

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Desarrollo de una herramienta software que modele y simule el comportamiento de relés direccionales de sobre corriente en caso de fallas en los sistemas de distribución con generación distribuida de elevada penetración.

**Juan Manuel Martínez Mantilla
Yonathan Alexander Montaña Rodríguez**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Electricista**

**Director:
Hermann Raúl Vargas Torres
Profesor Universidad Industrial de Santander
Doctor en Ingeniería Eléctrica**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2023**

Dedicatorias

A mis padres Yasmin Rodríguez, Benjamín Montaña, mis abuelos Adelina Alvarado y Álvaro Rodríguez, mi hermano Miguel Montaña y todas aquellas personas que han contribuido a alcanzar esta meta, este más que un logro personal es un logro de toda mi familia que siempre me apoya sin condición.

Agradecerles a los amigos que encontré en la carrera, por las horas de desvelo y el trabajo en equipo donde todos aprendimos de cada uno.

A la Universidad Industrial de Santander por acogerme en su comunidad más que una universidad se convirtió en mi segundo hogar.

-Yonathan Montaña -

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

A Dios por mantenerme en pie desde el primer día y hasta la fecha que disponga.

A mi madre y mis hermanas que han estado presentes en este proceso de formación y que así mismo celebran a mi lado por cada meta cumplida. Por ellas y para ellas.

A mi esposa que vio mis primeros pasos en la carrera, me acompañó con paciencia y comprensión por este largo camino y hoy con orgullo festeja este logro como propio.

A la Universidad Industrial de Santander que me abrió las puertas al conocimiento, me brindó las herramientas, los docentes y los espacios para disfrutar del proceso. El lugar donde tuve compañeros que se hicieron amigos, amigos que me llenaron de motivación para lograr nuestro objetivo común.

Yonathan Montaña, solo usted sabe cuán agradecido estoy de trabajar a su lado

-Juan Martínez-

Agradecimientos

Agradecemos a la Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander por brindarnos los espacios y los docentes capacitados para un buen desarrollo de la formación como ingenieros electricistas. Asimismo, agradecemos a nuestro director de proyecto el Dr. Hermann Raúl Vargas Torres quien supo guiarnos durante el tiempo de desarrollo de este proyecto.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Contenido

Introducción	18
1. Objetivos	20
1.1. Objetivo General	20
1.2. Objetivos Específicos	20
2. Justificación del Problema	21
3. Marco Conceptual	23
4. Metodología de Desarrollo	25
4.1. Selección del Lenguaje e Ide de Desarrollo	25
4.2. Modelos de los Parámetros Eléctricos de un Sistema de Potencia	26
4.3. Proceso de Simulación de las Fallas en los Sistemas de Potencia	26
4.4. Consulta sobre Modelos de Relés Direccionales de Sobrecorriente	26
4.5. Creación del Software	27
4.6. Simulación del Sistema de Prueba	27
4.7. Análisis de Resultados del Comportamiento de los Relés de Sobrecorriente Direccionales	27
4.8. Creación del Instructivo para el Usuario	27
5. Implementación de la Metodología	28
5.1. Consideraciones Generales	28
5.2. Selección del Lenguaje e Ide De Desarrollo	29
5.2.1. Python	29

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.2.2.	C++.....	30
5.2.3.	Matlab.....	31
5.2.4.	Selección del IDE y lenguaje de programación	32
5.3.	Modelado de los Parámetros Eléctricos de un Sistema de Potencia	33
5.3.1.	Modelos para Estado Estable	34
5.3.2.	Modelos para el Estado Transitorio.....	39
5.4.	Proceso para la Simulación de Fallas en Líneas de Transmisión.....	45
5.4.1.	Creación de la Barra Ficticia	45
5.4.2.	Tipo de Falla y su Modelado Circuitual.....	46
5.5.	Selección del Modelo del Relé de Sobre Corriente Direccional.....	51
5.5.1.	Identificación de la Dirección de Falla Utilizando un Nuevo Índice Basado en Corriente Fundado en la Tasa de Cambio de la Corriente de Falla.	52
5.5.2.	Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente	57
5.5.3.	Selección del Modelo del Relé Direccional de Sobre Corriente	61
5.6.	Creación del Software.....	61
5.6.1.	Cálculo de los Parámetros Eléctricos y Creación del Modelo Unifilar.....	64
5.6.2.	Cálculo de Potencia Monofásico por Medio de La Librería Matpower.....	65
5.6.3.	Modelo Serie de la Carga	68
5.6.4.	Equivalente de Norton de las Fuentes de Tensión	69
5.6.5.	Cálculo de las Condiciones Iniciales del Modelo Monofásico	70

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.6.6.	Cálculo de las Matrices de Impedancia para el Modelo RTdl	71
5.6.7.	Cálculo de Matriz Npf.....	73
5.6.8.	Cálculo de la Matriz G para el Modelo RTdl.....	74
5.6.9.	Cálculo de las Condiciones Iniciales del Modelo Trifásico	77
5.6.10.	Construcción del Módulo de Fallas.....	83
5.6.11.	Simulación del Flujo de Potencia Trifásico Transitorio en Fallas Asimétricas	87
5.6.12.	Construcción del Módulo de Comportamiento del Relé	92
5.6.13.	Visualización y Almacenamiento de los Datos	95
5.6.14.	Unión de los Datos Obtenidos del Relé.....	96
5.7.	Simulación del Sistema de Prueba	96
5.7.1.	Modelado del Sistema para el Caso de Prueba.....	96
5.7.2.	Modelos Circuitales del Sistema	101
5.7.3.	Cálculo del Flujo de la Potencia Monofásico en el Estado Estable	104
5.7.4.	Cálculo de Flujo de Potencia Trifásico Transitorio.....	110
5.7.5.	Gráficos de Tensiones y Corrientes muestreadas por los Relés.....	111
5.7.6.	Resultados de las Direcciones de las Fallas para el Sistema de Pruebas	121
5.7.7.	Análisis de Resultados.....	130
5.7.8.	Manual Del Usuario	139
6.	Conclusiones	140
	Referencias.....	142

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Apéndices..... 144

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Lista de Tablas

Tabla 1 Selección del lenguaje del lenguaje e IDE del proyecto.....	33
Tabla 2 Comparación de las ecuaciones de los elementos R, L y C en el dominio del tiempo contra el modelo RTdl	42
Tabla 3 Table_ISource para cuatro fuentes de tensión	69
Tabla 4 Tabla de los fasores de tensión para cada barra del sistema	70
Tabla 5 Tabla de la matriz de los fasores de corriente en el estado estable.....	70
Tabla 6 Parámetros de conductores	99
Tabla 7 Parámetros de transformador	99
Tabla 8 Potencia demandada por las cargas.....	100
Tabla 9 Parámetros de las fuentes.....	100
Tabla 10 Impedancia en pu y real para cada transformador del sistema	101
Tabla 11 Impedancia en pu y real para cada línea del sistema	101
Tabla 12 Modelo de reactancias equivalentes para dos ramas acopladas magnéticamente.....	102
Tabla 13 Impedancia en pu y real para la impedancia interna de la fuente	102
Tabla 14 Resultados de las tensiones monofásicas en el estado estable.....	108
Tabla 15 Resultados de las potencias monofásicas en el estado estable para todas las ramas del sistema.....	109
Tabla 16 Muestra de 14 columnas y 20 filas de la hoja muestras de V_{t} (t) trifásicas.....	110
Tabla 17 Muestra de 12 Columnas y 20 filas de la hoja, muestras de i_{t} (t) trifásicas.....	111
Tabla 18 Datos de la falla simulada	112
Tabla 19 Fallas que se aplicarán al sistema de pruebas	121
Tabla 20 Diccionario de las tablas que describen los comportamientos de los relés.....	121

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 21	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 1.....	122
Tabla 22	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 2.....	123
Tabla 23	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 3.....	124
Tabla 24	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 4.....	125
Tabla 25	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 5.....	126
Tabla 26	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 6.....	127
Tabla 27	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 7.....	128
Tabla 28	Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 8.....	129
Tabla 29	Disparos de los relés R1 y R2 para la falla F1 en la línea L3	130
Tabla 30	Disparos de los relés R5 y R6 para la falla F2 en la línea L4	131
Tabla 31	Disparos incorrectos para las fallas en punto F1 en la línea L3.....	132
Tabla 32	Disparos incorrectos para las fallas en el punto F2 en la línea L4.....	135
Tabla 33	Tasa de fallas de detecciones incorrectas de los relés de sobre corriente direccionales	139

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Lista de Figuras

Figura 1 Metodología para el desarrollo del proyecto.....	25
Figura 2 Arreglo geométrico de los conductores de un sistema trifásico	35
Figura 3 Modelo de impedancia para dos ramas mutuamente acopladas	36
Figura 4 Procedimiento para llevar a modelo circuital el acoplamiento magnético de dos ramas	38
Figura 5 Comparación de los elementos R , L y C en el dominio del tiempo contra el modelo RTdl	41
Figura 6 Comparación del modelo en el tiempo de dos ramas acopladas magnéticamente con el modelo RTdl	43
Figura 7 Equivalente de Norton para una fuente de tensión con impedancia inductiva.....	44
Figura 8 Creación de la barra auxiliar en una línea de 100 km, en la que ocurrió una falla, a 70 km desde la barra A	46
Figura 9 Modelo circuital trifásico para falla C_g	47
Figura 10 Modelo trifásico circuital para falla BC	48
Figura 11 Modelo trifásico circuital para falla BC_g	49
Figura 12 Modelo trifásico circuital para falla ABC	50
Figura 13 Modelo trifásico circuital para falla ABC_g	51
Figura 14 Discretización de una señal de corriente con amplitud uno	53
Figura 15 Área de detección hacia adelante y atrás	55
Figura 16 Sistematización de la detección y dirección de la falla presentada en diagrama de flujo	56

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 17 <i>Sistematización de la detección y dirección de la falla presentada en diagrama de flujo</i>	60
Figura 18 <i>Flujo de la información para la herramienta software</i>	63
Figura 19 <i>Diagrama unifilar en pu de un sistema de potencia de 9 nodos</i>	65
Figura 20 <i>Sistema de 4 barras y 2 generadores, figura 9.2 del libro de Grainger y Stevenson (1996, p. 317)</i>	66
Figura 21 <i>Resultados de usar la instrucción "runpf('case4gs.m')</i>	67
Figura 22 <i>Matriz NodosSource para un sistema con cuatro fuentes de tensión</i>	69
Figura 23 <i>Cálculo de Δt en base a las muestras por ciclo que decide el usuario</i>	72
Figura 24 <i>Matriz ImpedEntreLine</i>	72
Figura 25 <i>Matriz ImpedAtierra</i>	72
Figura 26 <i>Extracción de los datos de las ramas en pu</i>	73
Figura 27 <i>Circuito RLC serie monofásico</i>	74
Figura 28 <i>Programación del cálculo de la matriz G monofásica</i>	75
Figura 29 <i>Cálculo de la matriz G trifásica</i>	76
Figura 30 <i>Cálculo de las condiciones iniciales trifásicas</i>	78
Figura 31 <i>Programación para el cálculo sistemático de las condiciones iniciales de corriente de las ramas para el modelo trifásico.</i>	80
Figura 32 <i>Función que calcula las corrientes históricas trifásicas iniciales.</i>	82
Figura 33 <i>Función para modificar la matriz G y simular las fallas en el modelo trifásico</i>	83
Figura 34 <i>Cálculo sistemático de las tensiones para un sistema de N barras con N ramas</i>	87
Figura 35 <i>Cálculo trifásico sistematizado de las ecuaciones 28 y 31</i>	88
Figura 36 <i>Cálculo monofásico sistematizado de las ecuaciones 28 y 31</i>	89

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 37 <i>Cálculo trifásico sistematizado de las ecuaciones 27 y 30</i>	90
Figura 38 <i>Cálculo monofásico sistematizado de las ecuaciones 27 y 30</i>	91
Figura 39 <i>Modelo del relé trifásico</i>	92
Figura 40 <i>Modelo del relé monofásico</i>	93
Figura 41 <i>Diagrama unifilar del sistema de prueba con todas las fases en delta</i>	96
Figura 42 <i>Vista longitudinal y frontal de una línea de transmisión en doble circuito</i>	97
Figura 43 <i>Vista longitudinal y frontal de una línea de transmisión de un solo circuito</i>	98
Figura 44 <i>Modelo circuital monofásico en por unidad para el sistema de prueba de la figura 41</i>	103
Figura 45 <i>Modelo circuito monofásico en la regla trapezoidal de integración</i>	104
Figura 46 <i>Modelo del circuito de prueba figura 41 en formato dos de la librería MATPOWER</i>	104
Figura 47 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 1</i>	112
Figura 48 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 1</i>	113
Figura 49 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 2</i>	114
Figura 50 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 2</i>	114
Figura 51 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 3</i>	115
Figura 52 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 3</i>	115
Figura 53 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 4</i>	116
Figura 54 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 4</i>	116
Figura 55 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 5</i>	117
Figura 56 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 5</i>	117
Figura 57 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 6</i>	118

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 58 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 6.....</i>	118
Figura 59 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 7.....</i>	119
Figura 60 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 7.....</i>	119
Figura 61 <i>Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 8.....</i>	120
Figura 62 <i>Corriente trifásica muestreada por el relé 8.....</i>	120
Figura 63 <i>Corriente muestreada por el relé R3 durante la falla Bg en el punto F1</i>	133
Figura 64 <i>Corriente muestreada por el relé R5 durante la falla Bg en el punto F1</i>	134
Figura 65 <i>Corriente muestreada por el relé R1 durante la falla ABC en el punto F2</i>	136
Figura 66 <i>Corriente muestreada por el relé R2 durante la falla AB en el punto F2.....</i>	137
Figura 67 <i>Corriente muestreada por el relé R7 durante la falla AB en el punto F2.....</i>	138

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Lista de Apéndices

Apéndice A. Software para el Cálculo del Flujo de Potencia Trifásico Transitorio en los Sistemas de Potencia y Simulación del Comportamiento de los Relés de Sobre Corriente Direccionales.	144
Apéndice B. Manual Para el Uso del Software.....	146
Apéndice C. Resultados del modelo de prueba.	146

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Resumen

Título: Desarrollo de una herramienta software que modele y simule el comportamiento de relés direccionales de sobrecorriente en caso de fallas en los sistemas de distribución con generación distribuida de elevada penetración. *

Autor: Yonathan Alexander Montaña Rodríguez

Juan Manuel Martínez Mantilla **

Palabras claves: relés de sobrecorriente direccionales, dirección de las fallas, Flujo de potencia trifásico, Acoplamiento magnético, protecciones eléctricas, RTdl.

Descripción:

El presente trabajo tiene como fin, desarrollar un software que modela la respuesta de los relés direccionales de sobrecorriente, para que puedan detectar las fallas que suceden en los sistemas de potencia con acoplamientos magnéticos y elevada penetración de renovables. Así, el desarrollo del software calcula los parámetros concentrados de los elementos típicos de un sistema de potencia con base a la geometría de las líneas y parámetros eléctricos propios de cada elemento del circuito. Una vez se calculen los parámetros, el software calcula el flujo de potencia (respuesta de estado estable), y sus cálculos, son las condiciones iniciales para el estudio transitorio del sistema, con lo cual, se puede observar cómo los relés de corriente direccional responden ante fallas.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Profesor Hermann Raúl Vargas Torres.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Abstract

Title: Development of a software tool that models and simulates the behavior of directional overcurrent relays in case of failures in distribution systems with high penetration distributed generation*

Author: Yonathan Alexander Montaña Rodríguez **

Juan Manuel Martínez Mantilla **

KeyWords: Directional overcurrent relays, fault direction, three-phase power flow, magnetic coupling.

Description:

The present work aims to develop software that models the response of directional overcurrent relays, allowing them to detect faults occurring in power systems with magnetic couplings and high penetration of renewables. Thus, the software's development calculates the lumped parameters of the typical elements of a power system based on the geometry of the lines and the electrical parameters specific to each element of the circuit. Once the parameters are calculated, the software determines the power flow (steady-state response), and these calculations serve as initial conditions for the transient study of the system, enabling the observation of how directional current relays respond to faults.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Professor Hermann Raúl Vargas Torres.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Introducción

Actualmente en Colombia hay centros de producción de energía que no necesariamente están en los puntos de consumo. Así, generación y consumo se unen por líneas de transmisión, y a esta topología se le conoce como generación centralizada (GC), y con los avances tecnológicos se espera que sea reemplazada por generación distribuida (GD) donde la generación y el consumo estén en el mismo sitio geográfico. De esta manera, con esta nueva filosofía, el usuario podrá ser autosuficiente en su consumo energético y exportar sus excedentes a la red. Esto plantea, consiguientemente, condiciones de operación diferentes para las cuales se diseñaron los sistemas de generación, distribución. Además, resulta crucial analizar una de las variables más significativas: el desempeño de las protecciones eléctricas. Estas protecciones desempeñan un papel fundamental al asegurar la confiabilidad, la seguridad humana y la robustez de los sistemas eléctricos.

Así y todo, este proyecto se enfoca en observar el comportamiento de los relés de sobrecorriente direccionales cuando se presenta una falla en un sistema eléctrico con GD, ya que los relés de sobrecorrientes direccionales no están en capacidad de asegurar la selectividad en su operación para sistemas eléctricos que constan de redes que no son del tipo radial. Por tal motivo, se simulará un sistema típico de transmisión que agregue alta penetración de renovables.

Ahora bien, una falla eléctrica es cualquier evento que interrumpe el flujo normal de la potencia en un sistema eléctrico, y el objetivo del proyecto, por ende, es conocer el estado estable del sistema que lleva a calcular las condiciones iniciales del estado transitorio creado por las fallas.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Para ello, en el documento se presentan tanto los modelos RTdl para los análisis transitorios de los sistemas lineales, como la selección de lenguajes e IDE's para la sistematización del cálculo de flujos de potencia trifásicos transitorios, y el comportamiento de los relés de sobrecorriente direccional empleados.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta software que modele y simule el comportamiento de relés direccionales de sobrecorriente en caso de fallas en los sistemas eléctricos con generación distribuida de elevada penetración.

1.2. Objetivos Específicos

- Elegir el entorno de desarrollo (IDE) y lenguaje para diseñar el software.
- Consultar y seleccionar el modelo adecuado de los parámetros eléctricos lineales con o sin acoplamientos magnéticos en el estado estable y transitorio.
- Consultar y seleccionar un proceso para la simulación de las fallas en los sistemas trifásicos.
- Consultar y seleccionar un modelo de los relés de sobrecorriente direccionales.
- Diseñar un software capaz de simular el comportamiento de los relés direccionales de sobrecorriente en un sistema de potencia trifásico, con n barras y k pares de líneas acopladas magnéticamente ante situaciones de falla y con una alta penetración de fuentes de energía renovable.
- Simular un sistema de potencia de prueba para observar su comportamiento en el estado estable como en estado transitorio ante situaciones de falla.
- Analizar los resultados del comportamiento de los relés del sistema de pruebas.
- Elaborar una guía detallada para la simulación de sistemas de potencia proporcionados por el usuario.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

2. Justificación del Problema

En la actualidad, por un lado, el sector energético colombiano, según el Plan Energético Nacional 2020-2050 (2023), tiene “una capacidad efectiva neta de generación para el año 2023 de 18,78 GW (enero 2023), de los cuales 66,8% corresponden a energía hidráulica, el 30,5% a energía térmica, 1,1% energía por cogeneración, el 1,48% de energía solar y el 0,1% restante de energía eólica” (p. 3), de tal forma que, si se suma la generación térmica e hidráulica se obtiene un 97,36% de la capacidad neta de generación; por lo cual, se puede afirmar, que el sistema de generación eléctrico colombiano depende de los recursos hídricos y térmicos del país.

Por otro lado, según las proyecciones dadas para el año 2050 según el Plan Energético Nacional 2020-2050, se espera tener una capacidad instalada de 42,71 GW, de los cuales 43,2% corresponden a FRNC, 37,4% a energía hidráulica y el 19,2% restante a energía térmica; logrando así, un aumento en la capacidad efectiva neta total de 23,74 GW con respecto al presente año. (p.3).

De esta manera, la generación hidráulica y térmica suman 24,38%, y se observa una reducción de 73,01% en la cuota de mercado de las centrales térmicas e hidráulicas, por lo cual, este porcentaje se sustituirá por las FRNC que crecerán 41,3%. Ahora, los beneficios otorgados por la ley 02 del 2021, crea incentivos para el crecimiento de la autogeneración, esto traerá beneficios para los usuarios finales como su auto abastecimiento y mejora en los perfiles de tensión, pero también plantea retos a los sistemas eléctricos, ya que estos se diseñaron para el panorama de generación actual, y genera, por tanto, una incertidumbre del comportamiento de los sistemas ante el cambio de paradigma de generación.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Asimismo, una parte esencial de los sistemas eléctricos, son las protecciones eléctricas que garantizan tanto la seguridad de la infraestructura como la de los usuarios, por lo tanto, es indispensable un estudio de su comportamiento ante el nuevo panorama de generación renovable distribuida de elevada penetración, que permite una correcta coordinación de las protecciones y evitan también, que, en ciertos casos, el servicio se deje de prestar en su totalidad.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

3. Marco Conceptual

Para el desarrollo del proyecto se aplicarán las definiciones a continuación:

Sistema de Potencia: es una red interconectada de componentes eléctricos instalados, como generadores, transmisores, etc., para suministrar, transferir y usar energía eléctrica.

Rama: cualquier elemento que conecta dos barras, como una línea de transmisión, un transformador o un cable.

Barra: una barra en un sistema de potencia es un nodo en el que se conectan líneas de transmisión, generadores, transformadores y cargas. En análisis de sistemas de potencia, una barra es un punto en el que se supone que la tensión es constante en magnitud y ángulo.

Falla Eléctrica: evento, interrupción o problema en el suministro eléctrico que interfiere con el flujo normal de la potencia.

Circuito Lineal: es un circuito en el que las tensiones y corrientes o los valores eléctricos siguen una relación proporcionalmente lineal entre causa y efecto.

Modelo para Líneas Cortas: líneas con longitudes menores a 80 km o 50 millas.

Flujos de Potencia: estudio que se aplica a los sistemas de potencia donde se obtiene principalmente la magnitud y la tensión en cada barra, y las potencias reales y reactivas que fluyen en cada rama.

Estado Estable: condiciones de operación en las que todas las variables del sistema, como tensiones, corrientes y frecuencias, permanecen constantes o varían de manera predecible dentro de un rango normal.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Estado Transitorio: las condiciones de operación en las que las variables del sistema, como tensiones, corrientes y frecuencias, cambian rápidamente debido a una perturbación, como una falla o una operación de conmutación.

EMTP: ElectroMagnetic Transients Program, algoritmos destinados al análisis de circuitos en el régimen transitorio que utilizan principalmente el método de integración trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema que se simula.

RTdl: La regla trapezoidal es un método de integración numérica que se utiliza para calcular aproximadamente el valor de una integral definida, se usara en este documento para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales del sistema a simular.

Conductancia (G): facilidad o capacidad que tiene un material para dar paso a la corriente eléctrica.

Ramas Mutuamente Acopladas: dos o más ramas de un circuito eléctrico que están acopladas magnéticamente. Esto significa que el flujo magnético que genera una rama afecta a las otras ramas acopladas. En el caso de dos bobinas, por ejemplo, el paso de una corriente eléctrica variable en el tiempo por una bobina produce una diferencia de potencial entre los extremos de la otra bobina del circuito debido al acoplamiento magnético entre ellas.

Relé de Sobrecorriente Direccional: un relé direccional de sobrecorriente es un dispositivo de protección que se utiliza en sistemas eléctricos para detectar y responder a condiciones de sobrecorriente en una dirección específica. Estos relés tienen la capacidad de determinar la dirección de la corriente eléctrica mediante el reconocimiento de los ángulos de fases entre la corriente de operación y la magnitud de polarización (corriente o tensión) del relé.

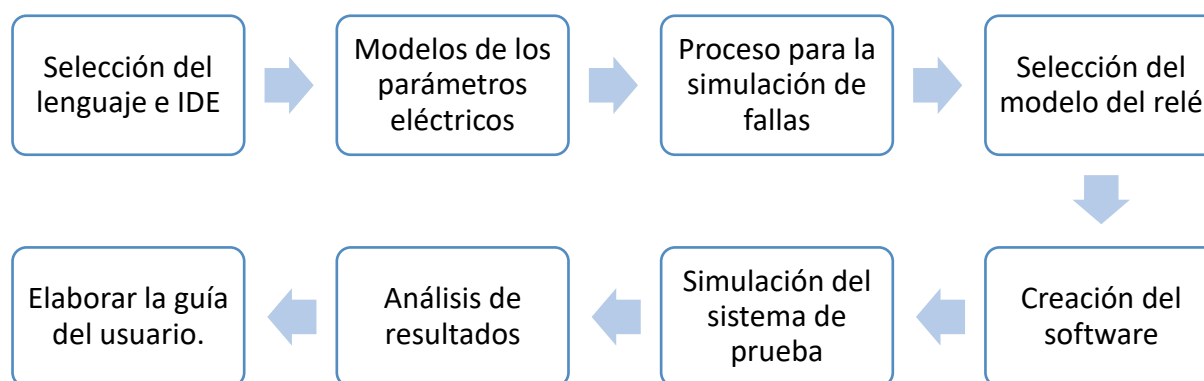
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

4. Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo del proyecto se realizará la metodología descrita en la figura 1

Figura 1

Metodología para el desarrollo del proyecto

**4.1. Selección del Lenguaje e Ide de Desarrollo**

La selección de un lenguaje de programación y un entorno de desarrollo integrado (IDE) adecuados es importante para el desarrollo de un proyecto por varias razones:

- *Idoneidad a las necesidades del proyecto:* cada lenguaje tiene sus propias fallas y fortalezas, y para este proyecto, es necesario seleccionar uno que se adapte a la simulación de algoritmos matemáticos y tenga una gran precisión.
- *Productividad:* Un buen IDE puede aumentar significativamente la productividad de los desarrolladores al proporcionar herramientas y funcionalidades que facilitan la escritura, depuración y mantenimiento del código.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

- *Compatibilidad*: Es importante que el software a entregar sea fácilmente ejecutable por los usuarios.
- *Comunidad y soporte*: una comunidad activa y un soporte oportuno puede ser de gran utilidad para la resolución de problemas.

4.2. Modelos de los Parámetros Eléctricos de un Sistema de Potencia

Para el desarrollo del trabajo de grado se modela un sistema de potencia integrado por fuentes de tensión, líneas de transmisión, transformadores y cargas. Cada uno de estos elementos necesita un modelo matemático tanto para el estado estable como para el estado transitorio; por lo tanto, se realiza una consulta y se seleccionan los más adecuados. Así también, este proyecto se limita al análisis de sistemas de potencias lineales, con lo cual, los modelos de los elementos del sistema serán lineales.

4.3. Proceso de Simulación de las Fallas en los Sistemas de Potencia

Existen varios enfoques para la simulación de fallas en circuitos trifásicos lineales, una de las más conocidas es *el método de componentes simétricas* desarrollado por Fortescue, de uso extendido en los análisis trifásicos unifilares; ya que, como menciona Grainger y Stevenson (1996), “el trabajo de Fortescue prueba que un sistema balanceado de n fasores relacionados, se puede resolver con n sistema de fasores balanceados llamados *componentes simétricas* de los fasores originales” (p. 391). Además de esto, se estudió la idoneidad de este método y se consultó el método empleado en el EMTP.

4.4. Consulta sobre Modelos de Relés Direccionales de Sobrecorriente

Se consultan varios algoritmos que describen el comportamiento transitorio del relé direccional de sobrecorriente, y se selecciona el modelo.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

4.5. Creación del Software

Se diseña y elabora un software que modela el comportamiento de los relés direccionales de sobrecorriente en sistemas trifásicos con pares de ramas acopladas magnéticamente y alta penetración de renovables, para ello, se aplican los algoritmos que se consultaron en el *proceso de simulación de las fallas en los sistemas de potencia* y en la *consulta sobre modelos de relés direccionales de sobrecorriente*, calculando así el flujo de potencia en el estado estable y transitorio. Del mismo modo, el software está construido sobre el IDE seleccionado y puede ejecutar sistemas de n barras con m pares de acoplamientos magnéticos, y observar el comportamiento de k relés direccionales de sobrecorriente.

4.6. Simulación del Sistema de Prueba

Para validar el software se propone un sistema trifásico con elevada penetración de FRNC¹, donde se calcularán los parámetros eléctricos, flujo de potencia trifásico en condiciones de falla y comportamiento de los relés de sobrecorriente direccionales en el que se usará el software diseñado.

4.7. Análisis de Resultados del Comportamiento de los Relés de Sobrecorriente Direccionales

En esta sección se realiza una comparación del comportamiento de los relés, (detección de la falla y dirección de la falla), con la ubicación real de las fallas en el modelo de prueba.

4.8. Creación del Instructivo para el Usuario

Se creó el documento apéndice B, en el que hay un paso a paso de cómo emplear el software, para la simulación de sistemas de estudio de los usuarios.

¹ Fuentes Renovables no Convencionales.

5. Implementación de la Metodología

En este apartado se presenta el desarrollo de la metodología indicada anteriormente en *Metodología del desarrollo*.

5.1. Consideraciones Generales

- Las figuras se han realizado en AutoCAD con licencia estudiantil y el software fue diseñado en Matlab R2020b con licencia estudiantil.
- El modelo de comportamiento de los relés se consultó en artículos científicos alojados en el repositorio de IEEE² y repositorios públicos.
- Las FRNC se modelan como máquinas síncronas dentro del algoritmo del software con impedancia inductiva.
- Los parámetros eléctricos se tomarán como lineales.
- El modelo de las líneas de transmisión será tomado como línea corta y se supone transposición de las líneas para que todas las fases tengan la misma impedancia.
- Los datos del sistema de prueba, como líneas, transformadores, generadores y cargas, no corresponden a ningún equipo comercial, son ejemplos académicos.
- Los resultados de tensión y corriente de salida del software se expresarán en *por unidad*, explicados en *Análisis de sistemas de potencia* (1996).
- La onda de referencia es la función coseno para todas las señales.
- Los sistemas trifásicos son en secuencia positiva.
- Δt debe cumplir el teorema de Nyquist.

