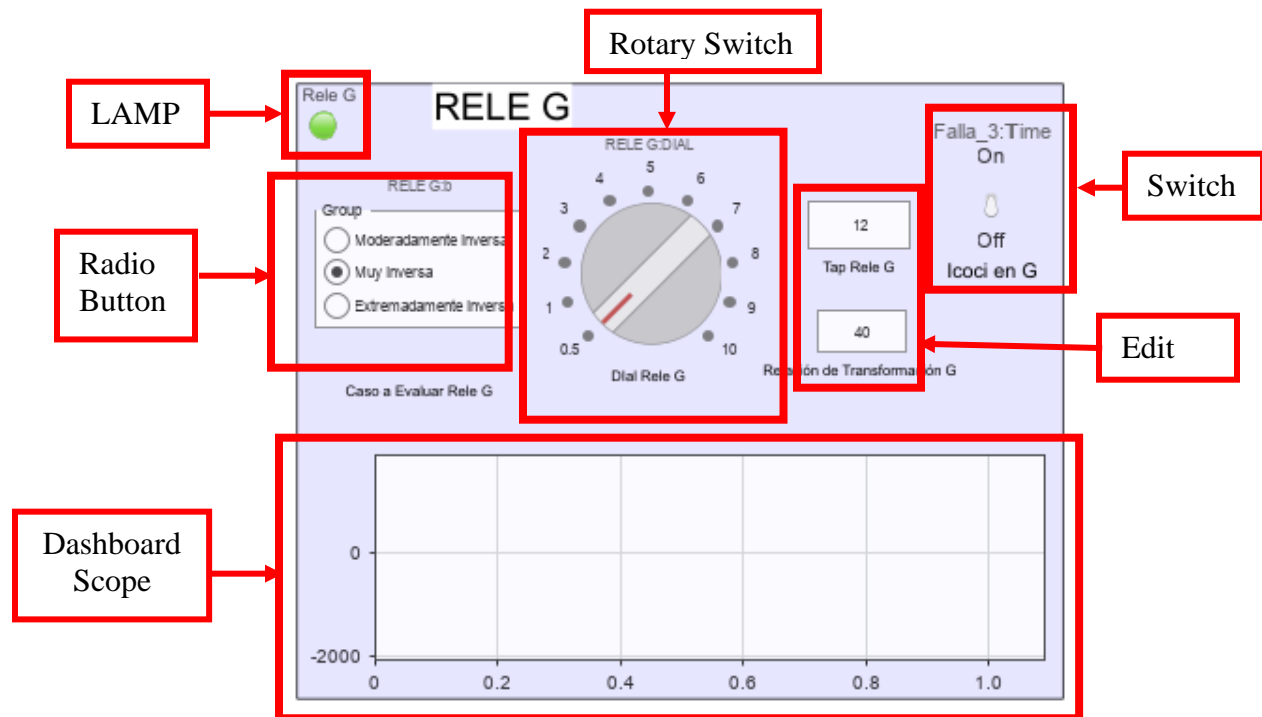
Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

Este panel de control recoge toda la información necesaria tanto para poner a funcionar el sistema, como los resultados obtenidos por el sistema, este también nos indica que está pasando en cada uno de los barrajes.

Como se observa en la Figura 15 el panel está compuesto por los siguientes bloques: el bloque Edit permite ingresar valores de tap y relación de transformación, para escoger el tipo de relé se utiliza el bloque Radio Button que permite escoger entre las opciones que tiene programadas, el bloque Rotary Switch para escoger el Dial al cual se requiere que el relé trabaja, el bloque Switch para decidir si en el barraje indicado la falla estará activa o inactiva, el bloque Lamp indica cual barraje se encuentra en estado de falla y el bloque Dashboard Scope permite visualizar la gráfica corriente vs tiempo que lee el relé, con la cual de manera visual se detecta el momento en que actúa la falla, el cambio que se genera en la corriente y el tiempo que tarda el sistema en detectar y operar la apertura del circuito para evitar daños en el sistema.

Figura 15

Partes del panel de control



Nota: Creación propia, implementando (MATLAB SIMULINK, R2024b)

El sistema está diseñado para que se le realicen adecuaciones según sea necesario, es por ello que las guías piden configuraciones diferentes a la cual trae por defecto, por medio de las guías de aprendizaje se va a realizar un análisis a la corriente de falla y al tiempo de operación.

4. Conclusiones

A partir del objeto de aprendizaje construido en Simulink, se diseñaron 3 guías de aprendizaje, las cuales se encuentran en los Apéndice C, Apéndice D y Apéndice E de este trabajo. Al ser un objeto de aprendizaje, dichas guías sólo representan 3 ejemplos de cómo utilizar el mismo y por tanto, su uso no se limita a lo aquí presentado. En general, este proyecto permite llevar un paso más adelante la coordinación de los relés, dado que se realizan los cálculos de manera manual

y permite utilizar el objeto de aprendizaje como herramienta adicional para comprobar y ver el funcionamiento del relé de manera más flexible e intuitiva.

El objeto de aprendizaje permite gran flexibilidad en el análisis, ya que permite estudiar diversas configuraciones para el sistema tales como diversos tipos de curvas de operación, corrientes de arranque, y tipos de relés haciendo ajustes a los datos de entrada y ejecutando de nuevo el programa.

El objeto de aprendizaje está diseñado para usarse con valores de dial de 1/2 a 10, de igual manera en caso de necesitar un dial diferente con un ajuste en la configuración de ingreso de dial se puede ingresar el dial que sea requerido.

El objeto de aprendizaje permite el análisis de la corriente y del tiempo que tarda en operar el relé cuando entra en un estado de falla. Este programa fue el resultado de un estudio a fondo de los relés de sobrecorriente, haciendo uso de las normas y configuraciones que deben cumplirse en los relés se logró obtener un programa que logra comprobar los datos obtenidos manualmente, ofreciendo así una herramienta adicional para realizar mejores análisis de lo que sucede en el relé.

Referencias Bibliográficas

American National Standards Institute. (s.f.). *Protección contra sobrecorriente IDMTL (ANSI 51)*.

Obtenido de [https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc/a0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/\\$/TPC_IDMTLProtection_b5effd44_es_T001598492](https://www.productinfo.schneider-electric.com/micrologicxuserguide/doc/a0102-micrologic-x/Spanish/BM_MasterPact%20MTZ%20MicroLogic%20X_b5effd44_es_T001597810.xml/$/TPC_IDMTLProtection_b5effd44_es_T001598492)

IEEE Power and Energy Society. Std C37.112. (2018). *IEEE Standard for Inverse Time Characteristics Equations for Overcurrent Relay*.

MATLAB, M. (R2024b). *Software MATLAB (Versión R2024b)*. (I. MathWorks, Productor)
Obtenido de MathWorks: <https://www.mathworks.com>

Novara, P. (2025). *PSeInt (versión 2025)*, 2025. (Universidad Nacional del Litoral) Obtenido de <https://pseint.sourceforge.net>

Paul M. Anderson, C. H. (2022). *Power System Protection* (Segunda Edición ed.). IEEE PRESS.

Apéndices

Apéndice A. Objeto de aprendizaje Protección Sobrecorriente

Apéndice B. Curvas características de tiempo para relés de sobrecorriente

Apéndice C. Guía de aprendizaje Análisis de Impedancias

Apéndice D Guía de aprendizaje Tiempos de Operación

Apéndice E. Guía de aprendizaje Coordinación de Relés