² Institute of Electrical and Electronics Engineers

5.2. Selección del Lenguaje e Ide De Desarrollo

Se preseleccionaron tres lenguajes, Python, C++, Matlab, con base a las habilidades del equipo de trabajo. En esta sección se describen los parámetros de selección y una descripción de cada lenguaje.

5.2.1. Python

Python es un lenguaje de programación interpretado, de alto nivel y de propósito general. Se creó por Guido van Rossum y se lanzó por primera vez en 1991. Tiene una sintaxis simple y clara, que favorece la legibilidad del código. Además, admite múltiples paradigmas de programación, como el imperativo, el orientado a objetos, el funcional o el declarativo. Asimismo, cuenta con una gran biblioteca estándar que ofrece una amplia variedad de módulos y paquetes para diversas tareas, que van desde el procesamiento de texto, el cálculo numérico, la interfaz gráfica hasta el desarrollo web. Python también es compatible con muchos otros lenguajes y plataformas, lo que facilita su integración y extensión; es uno de los lenguajes más populares y demandados en la actualidad, debido a su versatilidad, eficiencia y facilidad de aprendizaje (Python, s.f.).

Ahora bien, el lenguaje de Python cuenta con una librería dedicada al cálculo matricial llamada *numpy* y con otras librerías para el análisis de sistemas de potencia, como lo son:

5.2.1.1. Panda Power. Pandas Power es una librería de Python que proporciona herramientas para el análisis y la visualización de datos de sistemas eléctricos. Se basa en la librería Pandas, que ofrece estructuras de datos y operaciones para manipular datos tabulares de forma eficiente. Asimismo, permite crear y modificar redes eléctricas, calcular flujos de potencia, realizar análisis de estabilidad y optimización, y generar gráficos interactivos y mapas geográficos. Contiene, también, una librería de código abierto que se

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

puede instalar fácilmente con el gestor de paquetes *pip*, y que resulta útil para estudiantes, investigadores y profesionales que trabajan con sistemas eléctricos (PyPSA, 2023a).

5.2.1.2. PyPSA. PyPSA es una librería de código abierto para Python, que significa *Python para Análisis de Sistemas de Energía* (Python for Power System Analysis). Está diseñada para simular y optimizar sistemas modernos de energía que incluyen características como generadores convencionales con compromiso de unidad, generación variable de viento y solar, unidades de almacenamiento, acoplamiento a otros sectores energéticos y redes de corriente alterna y directa mixtas. PyPSA está diseñada para escalar bien con redes grandes y series de tiempo largas.

Del mismo modo, puede calcular el flujo de potencia estático, el flujo de potencia óptimo lineal con restricciones de seguridad y la optimización de inversión de costo mínimo del sistema eléctrico/energético total. También tiene modelos para redes de CA y CC conectadas en malla, tipos estándar para líneas y transformadores, generadores despachables convencionales y enlaces con compromiso de unidad, generadores con disponibilidad de potencia variable, unidades de almacenamiento con pérdidas de eficiencia y acoplamiento con otros portadores energéticos (PyPSA, 2023b).

5.2.2. C++

C++ es un lenguaje de programación de propósito general, de alto nivel y compilado. Se desarrolló por Bjarne Stroustrup en 1983 como una extensión del lenguaje C. Es conocido, además, por su eficiencia y flexibilidad, ya que permite a los programadores controlar el uso de recursos del sistema y la gestión de memoria. Asimismo, C++ es un lenguaje orientado a objetos que admiten programación procedural y genérica, y se utiliza, ampliamente, en el desarrollo de sistemas operativos, aplicaciones de escritorio, videojuegos, aplicaciones móviles y software de

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

servidor. C++ cuenta, también, con una amplia biblioteca estándar que ofrece una variedad de funciones y clases para tareas comunes, como el manejo de cadenas, el procesamiento de archivos y la manipulación de contenedores. En últimas, es un lenguaje muy popular y demandado en la industria debido a su eficiencia y versatilidad, aunque las operaciones matriciales no son un fuerte de C++, y cuenta, por ende, con una librería dedicada al análisis de sistemas de potencia llamada *power-grid-model* (Ceballos, 2015).

5.2.2.1. Power-Grid-Model. “Power Grid Model es una biblioteca para el análisis de sistemas de distribución de energía en estado estacionario distribuida para Python y C. El núcleo de la biblioteca está escrito en C++. Actualmente, admite cálculos como el cálculo de flujo de potencia simétrico y asimétrico con el método de Newton-Raphson, el método iterativo de corriente y el método lineal” (Power-Grid-Model, s.f.), y admite, también, la estimación de estado simétrica y asimétrica con el método lineal iterativo y se puede encontrar más información sobre esta biblioteca en su documentación oficial y en su repositorio *power-grid-model-io*.

5.2.3. Matlab

MATLAB es un lenguaje de programación y entorno de cómputo numérico desarrollado por MathWorks, permite la manipulación de matrices, la representación gráfica de funciones y datos, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas escritos en otros lenguajes (MathWorks, s.f.a). Algunas características fundamentales del lenguaje MATLAB incluyen operaciones básicas como la creación de variables, el indexado, manipulación de matrices y arrays, la aritmética y los tipos de datos.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Asimismo, cuenta con una amplia biblioteca de funciones y operadores para realizar tareas comunes (MathWorks, s.f.b), y complementos para el estudio de sistemas de potencia como es *SIMULINK* y una librería de uso extendido como es *MatPower* que se explicará a continuación:

5.2.3.1. Matpower. Matpower es una librería de MATLAB que permite realizar análisis de flujos de potencia, optimización de sistemas eléctricos y simulación de contingencias en redes de transmisión. Ofrece una interfaz sencilla y flexible para definir los datos de entrada, como la topología de la red, los parámetros de las líneas, las cargas, las generaciones y los límites operativos. Además, cuenta con varias funciones para resolver distintos tipos de problemas, como el cálculo del punto de operación óptimo (OPF), el análisis de estabilidad de tensión (VSA), el despacho económico (ED) y el análisis de seguridad (SCOPF). Matpower también permite integrar modelos de dispositivos de control y compensación, como FACTS y SVC, así como modelos de generación renovable, como eólica y solar, es una herramienta útil y versátil para el estudio y la planificación de sistemas eléctricos de gran escala (Matpower, s.f.).

5.2.4. Selección del IDE y lenguaje de programación

La selección del IDE y lenguaje de programación se hizo con base a las secciones *selección del lenguaje e Ide de desarrollo*, tanto de los apartados de la metodología del desarrollo como de la creación del software, expuestos anteriormente; y se agregó un peso a cada ítem, de manera tal que 1 es deficiente y 10 excelente, como se observa en la tabla 1.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 1*Selección del lenguaje del lenguaje e IDE del proyecto*

Lenguaje e IDE	Experiencia Del equipo	Librerías Para SP	Operaciones Matriciales	Productividad	Compatibilidad	Comunidad y soporte	Soporte director TdG	Total
Pyhton – Visual Studio Code	7	10	10	10	9	10	2	58
C++ - Dev C++	5	4	1	5	10	5	4	34
Matlab - Matlab	8	9	10	8	7	9	9	60

Nota. Como se observa en la Tabla 1, el lenguaje e IDE seleccionado es Matlab. Python se desempeña mejor en varios aspectos sobre Matlab, pero el factor decisivo es el soporte que puede ofrecer el director del trabajo de grado.

5.3. Modelado de los Parámetros Eléctricos de un Sistema de Potencia

El análisis de los sistemas eléctricos de potencia busca responder dos preguntas fundamentales: ¿Cómo se comporta el sistema en condiciones normales de funcionamiento? y ¿Qué sucede cuando el sistema es perturbado? Para abordar estas cuestiones, la ingeniería eléctrica ha desarrollado dos enfoques de análisis: el estudio del estado estable y el estudio transitorio.

El estudio del estado estable se encarga de resolver la pregunta de ¿cómo se comporta el sistema en condiciones normales? Para ello, se usan las técnicas del cálculo del flujo de potencia o flujo de carga, un análisis numérico que se aplica para determinar la magnitud y el ángulo de la tensión, la potencia activa y reactiva en cada nodo o barra del sistema. Este análisis permite conocer, por un lado, el estado operativo del sistema, así como planificar su expansión o mejorar su eficiencia. Por otro lado, permite conocer el cálculo del flujo de la potencia, que se basa en resolver un sistema de ecuaciones no lineales que relacionan las variables eléctricas con las

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

características de las fuentes y las cargas. Existen diferentes métodos para resolver el sistema de ecuaciones, como el método de Gauss-Seidel, el método de Newton-Raphson o el método de flujo de carga óptimo.

Ahora, el estudio transitorio analiza el comportamiento de las variables eléctricas, (tensión, corriente, potencia), cuando ocurre algún cambio o perturbación en el sistema, como, por ejemplo, una falla, una conexión o desconexión de un elemento, una variación de carga, etc. Estos cambios provocan, por ende, que las variables eléctricas se alejen de sus valores nominales o de régimen permanente y oscilen hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Por esta razón, el análisis del régimen transitorio es importante para el diseño, la operación y la protección de los sistemas de potencia, ya que permite evaluar la estabilidad, la seguridad y la calidad del suministro eléctrico.

De la misma manera, tanto el análisis transitorio como el flujo de carga trifásico se basan en modelos que representan de manera simplificada los elementos de los sistemas de potencia. Así, un modelo se optimiza para el tipo de análisis, y debido a esto, el modelo preciso para el estado estable no es el preciso para el estado transitorio. Por ello, para esta sección se consultarán y seleccionarán los modelos de los circuitos lineales (R, L, C) para los dos estados.

5.3.1. Modelos para Estado Estable

El enfoque para el estado estable es el cálculo del flujo de potencia monofásico, método estándar que usa, tanto el diagrama unifilar como admitancias propias y mutuas para generar la matriz Y_{barra} (Grainger y Stevenson, 1996). Por este motivo, a continuación, se explica el cálculo de las admitancias propias y mutuas de los elementos del sistema.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

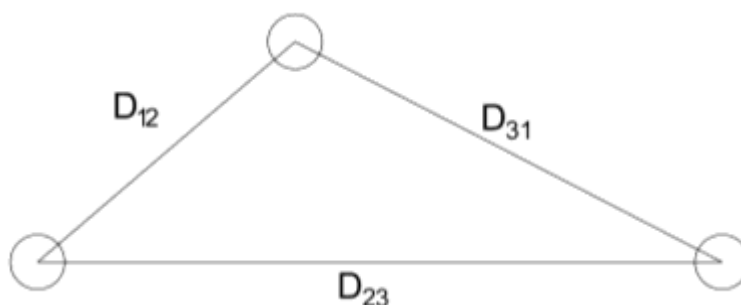
5.3.1.1. Líneas de Transmisión. Como fue descrito en *las consideraciones generales*, mencionadas anteriormente, el modelo de línea corta se aplicará a todas las líneas de este proyecto, y una vez se tenga el parámetro R y L, se expresará la impedancia en el dominio de la frecuencia, de la siguiente manera: $Z_{línea}=R+j \omega L$.

5.3.1.1.1. Cálculo de la Inductancia en Líneas Trifásicas con Espaciamiento Asimétrico.

Los conductores de una línea trifásica no necesariamente están espaciados de manera equilátera; por eso, la siguiente ecuación calcula la inductancia que supone la transposición de las fases:

Figura 2

Arreglo geométrico de los conductores de un sistema trifásico



$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_{eq}}{RMG} \right) \text{ [H/m]} \quad \text{ecuación 1}$$

donde
$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad \text{ecuación 2}$$

2 y el RMG depende del calibre cada conductor (Grainger y Stevenson, 1996, p. 152).

5.3.1.1.2. Cálculo De La Resistencia En Líneas. Para el cálculo de la resistencia de la línea, se busca el conductor seleccionado en tablas, y donde aparece la resistencia por kilómetro, se debe multiplicar por los kilómetros de la línea.

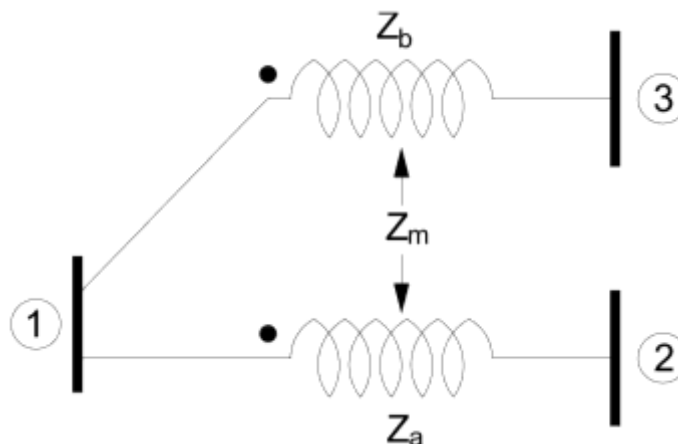
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.3.1.1.3. Líneas Acopladas Magnéticamente. Cuando circula una corriente por un conductor se genera un campo magnético alrededor de esta, que se conoce como la ley de Ampere-Maxwell, y si la corriente tiene carácter alterno, como es típico en los sistemas de potencia colombianos, entonces el campo magnético varía en el tiempo, y por la ley de Faraday se induce tensión en las líneas paralelas (Moore, 2016). Así, este fenómeno se observa en las líneas de transmisión de doble circuito donde se transportan seis conductores en paralelo.

Como ejemplo de lo anterior, se presenta a continuación la figura 3, del modelo en estado estable para dos ramas mutuamente acopladas que comparten una barra.

Figura 3

Modelo de impedancia para dos ramas mutuamente acopladas



Nota. la información y los datos para realizar la figura se tomaron de *Análisis de sistemas de potencia* (pp. 229-234), por J.J. Grainger y W.D. Stevenson, 1996, McGraw Hill Education.

$$\text{donde } Z_a = j \omega L_a, \quad Z_b = j \omega L_b, \quad Z_M = j \omega M$$

L_a = inductancia propia de la línea que conecta la barra 1 con la barra 2

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

L_b = inductancia propia de la línea que conecta la barra 1 con la barra 3

M = inductancia mutua entre las líneas L_a y L_b

Para el cálculo de L_a y L_b se aplicará la ecuación 1, el cálculo de la inductancia mutua se muestra a continuación.

5.3.1.1.4. Cálculo de la Inductancia Mutua (M) para Líneas Acopladas Magnéticamente.

la siguiente ecuación calcula la inductancia mutua

$$M = 0.2 \times 10^{-3} \left(\ln \left(\frac{2 \cdot S}{D_m} \right) - 1 \right) \left[\frac{H}{km} \right] \quad \text{ecuación 3}$$

donde $D_m = \sqrt[3]{D_{aa'} D_{bb'} D_{cc'}} \quad [m] \quad \text{ecuación 4}$

y S es la distancia de la línea en metros. (Anderson, 1973, pp. 76-77)

Los parámetros Z_a , Z_b y Z_m son conocidos, de forma tal, que se sigue el procedimiento descrito a continuación.

- Cálculo de Y_a , Y_b y Y_m

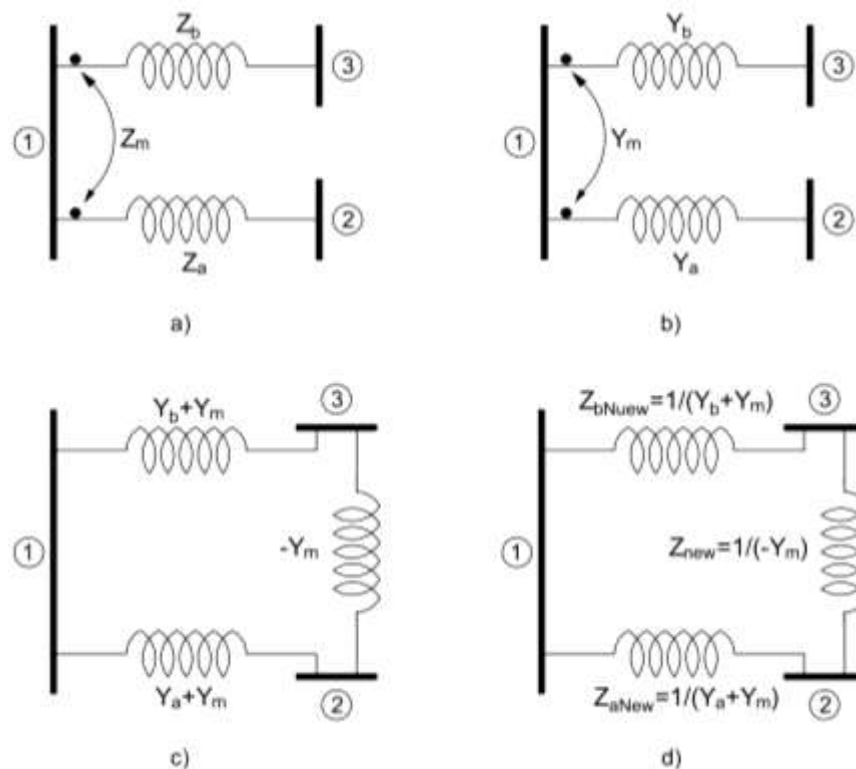
$$\begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} \quad \text{ecuación 5}$$

- Siga el procedimiento indicado en la figura 4

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 4

Procedimiento para llevar a modelo circuital el acoplamiento magnético de dos ramas



Nota. Se puede observar en la a) el modelo de impedancias de dos ramas acopladas magnéticamente, en la b), el modelo de admitancias de un acoplamiento magnético, mientras que en la c), se ve un modelo equivalente de admitancias, y en la d) se convierte ese modelo de admitancias a un modelo de impedancias.

5.3.1.2. Transformadores. Los catálogos técnicos de los transformadores proporcionan información sobre sus parámetros eléctricos. En estos catálogos, se pueden encontrar los siguientes dos parámetros:

- R_{cc} [%] Resistencia equivalente o de corto circuito en por ciento
- X_{cc} [%] Reactancia equivalente o de corto circuito en por ciento

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Así, el transformador se puede modelar como un circuito RL en serie, en el dominio de la frecuencia. Y para obtener la impedancia en por unidad, se pueden multiplicar los valores de R_{cc} y X_{cc} por cien. De esta manera, la fórmula resultante es

$$Z_{Pu} = (R_{cc} + j X_{cc}) * 100 \quad \text{ecuación 6}$$

5.3.1.3. Fuentes de Tensión. Las fuentes de tensión pueden ser de dos tipos: compensación o tensión controlada. Y con relación a esto, se conocen y se desconocen los siguientes datos:

5.3.1.3.1. Barra de tensión controlada.

- Variables conocidas: P, magnitud de V
- Variables desconocidas: Angulo de V, Q

5.3.1.3.2. Barra de compensación.

- Variables conocidas: magnitud de V, Angulo de V
- Variables desconocidas: P, Q

Ahora bien, todas las fuentes de tensión son modeladas con una resistencia interna RL, serie que será suministrada en por unidad.

5.3.1.4. Cargas. En los análisis de flujo de potencia, las cargas se modelan en términos de potencia (P y Q). De manera tal, que los datos que se utilizaron en el modelo dependen de las condiciones específicas del sistema que está en análisis.

5.3.2. Modelos para el Estado Transitorio

El enfoque más utilizado para el análisis transitorio es el método de las tres componentes, un análisis de las fallas asimétricas, tratado por Paul Anderson (1973), las cuales se basan en las componentes simétricas y las redes de secuencia; sin embargo, para el análisis propuesto en este trabajo de grado, el cálculo del flujo de potencia transitorio trifásico no es el enfoque más

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

adecuado, ya que este método calcula el nuevo estado estable después de la falla y no se conoce el comportamiento transitorio de las señales de tensión y corriente. Por lo cual, se consultó y se escogió el empleado en el EMTP. Así pues, EMTP propone, para la simulación de circuitos lineales en el estado transitorio, reemplazar los elementos R, L, C del modelo circuital, por los modelos descritos a continuación basados en RTdl:

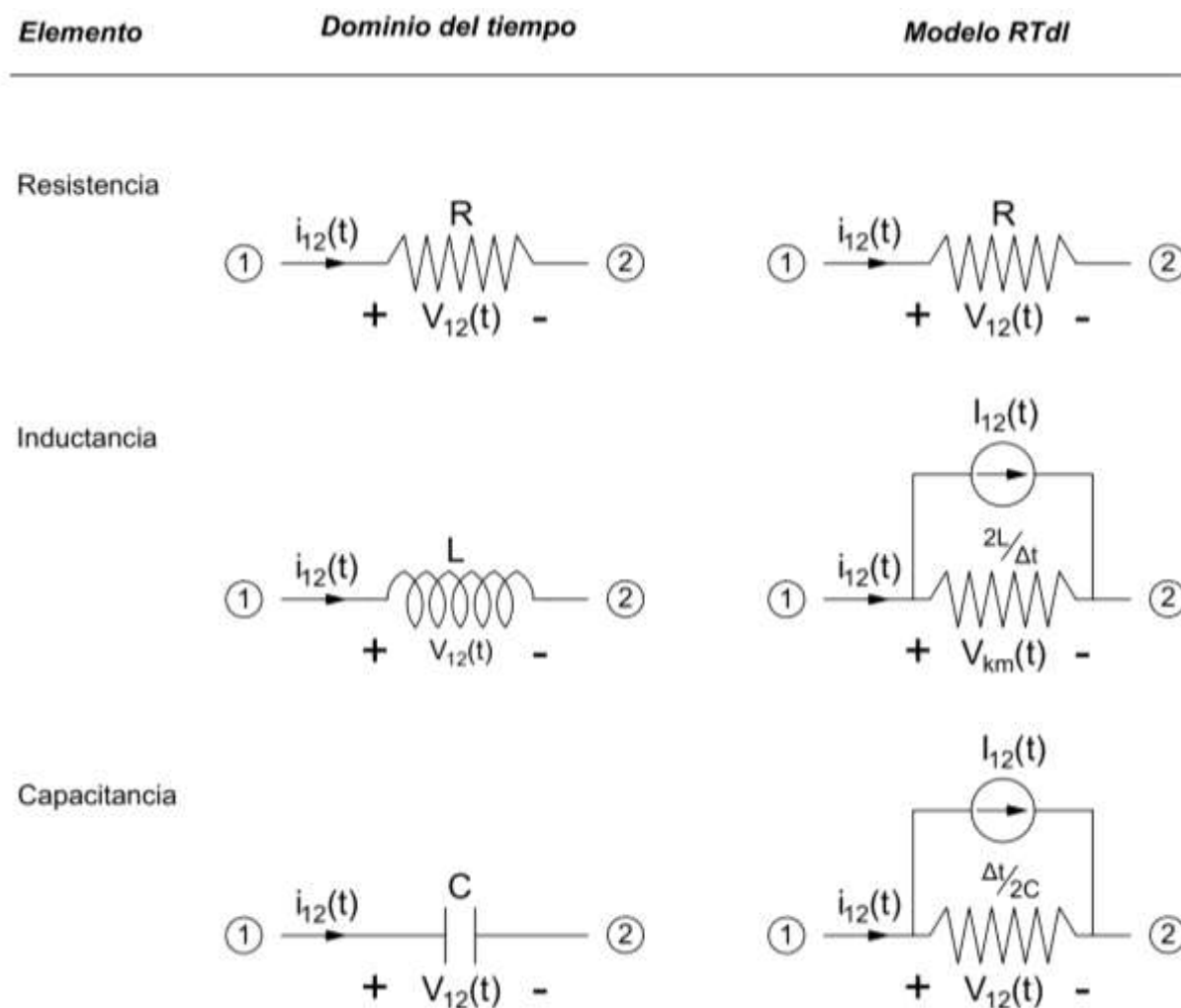
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.3.2.1. Comparación del Modelo en el Tiempo con el Modelo RTdl para Circuitos

Básicos Las siguientes imágenes comparan los circuitos básicos R, L, C con los modelos RTdl.

Figura 5

Comparación de los elementos R, L y C en el dominio del tiempo contra el modelo RTdl



Nota. En la figura se puede observar que los elementos básicos de circuito en el dominio del tiempo se comparan con el modelo de la regla trapezoidal de integración.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 2

Comparación de las ecuaciones de los elementos R, L y C en el dominio del tiempo contra el modelo RTdl

Elemento	Dominio del tiempo	Modelo RTdl
Resistencia	$V_{12}(t) = R i_{12}(t)$	$V_{12}(t) = R i_{12}(t)$
Inductancia	$V_{12}(t) = L \frac{di_{12}(t)}{dt}$	$i_{12}(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_{12}(t) + I_{12}(t)$
		$I_{12}(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_{12}(t - \Delta t) + i_{12}(t - \Delta t)$
Capacitancia	$i_{12}(t) = C \frac{dV_{12}(t)}{dt}$	$i_{12}(t) = \frac{2C}{\Delta t} V_{12}(t) + I_{12}(t)$
		$I_{12}(t) = - \left[\frac{2C}{\Delta t} V_{12}(t - \Delta t) + i_{12}(t - \Delta t) \right]$

Nota. La tabla muestra la comparación de las ecuaciones de los elementos básicos de circuito R, L y C en el dominio del tiempo y la solución de la ecuación diferencial por el método RTdl.

5.3.2.2. Comparación del Modelo en el Tiempo con el Modelo RTdl para Circuitos

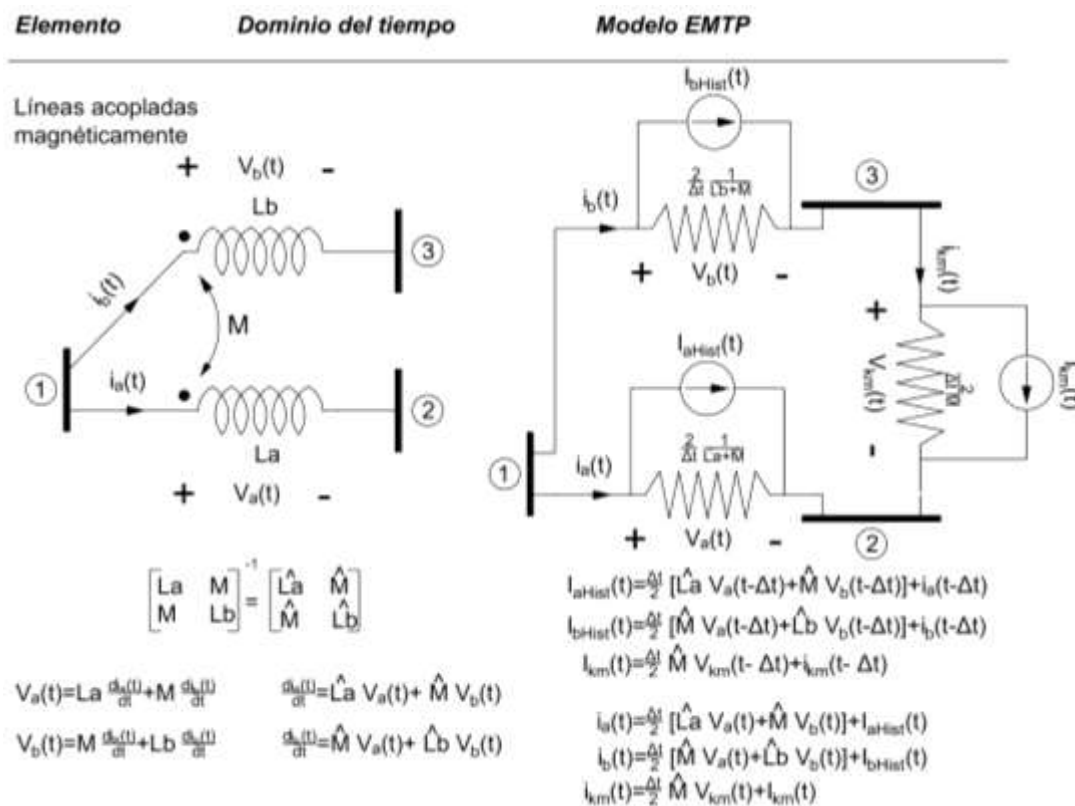
Acoplados Magnéticamente La siguiente imagen compara las ramas acopladas magnéticamente en el modelo del tiempo con el modelo para circuitos transitorios RTdl.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 6

Comparación del modelo en el tiempo de dos ramas acopladas magnéticamente con el modelo

RTdl



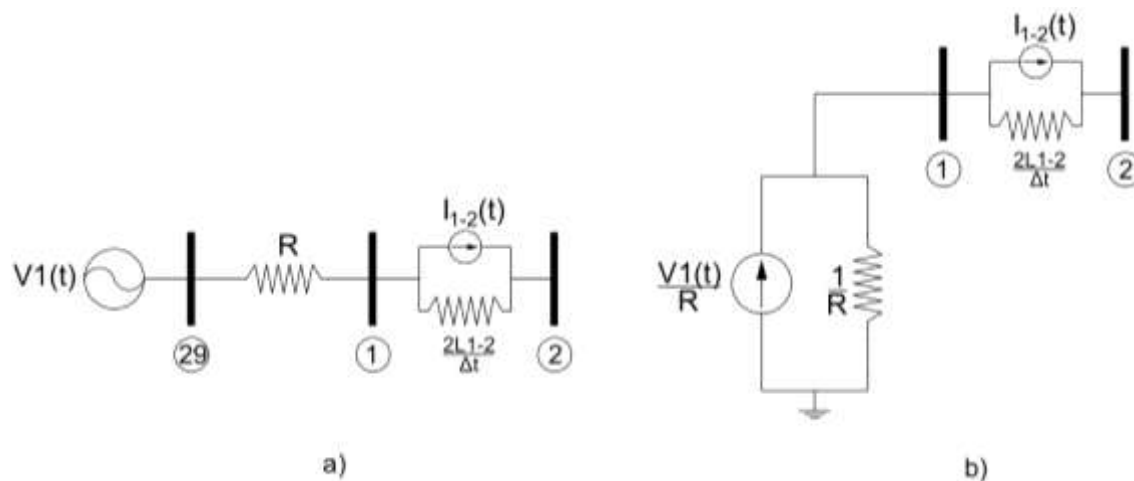
Nota. En la figura se representan las ramas acopladas magnéticamente en el dominio del tiempo y en el dominio del EMTP.

5.3.2.3. Modelo Transitorio para Fuentes de Tensión. Las fuentes de tensión con su impedancia interna inductiva se transforman en un equivalente de Norton sin transformar la inductancia interna de la fuente, como se ve a continuación:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 7

Equivalente de Norton para una fuente de tensión con impedancia inductiva



Nota. En la figura se observa, por un lado, (a) el modelo circuital de una fuente de tensión con impedancia inductiva, y, por otro lado, (b) el equivalente de Norton de una fuente de tensión con impedancia inductiva. La información y los datos para la creación de la figura se basan en el libro de Grainger y Stevenson (1996).

5.3.2.4. Modelo Transitorio para Cargas. Las cargas fueron modeladas en el estado estable como potencias P y Q. Así, para analizar el comportamiento transitorio, las cargas serán modeladas así:

- P y Q positivas a RL serie
- P positiva y Q negativa a RC serie

Y son llevadas a modelos RTdl como se explicó en el apartado de *comparación del modelo en el tiempo con el modelo RTdl para circuitos básicos.*

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.4. Proceso para la Simulación de Fallas en Líneas de Transmisión

Para el análisis de fallas en circuitos trifásicos se consultaron dos metodologías, la primera, basada en la teoría de componentes simétricas, redes de secuencia y el método de las tres componentes, y la segunda, basada en los modelos RTdl. De estas dos metodologías consultadas, se seleccionó la metodología EMTP, por permitir calcular el flujo de potencia trifásico transitorio, debido a que, crea muestras de las señales de entrada, y opera, de manera iterativa, un algoritmo matricial.

De esta manera, el procedimiento a seguir es conocer las variables eléctricas (tensión y corriente), en el estado estable y usar los modelos descritos en el apartado, *comparación del modelo en el tiempo con el modelo EMPT para circuitos básicos*. Por tal, el cálculo del comportamiento transitorio tiene el siguiente procedimiento:

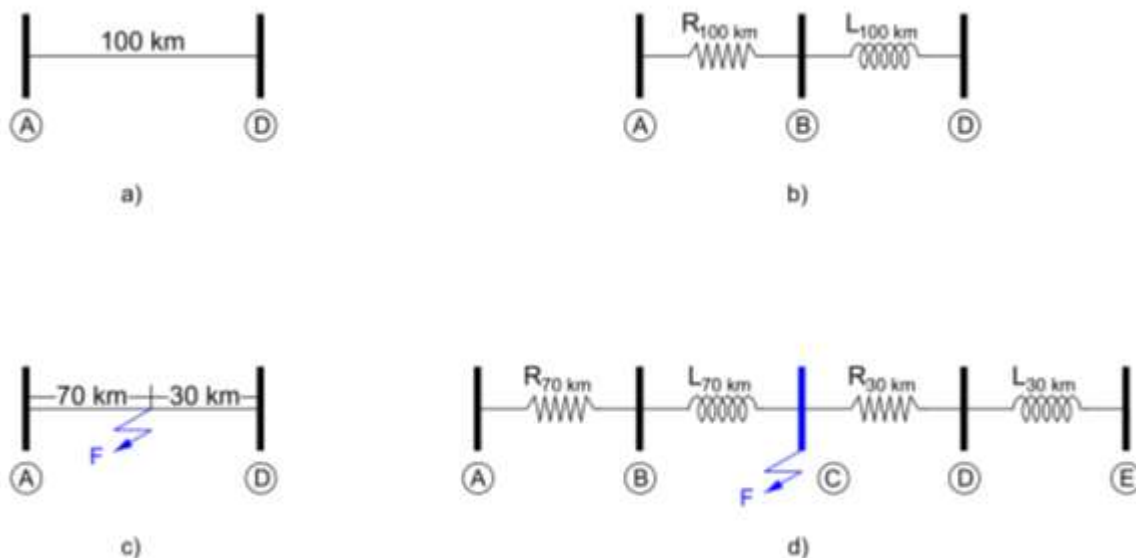
5.4.1. Creación de la Barra Ficticia

Las fallas que se producen en las líneas de transmisión pueden ocurrir en cualquier punto de la línea, razón por la cual, el método que se usó para simular el punto donde ocurre la falla, es la creación de una barra auxiliar como se observa en la figura 8.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 8

Creación de la barra auxiliar en una línea de 100 km, en la que ocurrió una falla, a 70 km desde la barra A



Nota. en la gráfica se pueden observar los siguientes componentes: a) modelo unifilar de una línea de 100 km sin falla, b) modelo unifilar en el tiempo de la línea de transmisión, c) modelo unifilar de una línea de 100 km con una falla a 70 km de la barra A, d) creación de la barra auxiliar en el modelo unifilar en el tiempo para una falla a 70 km de la barra A.

5.4.2. Tipo de Falla y su Modelado Circuital

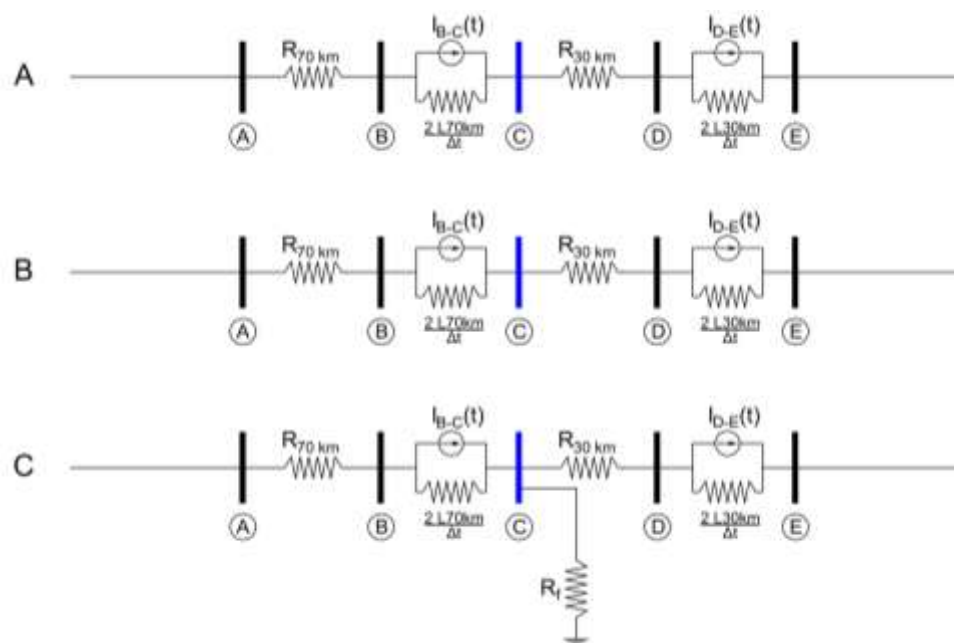
Existen varios tipos de fallas que dependen de factores externos o ajenos al sistema; como lo son, por ejemplo: las descargas atmosféricas, las caídas de árboles, los agentes contaminantes de la atmosfera, etc. Asimismo, estos tipos de fallas en sistemas trifásicos se agruparon en: fase a tierra, fase a fase, fase a fase y a tierra, trifásica y trifásica a tierra. A continuación, se describe el tipo de falla y su modelo circuital trifásico:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.4.2.1. Fase Tierra. Una de las fallas más comunes de los sistemas eléctricos, es la falla conocida como *fase tierra*, en la cual, hay un camino eléctrico entre la fase que está en falla y la tierra. Estos tipos de fase tierra se clasifican como: Ag, Bg, Cg; donde la primera letra describe la fase, y la segunda, tierra física. Estas dos descripciones aplican para los tres tipos de fases. A continuación, se observa en la figura 9 el modelo trifásico transitorio. Modelo circuital trifásico para falla Cg.

Figura 9

Modelo circuital trifásico para falla Cg



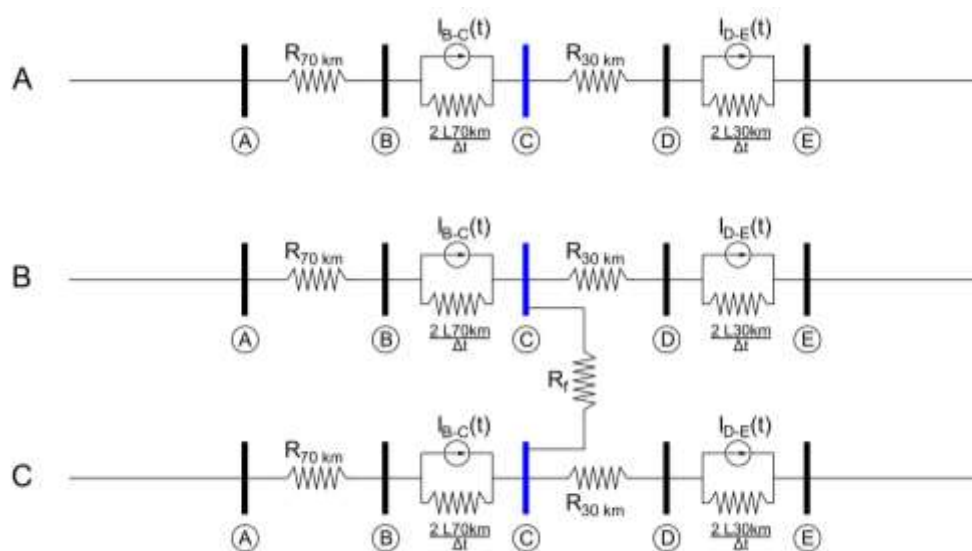
Nota. En la figura se puede observar un ejemplo claro de falla en fase C a tierra en la barra ficticia.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.4.2.2. Fase Fase. Una falla *fase fase*, es cuando se crea un camino eléctrico entre las fases en falla. Así, las fallas fase fase se clasifican en tres tipos, que son: AB, BC, CA, donde las dos letras describen las fases en corto; por ejemplo, AB es una falla entre la fase A y la fase B. De esta manera, el modelo transitorio trifásico se representa del siguiente modo, tal como se observa en la figura 10.

Figura 10

Modelo trifásico circuital para falla BC.



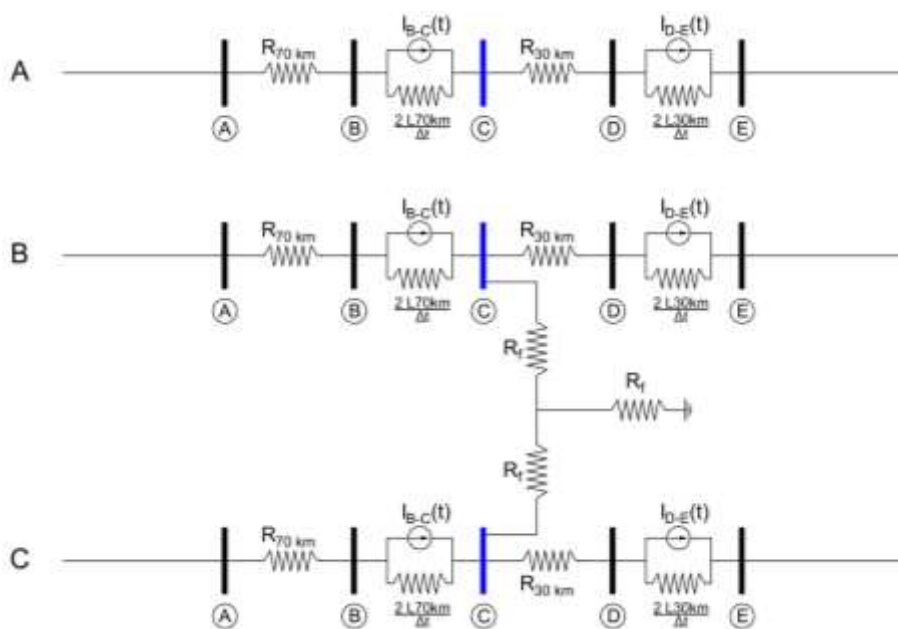
Nota. En esta figura se representa la falla BC.

5.4.2.3. Fase Fase a Tierra. La falla *fase fase a tierra* se define, como la unión de dos fases que permite el encuentro de un camino a tierra. Su clasificación, por tal, se expresa de la siguiente manera: ABg, BCg, CAg, donde la primera y segunda letra, describe las fases en corto, y la tercera describe la tierra física. La representación gráfica del modelo transitorio trifásico se ve en la figura 11.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 11

Modelo trifásico circuital para falla BCg



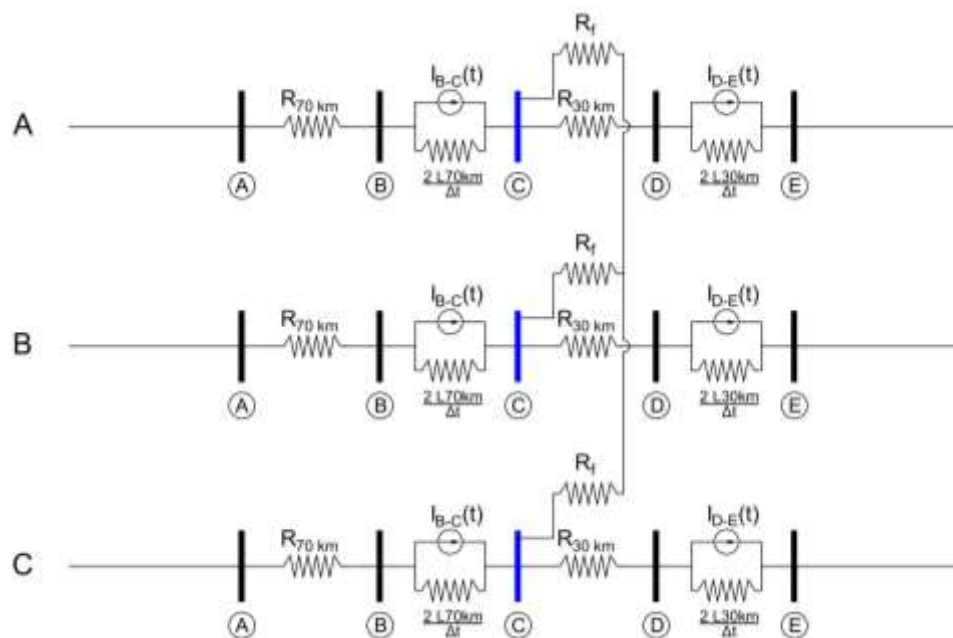
Nota. Esta figura representa la falla BCg.

5.4.2.4. Trifásica. En este tipo de falla se unen todas las fases del sistema, y se representa en este documento, como ABC. La representación gráfica del modelo transitorio trifásico se ve en la figura 12.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 12

Modelo trifásico circuital para falla ABC

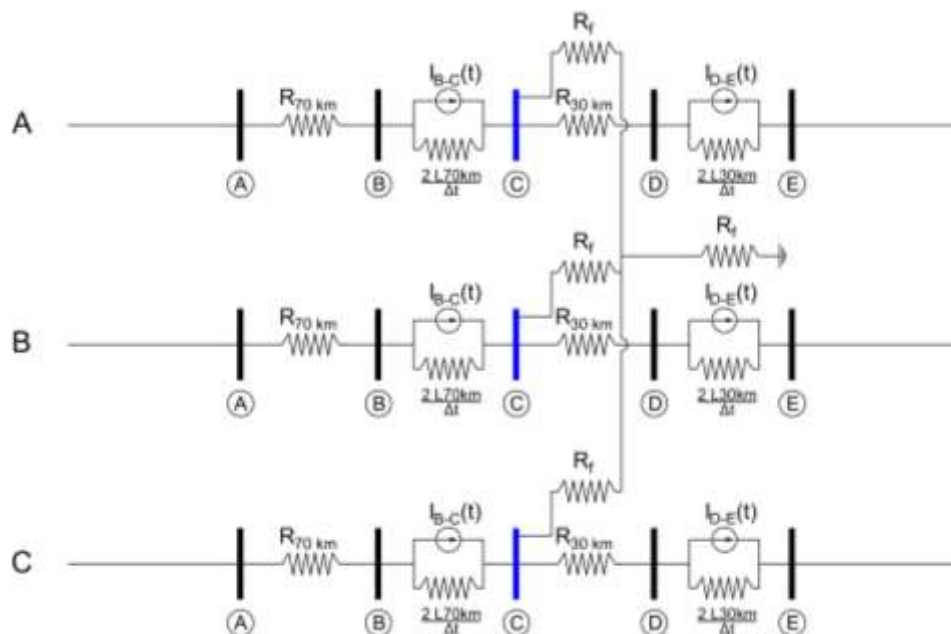


Nota. En la figura se observa una falla trifásica, en la que se unen las tres fases A, B, C.

5.4.2.5. Trifásica a Tierra. En esta falla todas las fases del sistema se unen y encuentran un camino a tierra; su representación en este documento se da como ABCg. Así pues, el modelo transitorio trifásico se ve representado en la figura 13.

Figura 13

Modelo trifásico circuital para falla ABCg



Nota. En la figura se observa una falla trifásica a tierra, en la que se unen las tres fases y la tierra.

Ahora bien, se debe seguir el siguiente procedimiento para poder realizar la falla:

1. Se selecciona la línea, la distancia, el tipo de falla, la resistencia de falla y el tiempo donde entrará la falla en la simulación.
2. Se modifica la matriz G de acuerdo con el modelo de la falla.
3. Se simula la nueva condición con la matriz G modificada.

5.5. Selección del Modelo del Relé de Sobre Corriente Direccional

Para la selección del modelo del relé direccional de sobre corriente se consultaron dos artículos científicos, y se eligió uno de ellos con ayuda del director del trabajo de grado. Estos artículos se presentan a continuación:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.5.1. *Identificación de la Dirección de Falla Utilizando un Nuevo Índice Basado en Corriente Fundado en la Tasa de Cambio de la Corriente de Falla.*

Este artículo, de la revista *Electric Power System*, analiza los desafíos de protección que surgen debido a la creciente presencia de *Generaciones Distribuidas* (DGs), en las redes de distribución eléctrica. De esta manera, el algoritmo direccional propuesto por Payam *et al.* (2021), presenta:

Un algoritmo direccional basado en la corriente que utiliza una señal de corriente previa a la falla como referencia. Este algoritmo se diseña en función de la corriente previa a la falla y la tasa de cambio de la corriente de falla. Como se puede inferir a partir de la base matemática del método propuesto, este algoritmo tiene una baja sensibilidad a los componentes de corriente continua, en disminución y al ruido. (p. 1)

Así, el artículo es apropiado para la investigación, en la medida en que proporciona los resultados necesarios para comprender la efectividad del algoritmo en los sistemas de Generación Distribuida.

5.5.1.1. Modelo Propuesto del Comportamiento del Relé. Para la detección de la dirección de la falla, el algoritmo toma muestras de corriente en intervalos iguales de tiempo, (discretización de la señal,) y compara el valor de corriente en el tiempo actual con la del ciclo anterior, para esto se necesita tener una ventana de memoria de mínimo dos ciclos.

Ahora bien, el algoritmo sigue los siguientes pasos para el cálculo de la detección y dirección de la falla.

5.5.1.1.1. Detección de la falla: La falla se detecta cuando se satisface la siguiente condición:

$$||i[k] - i[k - N]| - i[k - N] - i[k - 2N]| \geq 0.2 I_{nom} \quad \text{ecuación 7}$$

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Donde $k = \text{numero de muestras totales}$ $N =$

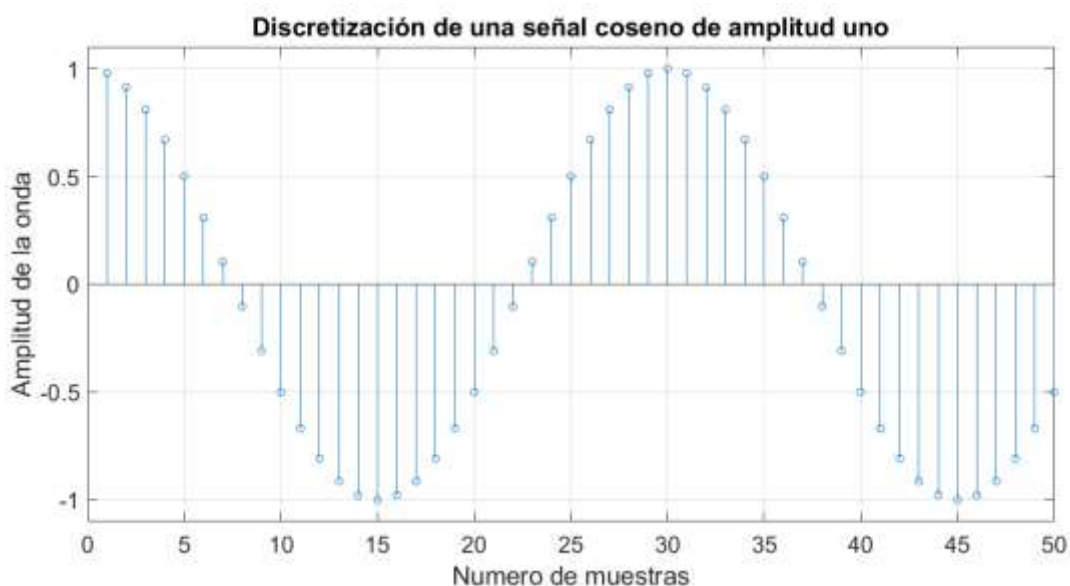
número de muestras por ciclo

$I_{nom} = \text{Corriente nominal RMS sensada por el CT conectado al relé}$

Eje: la señal de corriente de la figura 14 tiene $N=30$ y $k=50$ y $I_{nom} = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Figura 14

Discretización de una señal de corriente con amplitud uno



Nota. La figura 14 ejemplariza cómo discretizar una señal, en la que se toman 30 muestras por ciclo, y en total se toman 50 muestras.

5.5.1.1.2. Comparar la Corriente de Pre Falla Con ε . Los algoritmos que se basan en la corriente tienden a fallar cuando la falla es cercana al cruce por cero de la señal, para ello, se usa un criterio auxiliar que compara la magnitud previa a la falla, con un valor pequeño $\varepsilon = 0,001 I_{nom}$ si la magnitud de la corriente pre falla es $< \varepsilon$ aplique el paso tres o de lo contrario vaya al paso 4.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.5.1.1.3. Cálculo del Índice ACI. Para el cálculo del índice MACI se calcula el índice ACI para la muestra actual de corriente y luego se calcula el índice MACI de la siguiente manera:

$$ACI[k] = \sum_{k=1}^N i[k] i[k - N] \quad \text{ecuación 8}$$

Luego se calcula $MACI[k] = \left(\frac{2}{T}\right) ACI[k]$ ecuación

9

5.5.1.1.4. Cálculo del Índice MACI. Se calcula el índice MACI basado en la tensión previa a la falla:

$$MACI[k] = \left(\frac{2}{T}\right) \sum_{k=1}^N i[k] v[k - N] \quad \text{ecuación 10}$$

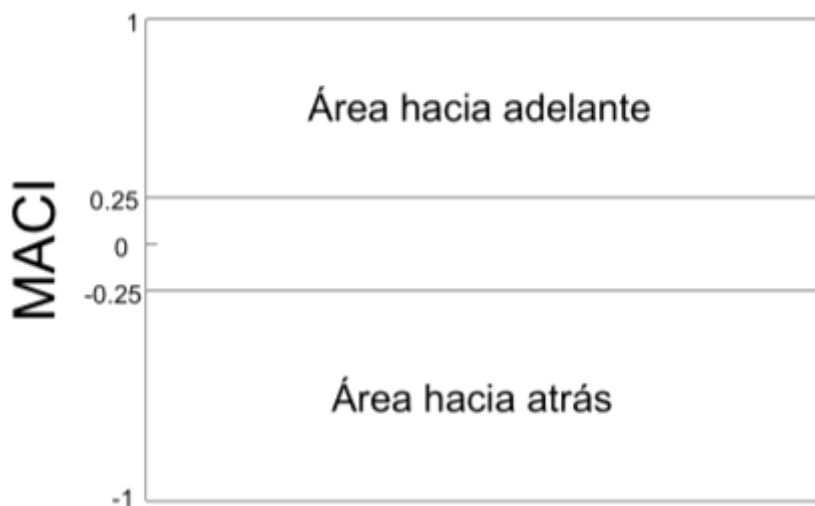
5.5.1.1.5. Comparar el Índice Calculado con las Regiones de Detección. Al respecto del índice calculado con las regiones de detección, Payam *et al.* (2021), afirman que,

si la región adelante permanece (0.25,1) durante cinco muestras consecutivas, el algoritmo identifica la dirección de falla hacia adelante. Además, si MACI cae en la región ateras (-0.25,1) durante cinco muestras consecutivas, el algoritmo identifica la dirección de falla hacia atrás. (p. 9)

Como se ve en la figura 15:

Figura 15

Área de detección hacia adelante y atrás



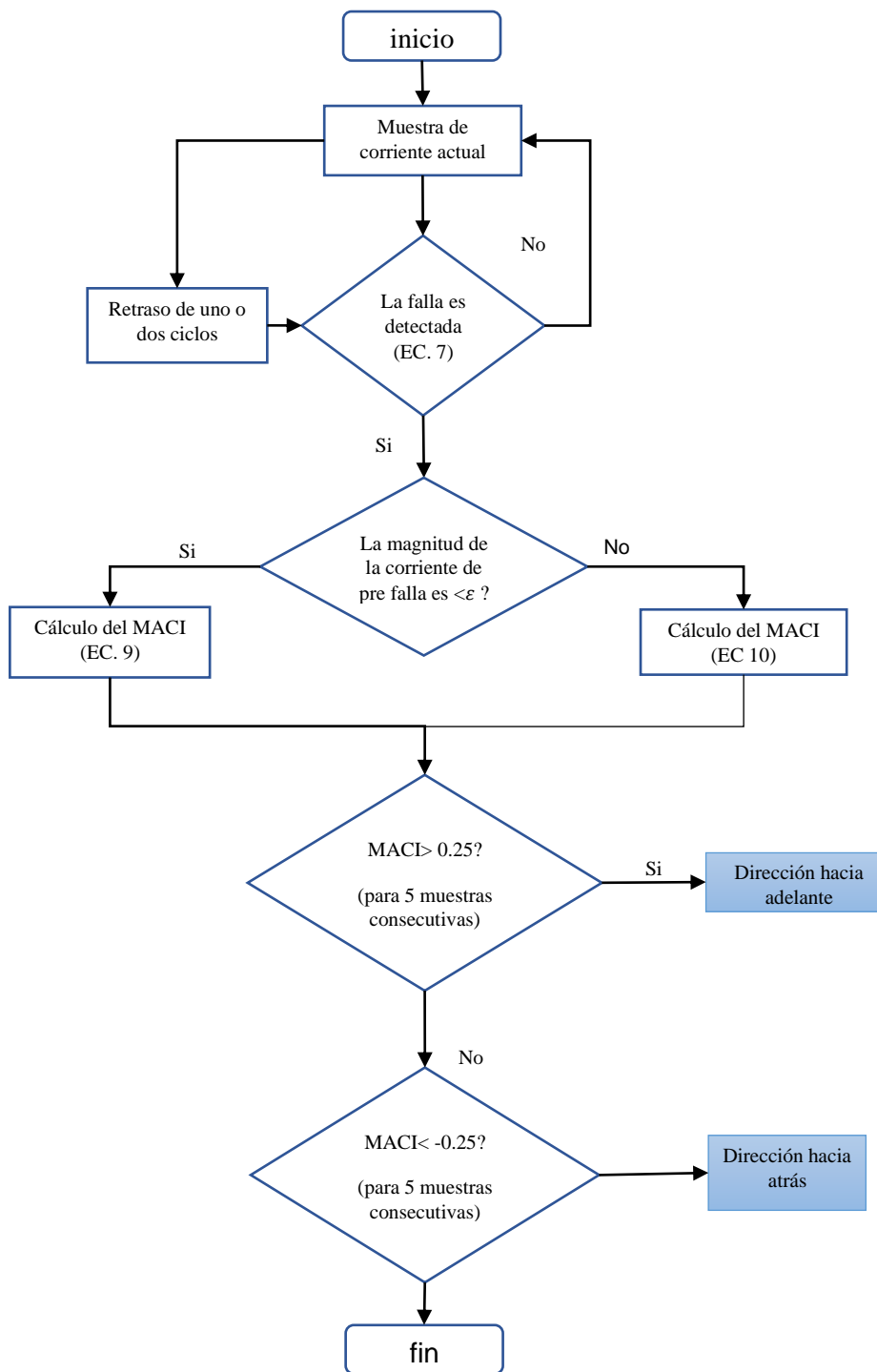
Nota. La información para realizar la figura 15 se tomó de Identificación de la Dirección de Falla Utilizando un Nuevo Índice Basado en Corriente Fundado en la Tasa de Cambio de la Corriente de Falla. (p. 2), por Payam *et al.*, 2021, *Electric System Power*, 201.

5.5.1.2. Diagrama de Flujo del Modelo del Relé. El procedimiento del apartado *modelo propuesto del comportamiento del relé*, se repite hasta agotar las muestras de corriente. El análisis de cada muestra del vector de corrientes se sistematiza en la Figura 16.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 16

Sistematización de la detección y dirección de la falla presentada en diagrama de flujo



Nota. En la figura 16 se puede observar el diagrama de flujo que explica el comportamiento del relé en el tiempo. La información para realizar la figura 16 se tomó de Identificación de la Dirección de Falla Utilizando un Nuevo Índice Basado en Corriente Fundado en la Tasa de Cambio de la Corriente de Falla. (p. 2), por Payam *et al.*, 2021, *Electric System Power*, 201.

5.5.2. Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente

Este artículo, publicado por el *Institue of Electrical and Electronics Engineers*, se enfoca en los algoritmos direccionales que están basados en la toma de muestras de corriente. Su planteamiento, por consiguiente, afirma que,

Para un intervalo especificado, las muestras de corriente de falla se multiplican por las muestras de corriente previas a la falla correspondientes y se calcula la sumatoria de los resultados como un criterio. El signo de la suma y la dirección del flujo de potencia en condiciones normales determinan la dirección de la falla. A diferencia de la mayoría de las técnicas de alta velocidad, solo se necesitan transformadores de corriente precisos para obtener el criterio y determinar el flujo de potencia normal puede relérgarse a transformadores de tensión simples en condiciones de estado estacionario. (Samet, *et al.*, 2019)

Así, el algoritmo sigue los siguientes pasos para calcular la detección y dirección de la falla:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.5.2.1. Modelo Propuesto del Comportamiento del Relé. Para la detección de la dirección de la falla, el algoritmo toma muestras de corriente en intervalos iguales de tiempo (discretización de la señal), y compara el valor de corriente de la muestra actual con la muestra del ciclo anterior. Para ello, se necesita tener una ventana de memoria de mínimo dos ciclos.

El algoritmo sigue los siguientes pasos para el cálculo de la detección y dirección de la falla:

5.5.2.1.1. Detección de la Falla. El procedimiento es análogo al del artículo científico anterior, solo que al número de la muestra donde se detectó la falla se le llamará:

$$N_{DF} = \text{Número de la muestra donde se detectó la falla}$$

5.5.2.1.2. Encontrar en que Muestra Ocurre la Falla (N_f). Se inicializa la variable k con el número de la muestra donde se detectó la falla, y se compara con las muestras de corriente con el ciclo anterior; si no son iguales se resta a la variable k uno y se repite el procedimiento hasta que el error sea cero, una vez el error sea tendiente a cero vaya al paso *comparar la corriente de pre falla con μ* .

$$k = N_{DF}, \quad \text{si } i_a[k] - i_a[k - N] < \text{error}, \quad \text{entonces } k = k - 1$$

Y el procedimiento se repite hasta que el error tienda a cero, cuando llegue a cero $k=N_f$, donde se denomina el *Número de la muestra donde ocurre la falla*.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.5.2.1.3. Comparar la Corriente de Pre Falla Con μ . μ es igual a ϵ del artículo científico anterior. Entonces, si la magnitud de la corriente de pre falla es $> \mu$ aplique el paso *cálculo del índice F* o de lo contrario vaya al paso que le sigue a este.

5.5.2.1.4. Cálculo del Índice F' . Se calcula el índice F basado en la tensión previa a la falla:

$$F' = \sum_{N_F}^{N_{DF}} i_a[k] V_a[k - N] \quad \text{ecuación 11}$$

5.5.2.1.5. Cálculo del Índice F . Se calcula el índice F basado en la corriente censada por el relé

$$F = \sum_{N_F}^{N_{DF}} i_a[k] ia[k - N] \quad \text{ecuación 12}$$

5.5.2.1.6. Dirección De La Falla. El documento presenta una nueva variable llamada, ***NPF*** (*Normal Power Flow*), que representa el flujo normal de la potencia. Esta variable se conoce cuando se ha calculado el flujo de potencia del sistema en el estado estable. De esta manera, *NPF* será positiva en el sentido que fluye la potencia y negativa en contrasentido de la potencia.

El valor del índice F no es relevante para el cálculo de la dirección de la falla, lo más importante es el signo de F , debido a que, la manera en cómo se calcula la dirección de la falla, es comparar el signo de F con el valor de *NPF* de la siguiente manera:

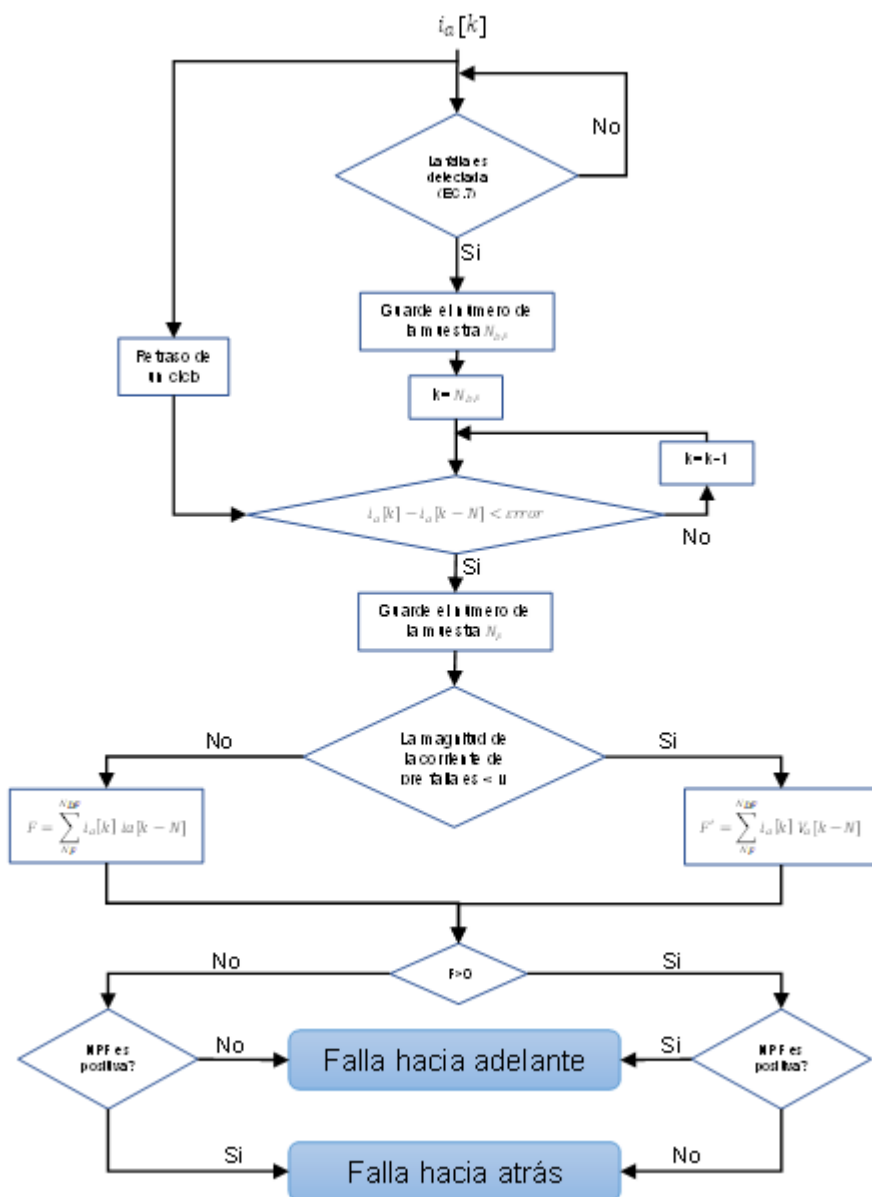
- *Falla hacia adelante:* cuando *NPF* es positiva y F es positiva, o cuando F es negativa y F es negativa.
- *Falla hacia atrás:* cuando *NPF* es positiva y F negativa, o cuando *NPF* es negativa y F positiva.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.5.2.2. Diagrama de Flujo del Modelo Del Relé. El procedimiento del apartado *modelo propuesto del comportamiento del relé*, se repite hasta agotar las muestras de corriente. Así pues, el análisis de cada muestra del vector de corrientes se sistematiza en la figura 17.

Figura 17

Sistematización de la detección y dirección de la falla presentada en diagrama de flujo



DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Nota. La información para realizar la figura 17 se ha tomado de Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente (p. 1267), por Samet *et al.*, 2019, *IEEE Systems*, 13(2).

5.5.3. Selección del Modelo del Relé Direccional de Sobre Corriente

Como se describió en el apartado *Identificación de la Dirección de Falla Utilizando un Nuevo Índice Basado en Corriente Fundado en la Tasa de Cambio de la Corriente de Falla*, y *Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente*, los modelos del relé de sobre corriente direccional consultados son muy similares; sin embargo, difieren, en el cálculo del indicador para la dirección de la falla. Por este motivo, aunque cualesquiera de los dos modelos son adecuados para el proyecto, se siguió la recomendación del director de trabajo de grado, y se ha seleccionado el modelo descrito en el apartado *Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente*.

5.6. Creación del Software

La creación del software se hace en IDE y lenguaje MATLAB, con base en los modelos seleccionados, comprendidos entre los apartados, *modelado de los parámetros eléctricos de un sistema de potencia*, a los valores de *selección del modelo del relé de sobre corriente direccional*. De esta manera, todos los elementos del sistema se pasan a por unidad, y el enfoque para simular el comportamiento de los relés direccionales de sobre corriente ante fallos, es el siguiente:

- Cálculo de todos los parámetros eléctricos del sistema en por unidad y construcción del modelo unifilar.
- Cálculo del flujo de potencia monofásico por medio de la librería MATPOWER.
- Construcción de los modelos *RL* o *RC* serie de la carga.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

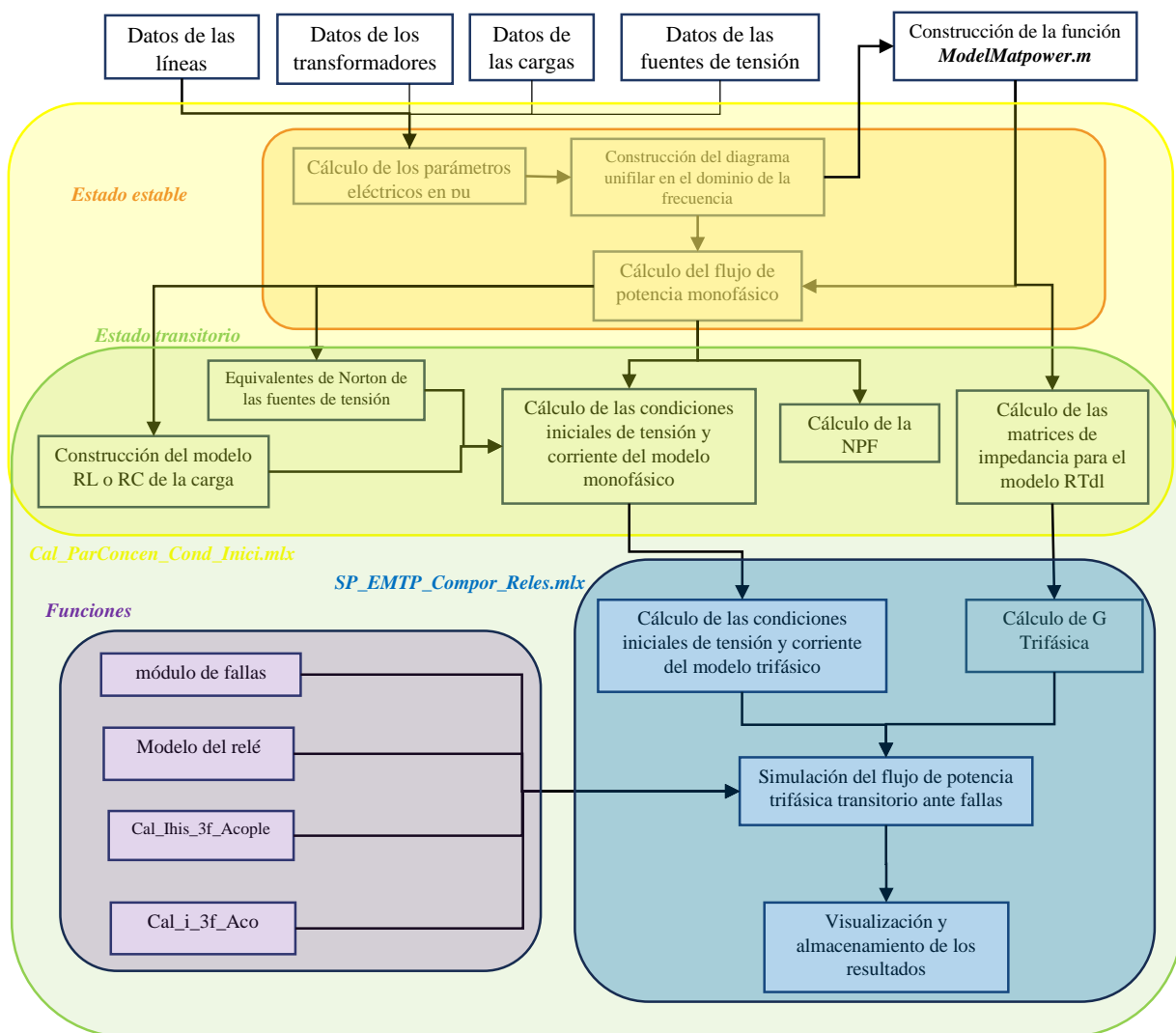
- Construcción del equivalente de Norton de las fuentes de tensión.
- Cálculo de las condiciones iniciales de tensión y corriente del modelo monofásico.
- Cálculo de las matrices de impedancia para el modelo *RTdl*
- Cálculo de la *NPF*.
- Cálculo de la Matriz *G* para el modelo *RTdl*.
- Cálculo de las condiciones iniciales (tensión, corriente) del modelo trifásico transitorio.
- Construcción del módulo para realizar fallas en el sistema transitorio.
- Simulación del flujo de potencia trifásico transitorio ante fallas.
- Construcción el módulo del comportamiento de los relés
- Almacenamiento de los resultados.

Ahora bien, en este capítulo se describe el cálculo de cada uno de los ítems anteriores, y el software se puede observar en el Apéndice A. Así también, en la figura 18 se describe el flujo de la información en los scripts del software.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 18

Flujo de la información para la herramienta software



Nota. En la figura 18 el diagrama de flujo ilustra el flujo de información del software desde el cálculo de los parámetros eléctricos hasta la visualización del flujo de potencia transitorio trifásico y el comportamiento del relé ante fallos. Como se observa, la figura 18 se divide en tres segmentos principales: *Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx*, *SP_EMTP_Compom_Relés.mlx* y *funciones*. Estos segmentos representan los dos scripts principales del software, y las funciones

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

construidas. Existe otra agrupación que el dominio de las ecuaciones, el estado estable se encuentra en el dominio de la frecuencia y el estado transitorio en la regla trapezoidal de integración.

5.6.1. Cálculo de los Parámetros Eléctricos y Creación del Modelo Unifilar

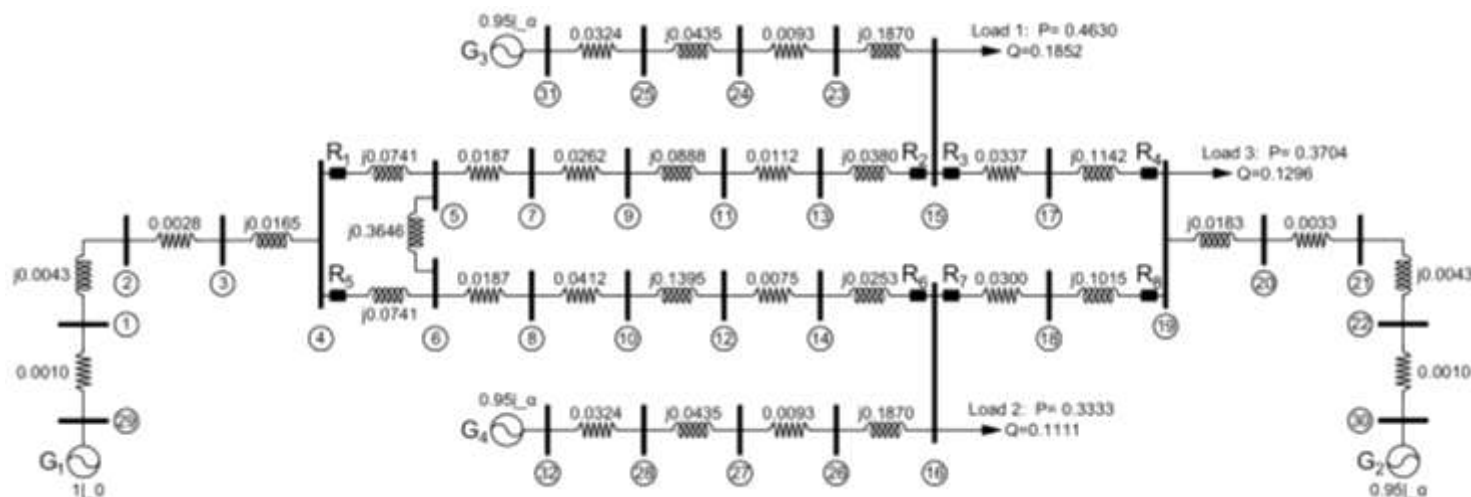
Los modelos para realizar estos cálculos son los descritos en el apartado *Modelos para Estado Estable*, donde se debe conocer la geometría de las líneas de transmisión, la impedancia de los transformadores, la impedancia interna de las fuentes de tensión y su potencia generada. Al mismo tiempo, la demanda de las cargas a la información descrita, se le conoce como los datos de entrada para calcular los parámetros eléctricos.

De este modo, los cálculos se sistematizaron en el script *Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx* proporcionado en el Apéndice A, carpeta *Condiciones iniciales* y el formato para la entrada de los datos matrices *DataTrafo*, *DatoLinea*, *DatoAcopl*, *Datoload*. Esto se encuentra explicado en el Apéndice B, capítulo cálculo de *condiciones iniciales*. Una vez se haya calculado todo el sistema en por unidad, se construye el diagrama unifilar de manera similar a como se crean las barras auxiliares entre los elementos R , L , C como se ve en la figura

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 19

Diagrama unifilar en pu de un sistema de potencia de 9 nodos



Nota. La figura 19 representa el diagrama unifilar de un sistema de potencia de nueve nodos. Con base en la figura 19, se construye la función para el cálculo de flujo de potencia por medio de la librería Matpower.

5.6.2. Cálculo de Potencia Monofásico por Medio de La Librería Matpower

MATPOWER es una librería que permite simular sistema de potencia en el estado estable; sin embargo, esta librería no cuenta con flujo de potencia trifásico, de manera tal, que su enfoque se dirige a crear un diagrama unifilar y suministrar esa información en el formato compatible de la versión 2 de MATPOWER. Para ello, dentro de la carpeta *Condiciones iniciales* se crea un script *ModelMatpower.m*, que modela los sistemas de potencia con base al diagrama unifilar. Así, a continuación, se presenta el sistema de 4 barras y 2 generadores, figura 9.2 del libro de Grainger y Stevenson (1996, p. 317).

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 20

Sistema de 4 barras y 2 generadores, figura 9.2 del libro de Grainger y Stevenson (1996, p. 317)

```
function mpc = case4gs

%CASE4GS Power flow data for 4 vol, 2 gen case from Grainger & Stevenson.
% Please see CASEFORMAT for details on the case file format.
%
% This is the 4 bus example from pp. 337-338 of "Power System Analysis",
% by John Grainger, Jr., William Stevenson, McGraw-Hill, 1994.

% MATPOWER

%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
Vmin
mpc.bus = [
    1 3 50 30.99 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    2 1 170 105.35 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    3 1 200 123.94 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    4 2 80 49.58 0 0 1 1 0 245 1 1.1 0.9;
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1
Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
    4 318 0 100 -100 1.02 100 1 318 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0;
    1 0 0 100 -100 1 100 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle
status angmin angmax
mpc.branch = [
    1 2 0.01008 0.0504 0.1025 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    1 3 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    2 4 0.00744 0.0372 0.0775 250 250 250 0 0 1 -360 360;
    3 4 0.01272 0.0636 0.1275 250 250 250 0 0 1 -360 360;
];
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Después de llenar la matriz a mano que describe los datos de los generadores, buses y ramas, use la instrucción *runpf* para calcular el flujo de potencia, como se observa a continuación:

Figura 21

Resultados de usar la instrucción "runpf('case4gs.m')

MATPOWER Version 7.1, 08-Oct-2020 -- AC Power Flow (Newton)

Newton's method power flow (power balance, polar) converged in 3 iterations.

Converged in 1.96 seconds

```

=====
=====
|      System Summary
|
=====
=====

```

How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	4	Total Gen Capacity	318.0	-200.0 to 200.0
Generators	2	On-line Capacity	318.0	-200.0 to 200.0
Committed Gens	2	Generation (actual)	504.8	295.9
Loads	4	Load	500.0	309.9
Fixed	4	Fixed	500.0	309.9
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	4	Losses (I ² * Z)	4.81	24.05
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	38.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			

```

-----
-----

```

	Minimum	Maximum
Voltage Magnitude	0.969 p.u. @ bus 3	1.020 p.u. @ bus 4
Voltage Angle	-1.87 deg @ bus 3	1.52 deg @ bus 4
P Losses (I ² *R)	-	1.84 MW @ line 3-4
Q Losses (I ² *X)	-	9.18 MVar @ line 3-4

```

=====
=====
|      Bus Data
|

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

=====
=====
Bus      Voltage      Generation      Load
#      Mag (pu) Ang(deg)      P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)
-----
1      1.000    0.000*    186.81   114.50   50.00   30.99
2      0.982    -0.976     -        -       170.00  105.35
3      0.969    -1.872     -        -       200.00  123.94
4      1.020    1.523    318.00   181.43   80.00   49.58
-----
Total:    504.81   295.93   500.00   309.86
=====

```

```

=====
|      Branch Data
|
=====
Brnch   From   To   From Bus Injection   To Bus Injection   Loss (I^2 *
#       Bus   Bus   P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q (MVA)  P (MW)  Q
(MVA)
-----
1       1     2    38.69   22.30   -38.46  -31.24   0.227
1.13
2       1     3    98.12   61.21   -97.09  -63.57   1.031
5.16
3       2     4   -131.54  -74.11   133.25   74.92   1.715
8.58
4       3     4   -102.91  -60.37   104.75   56.93   1.835
9.18
-----
Total:    4.809
24.05

```

Nota. estas matrices *Barra Data* y *Brach Data* contiene la información de la magnitud y el ángulo de las tensiones de barra los flujos de potencia en cada rama respectivamente. Los datos y la información de la figura 21 se obtuvieron de simular en MATPOWER el sistema de 4 barras y 2 generadores, figura 9.2 del libro de Grainger y Stevenson (1996, p. 317).

5.6.3. Modelo Serie de la Carga

Con los datos de tensión y corriente del estado estable en la carga, se divide fasorialmente la tensión y la corriente; y el resultado de la operación, es el modelo serie de la carga. Así también,

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

el cálculo sistematiza un código que se genera entre las líneas 157-167 del script *Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx*, ubicado en la carpeta *Condiciones iniciales*, Apéndice A.

5.6.4. Equivalente de Norton de las Fuentes de Tensión

En la figura 7, se aplicó el modelo del apartado, *Modelo Transitorio para Fuentes de Tensión*, en el cual, el cálculo depende de la matriz *NodosSour*, y se sistematizó un código generado entre las líneas 168-176, del script *Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx*, ubicado en la carpeta *Condiciones iniciales*, Apéndice A. Así, la figura representa la matriz *NodosSour*.

Figura 22

Matriz NodosSource para un sistema con cuatro fuentes de tensión

```

%           IdFuente  Nodo  FuenTensión      Nodo Inorton
%           [ModelMatpower]  [Modelo EMTP]
NodosSour=[  1           29           1;
              2           30           22;
              3           31           25;
              4           32           28;];

```

Nota. La columna dos representa la barra a la que se encuentra conectada la fuente de tensión en el diagrama unifilar, la columna tres, representa la barra donde queda conectada la fuente de corriente de *Norton*, como en la figura 7.

Con base en lo anterior, el resultado es la tabla 3.

Tabla 3

Table_Isource para cuatro fuentes de tensión

Id	# Barra	Ipu	Ángulo [°]
Fuente			
1	1	977.777	0
2	22	2177.083	-14.719

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

3	25	29.255	-15.662
4	28	29.255	-14.778

Nota. La tabla 3 contiene la información de los equivalentes de Norton de las fuentes de tensión. Así, la columna 1 informa sobre el ID de la fuente; la columna 2, la barra a la que se conecta la fuente de Norton; la columna 3, la magnitud en por unidad de la corriente de Norton; y la columna 4 representa el ángulo de la corriente de Norton.

5.6.5. Cálculo de las Condiciones Iniciales del Modelo Monofásico

El flujo de potencia calculado con la librería MATPOWER, figura 21, proporciona la información de las potencias en cada rama y las tensiones en cada barra. Así, esta información es un insumo para calcular las condiciones iniciales del modelo trifásico, de este proceso surgen dos tablas, la tabla 4 y la tabla 5, que contienen la información del fasor de tensión en cada barra y el fasor de corriente en cada rama respectivamente.

Tabla 4

Tabla de los fasores de tensión para cada barra del sistema

Barra	Vpu
1	0.998 + i0.0002
2	0.996 – i0.0081
3	0.991 – i0.0074
4	0.987 – i0.0398
5	0.975 – i0.1189
6	0.979 – i0.1063

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

7	0.906 – i0.1086
8	0.925 – i0.1006
9	0.877 – i0.1043
⋮	⋮

Tabla 5

Tabla de la matriz de los fasores de corriente en el estado estable

362.92 + 0.9i	1.9626-0.25i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	...
0 + 0i	0 + 0i	1.9626-0.25i	0 + 0i	0 + 0i	...
0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	1.96-0.25i	0 + 0i	...
0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	1.06-0.15i	...
0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Nota. Cada posición de la matriz, (fila y columna), indica las barras donde se encuentra conectada la rama.

5.6.6. Cálculo de las Matrices de Impedancia para el Modelo RTdl

Como se observó en la tabla 2 y figura 6, el modelo de las R, L y C depende de un parámetro Δt , este parámetro representa la distancia entre muestras de la señal discretizada expresada en segundos. Así, la figura 23 expresa su cálculo:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 23

Cálculo de Δt en base a las muestras por ciclo que decide el usuario

```
MuesCiclo=120;
deltaT=1/((MuesCiclo)*60); %Tiempo de muestreo de la señal
```

las ramas del sistema son de dos tipos para efectos de este software; ramas que se conectan entre barra y barra y ramas que se conectan entre una barra y tierra. Para ello, se construyen las matrices como se ve en las figuras 24 y 25.

Figura 24

Matriz ImpedEntreLine

```
%Matriz de impedancia entre barras
%Barra salida - Barra llegada - Zreal -Tipo R=1,L=2,C=3
%
%          BS    BLl    Zreal          Tipo
ImpedEntreLine=[  1    2    2*(0.6299e-3)/deltaT    2;
                  2    3    0.0288                1;
                  3    4    2*(0.1592e-3)/deltaT    2;];

ImpedAtierra(:,2)=ImpedAtierra(:,2)/Z_base; %Convertir las impedancias a
valores por unidad
```

Nota. La primera columna representa el nodo de inicio de la impedancia; la segunda, el nodo final; la tercera, representa la impedancia real en el modelo RTdl; (ver figuras 5,6,7), y la cuarta columna, representa el tipo de elemento básico de circuito que se encuentra conectado, de esta manera, si es una resistencia, el parámetro es 1, si es una inductancia el parámetro es 2 y si es una capacitancia el parámetro es 3, una vez se construye la matriz se convierte la impedancia a *pu*.

Figura 25

Matriz ImpedAtierra

```
%Matriz de impedancia de barra a tierra
%las tensiones en las barras tienen de referencia a la tierra
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%           B           Zreal           Tipo
ImpedAtierra= [1           0.1159           1;
                9           2*(1.4983e-3)/deltaT           2; ];

ImpedAtierra(:,2)=ImpedAtierra(:,2)/Z_base; %Convertir las impedancias a
valores por unidad

```

Nota. La primera columna representa el nodo conectado a tierra por una impedancia; la segunda, la impedancia real en el modelo RTdl; (ver figuras 5, 6, 7), y la tercera columna, representa el tipo de elemento básico de circuito que se encuentra conectado, de esta manera, si es una resistencia, el parámetro es 1, si es una inductancia el parámetro es 2 y si es una capacitancia el parámetro es 3, una vez se construye la matriz se convierte la impedancia a pu.

Este proceso se sistematizó al tomar las ramas de la función ModelMatpower.m, como se observa en la figura 26, y luego se ejecutó el cambio de dominio de la frecuencia, a la regla trapezoidal de integración en un código generado entre las líneas 228-262, del script Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx ubicado en la carpeta Condiciones iniciales Apéndice A.

Figura 26

Extracción de los datos de las ramas en pu

```

mpc = loadcase('ModelMatpower.m');
branch = mpc.branch; %Datos de las ramas
branch=branch(:,1:4);

```

Nota. Llamar a la función 'ModelMatpower.m' y extraer los datos de las ramas.

5.6.7. Cálculo de Matriz Npf

La *NPF* es el flujo normal de la potencia, por ello, será tomado positivo en el sentido en el que fluye la corriente, y negativo en contrasentido de la corriente. Además, este proceso se sistematizó con un código generado entre las líneas 163-170, del script Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx ubicado en la carpeta Condiciones iniciales Apéndice A.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.6.8. Cálculo de la Matriz G para el Modelo RTdl

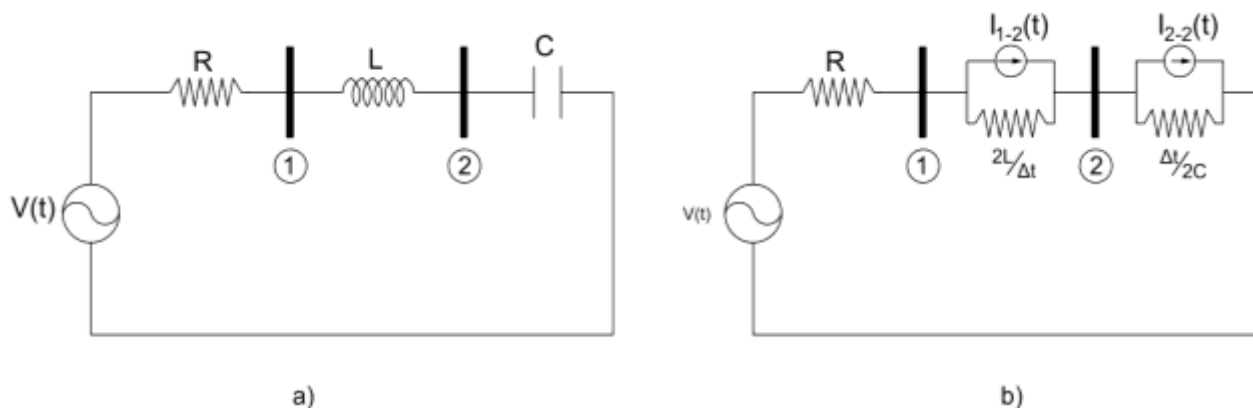
La matriz G describe la conductancia nodal de todo el sistema. A continuación, se explica su cálculo monofásico y trifásico.

5.6.8.1. Calculo Monofásico.

Para realizar el cálculo de la matriz G (Conductancia nodal), se ejemplariza con un circuito RLC serie, correspondiente con la figura 27 y luego se generaliza para N barras.

Figura 27

Circuito RLC serie monofásico



Nota. En la figura 278 se observa el circuito RLC en dos dominios, a) dominio del tiempo y b) regla trapezoidal de integración.

Ahora, para la resolución de circuitos de la figura 28 se aplica el método de nodos

$$V_1(t) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{(2L/\Delta t)} \right) - V(t) \left(\frac{1}{R} \right) - V_2(t) \left(\frac{1}{(2L/\Delta t)} \right) + I_{1-2}(t) = 0 \quad \text{ecuación 13}$$

$$V_2(t) \left(\frac{1}{(2L/\Delta t)} + \frac{1}{(\Delta t/2C)} \right) - V_1(t) \left(\frac{1}{(2L/\Delta t)} \right) + I_{2-2}(t) - I_{1-2}(t) = 0 \quad \text{ecuación 14}$$

Y se expresan las ecuaciones de manera matricial

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

$$\begin{bmatrix} 1/R + \Delta t/2L & -\Delta t/2L \\ -\Delta t/2L & \Delta t/2L + 2C/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R}\right) V(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{1-2}(t) \\ I_{1-2}(t) - I_{2-2}(t) \end{bmatrix} \quad \text{ecuación 15}$$

$$[G] [V(t)] = [i(t)] - [I(t)] \quad \text{ecuación 16}$$

Así, al seguir a Velasco (2020), la matriz G representa las relaciones de conductancia entre los nodos. El vector $v(t)$ contiene las tensiones actuales de cada nodo, mientras que, el vector $i(t)$ contiene las fuentes de corriente presentes en el sistema. Por último, el vector $I(t)$ engloba los términos históricos, que incorporan información pasada relevante para el modelo del sistema.

Como se observa, al comparar la ecuación 15 con la ecuación 16, la matriz de conductancia nodal G en RTdl, es análoga al concepto de *la Ybarra* en el dominio de la frecuencia, por tanto, si Δt no cambia en el tiempo, la matriz G es constante. Además, el cálculo de G en la ecuación 15 es para un circuito monofásico.

El cálculo para N barras se realizó en una función *Ybarra_EMTP.m* ubicado en la carpeta Funciones del Apéndice A. A continuación, se muestra la programación de la función:

Figura 28

Programación del cálculo de la matriz G monofásica

```
function [Yb] = Ybarra_EMTP(NumBarr,ImpedLine,ImpedFuen)

Yb=zeros(NumBarr,NumBarr);
Y=Yb;
for k=1:size(ImpedLine,1)
    Y(ImpedLine(k,1),ImpedLine(k,2))=1/(ImpedLine(k,3));
end

for k=1:size(ImpedFuen,1)
    Y(ImpedFuen(k,1),ImpedFuen(k,1))=1/(ImpedFuen(k,2));
end

%construcción de la diagonal principal
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

for k=1:NumBarr
    Yb(k,k)=sum(Y(k,:))+sum(Y(:,k))-Y(k,k);
end

%Construcción de diagonal hacia arriba
for fila=1:NumBarr
    for colum=1:NumBarr
        if fila~=colum
            Yb(fila,colum)=-Y(fila,colum);
        end
    end
end

%Construcción de diagonal hacia abajo
for fila=1:NumBarr
    for colum=1:NumBarr
        if fila~=colum
            Yb(colum,fila)=Yb(fila,colum);
        end
    end
end
end
end

```

5.6.8.2. Cálculo Trifásico.

Una vez se conozca la matriz de conductancia monofásica se aplica el siguiente algoritmo para calcular la matriz G trifásica.

Figura 29

Cálculo de la matriz G trifásica

```

% Calculo de la G trifásica
Yb_Uni = Ybarra_EMTP(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra);
Yb_Trif=zeros(NumBarr*3,NumBarr*3);
Yb_Trif(1:NumBarr,1:NumBarr)=Yb_Uni;
Yb_Trif(NumBarr+1:2*NumBarr,NumBarr+1:2*NumBarr)=Yb_Uni;
Yb_Trif(2*NumBarr+1:3*NumBarr,2*NumBarr+1:3*NumBarr)=Yb_Uni;

```

Nota. NumBarr es el número de barras del sistema.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.6.9. Cálculo de las Condiciones Iniciales del Modelo Trifásico

Las matrices de la tabla 4 y la tabla 5, contienen los fasores de tensión de las barras y corriente de las ramas para el estado estable respectivamente. De este modo, el proceso para el cálculo de las condiciones iniciales se describe a continuación:

- Calcular el circuito cero menos para cada fase
- Cálculo de las corrientes históricas iniciales I_{hist}

5.6.9.1. Cálculo del Circuito Cero Menos Para Cada Fase. La continuidad de las señales de corriente y tensión para los elementos básicos de circuito L y C respectivamente, permite el cálculo de las condiciones de pre falla. A continuación, se muestra el procedimiento para el cálculo de las tensiones y corrientes de pre falla.

5.6.9.1.1. Condiciones Iniciales de las Tensiones de las Barras. Se inicia el modelo trifásico con el valor inicial de los fasores de tensión del modelo unifilar (tabla 4) estos valores son repetitivos a la fase a, de modo tal, que para el cálculo de la fase b y c se usa el operado $a = (1L - 120)$ que modifica el Ángulo, pero no la magnitud de los fasores; y así, se agrega el desfase de ciento veinte grados para la construcción del sistema trifásico. A continuación, se da el ejemplo del cálculo de las condiciones iniciales trifásica para la barra uno.

En la tabla 4, la tensión de la barra uno se ve en la ecuación 17, y así, el cálculo de la tensión inicial para cada fase se ve a continuación:

$$V_1 = 0.998 + 0.0002i = (0.9980L0.0115) \quad \text{ecuación 17}$$

Y el cálculo de las condiciones iniciales para todas las fases se describe a continuación:

$$Va_1 = |V_1| * \cos(V_1) = 0.9980 \quad \text{ecuación 18}$$

$$Vb_1 = a * V_1 = |V_1| * \cos(a * V_1) = -0.4992 \quad \text{ecuación 19}$$

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

$$V_{c1} = a^2 * V1 = |V1| * \cos(a^2 * V1) = -0.4988 \quad \text{ecuación 20}$$

Ahora bien, cada vector V_a, V_b, V_c tienen las condiciones iniciales de las tensiones de barra para las fases a, b, c, respectivamente, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} V_a &= [Va_1 Va_2 Va_3 Va_4 Va_5 \dots Va_n] & V_b &= [Vb_1 Vb_2 Vb_3 Vb_4 Vb_5 \dots Vb_n] & V_c \\ & & & & = [Vc_1 Vc_2 Vc_3 Vc_4 Vc_5 \dots Vc_n] \end{aligned}$$

Seguido de esto, se concatenan de manera horizontal los vectores para generar un único vector llamado $V_(t)$ que contiene todas las condiciones iniciales de tensión.

$$V_t = [Va_1 Va_2 Va_3 Va_4 Va_5 \dots Va_n Vb_1 Vb_2 Vb_3 Vb_4 Vb_5 \dots Vb_n Vc_1 Vc_2 Vc_3 Vc_4 Vc_5 \dots Vc_n] \quad \text{ecuación 21}$$

El procedimiento descrito se sistematiza con un código generado en la figura 31, entre las líneas 163-170 del script *SP_EMTP_Compom_Relés.mlx*, ubicado en la carpeta raíz del proyecto Apéndice A.

Figura 30

Cálculo de las condiciones iniciales trifásicas

```
%operador a= 1|-120 %tomar de referencia la función cos ()

opts = detectImportOptions('V.txt'); %Import de la tensiones iniciales
opts.VariableNamingRule = 'preserve';
TableV=readtable('V.txt',opts)

V=table2array(TableV(:,2)); V=V';
opts = detectImportOptions('i.txt'); %Import de la matriz i inicial
opts.VariableNamingRule = 'preserve';
i=table2array(readtable('i.txt',opts));
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%cálculo de las corrientes y tensiones calculadas iniciales 0+.
Va=abs(V).*cos(angle(V)); Vb=abs(V*a).*cos(angle(V*a));
Vc=abs(V*a^2).*cos(angle(V*a^2));
ia=abs(i).*cos(angle(i)); ib=abs(i*a).*cos(angle(i*a));
ic=abs(i*a^2).*cos(angle(i*a^2));

```

Nota. En la figura 31 se presenta el código que permite calcular de manera sistemática las condiciones iniciales de las tensiones de las barras en el modelo trifásico.

5.6.9.1.2. Condiciones Iniciales de las Corrientes en las Ramas. Se aplica el mismo procedimiento descrito en el apartado *Condiciones Iniciales de las Tensiones De Las Barras*, para los fasores de corriente de las ramas (tabla 4). A continuación, se explica el cálculo con un ejemplo de la condición inicial trifásica para la rama que conecta las barras 1 y 2 (fila=1, Columna=2)

$$i_{1-2} = 1.9626 - 0.2534i = (1.9789L - 7.3570) \quad \text{ecuación 22}$$

El cálculo de las condiciones iniciales para todas las fases se describe a continuación:

$$ia_{1-2} = |i_{1-2}| * \cos(i_{1-2}) = 1.9626 \quad \text{ecuación 23}$$

$$ib_{1-2} = a * i_{1-2} = |i_{1-2}| * \cos(a * i_{1-2}) = -1.2008 \quad \text{ecuación 24}$$

$$ic_{1-2} = a^2 * i_{1-2} = |i_{1-2}| * \cos(a^2 * i_{1-2}) = -0.7618 \quad \text{ecuación 25}$$

Ahora, cada matriz i_a , i_b , i_c tienen las condiciones iniciales de las corrientes de las ramas para las fases a, b, c respectivamente, de la siguiente manera:

$$ia = \begin{bmatrix} ia_{1-1} & 1.9626 & \dots & ia_{1-n} \\ ia_{2-1} & ia_{2-2} & \dots & ia_{2-n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & ia_{3-n} \\ ia_{m-1} & ia_{m-2} & \dots & ia_{m-n} \end{bmatrix} \quad ib = \begin{bmatrix} ib_{1-1} & -1.2008 & \dots & ib_{1-n} \\ ib_{2-1} & ib_{2-2} & \dots & ib_{2-n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & ib_{3-n} \\ ib_{m-1} & ib_{m-2} & \dots & ib_{m-n} \end{bmatrix}$$

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

$$i_c = \begin{bmatrix} i_{c_{1-1}} & -0.7618 & \dots & i_{c_{1-n}} \\ i_{c_{2-1}} & i_{c_{2-2}} & \dots & i_{c_{2-n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & i_{c_{3-n}} \\ i_{c_{m-1}} & i_{c_{m-2}} & \dots & i_{c_{m-n}} \end{bmatrix}$$

Seguido de esto, se concatenan de manera horizontal las matrices para generar una matriz llamada $i_t(t)$ que contiene todas las condiciones iniciales de corriente para todas las ramas del circuito.

$$i_t = \begin{bmatrix} i_{a_{1-1}} & 1.9626 & \dots & i_{a_{1-n}} & i_{b_{1-1}} & -1.2008 & \dots & i_{b_{1-n}} & i_{c_{1-1}} & -0.7618 & \dots & i_{c_{1-n}} \\ i_{a_{2-1}} & i_{a_{2-2}} & \dots & i_{a_{2-n}} & i_{b_{2-1}} & i_{b_{2-2}} & \dots & i_{b_{2-n}} & i_{c_{2-1}} & i_{c_{2-2}} & \dots & i_{c_{2-n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & i_{a_{3-n}} & \vdots & \vdots & \ddots & i_{b_{3-n}} & \vdots & \vdots & \ddots & i_{c_{3-n}} \\ i_{a_{m-1}} & i_{a_{m-2}} & \dots & i_{a_{m-n}} & i_{b_{m-1}} & i_{b_{m-2}} & \dots & i_{b_{m-n}} & i_{c_{m-1}} & i_{c_{m-2}} & \dots & i_{c_{m-n}} \end{bmatrix}$$

ecuación 26

Y, por último, se convierte la matriz i_t a vector.

Asimismo, el procedimiento descrito se sistematiza con un código generado entre las líneas 91-117 como se ve en la figura 32, del script *SP_EMTP_Compór_Relés.mlx* ubicado en la carpeta raíz del proyecto Apéndice A.

Figura 31

Programación para el cálculo sistemático de las condiciones iniciales de corriente de las ramas para el modelo trifásico.

```

opts = detectImportOptions('i.txt'); %Import de la matriz i inicial
opts.VariableNamingRule = 'preserve';
i=table2array(readtable('i.txt',opts));

%cálculo de las corrientes y tensiones calculadas iniciales 0+.
ia=abs(i).*cos(angle(i)); ib=abs(i*a).*cos(angle(i*a));
ic=abs(i*a^2).*cos(angle(i*a^2));

%Convertir las matrices de corriente en vectores
ia_t(1,:)=ia(:)'; ib_t(1,:)=ib(:)'; ic_t(1,:)=ic(:)';

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```
% Unir las 3 fases para iterar en el modelo trifásico
i_t(1,:)=horzcat(ia_t,ib_t,ic_t);
```

Nota. El cálculo se hace con base a la onda patrón coseno, y, además, calcula el valor inicial de las corrientes al multiplicar la magnitud del fasor por el coseno de su ángulo.

5.6.9.1.3. Cálculo De Las Corrientes Históricas Iniciales. Según las ecuaciones descritas en la tabla 2, el cálculo de la corriente histórica, (fuente de tensión ficticia), para cada elemento básico de circuito (R, L, C) es.

- **R**

No es necesario calcular corriente histórica según el modelo de la tabla 2.

- **L**

$$i_L(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_L(t) + I_L(t) \quad \text{ecuación 27}$$

$$I_L(t) = \frac{\Delta t}{2L} V_L(t - \Delta t) + i_L(t - \Delta t) \quad \text{ecuación 28}$$

El cálculo de la corriente histórica, ecuación 28, depende de la muestra anterior. Así, como se va a calcular las condiciones iniciales se usa la ecuación 27 modificada de la siguiente manera:

$$I_L(1) = i_L(1) - \frac{\Delta t}{2L} V_L(t) \quad \text{ecuación 29}$$

Nota. la primera posición para Matlab es uno de todos los vectores y matrices.

- **C**

$$i_c(t) = \frac{2C}{\Delta t} V_C(t) + I_C(t) \quad \text{ecuación 30}$$

$$I_C(t) = - \left[\frac{2C}{\Delta t} V_C(t - \Delta t) + i_c(t - \Delta t) \right] \quad \text{ecuación 31}$$

³ Los datos y la información para las ecuaciones fueron tomados del libro de Martínez-Velasco (2020).

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Del mismo modo que el cálculo anterior, el cálculo de la corriente ecuación 31 depende de la muestra anterior, y como se va a calcular las condiciones iniciales, se usa la ecuación 30 modificada de la siguiente manera:

$$I_C(1) = i_c(1) - \frac{2C}{\Delta t} V_C(1) \quad \text{ecuación 32}$$

Por otro lado, las ecuaciones 29 y 32, se sistematizaron para circuitos trifásico, como se ve en la figura 33, función *Ihis_inicial.m* ubicada en la carpeta *Funciones* del proyecto Apéndice A.

Figura 32

Función que calcula las corrientes históricas trifásicas iniciales.

```
function [Ihis] =
Ihis_inicial(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t)

    Ihis=zeros(NumBarr,NumBarr);

    %Cálculo de las corrientes históricas entre líneas
    for k=1:size(ImpedEntreLine,1)
        %Cálculo de corrientes históricas para las inductancias entre
líneas
        if ImpedEntreLine(k,4)==2 %Para L
            Ihis(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=-
            1/ImpedEntreLine (k,3)*(V_t(ImpedEntreLine (k,1))-
V_t(ImpedEntreLine(k,2)))+i_t(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntr
eLine (k,2));

        end

        %Cálculo de corrientes históricas para las capacitancias entre
líneas
        if ImpedEntreLine(k,4)==3 %Para C
            Ihis(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=-
            (1/ImpedEntreLine(k,3)*(V_t(ImpedEntreLine(k,1))-
V_t(ImpedEntreLine(k,2)))+i_t(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntr
eLine(k,2)));

        end
    end
end
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

        %Cálculo de las corrientes históricas línea a tierra
        for k=1:size(ImpedAtierra,1)
            %Cálculo de corrientes históricas para las inductancias línea
tierra
            if ImpedAtierra(k,3)==2 %Para m
                Ithis(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=-
                1/ImpedAtierra(k,3)*V_t(ImpedAtierra(k,1))+i_t(ImpedAtierra
                (k,1),ImpedAtierra(k,1));
            end

            %Cálculo de corrientes históricas para las capacitancias línea
tierra
            if ImpedAtierra(k,3)==3 %Para C
                Ithis(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=-
                (1/ImpedAtierra(k,2)*V_t(ImpedAtierra(k,1))+i_t
                (ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1)));
            end
        end
    end
end

```

5.6.10. Construcción del Módulo de Fallas

Se aplican los modelos descritos en el apartado *Proceso para la Simulación de Fallos en Líneas de Transmisión* y se sistematizaron como se ve en la figura 34, función *Mod_G_Fall.m* ubicada en la carpeta *Funciones* del proyecto Apéndice A

Figura 33

Función para modificar la matriz G y simular las fallas en el modelo trifásico

```

function [Yb_Trif] = Mod_G_Fall(Yb_Trif,key,Barr,RfPu,NumBarr)
%%
% Yb= La matriz G trifásica
% Key= Clave eje='Ag' --->> falla línea tierra
% Barr=Barra a fallar
% RfPu=resistencia de falla en Pu
%%
switch key
    case 'Ag'
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
    case 'Bg'
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

        case 'Cg'
Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
        case 'AB'
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
        %Por simetria
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

        case 'BC'
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);
        %Por simetría
        Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
        case 'CA'
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
        %Por simetría
        Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
        case 'ABg'
        %Unir eléctricamente las fases A y B
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
        %Por simetria
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

        %Llevar a tierra las fases A y B
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);
    case 'BCg'
        %Unir eléctricamente las fases B y C
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);
    %Por simetría
    Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);

    %Llevar a tierra las fases B y C

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
    case 'CAG'
        %Unir eléctricamente las fases A y C
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);
Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
        %Por simetria
        Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);

    %Llevar a tierra las fases A y C
    Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
    case 'ABC'
        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);
        Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
        %Por simetria
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

        %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
        Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);
        %Por simetría
        Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
        case 'ABCg'
            %Unir eléctricamente las fases A, B y C
            %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
            Yb_Trif(Barr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);
            Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);
            %Por simetría
            Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

            %Se modifica la suma de las impedancias y la posición de la
Resistencia de falla
            Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+2*NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);
            %Por simetría
            Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+NumBarr)=-1/(RfPu);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);

            % Llevar barras a tierra
            Yb_Trif(Barr,Barr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr,Barr);

Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+NumBarr,Barr+NumBarr);

Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*NumBarr)=1/(RfPu)+Yb_Trif(Barr+2*NumBarr,Barr+2*Num
Barr);
        otherwise
            disp(['No existe la falla',' ',num2str(key),'por favor ingrese una
falla valida'])
        end
    end
end

```

5.6.11. Simulación del Flujo de Potencia Trifásico Transitorio en Fallas Asimétricas

La ecuación 16 describe el cálculo de las tensiones para cada muestra de la corriente de Norton en un circuito monofásico; esta ecuación, por lo tanto, se modifica para permitir el cálculo de flujo de potencia trifásico, y la ecuación 33 se sistematiza para analizar los circuitos trifásico. De esta manera, cuando el usuario del software desee que entre la falla, llama al módulo de fallas y modifica la matriz G, que fuerza al modelo a entrar en el estado transitorio. Así pues, se describen a continuación, las funciones creadas para ejecutar la ecuación 33.

$$[G_{3\phi}] \begin{bmatrix} V_a(k) \\ V_b(k) \\ V_c(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ia_{norton}(k) \\ ib_{norton}(k) \\ ic_{norton}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Ia(k) \\ Ib(k) \\ Ic(k) \end{bmatrix} \quad \text{ecuación 33}$$

$$\begin{bmatrix} V_a(k) \\ V_b(k) \\ V_c(k) \end{bmatrix} = [G_{3\phi}]^{-1} \left(\begin{bmatrix} ia_{norton}(k) \\ ib_{norton}(k) \\ ic_{norton}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Ia(k) \\ Ib(k) \\ Ic(k) \end{bmatrix} \right) \quad \text{ecuación 34.}$$

Nota. Ecuación para el cálculo de las muestras de tensiones trifásicas.

La ecuación 34 se sistematiza como se ve en la figura 35, script *SP_EMTP_Comporelés.mlx* líneas de la 119-135 ubicada en la carpeta raíz del proyecto Apéndice A.

Figura 34

Cálculo sistemático de las tensiones para un sistema de N barras con N ramas

```

for k=2:fix(TimeFall/deltaT)
    %cálculo de las corrientes históricas con los parámetros de entrada
    [Ihis_t,I] =
Cal_Ihis_3f_Acople(k,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t);
    V_t(k,:)=(Yb_Trif)\(I_input(k,:)'-I');
    [i_t] =
Cal_i_3f_Aco(k,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t);
end

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%Función que modifica la G trifásica y simula las fallas
%la F1 fue hecha en la barra 11, F2 en la barra 12
[Yb_Trif] = Mod_G_Fall(Yb_Trif,TipoFall,BarrFall,0.001/Z_base,NumBarr);

for k=fix(TimeFall/deltaT)+1:size(t,1)
    %cálculo de las corrientes históricas con los parámetros de entrada
    [Ihis_t,I] =
Cal_Ihis_3f_Acople(k,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t);
    V_t(k,:)=(Yb_Trif)\(I_input(k,:)'-I'); %ecuación 34
    [i_t] =
Cal_i_3f_Aco(k,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t);
end

```

A continuación, se explican las funciones Cal_Ihis_3f_Acople.m, Cal_i_3f_Aco

5.6.11.1. Función Cal_Ihis_3f_Acople.M. La función sistematiza el cálculo de las ecuaciones 28 y 31, como se ve en la figura 36, y designa a una subfunción *IhistAcop.m* que realiza el cálculo monofásico como se observa en la figura 37.

Figura 35

Cálculo trifásico sistematizado de las ecuaciones 28 y 31

```

function [Ihis_t,I] =
Cal_Ihis_3f_Acople(m,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t)

    %Convertir las corrientes vectorizadas en matrices por fase
    ia=reshape(i_t(m-1,1:NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);
    ib=reshape(i_t(m-1,NumBarr^2+1:2*NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);
    ic=reshape(i_t(m-1,2*NumBarr^2+1:3*NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);

    %Tensiones por fase
    Va=V_t(m-1,1:NumBarr); Vb=V_t(m-1,NumBarr+1:2*NumBarr); Vc=V_t(m-
1,2*NumBarr+1:3*NumBarr);

    %Cálculo de las corrientes históricas
    [Ihis_a,I_a] = IhistAcop(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Va,ia);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

    [Ihis_b,I_b] = IhistAcop(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Vb,ib);
    [Ihis_c,I_c] = IhistAcop(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Vc,ic);

    %Vectorizar las corrientes
    Iahis_t=[Ihis_a(:)]'; Ibh_t(1,:)= [Ihis_b(:)]';
    Ichis_t(1,:)= [Ihis_c(:)]';

    %Concat de las corrientes y el vector I
    Ihis_t(m,:)=horzcat(Iahis_t,Ibh_t,Ichis_t);
    I=horzcat(I_a,I_b,I_c);
End

```

Figura 36

Cálculo monofásico sistematizado de las ecuaciones 28 y 31

```

function [Ihis,I] = IhistAcop(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t)

Ihis=zeros(NumBarr,NumBarr);

%Cálculo de las corrientes históricas entre líneas
for k=1:size(ImpedEntreLine,1)
    %Cálculo de corrientes históricas para las inductancias entre
líneas
    if ImpedEntreLine(k,4)==2 %Para L
        Ihis(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=1/ImpedEntreLine(k,3)*(V_t(ImpedEnt
reLine(k,1))-
V_t(ImpedEntreLine(k,2)))+i_t(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2));
        end

        %Cálculo de corrientes históricas para las capacitancias entre
líneas
        if ImpedEntreLine(k,4)==3 %Para C
            Ihis(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=-
(1/ImpedEntreLine(k,3)*(V_t(ImpedEntreLine(k,1))-
V_t(ImpedEntreLine(k,2)))+i_t(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2)));
            end
        end

        %Cálculo de las corrientes históricas línea a tierra
        for k=1:size(ImpedAtierra,1)
            %Cálculo de corrientes históricas para las inductancias línea
tierra
            if ImpedAtierra(k,3)==2 %Para m

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

This(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=1/ImpedAtierra(k,2)*V_t(ImpedAtierra(k,
1))+i_t(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1));
    end

    %Cálculo de corrientes históricas para las capacitancias línea
tierra
    if ImpedAtierra(k,3)==3 %Para C
        This(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=-
(1/ImpedAtierra(k,2)*V_t(ImpedAtierra(k,1))+i_t(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,
1)));
    end
end

%cálculo del parámetro I
for k=1:size(This,1)
    I(k)=sum(This(k,:))+This(k,k)-sum(This(:,k));
end

end

```

5.6.11.2. Función Cal_I_3f_Aco.M. La función sistematiza el cálculo de las ecuaciones 27 y 30, como se ve en la figura 38, que designa a una subfunción *i_t_3fas.m*, que realiza el cálculo monofásico, como se observa en la figura 39.

Figura 37

Cálculo trifásico sistematizado de las ecuaciones 27 y 30

```

function [i_t] =
Cal_i_3f_Aco(m,NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,i_t,Ihis_t)

    %Convertir las corrientes vectorizadas en matrices por fase
    This_a=reshape(Ihis_t(m,1:NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);
    This_b=reshape(Ihis_t(m,NumBarr^2+1:2*NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);
    This_c=reshape(Ihis_t(m,2*NumBarr^2+1:3*NumBarr^2),NumBarr,NumBarr);

    %Tensiones por fase
    Va=V_t(m,1:NumBarr); Vb=V_t(m,NumBarr+1:2*NumBarr);
    Vc=V_t(m,2*NumBarr+1:3*NumBarr);

    %Cálculo de las corrientes históricas
    [ia] = i_t_3fas(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Va,Ihis_a);
    [ib] = i_t_3fas(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Vb,Ihis_b);
    [ic] = i_t_3fas(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,Vc,Ihis_c);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%Vectorizar las corrientes
ia_t=[ia(:)]'; ib_t(1,:)=[ib(:)]'; ic_t(1,:)=[ic(:)]';

%Concat de las corrientes y el vecto I
i_t(m,:)=horzcat(ia_t,ib_t,ic_t);

end

```

Figura 38

Cálculo monofásico sistematizado de las ecuaciones 27 y 30

```

function [i] = i_t_3fas(NumBarr,ImpedEntreLine,ImpedAtierra,V_t,Ihis_t)

i=zeros(NumBarr,NumBarr);

%Cálculo de las corrientes calculadas entre líneas
for k=1:size(ImpedEntreLine,1)

    %Cálculo de corrientes calculadas para resistencias entre líneas
    if ImpedEntreLine(k,4)==1 %Para R

i(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=1/ImpedEntreLine(k,3)*(V_t(ImpedEntreLine(k,1))-V_t(ImpedEntreLine(k,2)));
        end

    %Cálculo de corrientes históricas para las inductancias y
    capacitancias entre líneas
    if ImpedEntreLine(k,4)==2 || ImpedEntreLine(k,4)==3 %Para L y C

i(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2))=1/ImpedEntreLine(k,3)*(V_t(ImpedEntreLine(k,1))-V_t(ImpedEntreLine(k,2)))+Ihis_t(ImpedEntreLine(k,1),ImpedEntreLine(k,2));
        end
    end

%Cálculo de las corrientes calculadas línea a tierra
for k=1:size(ImpedAtierra,1)
    %Cálculo de corrientes calculadas para resistencias línea tierra
    if ImpedAtierra(k,3)==1 %Para R

i(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=1/ImpedAtierra(k,2)*V_t(ImpedAtierra(k,1))
;
        end
    end

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

        %Cálculo de corrientes calculada para las inductancias y
        capacitancias línea tierra
        if ImpedAtierra(k,3)==2 || ImpedAtierra(k,3)==3 %Para L y C
i(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1))=1/ImpedAtierra(k,2)*V_t(ImpedAtierra(k,1))
+Ihis_t(ImpedAtierra(k,1),ImpedAtierra(k,1));
        end
        end
    end
end
end

```

5.6.12. Construcción del Módulo de Comportamiento del Relé

El módulo se construye con base al diagrama de flujo del modelo del relé seleccionado, como se ve en la figura 17 del artículo de Samet *et al.* (2019), función *ReléMono.m*. Así, el modelo trifásico del relé se construyó con la función *Relé3fas.m*, las dos funciones se explican a continuación:

5.6.12.1. Función Relé3fas.M. La función sistematiza el cálculo de la figura anteriormente mencionada, para las corrientes trifásicas, como se puede observar en la figura 40, que designa a una subfunción *ReléMono.m*. que realiza el cálculo monofásico. Tal como se observa en la figura 41.

Figura 39

Modelo del relé trifásico

```

function [A,B,C] =
Relé3fas(NumBarr,ImpedAtierra,ImpedEntreLine,deltaT,NPF,MuesCiclo,f,c,filas,colum
nas,i_t,V_t,error)

%% Índices para las corrientes trifásicas
i_t1=i_t(:, sum(i_t, 1) ~= 0);

NuElem=size(ImpedAtierra,1)+size(ImpedEntreLine,1); %número de elementos

for k=1:size(filas,2)
    if f==filas(k) && c==columnas(k)
        pos=k;
    end
end
end

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

IndI=[pos,pos+NuElem,pos+NuElem*2];
ia=i_t1(:,IndI(1)); ib=i_t1(:,IndI(2)); ic=i_t1(:,IndI(3));

%% Índices para la tensión trifásica

IndVol=[f,NumBarr+f,NumBarr*2+f];
Va=V_t(:,IndVol(1)); Vb=V_t(:,IndVol(2)); Vc=V_t(:,IndVol(3));

%% NPF
% Números de búsqueda
FilaColum = [f c];

% Índice de la fila
IndiceFila = ismember(str2double(NPF(:, 1:2)),FilaColum, 'rows');

% Obtener la dirección de NPF
DireNPF = NPF(IndiceFila, 3);

%% Modelo del relé
[ Direc_Fault,N_df,Nf,F] = ReléMono(deltaT,MuesCiclo,ia,Va,DireNPF,error);
A={Direc_Fault, N_df, Nf, F};
[ Direc_Fault,N_df,Nf,F] = ReléMono(deltaT,MuesCiclo,ib,Vb,DireNPF,error);
B={Direc_Fault, N_df, Nf, F};
[ Direc_Fault,N_df,Nf,F] = ReléMono(deltaT,MuesCiclo,ic,Vc,DireNPF,error);
C={Direc_Fault, N_df, Nf, F};

end

```

5.6.12.2. Función Relémono.M.**Figura 40***Modelo del relé monofásico*

```

function [Direc_Fault,N_df,Nf,F] =
ReléMono(deltaT,MuesCiclo,i_t,V_t,NPF,error)

%% Tipos de NPF
%NPF='Positive';
%NPF='Negative'
%%
Inom_12=max(i_t(MuesCiclo:2*MuesCiclo,1))/sqrt(2);
MuesMax=size(i_t,1);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%condición para la detección del fallo después de cumplir 3 veces la
ecuación
%||ia [k] - ia [k - N]|-|ia [k - N] - ia [k - 2N]|| ≥ 0.2Irat

%Implementación de la anterior ecuación
Fall=0; count=0; k=3*MuesCiclo+1;

while Fall <= 0.2*Inom_12 || count<40
    Fall=abs(abs(i_t(k)-i_t(k-MuesCiclo))-abs(i_t(k-MuesCiclo)-i_t(k-
2*MuesCiclo)));
    k = k + 1; % Incrementar k en 1 en cada iteración del ciclo

    if Fall>0.2*Inom_12
        count=count+1;
    end

    if k == MuesMax
        break; % Salir del ciclo while cuando k sea igual a 9601
    end
end

N_df=k;

if k == MuesMax
    Direc_Fault='Not Fall'; N_df='Na'; Nf='Na'; F='Na'; NPF='Na';
else

    e=1e3;
    while e>error
        e=abs(abs(i_t(k))-abs(i_t(k-MuesCiclo)));
        k= k-1;
    end
    Nf=k+1;

    F=0;

    if abs(i_t(Nf))<0.001*Inom_12 %Si Mag de la corriente prefalla es
cercana a 0
        %Algoritmo Principal para la dirección de la falla la tensión es
        %la tensión de la barra donde se encuentra el relé
        for k=Nf:N_df
            F=F+i_t(k)*V_t(k-MuesCiclo);
        end
    else
        %Algoritmo adicional para fallas cercanas a cero
        for k=Nf:N_df
            F=F+i_t(k)*i_t(k-MuesCiclo);
        end
    end
end

```

```

    if F>0 && strcmp(NPF, 'Positive')
        Direc_Fault='Adelante';
    end
    if F>0 && strcmp(NPF, 'Negative')
        Direc_Fault='Atrás';
    end

    if F<0 && strcmp(NPF, 'Positive')
        Direc_Fault='Atras';
    end

    if F<0 && strcmp(NPF, 'Negative')
        Direc_Fault='Adelante';
    end

    Nf=strcat(num2str(Nf*deltaT*1000));
    N_df=strcat(num2str((N_df)*deltaT*1000));
    F=num2str(F);
end
end

```

5.6.13. Visualización y Almacenamiento de los Datos

Se construyeron las funciones *PlotV3f.m* y *PlotI3f.m* que cumplen el mismo objetivo de la función reservada de *Matlab plot*, no obstante, si se desea graficar las 3 fases en una sola línea o indagar en su programación, diríjase a la carpeta *Funciones* y abra la función.

Así pues, la función *TableRelé* se encarga de construir una tabla con la direccionalidad de la falla censada por el relé. Y finalmente estas líneas de código son las encargadas de almacenar los resultados.

```

% Especificar la ruta y el nombre del archivo CSV
nombreArchivo = ['ResultFall_' num2str(BarrFall) '_' TipoFall '_ '
num2str(TimeFall*1000) '_ms.csv' ];

% Crear la ruta completa del archivo y utilizar la función fullfile
rutaCompleta = fullfile(carpetaDestino, nombreArchivo);

% Guardar la tabla como archivo CSV en la carpeta especificada
writetable(R, rutaCompleta);

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.6.14. Unión de los Datos Obtenidos del Relé

Si desea unir todos los datos obtenidos de las fallas vaya a la carpeta *Resultados_Relés* y ejecute el script *JoinTable*, una vez ejecutado, se creará un documento CSV con todos los resultados almacenados en la carpeta.

5.7. Simulación del Sistema de Prueba

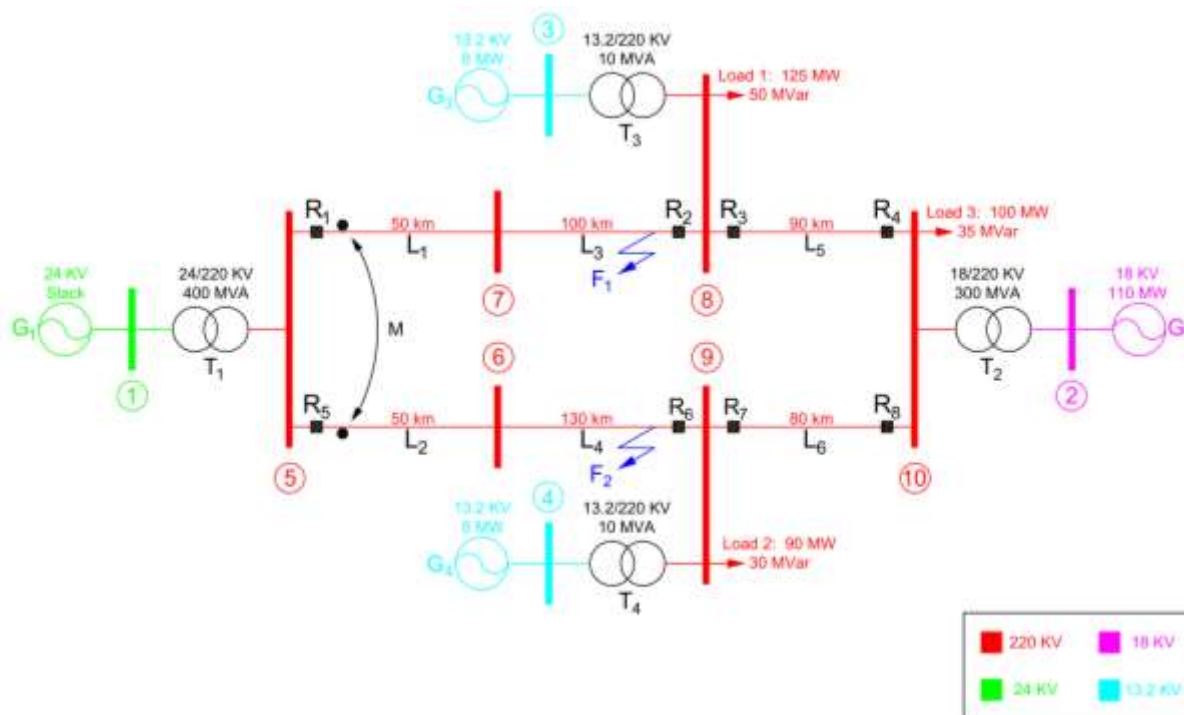
Se propone un sistema de nueve barras con dos líneas acopladas magnéticamente, cuatro generadores, tres cargas y ocho relés de sobre corriente direccionales, como se observa en la figura 41.

5.7.1. Modelado del Sistema para el Caso de Prueba

A continuación, se presentan los siguientes datos:

5.7.1.1. Diagrama Unifilar.**Figura 41**

Diagrama unifilar del sistema de prueba con todas las fases en delta.



5.7.1.2. Geometría De Las Líneas. Las líneas tres, cuatro, cinco, seis son en circuito simple, como se puede ver en la figura 43; y las líneas uno y dos son en circuito doble como se puede ver en la figura 42.

Figura 42

Vista longitudinal y frontal de una línea de transmisión en doble circuito.

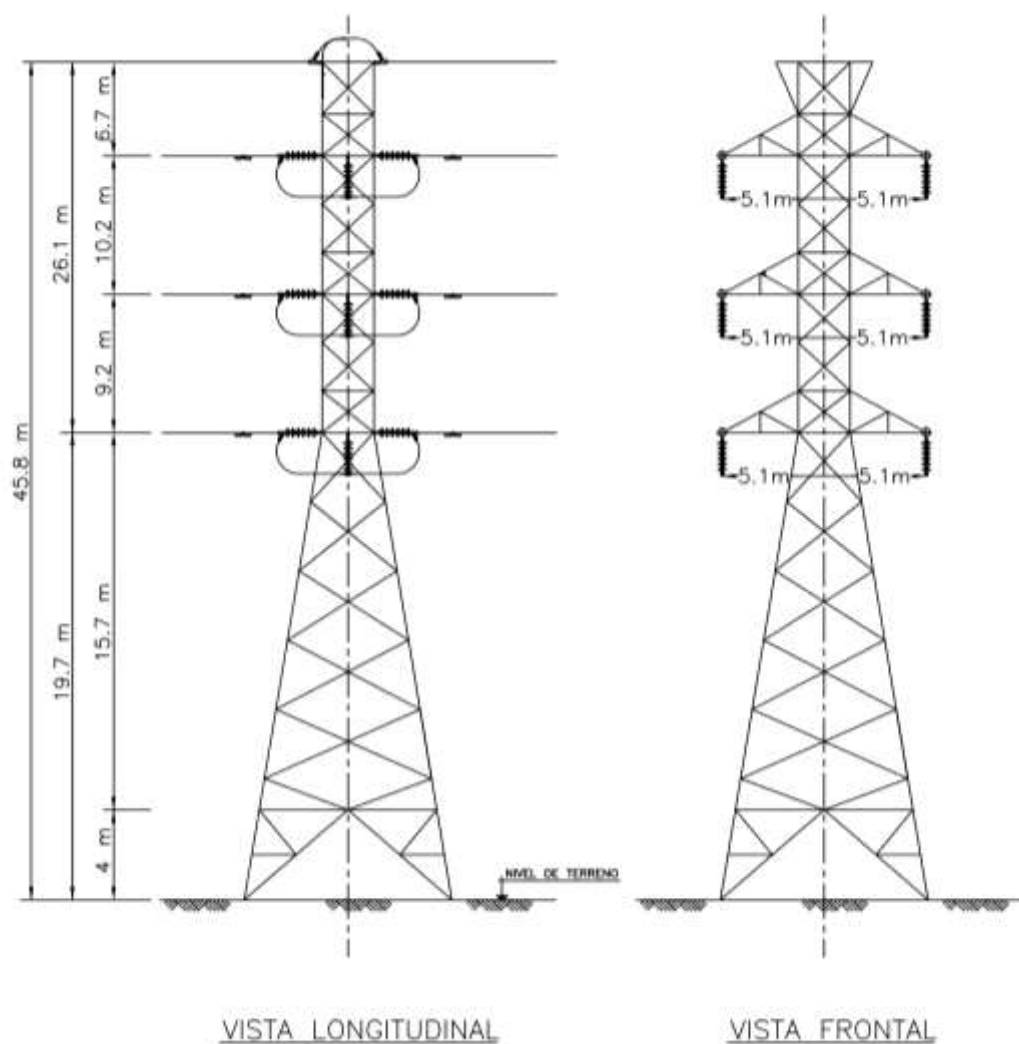
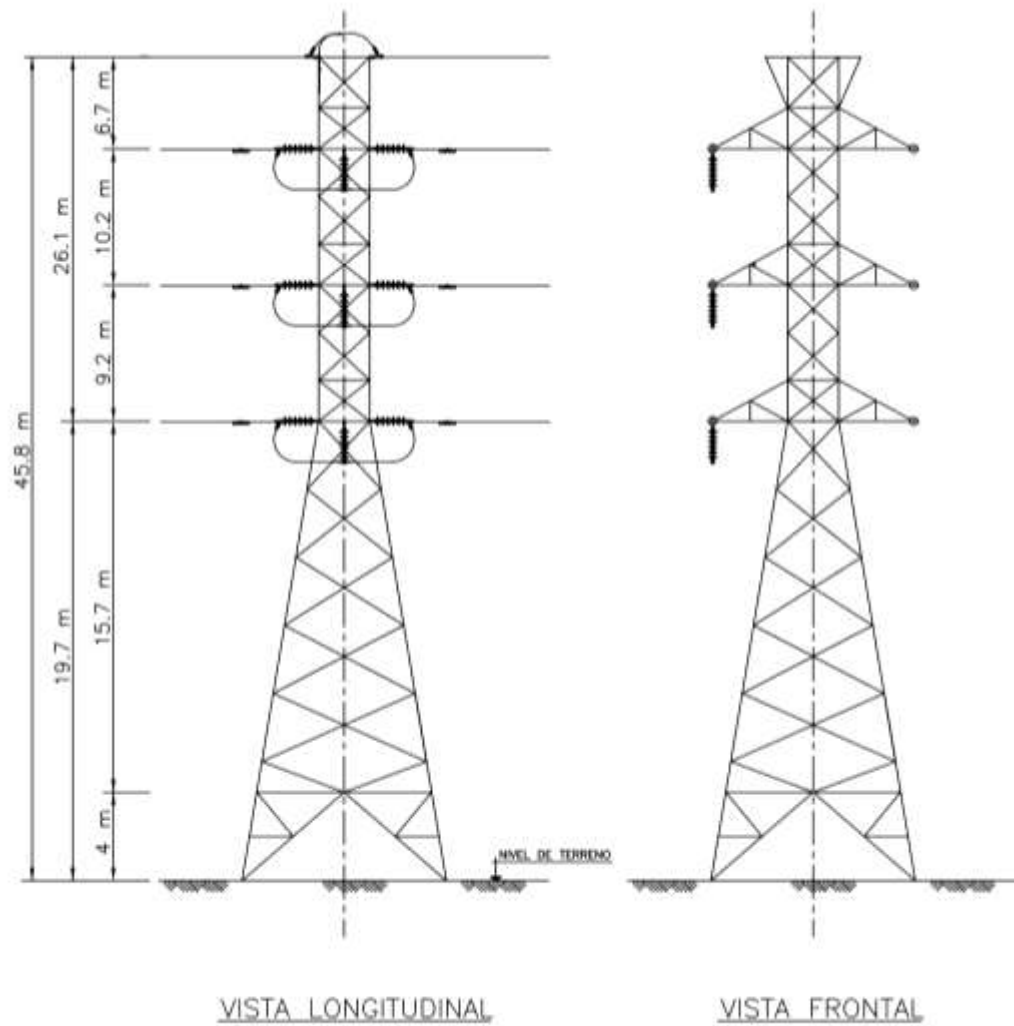


Figura 43

Vista longitudinal y frontal de una línea de transmisión de un solo circuito



DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.1.3. Conductores. Los parámetros de los conductores son los indicados en la Tabla 6, y los valores de la resistencia y reactancia se tomaron del catálogo de CETELSA.

Tabla 6

Parámetros de conductores

Nombre	ID Línea	Tipo	Longitud [km]	RMG [mm]	R [Ω /km]	Capacidad [kA]
Linnet	1	336,4 AWG ACSR	50	7.43	0.165	25,6
Linnet	2	336,4 AWG ACSR	50	7.43	0.165	25,6
Linnet	3	336,4 AWG ACSR	100	7.43	0.165	25,6
Linnet	4	336,4 AWG ACSR	130	7.43	0.165	25,6
Linnet	5	336,4 AWG ACSR	90	7.43	0.165	25,6
Linnet	6	336,4 AWG ACSR	80	7.43	0.165	25,6

5.7.1.4. Transformadores. La Tabla 7 muestra los parámetros típicos de un transformador, y los datos siguientes son ejemplos académicos.

Tabla 7

Parámetros de transformador

ID Línea	Grupo de conexión	VL [kV]	VH [kV]	Sbase [MVA]	R [%]	X [%]
1	Dd0	24	220	400	1	6
2	Dd0	18	220	300	0.9	5
3	Dd0	13.2	220	10	0.085	1.7
4	Dd0	13.2	220	10	0.085	1.7

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.1.5. Cargas. La Tabla 8 muestra la potencia demandada por las cargas del sistema, los siguientes datos son ejemplos académicos.

Tabla 8

Potencia demandada por las cargas

ID Carga	P [kW]	Q [kV]
1	125	50
2	90	30
3	100	35

5.7.1.6. Fuentes. Las fuentes FRNC, Slack y controladas de tensión, son modeladas como maquinas síncronas. De esta manera, la Tabla 9 muestra los parámetros de las fuentes de la figura 40, de forma tal que los siguientes datos son ejemplos académicos.

Tabla 9

Parámetros de las fuentes

ID Fuente	Tipo de barra	V pu	Ángulo [°]	Pout [MVA]	Qout [%]	Sbase [%]	Ra [pu]	XL [pu]	Vnom [kV]
1	3	1	0	9999	9999	512	0.4	1.7	24
2	2	0.9	9999	110	9999	270	0.16	1.7	18
3	2	0.9	9999	8	9999	10	0.82	1.1	13.2
4	2	0.9	9999	8	9999	10	0.82	1.1	13.2

5.7.2. Modelos Circuitales del Sistema

5.7.2.1. Modelo Circuital en el Dominio de la Frecuencia. Las tablas 10, 11, 12 y 13 son los resultados de procesar la información del apartado *Simulación del Sistema de Prueba*, y los formatos de entrada de los datos de este mismo apartado, se explican en el Apéndice B. Asimismo, con la información de las tablas 10, 11, 12 y 13, se construye el modelo circuital en pu figura 45, que es el insumo de la función *ModelMatpower.m* carpeta *Condiciones iniciales* del Apéndice A.

Tabla 10

Impedancia en pu y real para cada transformador del sistema

Id Trafo	Z_pu	R_real [Ohms]	L_real [mH]
1	0.00275+0.0165i	1.21	19.258
2	0.0033+0.018333i	1.452	21.397
3	0.00935+0.187i	4.114	218.25
4	0.00935+0.187i	4.114	218.25

Tabla 11

Impedancia en pu y real para cada línea del sistema

Id Line	Distancia [km]	Z_pu	R_real [Ohms]	L_real [mH]
1	50	0.01875+0.063442i	8.25	74.045
2	50	0.01875+0.063442i	8.25	74.045
3.1	70	0.02625+0.088818i	11.55	103.66
3.2	30	0.01125+0.038065i	4.95	44.427
4.1	110	0.04125+0.13957i	18.15	162.9
4.2	20	0.0075+0.025377i	3.3	29.618
5	90	0.03375+0.1142i	14.85	133.28

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

6	80	0.03+0.10151i	13.2	118.47
---	----	---------------	------	--------

Tabla 12

Modelo de reactancias equivalentes para dos ramas acopladas magnéticamente

Id Line	XLpu
1	0.074164i
2	0.074164i
7	0.36464i

Tabla 13

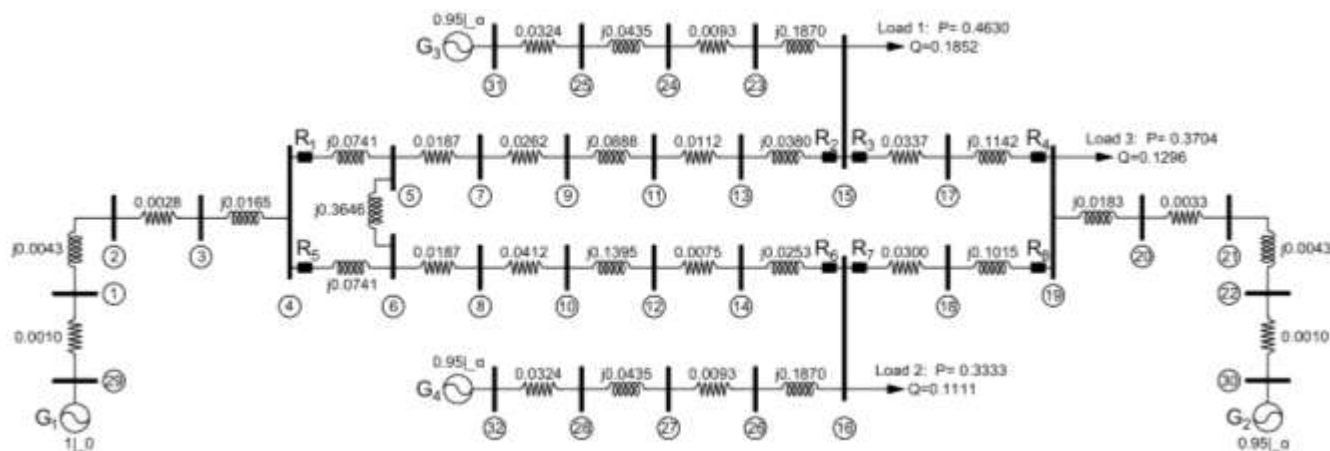
Impedancia en pu y real para la impedancia interna de la fuente

Id Fuente	Z_pu	R_real [Ohms]	L_real [mH]
1	0.0010227+0.0043466i	0.45	5.0731
2	0.00043636+0.0046364i	0.192	5.4113
3	0.032472+0.04356i	14.288	50.84
4	0.032472+0.04356i	14.288	50.84

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 44

Modelo circuital monofásico en por unidad para el sistema de prueba de la figura 41

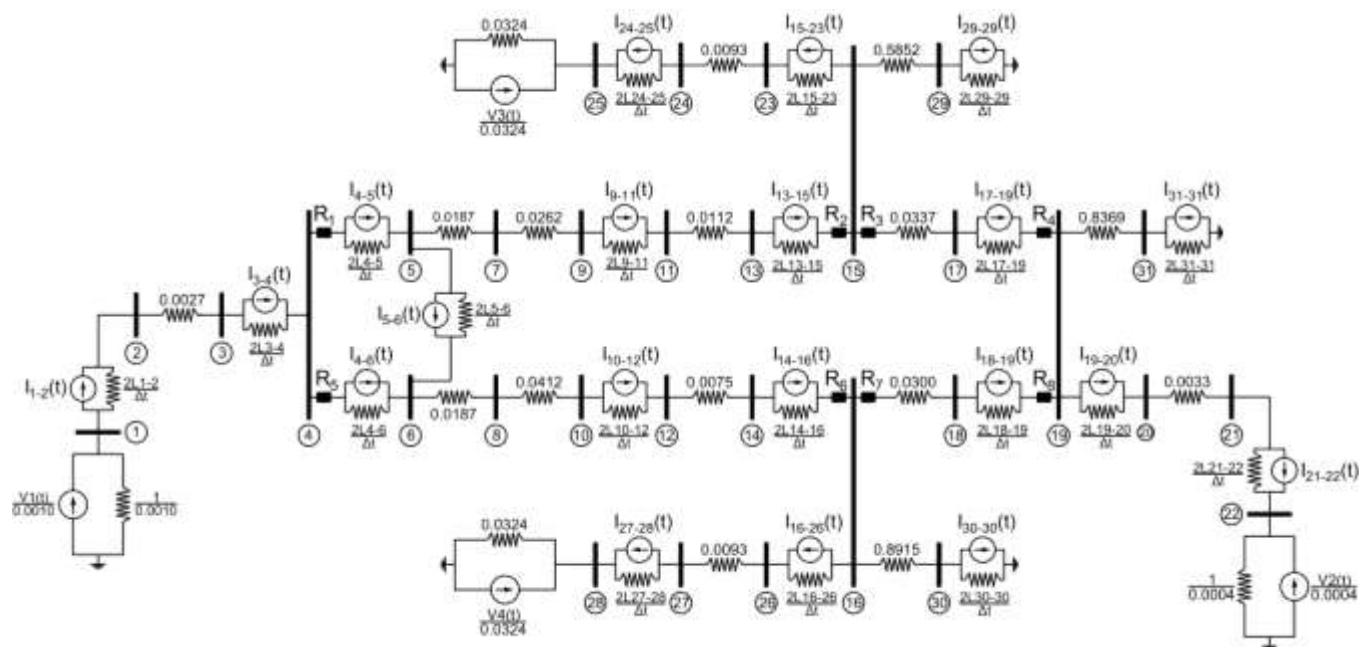


5.7.2.2. Modelo Circuital en la Regla Trapezoidal de Integración. El software calcula automáticamente el modelo matemático monofásico en la regla trapezoidal de integración. A continuación, el modelo circuito se presenta en la figura 46.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 45

Modelo circuito monofásico en la regla trapezoidal de integración



5.7.3. Cálculo del Flujo de la Potencia Monofásico en el Estado Estable

Con base en la figura 45 se construye la función *ModelMatpower.m*; y la figura 47 es insumo para el cálculo del flujo de la potencia por medio de la librería MATPOWER. De esta manera, los resultados del flujo de la potencia son presentados en las tablas 13 y 14.

Figura 46

Modelo del circuito de prueba figura 41 en formato dos de la librería MATPOWER

```
function mpc = ModelMatpower
%IEEE9Node modificado Power flow data for 32 bus, 4 gen
% MATPOWER

% MATPOWER Case Format: Version 2
mpc.version = '2';
```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 110; %Sbase trifásica

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
Vmin
mpc.bus = [
    1 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    2 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    3 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    4 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    5 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    6 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    7 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    8 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    9 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    10 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    11 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    12 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    13 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    14 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    15 1 125 50 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    16 1 90 30 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    17 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    18 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    19 1 100 35 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    20 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;
    21 1 0 0 0 0 1 1 0 220 1 1.1
0.9;

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

```

    22      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    23      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    24      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    25      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    26      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    27      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    28      1      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    29      3      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    30      2      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    31      2      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
    32      2      0      0      0  0  1      1  0  220      1  1.1
0.9;
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2
Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
    29  200  100  200 -200  1  512  1  400  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0;
    30  110  30  5 -5  0.95  270  1  200  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0;
    31  8  1  1 -1  0.95  10  1  9  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0;
    32  8  1  1 -1  0.95  10  1  9  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
angmin angmax
mpc.branch = [
%Trafo y Gen 1
    1  29  0.0010  0  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %R V1
    1  2  0  0.0043  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %L V1
    2  3  0.0028  0  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %R T1
    3  4  0  0.0165  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %L T1
%Trafo y Gen 2
    19  20  0  0.0183  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %L T2
    20  21  0.0033  0  0  0  0  0  0  0  1  -360  360; %R T2

```

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

21	22	0	0.00436	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L V2
22	30	0.0004	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R V2
%Trafo y Gen 3													
15	23	0	0.1870	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L T3
23	24	0.0094	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R T3
24	25	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L V3
25	31	0.0325	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R V3
%Trafo y Gen 4													
16	26	0	0.1870	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L T4
26	27	0.0094	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R T4
27	28	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L V4
28	32	0.0325	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R V4
%L1													
4	5	0	0.0742	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L1
5	7	0.0634	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L1
%L2													
4	6	0	0.0742	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L2
6	8	0.0634	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R V4
%L7													
5	6	0	0.3646	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L7
%L3.1													
7	9	0.0263	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L3.1
9	11	0	0.0888	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L3.1
%L3.2													
11	13	0.0112	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L3.1
13	15	0	0.0381	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L3.1
%L4.1													
8	10	0.0413	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L4.1
10	12	0	0.1396	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L4.1
%L4.2													
12	14	0.0075	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L4.1
14	16	0	0.0254	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L4.1
%L5													
15	17	0.0338	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L4.1
17	19	0	0.1142	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L4.1
%L6													
16	18	0.0300	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %R L4.1
18	19	0	0.1015	0	0	0	0	0	0	0	1	-360	360; %L L4.1

];

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 14*Resultados de las tensiones monofásicas en el estado estable*

Barra	Tipo de barra	Tensión [pu]	Ángulo [°]	Pg [MW]	Qg [MVAR]	Pd [MW]	Qd [MVAR]
1	1	0.998	0.015	0	0	0	0
2	1	0.997	-0.470	0	0	0	0
3	1	0.991	-0.432	0	0	0	0
4	1	0.988	-2.312	0	0	0	0
5	1	0.983	-6.949	0	0	0	0
6	1	0.986	-6.198	0	0	0	0
7	1	0.913	-6.835	0	0	0	0
8	1	0.931	-6.209	0	0	0	0
9	1	0.883	-6.783	0	0	0	0
10	1	0.895	-6.218	0	0	0	0
11	1	0.886	-13.179	0	0	0	0
12	1	0.903	-13.918	0	0	0	0
13	1	0.874	-13.247	0	0	0	0
14	1	0.897	-13.975	0	0	0	0
15	1	0.878	-16.003	0	0	125	50
16	1	0.900	-15.363	0	0	90	30
17	1	0.882	-16.810	0	0	0	0
18	1	0.900	-15.827	0	0	0	0
19	1	0.924	-15.974	0	0	100	35
20	1	0.942	-14.778	0	0	0	0
21	1	0.945	-14.974	0	0	0	0
22	1	0.950	-14.696	0	0	0	0
23	1	0.934	-15.104	0	0	0	0
24	1	0.935	-15.276	0	0	0	0
25	1	0.948	-15.079	0	0	0	0
26	1	0.938	-14.465	0	0	0	0
27	1	0.939	-14.581	0	0	0	0
28	1	0.948	-14.381	0	0	0	0
29	3	1.000	0.000	215.882	27.879	0	0
30	2	0.950	-14.719	110	102.244	0	0
31	2	0.950	-15.663	8	31.032	0	0
32	2	0.950	-14.779	8	21.121	0	0

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 15

Resultados de las potencias monofásicas en el estado estable para todas las ramas del sistema.

B out	B in	Inyec Bout P[MW]	Inyec Bout Q[MVAR]	Inyec Bin P[MW]	Inyec Bin Q[MVAR]	Perdidas P[MW]	Perdidas Q[MVAR]	Corriente [pu]	Ángulo [°]
1	29	-215.45	-27.88	215.88	27.88	0.43	0.00	1.979	172.642
1	2	215.45	27.88	-215.45	-26.03	0.00	1.85	1.979	-7.358
2	3	215.45	26.03	-214.25	-26.03	1.21	0.00	1.979	-7.358
3	4	214.25	26.03	-214.25	-18.92	0.00	7.11	1.979	-7.358
19	20	-109.16	-97.10	109.16	101.25	0.00	4.16	1.437	122.374
20	21	-109.16	-101.25	109.91	101.25	0.75	0.00	1.437	122.374
21	22	-109.91	-101.25	109.91	102.24	0.00	0.99	1.437	122.374
22	30	-109.91	-102.24	110.00	102.24	0.09	0.00	1.437	122.374
15	23	-7.57	-28.65	7.57	30.58	0.00	1.93	0.307	88.793
23	24	-7.57	-30.58	7.66	30.58	0.10	0.00	0.307	88.793
24	25	-7.66	-30.58	7.66	31.03	0.00	0.45	0.307	88.793
25	31	-7.66	-31.03	8.00	31.03	0.34	0.00	0.307	88.793
16	26	-7.78	-19.94	7.78	20.90	0.00	0.96	0.216	95.966
26	27	-7.78	-20.90	7.83	20.90	0.05	0.00	0.216	95.966
27	28	-7.83	-20.90	7.83	21.12	0.00	0.22	0.216	95.966
28	32	-7.83	-21.12	8.00	21.12	0.17	0.00	0.216	95.966
4	5	116.42	11.87	-116.42	-2.41	0.00	9.46	1.077	-8.135
5	7	120.25	3.08	-111.62	-3.08	8.63	0.00	1.112	-8.416
4	6	97.83	7.05	-97.83	-0.40	0.00	6.65	0.902	-6.432
6	8	94.00	-0.32	-88.75	0.32	5.24	0.00	0.867	-6.001
5	6	-3.83	-0.67	3.83	0.72	0.00	0.05	0.036	163.134
7	9	111.62	3.08	-108.04	-3.08	3.58	0.00	1.112	-8.416
9	11	108.04	3.08	-108.04	9.00	0.00	12.08	1.112	-8.416
11	13	108.04	-9.00	-106.52	9.00	1.52	0.00	1.112	-8.416
13	15	106.52	-9.00	-106.52	14.19	0.00	5.18	1.112	-8.416
8	10	88.75	-0.32	-85.34	0.32	3.42	0.00	0.867	-6.001
10	12	85.34	-0.32	-85.34	11.87	0.00	11.54	0.867	-6.001
12	14	85.34	-11.87	-84.72	11.87	0.62	0.00	0.867	-6.001
14	16	84.72	-11.87	-84.72	13.97	0.00	2.10	0.867	-6.001
15	17	-10.91	-35.54	11.47	35.54	0.55	0.00	0.385	91.070
17	19	-11.47	-35.54	11.47	37.40	0.00	1.86	0.385	91.070
16	18	2.50	-24.03	-2.31	24.03	0.20	0.00	0.244	68.692
18	19	2.31	-24.03	-2.31	24.70	0.00	0.66	0.244	68.692

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.4. Cálculo de Flujo de Potencia Trifásico Transitorio

Las muestras de la tensión trifásica en todas las barras y corrientes de las ramas trifásicas se encuentran en el Apéndice C, hojas *muestras de $V_{-}(t)$ trifásicas*, *muestras de $i_{-}(t)$ trifásicas* respectivamente. Así, la estructura de las tablas se ve en las tablas 15 y 16.

Tabla 16

Muestra de 14 columnas y 20 filas de la hoja muestras de $V_{-}(t)$ trifásicas

Va1	Va2	Va3	Va4	Va5	Va6	Va7	Va8	Va9	Va10	Va11	Va12	Va13	Va14
0.998	0.997	0.991	0.987	0.976	0.980	0.906	0.925	0.877	0.889	0.863	0.877	0.850	0.870
0.997	0.996	0.990	0.988	0.981	0.984	0.911	0.929	0.882	0.893	0.872	0.887	0.860	0.880
0.992	0.992	0.987	0.986	0.983	0.986	0.912	0.931	0.883	0.895	0.879	0.895	0.867	0.888
0.986	0.986	0.980	0.981	0.983	0.984	0.912	0.929	0.883	0.894	0.884	0.900	0.871	0.894
0.976	0.977	0.971	0.974	0.979	0.981	0.909	0.926	0.880	0.890	0.886	0.903	0.873	0.896
0.964	0.965	0.960	0.964	0.974	0.974	0.904	0.919	0.874	0.884	0.886	0.903	0.873	0.897
0.949	0.951	0.945	0.951	0.965	0.965	0.895	0.911	0.866	0.876	0.883	0.901	0.871	0.895
0.932	0.934	0.928	0.936	0.954	0.953	0.885	0.900	0.857	0.865	0.878	0.896	0.866	0.890
0.912	0.914	0.909	0.918	0.940	0.938	0.872	0.886	0.844	0.852	0.870	0.889	0.858	0.883
0.889	0.892	0.887	0.898	0.924	0.921	0.857	0.870	0.829	0.836	0.861	0.880	0.849	0.874
0.864	0.867	0.862	0.875	0.904	0.902	0.839	0.852	0.812	0.819	0.848	0.868	0.837	0.862
0.837	0.841	0.836	0.850	0.883	0.880	0.819	0.831	0.793	0.799	0.834	0.854	0.822	0.848
0.807	0.811	0.806	0.822	0.859	0.855	0.797	0.808	0.771	0.777	0.817	0.837	0.806	0.831
0.775	0.780	0.775	0.792	0.833	0.828	0.773	0.782	0.748	0.752	0.798	0.818	0.787	0.813
0.741	0.746	0.742	0.760	0.805	0.799	0.746	0.755	0.722	0.726	0.776	0.797	0.766	0.792
0.706	0.711	0.706	0.726	0.774	0.768	0.718	0.725	0.694	0.697	0.753	0.774	0.743	0.769
0.668	0.673	0.669	0.690	0.741	0.735	0.687	0.694	0.664	0.667	0.727	0.748	0.718	0.743
0.628	0.634	0.630	0.652	0.707	0.699	0.655	0.660	0.633	0.635	0.700	0.721	0.691	0.716
0.586	0.593	0.589	0.613	0.670	0.662	0.620	0.625	0.600	0.601	0.671	0.691	0.662	0.687

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 17

Muestra de 12 Columnas y 20 filas de la hoja, muestras de $i_{-}(t)$ trifásicas

Ia1-1 [A]	Ia1-2 [A]	Ia2-3 [A]	Ia3-4 [A]	Ia4-5 [A]	Ia4-6 [A]	Ia5-6 [A]	Ia5-7 [A]	Ia6-8 [A]	Ia7-9 [A]	Ia8-10 [A]	Ia9-11 [A]
977.778	1.963	1.963	1.963	1.066	0.897	-0.034	1.100	0.862	1.100	0.862	1.100
974.465	1.973	1.973	1.973	1.072	0.901	-0.035	1.107	0.866	1.107	0.866	1.107
970.443	1.978	1.978	1.978	1.076	0.902	-0.035	1.111	0.867	1.111	0.867	1.111
963.762	1.978	1.978	1.978	1.077	0.902	-0.036	1.112	0.866	1.112	0.866	1.112
954.439	1.972	1.972	1.972	1.074	0.898	-0.036	1.110	0.862	1.110	0.862	1.110
942.500	1.961	1.961	1.961	1.069	0.892	-0.036	1.105	0.856	1.105	0.856	1.105
927.977	1.945	1.945	1.945	1.061	0.884	-0.036	1.097	0.848	1.097	0.848	1.097
910.911	1.923	1.923	1.923	1.050	0.873	-0.036	1.085	0.838	1.085	0.838	1.085
891.348	1.896	1.896	1.896	1.036	0.860	-0.036	1.071	0.825	1.071	0.825	1.071
869.343	1.864	1.864	1.864	1.019	0.845	-0.035	1.054	0.809	1.054	0.809	1.054
844.954	1.826	1.826	1.826	0.999	0.827	-0.035	1.034	0.792	1.034	0.792	1.034
818.249	1.784	1.784	1.784	0.977	0.807	-0.035	1.011	0.773	1.011	0.773	1.011
789.302	1.737	1.737	1.737	0.952	0.785	-0.034	0.986	0.751	0.986	0.751	0.986
758.191	1.685	1.685	1.685	0.924	0.761	-0.033	0.957	0.727	0.957	0.727	0.957
725.002	1.628	1.628	1.628	0.894	0.734	-0.033	0.927	0.701	0.927	0.701	0.927
689.826	1.567	1.567	1.567	0.861	0.706	-0.032	0.893	0.674	0.893	0.674	0.893
652.759	1.502	1.502	1.502	0.826	0.675	-0.031	0.857	0.644	0.857	0.644	0.857
613.903	1.432	1.432	1.432	0.789	0.643	-0.030	0.819	0.613	0.819	0.613	0.819
573.365	1.359	1.359	1.359	0.750	0.609	-0.029	0.778	0.580	0.778	0.580	0.778
531.254	1.282	1.282	1.282	0.708	0.573	-0.028	0.736	0.546	0.736	0.546	0.736

5.7.5. Gráficos de Tensiones y Corrientes muestreadas por los Relés

En esta sección se presentan los gráficos de las señales sensadas por los 8 relés ubicados, como se ve en la figura 46. Así, los datos de la falla simulados para esta sección se ven en la tabla

18.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 18*Datos de la falla simulada*

Tipo de falla	Tiempo del ingreso de la falla al sistema	Barra en falla
ABC	160 [ms]	12

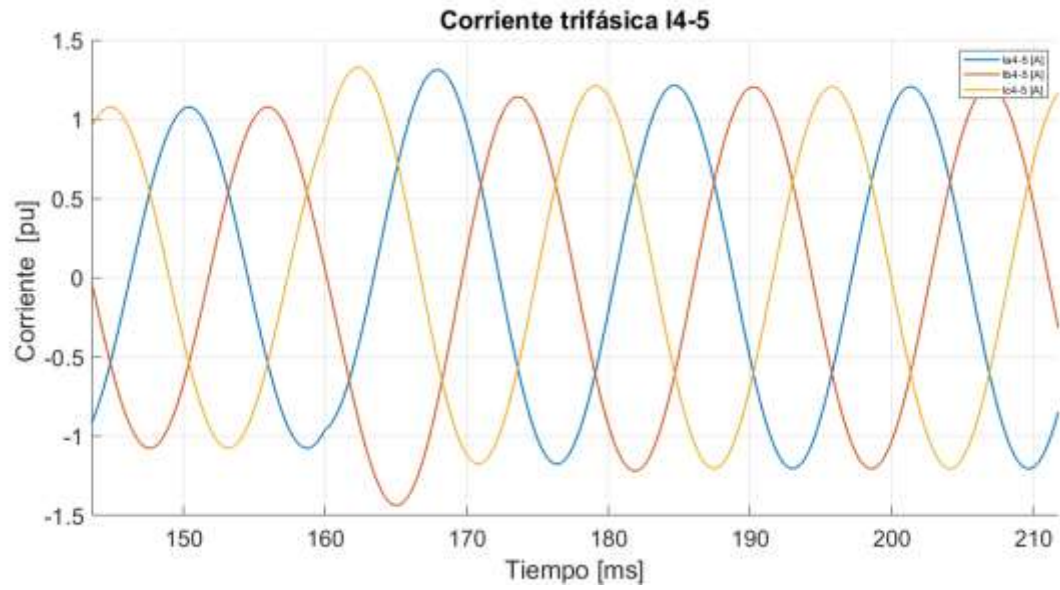
Relé 1: El relé uno se encuentra en la barra cuatro y censa la corriente que circula entre las barras 4 y 5, para el cálculo de F' (indicador auxiliar para fallas próximas al cruce por cero) ver figura 17. Además, se debe medir la tensión de la barra donde se encuentra ubicado el relé. Para ello, se presenta a continuación las tensiones en las figuras 48 y corrientes, y 49 trifásicas descritas.

Figura 47*Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 1*

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 48

Corriente trifásica muestreada por el relé 1



El procedimiento del relé uno se repite para los siete relés restantes como se ve a continuación

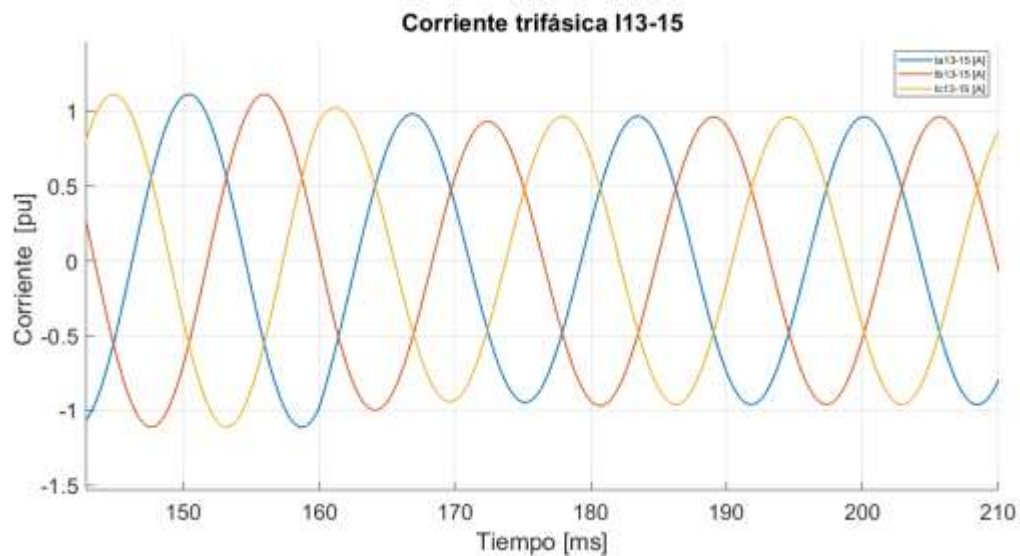
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Relé 2:**Figura 49**

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 2

**Figura 50**

Corriente trifásica muestreada por el relé 2



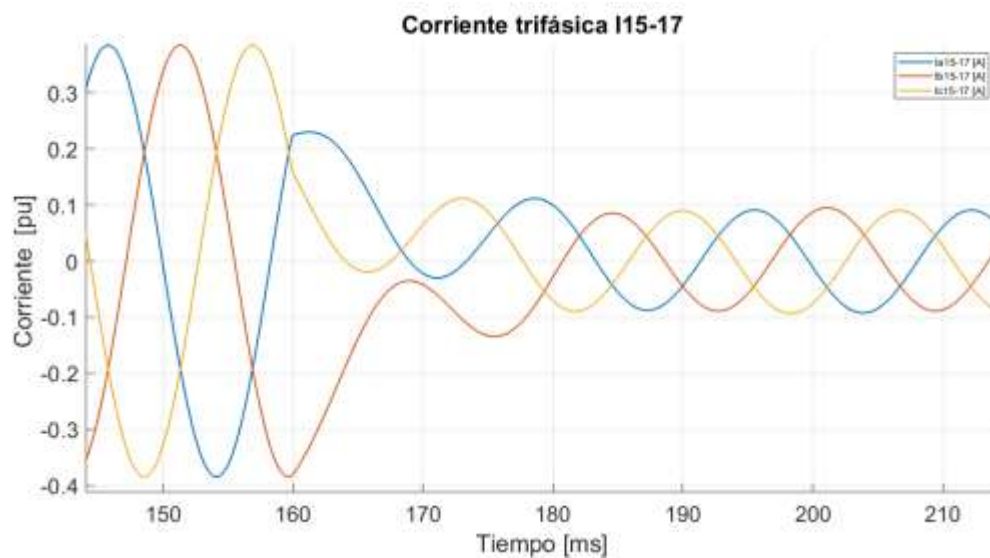
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Relé 3:**Figura 51**

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 3

**Figura 52**

Corriente trifásica muestreada por el relé 3



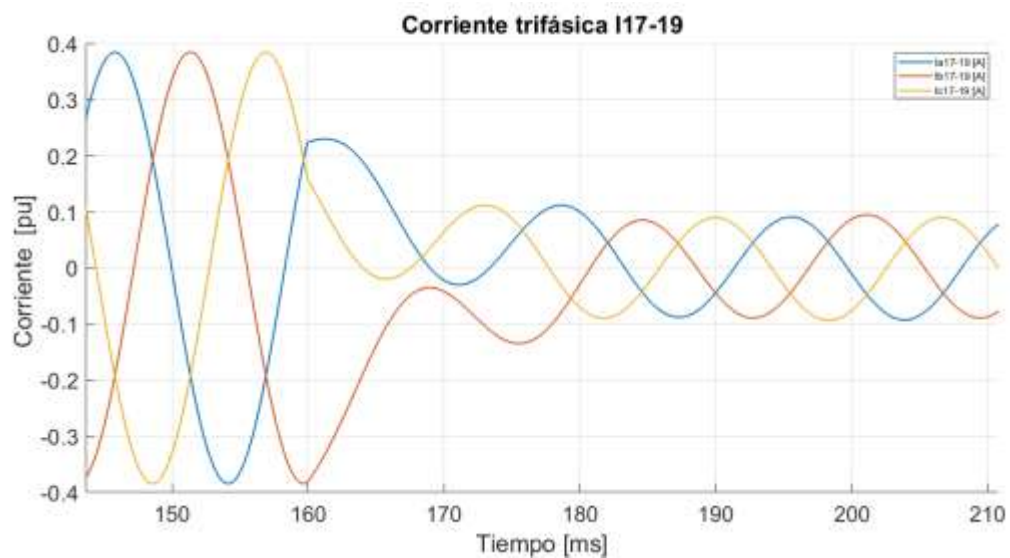
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Relé 4:**Figura 53**

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 4

**Figura 54**

Corriente trifásica muestreada por el relé 4



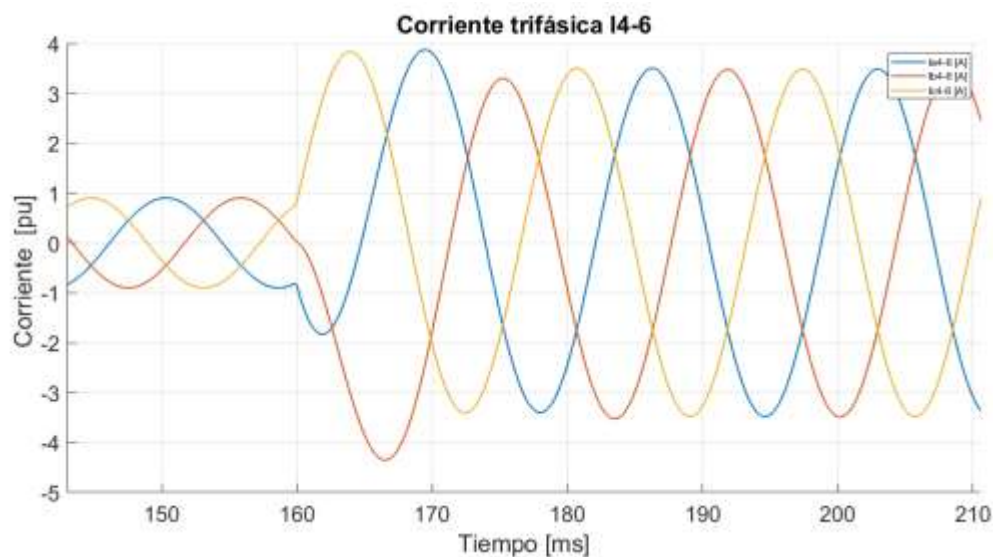
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Relé 5:**Figura 55**

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 5

**Figura 56**

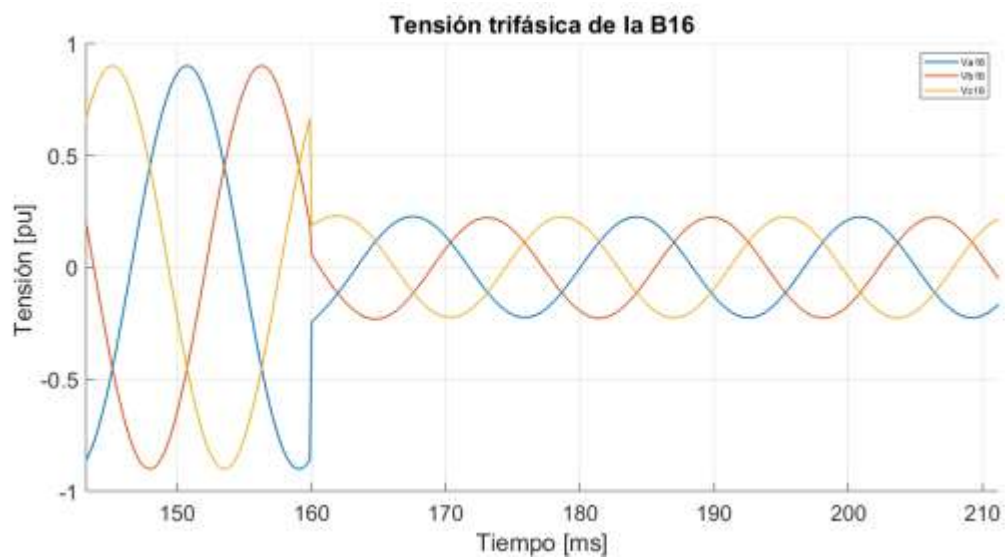
Corriente trifásica muestreada por el relé 5

**Relé 6:**

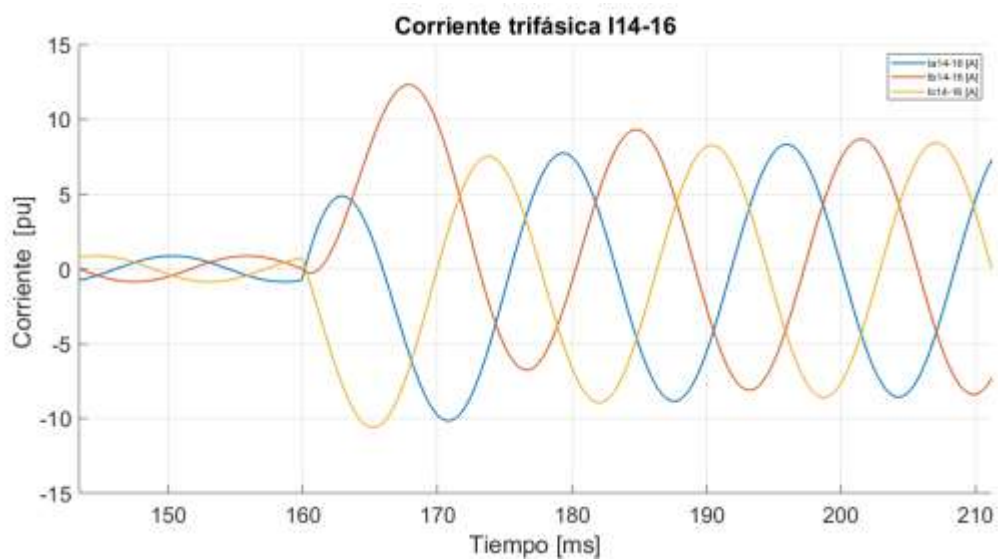
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 57

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 6

**Figura 58**

Corriente trifásica muestreada por el relé 6

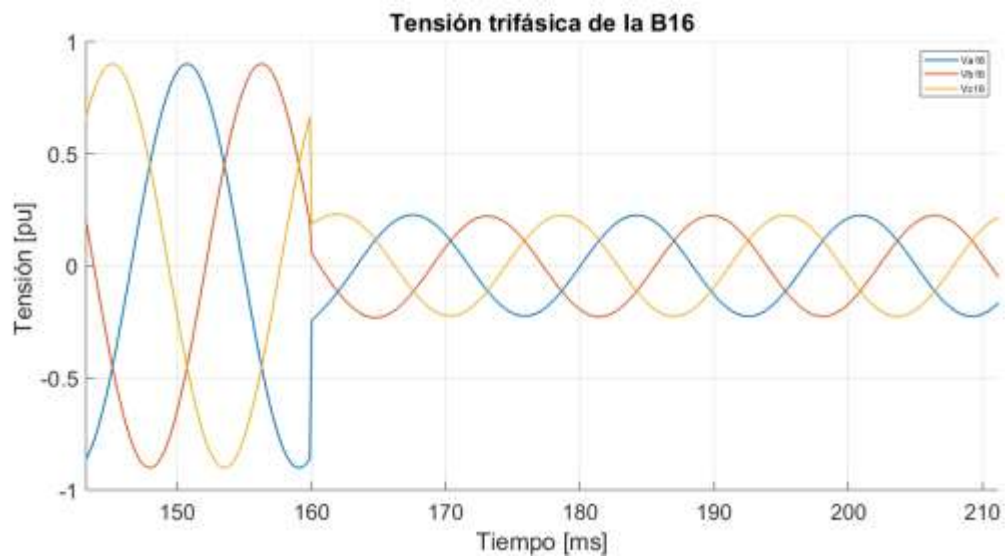


Relé 7:

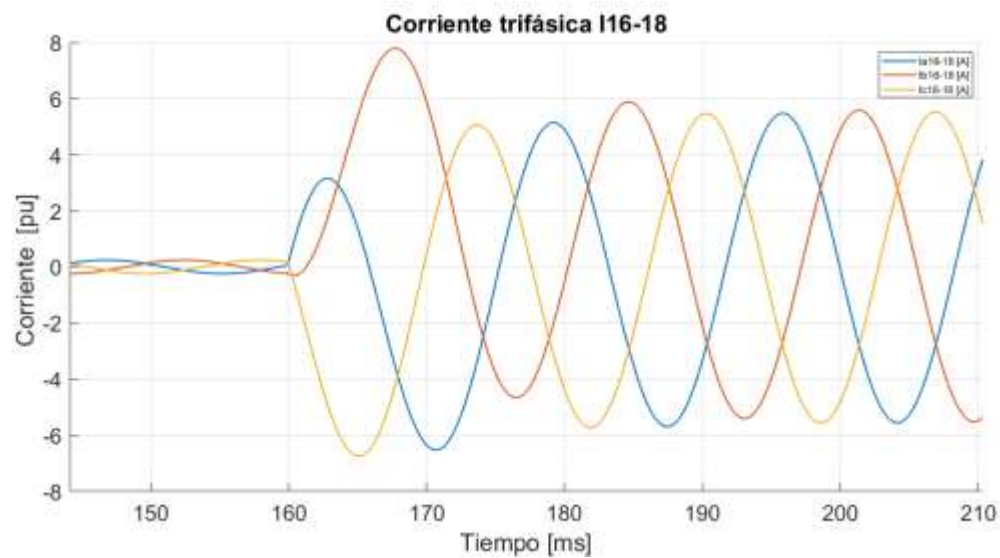
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 59

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 7

**Figura 60**

Corriente trifásica muestreada por el relé 7

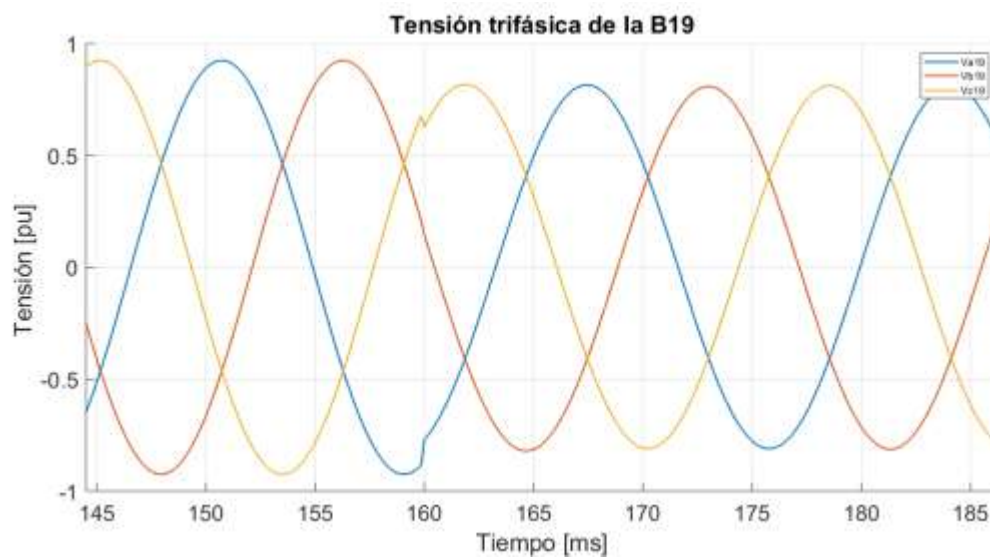


Relé 8:

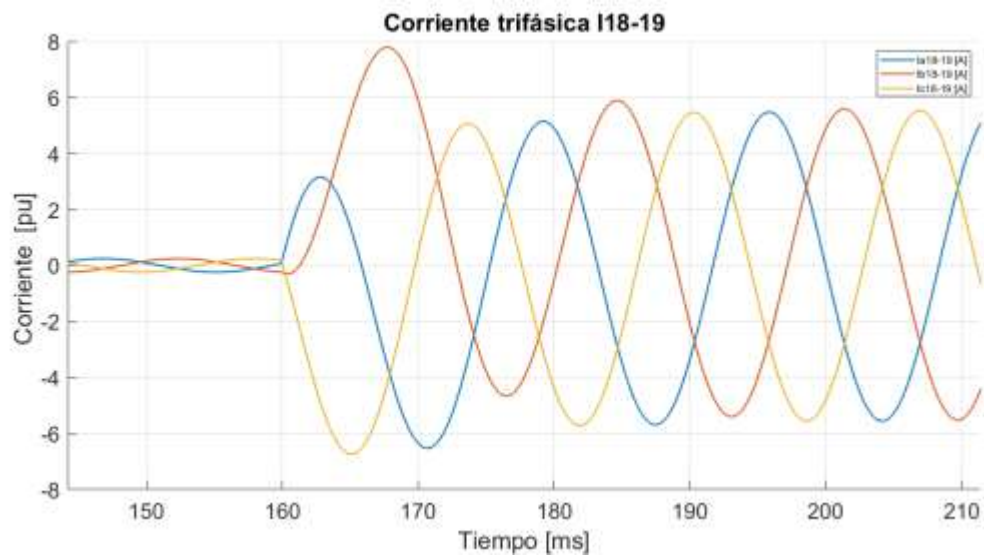
DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Figura 61

Tensión trifásica de la barra donde se ubica el relé 8

**Figura 62**

Corriente trifásica muestreada por el relé 8



DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.6. *Resultados de las Direcciones de las Fallas para el Sistema de Pruebas*

En este apartado se muestra el comportamiento de los relés para las fallas descritas en la tabla 19, de esta manera, la falla hacia adelante se da en sentido normal del flujo de la potencia; así, si la corriente fluye de la barra 1-2 el flujo normal de la potencia es de la barra 1 a 2; por consiguiente, las fallas después de la barra dos serán tomadas como hacia adelante, y las fallas posteriores pero anteriores a la barra 1 serán tomadas como fallas hacia atrás.

Así también, en la tabla 20 se encuentra el diccionario de las columnas de los resultados del relé.

Tabla 19

Fallas que se aplicarán al sistema de pruebas

Tipo de falla	Tiempo del ingreso de la falla al sistema [ms]	Línea en falla	Barra del modelo RTdl
Ag	70	L3	11
Bg	87	L3	11
Cg	90	L3	11
AB	115	L3	11
BC	130	L3	11
ABC	157	L3	11
Ag	70	L4	12
Bg	85	L4	12
Cg	95	L4	12
AB	110	L4	12
BC	137	L4	12
ABC	160	L4	12

Tabla 20

Diccionario de las tablas que describen los comportamientos de los relés.

Columna	Significado
Id Relé	Identificación única del relé
Fase	Fase del sistema (A, B, C) donde el relé censa la corriente
Barra	Barra donde se encuentra ubicado el relé en el modelo RTdl

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Inicio de falla [ms]	Tiempo donde el usuario del software inicio la falla
Línea en falla	Línea del diagrama unifilar donde el usuario ubico la falla
Disparo	Dirección de la falla dada por el relé (DF=disparo hacia el frente, DA=disparo hacia atrás, ND=no disparo)
t(N_df) [ms]	Tiempo donde el relé detecta la falla
t(Nf) [ms]	Tiempo donde el relé detecta el inicio de la falla
F	Indicador F del modelo del relé
Dirección	Dirección real de la falla.

R1.**Tabla 21**

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 1

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
1	A	4	Ag	70	L3	DF	72.6389	70	1.7914	DF	Ok
1	A	4	Ag	70	L4	DF	76.9444	70	35.8407	DA	Not Ok
1	B	4	Bg	85	L4	DF	90.5556	85	33.4121	DA	Not Ok
1	B	4	Bg	87	L3	DF	89.5833	86.9444	45.4823	DF	Ok
1	C	4	Cg	90	L3	DF	93.4722	90	12.6374	DF	Ok
1	C	4	Cg	95	L4	DF	98.6111	95	20.9955	DA	Not Ok
1	A	4	AB	110	L4	DF	117.6389	110	37.0125	DA	Not Ok
1	B	4	AB	110	L4	DF	117.6389	110	38.3911	DA	Not Ok
1	A	4	AB	115	L3	DF	117.6389	115	49.5634	DF	Ok
1	B	4	AB	115	L3	DF	117.6389	115	31.9031	DF	Ok
1	B	4	BC	130	L3	DF	132.6389	130	48.2914	DF	Ok
1	C	4	BC	130	L3	DF	132.6389	130	12.7781	DF	Ok
1	B	4	BC	137	L4	DF	140.8333	136.9444	33.0059	DA	Not Ok
1	C	4	BC	137	L4	DF	140.8333	136.9444	17.957	DA	Not Ok
1	A	4	ABC	157	L3	DF	159.5833	156.9444	52.4178	DF	Ok
1	B	4	ABC	157	L3	DF	159.5833	156.9444	26.9129	DF	Ok
1	C	4	ABC	157	L3	DF	161.1111	156.9444	34.3894	DF	Ok
1	A	4	ABC	160	L4	DF	163.8889	160	10.1316	DA	Not Ok
1	B	4	ABC	160	L4	DF	165.5556	160	33.4102	DA	Not Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

1	C	4	ABC	160	L4	DF	163.75	160	32.9888	DA	Not Ok
---	---	---	-----	-----	----	----	--------	-----	---------	----	--------

R2.**Tabla 22**

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 2

Id relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
2	A	15	Ag	70	L3	DF	72.6389	70	2.6071	DF	Ok
2	A	15	Ag	70	L4	DF	85.6944	70	62.1386	DF	Ok
2	B	15	Bg	85	L4	DF	99.4444	85	60.3546	DF	Ok
2	B	15	Bg	87	L3	DF	89.5833	86.9444	-38.7313	DF	Ok
2	C	15	Cg	90	L3	DF	92.9167	90	0.21792	DF	Ok
2	C	15	Cg	95	L4	DF	120.8333	95	101.0959	DF	Ok
2	A	15	AB	110	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	B	15	AB	110	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	A	15	AB	115	L3	DF	117.5	115	-38.1129	DF	Ok
2	B	15	AB	115	L3	DF	117.5	115	-24.334	DF	Ok
2	B	15	BC	130	L3	DF	132.5	130	-31.2143	DF	Ok
2	C	15	BC	130	L3	DF	132.5	130	-10.2996	DF	Ok
2	B	15	BC	137	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	C	15	BC	137	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	A	15	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	-40.0438	DF	Ok
2	B	15	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	-21.0567	DF	Ok
2	C	15	ABC	157	L3	DF	160.1389	156.9444	-6.4516	DF	Ok
2	A	15	ABC	160	L4	DF	193.0556	160	121.5443	DF	Ok
2	B	15	ABC	160	L4	DF	174.4444	160	60.3546	DF	Ok
2	C	15	ABC	160	L4	DF	171.9444	160	57.3904	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R3.

Tabla 23

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 3

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
3	A	15	Ag	70	L3	DA	72.5	70	5.5054	DA	Ok
3	A	15	Ag	70	L4	DA	76.25	70	3.0045	DA	Ok
3	B	15	Bg	85	L4	DA	89.5833	85	2.2592	DA	Ok
3	B	15	Bg	87	L3	DF	89.4444	86.9444	-0.49592	DA	Not Ok
3	C	15	Cg	90	L3	DA	92.7778	90	2.7755	DA	Ok
3	C	15	Cg	95	L4	DA	97.9167	95	0.60359	DA	Ok
3	A	15	AB	110	L4	DA	116.8056	110	4.3634	DA	Ok
3	B	15	AB	110	L4	DA	116.8056	110	2.1161	DA	Ok
3	A	15	AB	115	L3	DA	117.5	115	0.18312	DA	Ok
3	B	15	AB	115	L3	DA	117.5	115	10.5643	DA	Ok
3	C	15	BC	130	L3	DA	132.5	130	12.0349	DA	Ok
3	B	15	BC	130	L3	DA	132.5	130	4.0907	DA	Ok
3	C	15	BC	137	L4	DA	140	136.9444	0.93929	DA	Ok
3	B	15	BC	137	L4	DA	140	136.9444	0.45606	DA	Ok
3	C	15	ABC	157	L3	DA	160	156.9444	1.06	DA	Ok
3	A	15	ABC	157	L3	DA	159.4444	156.9444	1.3705	DA	Ok
3	B	15	ABC	157	L3	DA	159.4444	156.9444	10.8751	DA	Ok
3	C	15	ABC	160	L4	DA	163.0556	160	0.018153	DA	Ok
3	A	15	ABC	160	L4	DA	163.0556	160	1.7301	DA	Ok
3	B	15	ABC	160	L4	DA	164.5833	160	2.259	DA	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R4.**Tabla 24***Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 4*

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
4	A	19	Ag	70	L3	DF	72.5	70	5.5054	DF	Ok
4	A	19	Ag	70	L4	DF	76.25	70	3.0045	DF	Ok
4	B	19	Bg	85	L4	DF	89.5833	85	2.2592	DF	Ok
4	B	19	Bg	87	L3	DF	89.4444	86.9444	-0.49592	DF	Ok
4	C	19	Cg	90	L3	DF	92.7778	90	2.7755	DF	Ok
4	C	19	Cg	95	L4	DF	97.9167	95	0.60359	DF	Ok
4	A	19	AB	110	L4	DF	116.8056	110	4.3634	DF	Ok
4	B	19	AB	110	L4	DF	116.8056	110	2.1161	DF	Ok
4	A	19	AB	115	L3	DF	117.5	115	0.18312	DF	Ok
4	B	19	AB	115	L3	DF	117.5	115	10.5643	DF	Ok
4	B	19	BC	130	L3	DF	132.5	130	4.0907	DF	Ok
4	C	19	BC	130	L3	DF	132.5	130	12.0349	DF	Ok
4	B	19	BC	137	L4	DF	140	136.9444	0.45606	DF	Ok
4	C	19	BC	137	L4	DF	140	136.9444	0.93929	DF	Ok
4	A	19	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	1.3705	DF	Ok
4	B	19	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	10.8751	DF	Ok
4	C	19	ABC	157	L3	DF	160	156.9444	1.06	DF	Ok
4	A	19	ABC	160	L4	DF	163.0556	160	1.7301	DF	Ok
4	B	19	ABC	160	L4	DF	164.5833	160	2.259	DF	Ok
4	C	19	ABC	160	L4	DF	163.0556	160	0.018153	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R5.

Tabla 25

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 5

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
5	A	4	Ag	70	L3	DF	76.5278	70	24.1265	DA	Not Ok
5	A	4	Ag	70	L4	DF	72.6389	70	1.0246	DF	Ok
5	B	4	Bg	85	L4	DF	88.75	85	21.7887	DF	Ok
5	B	4	Bg	87	L3	DF	90.5556	86.9444	23.0095	DA	Not Ok
5	C	4	Cg	90	L3	DF	95.8333	90	23.1892	DA	Not Ok
5	C	4	Cg	95	L4	DF	97.6389	95	28.5703	DF	Ok
5	A	4	AB	110	L4	DF	112.6389	110	9.2643	DF	Ok
5	B	4	AB	110	L4	DF	112.6389	110	0.32618	DF	Ok
5	A	4	AB	115	L3	DF	118.4722	115	22.5957	DA	Not Ok
5	B	4	AB	115	L3	DF	118.4722	115	10.7004	DA	Not Ok
5	C	4	BC	130	L3	DF	133.4722	130	4.0121	DA	Not Ok
5	B	4	BC	130	L3	DF	133.4722	130	20.6892	DA	Not Ok
5	C	4	BC	137	L4	DF	139.5833	136.9444	23.7669	DF	Ok
5	B	4	BC	137	L4	DF	139.5833	136.9444	32.7522	DF	Ok
5	C	4	ABC	157	L3	DF	162.3611	156.9444	22.2177	DA	Not Ok
5	A	4	ABC	157	L3	DF	160.4167	156.9444	23.2124	DA	Not Ok
5	B	4	ABC	157	L3	DF	160.2778	156.9444	8.7345	DA	Not Ok
5	C	4	ABC	160	L4	DF	162.6389	160	37.0509	DF	Ok
5	A	4	ABC	160	L4	DF	162.6389	160	13.8356	DF	Ok
5	B	4	ABC	160	L4	DF	163.75	160	21.7903	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R6.**Tabla 26***Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 6*

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
6	A	16	Ag	70	L3	DF	76.9444	70	16.1501	DF	Ok
6	A	16	Ag	70	L4	DF	72.5	70	2.1592	DF	Ok
6	B	16	Bg	85	L4	DF	88.1944	85	-13.3167	DF	Ok
6	B	16	Bg	87	L3	DF	91.1111	86.9444	15.3873	DF	Ok
6	C	16	Cg	90	L3	DF	96.25	90	15.299	DF	Ok
6	C	16	Cg	95	L4	DF	97.5	95	-35.3576	DF	Ok
6	A	16	AB	110	L4	DF	112.5	110	-4.2011	DF	Ok
6	B	16	AB	110	L4	DF	112.5	110	12.3885	DF	Ok
6	A	16	AB	115	L3	DF	118.8889	115	15.2684	DF	Ok
6	B	16	AB	115	L3	DF	118.8889	115	6.8907	DF	Ok
6	B	16	BC	130	L3	DF	138.0556	130	18.6472	DF	Ok
6	C	16	BC	130	L3	DF	138.0556	130	20.7004	DF	Ok
6	B	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-39.532	DF	Ok
6	C	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-27.2524	DF	Ok
6	A	16	ABC	157	L3	DF	160.8333	156.9444	14.9369	DF	Ok
6	B	16	ABC	157	L3	DF	164.5833	156.9444	17.0508	DF	Ok
6	C	16	ABC	157	L3	DF	162.9167	156.9444	15.1851	DF	Ok
6	A	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-16.5281	DF	Ok
6	B	16	ABC	160	L4	DF	163.1944	160	-13.317	DF	Ok
6	C	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-43.8811	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R7.

Tabla 27

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 7

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
7	A	16	Ag	70	L3	DA	76.5278	70	1.6342	DA	Ok
7	A	16	Ag	70	L4	DA	72.5	70	3.4819	DA	Ok
7	B	16	Bg	85	L4	DF	87.9167	85	-1.1501	DA	Not Ok
7	B	16	Bg	87	L3	DA	90.4167	86.9444	0.57523	DA	Ok
7	C	16	Cg	90	L3	DA	95.5556	90	1.5967	DA	Ok
7	C	16	Cg	95	L4	DA	97.5	95	4.063	DA	Ok
7	A	16	AB	110	L4	DA	112.5	110	2.6157	DA	Ok
7	B	16	AB	110	L4	DA	112.5	110	3.9657	DA	Ok
7	A	16	AB	115	L3	DA	118.1944	115	0.46354	DA	Ok
7	B	16	AB	115	L3	DA	118.1944	115	0.23013	DA	Ok
7	C	16	BC	130	L3	DA	133.3333	130	0.6571	DA	Ok
7	B	16	BC	130	L3	DA	133.1944	130	0.1128	DA	Ok
7	C	16	BC	137	L4	DA	139.4444	136.9444	4.5294	DA	Ok
7	B	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-3.576	DA	Not Ok
7	C	16	ABC	157	L3	DA	162.0833	156.9444	1.5366	DA	Ok
7	A	16	ABC	157	L3	DA	160.2778	156.9444	0.33222	DA	Ok
7	B	16	ABC	157	L3	DA	160.1389	156.9444	0.34798	DA	Ok
7	C	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-1.4619	DA	Not Ok
7	A	16	ABC	160	L4	DA	162.5	160	6.0846	DA	Ok
7	B	16	ABC	160	L4	DF	162.9167	160	-1.1501	DA	Not Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

R8.

Tabla 28

Resultados de la dirección por fase para cada falla para el relé 8

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
8	A	19	Ag	70	L3	DF	76.5278	70	1.6342	DF	Ok
8	A	19	Ag	70	L4	DF	72.5	70	3.4819	DF	Ok
8	B	19	Bg	85	L4	DF	87.9167	85	-1.1501	DF	Ok
8	B	19	Bg	87	L3	DF	90.4167	86.9444	0.57523	DF	Ok
8	C	19	Cg	90	L3	DF	95.5556	90	1.5967	DF	Ok
8	C	19	Cg	95	L4	DF	97.5	95	4.063	DF	Ok
8	A	19	AB	110	L4	DF	112.5	110	2.6157	DF	Ok
8	B	19	AB	110	L4	DF	112.5	110	3.9657	DF	Ok
8	A	19	AB	115	L3	DF	118.1944	115	0.46354	DF	Ok
8	B	19	AB	115	L3	DF	118.1944	115	0.23013	DF	Ok
8	B	19	BC	130	L3	DF	133.1944	130	0.1128	DF	Ok
8	C	19	BC	130	L3	DF	133.3333	130	0.6571	DF	Ok
8	B	19	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-3.576	DF	Ok
8	C	19	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	4.5294	DF	Ok
8	A	19	ABC	157	L3	DF	160.2778	156.9444	0.33222	DF	Ok
8	B	19	ABC	157	L3	DF	160.1389	156.9444	0.34798	DF	Ok
8	C	19	ABC	157	L3	DF	162.0833	156.9444	1.5366	DF	Ok
8	A	19	ABC	160	L4	DF	162.5	160	6.0846	DF	Ok
8	B	19	ABC	160	L4	DF	162.9167	160	-1.1501	DF	Ok
8	C	19	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-1.4619	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.7. Análisis de Resultados

5.7.7.1. Despeje de las fallas F1 y F2 Los relés R1, R2, R5 y R6 tienen la responsabilidad de despejar las fallas F1 y F2. Su comportamiento ante estas fallas se muestra en las tablas 29 y 30. De acuerdo con estas tablas, se puede observar que los relés R1 y R2 despejan correctamente todas las fallas en el punto F1. De manera similar, los relés R5 y R6 también despejan todas las fallas en el punto F2.

Tabla 29

Disparos de los relés R1 y R2 para la falla F1 en la línea L3

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
1	A	4	Ag	70	L3	DF	72.6389	70	1.7914	DF	Ok
1	B	4	Bg	87	L3	DF	89.5833	86.9444	45.4823	DF	Ok
1	C	4	Cg	90	L3	DF	93.4722	90	12.6374	DF	Ok
1	A	4	AB	115	L3	DF	117.6389	115	49.5634	DF	Ok
1	B	4	AB	115	L3	DF	117.6389	115	31.9031	DF	Ok
1	B	4	BC	130	L3	DF	132.6389	130	48.2914	DF	Ok
1	C	4	BC	130	L3	DF	132.6389	130	12.7781	DF	Ok
1	A	4	ABC	157	L3	DF	159.5833	156.9444	52.4178	DF	Ok
1	B	4	ABC	157	L3	DF	159.5833	156.9444	26.9129	DF	Ok
1	C	4	ABC	157	L3	DF	161.1111	156.9444	34.3894	DF	Ok
2	A	15	Ag	70	L3	DF	72.6389	70	2.6071	DF	Ok
2	B	15	Bg	87	L3	DF	89.5833	86.9444	-38.7313	DF	Ok
2	C	15	Cg	90	L3	DF	92.9167	90	0.21792	DF	Ok
2	A	15	AB	115	L3	DF	117.5	115	-38.1129	DF	Ok
2	B	15	AB	115	L3	DF	117.5	115	-24.334	DF	Ok
2	B	15	BC	130	L3	DF	132.5	130	-31.2143	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

2	C	15	BC	130	L3	DF	132.5	130	-10.2996	DF	Ok
2	A	15	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	-40.0438	DF	Ok
2	B	15	ABC	157	L3	DF	159.4444	156.9444	-21.0567	DF	Ok
2	C	15	ABC	157	L3	DF	160.1389	156.9444	-6.4516	DF	Ok

Tabla 30

Disparos de los relés R5 y R6 para la falla F2 en la línea L4

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
5	A	4	Ag	70	L4	DF	72.6389	70	1.0246	DF	Ok
5	B	4	Bg	85	L4	DF	88.75	85	21.7887	DF	Ok
5	C	4	Cg	95	L4	DF	97.6389	95	28.5703	DF	Ok
5	A	4	AB	110	L4	DF	112.6389	110	9.2643	DF	Ok
5	B	4	AB	110	L4	DF	112.6389	110	0.32618	DF	Ok
5	C	4	BC	137	L4	DF	139.5833	136.9444	23.7669	DF	Ok
5	B	4	BC	137	L4	DF	139.5833	136.9444	32.7522	DF	Ok
5	C	4	ABC	160	L4	DF	162.6389	160	37.0509	DF	Ok
5	A	4	ABC	160	L4	DF	162.6389	160	13.8356	DF	Ok
5	B	4	ABC	160	L4	DF	163.75	160	21.7903	DF	Ok
6	A	16	Ag	70	L4	DF	72.5	70	2.1592	DF	Ok
6	B	16	Bg	85	L4	DF	88.1944	85	-13.3167	DF	Ok
6	C	16	Cg	95	L4	DF	97.5	95	-35.3576	DF	Ok
6	A	16	AB	110	L4	DF	112.5	110	-4.2011	DF	Ok
6	B	16	AB	110	L4	DF	112.5	110	12.3885	DF	Ok
6	B	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-39.532	DF	Ok
6	C	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-27.2524	DF	Ok
6	A	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-16.5281	DF	Ok
6	B	16	ABC	160	L4	DF	163.1944	160	-13.317	DF	Ok
6	C	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-43.8811	DF	Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

5.7.7.2. Disparos incorrectos de los relés del sistema Si los relés R1, R2, R5 y R6 no funcionan, es esencial que los demás relés sean capaces de aislar la falla y evitar que las cargas queden sin suministro. Por lo tanto, en este índice se examinará el comportamiento inusual de todos los relés frente a las fallas F1 y F2.

5.7.7.2.1. Fallas en el punto F1 Para las fallas en el punto F1 en la línea L3, los relés R3 y R5 presentan disparos incorrectos como se ve en la tabla 31

Tabla 31

Disparos incorrectos para las fallas en punto F1 en la línea L3

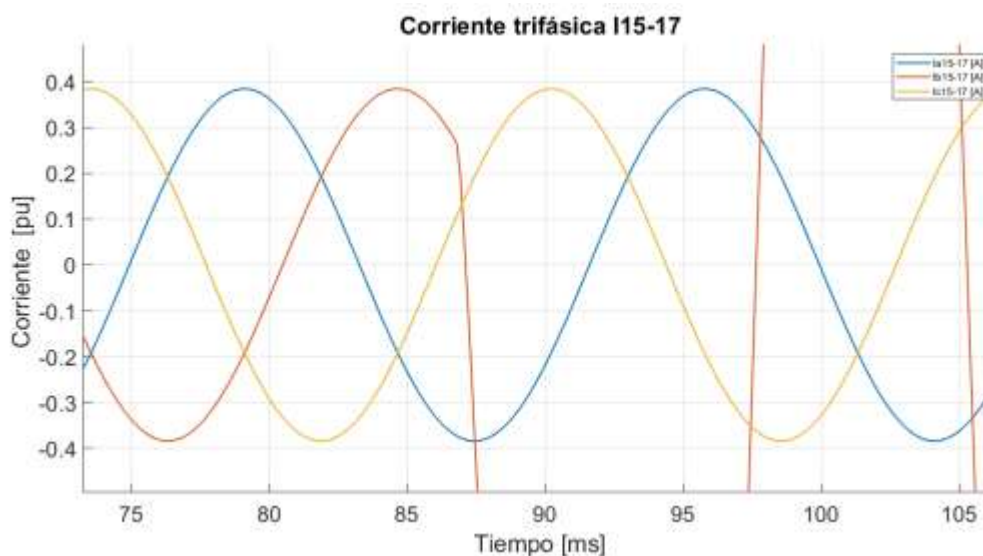
Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
3	B	15	Bg	87	L3	DF	89.4444	86.9444	-0.49592	DA	Not Ok
5	A	4	Ag	70	L3	DF	76.5278	70	24.1265	DA	Not Ok
5	B	4	Bg	87	L3	DF	90.5556	86.9444	23.0095	DA	Not Ok
5	C	4	Cg	90	L3	DF	95.8333	90	23.1892	DA	Not Ok
5	A	4	AB	115	L3	DF	118.4722	115	22.5957	DA	Not Ok
5	B	4	AB	115	L3	DF	118.4722	115	10.7004	DA	Not Ok
5	C	4	BC	130	L3	DF	133.4722	130	4.0121	DA	Not Ok
5	B	4	BC	130	L3	DF	133.4722	130	20.6892	DA	Not Ok
5	C	4	ABC	157	L3	DF	162.3611	156.9444	22.2177	DA	Not Ok
5	A	4	ABC	157	L3	DF	160.4167	156.9444	23.2124	DA	Not Ok
5	B	4	ABC	157	L3	DF	160.2778	156.9444	8.7345	DA	Not Ok

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Para la falla Bg en el punto F1, el relé R3 muestrea la corriente de la barra 15 a la 17 del modelo RTdl (ver figura 63). Según se observa en la tabla 31, el relé R3 presenta una NPF negativa y el índice F también es negativo. Esto indica que el algoritmo ha detectado erróneamente la dirección de la falla, resultando en un disparo hacia adelante cuando la dirección real es hacia atrás. Una posible causa de este error podría ser la longitud de la ventana utilizada para calcular el indicador F. En este trabajo de grado, la longitud de la ventana es de 2.40 ms, que es superior a los 2.25 ms recomendados por el documento “Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente”. Aunque el documento menciona que después de 2.25 ms se garantiza un funcionamiento correcto, en este caso se puede observar que una ventana más grande puede cambiar la dirección detectada de la falla.

Figura 63

Corriente muestreada por el relé R3 durante la falla Bg en el punto F1

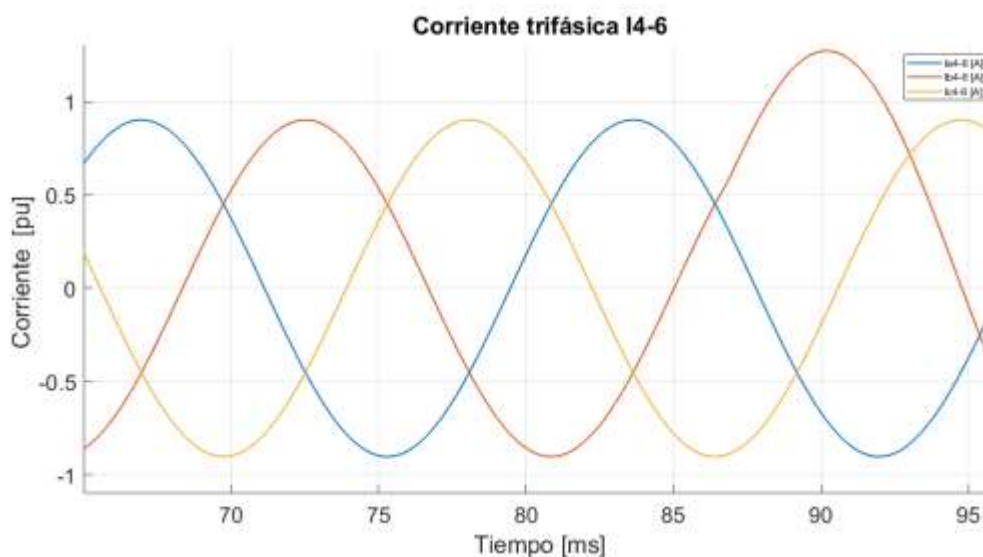


DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Para la falla Bg en el punto F1, el relé R5 muestrea la corriente de la barra 4 a la 6 del modelo RTdl (ver figura 64). Según se observa en la tabla 31, el relé R5 presenta una NPF positiva y el índice F también es positivo. Sin embargo, el algoritmo detecta incorrectamente la falla. La hipótesis propuesta en este trabajo de grado es que el modelo utilizado para simular el acoplamiento magnético (ver figura 4) crea una ruta de propagación de la falla, lo que lleva a que los relés detecten erróneamente la dirección de la falla.

Figura 64

Corriente muestreada por el relé R5 durante la falla Bg en el punto F1



5.7.7.2.2. Fallas en el punto F2 Para las fallas en el punto F2 en la línea L4, los relés R1, R2 y R7 presentan disparos incorrectos como se ve en la tabla 32.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

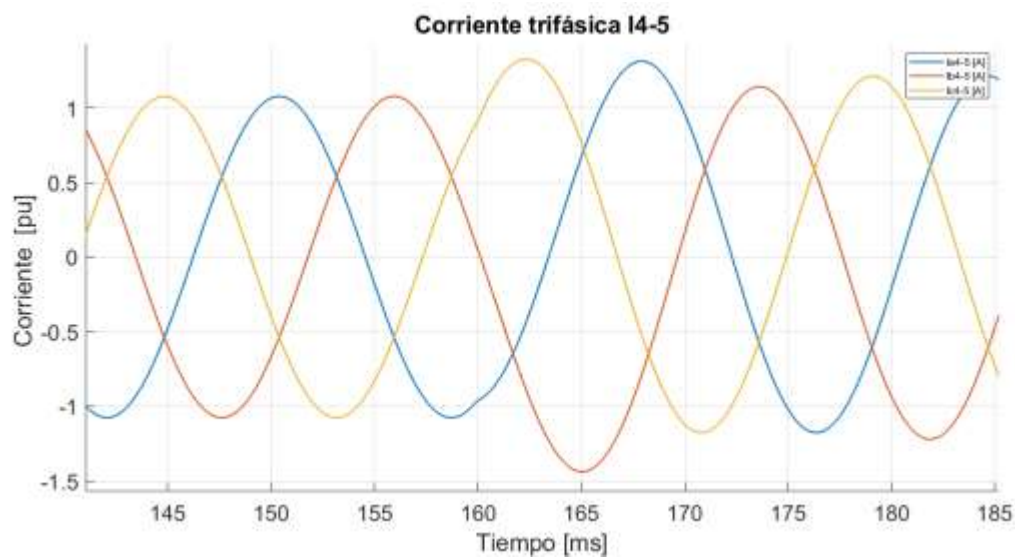
Tabla 32*Disparos incorrectos para las fallas en el punto F2 en la línea L4*

Id Relé	Fase	Barra	Tipo de falla	Inicio de falla [ms]	Línea en falla	Disparo	t(N_df) [ms]	t(Nf) [ms]	F	Dirección	Ok/Not Ok
1	A	4	Ag	70	L4	DF	76.9444	70	35.8407	DA	Not Ok
1	B	4	Bg	85	L4	DF	90.5556	85	33.4121	DA	Not Ok
1	C	4	Cg	95	L4	DF	98.6111	95	20.9955	DA	Not Ok
1	A	4	AB	110	L4	DF	117.6389	110	37.0125	DA	Not Ok
1	B	4	AB	110	L4	DF	117.6389	110	38.3911	DA	Not Ok
1	B	4	BC	137	L4	DF	140.8333	136.9444	33.0059	DA	Not Ok
1	C	4	BC	137	L4	DF	140.8333	136.9444	17.957	DA	Not Ok
1	A	4	ABC	160	L4	DF	163.8889	160	10.1316	DA	Not Ok
1	B	4	ABC	160	L4	DF	165.5556	160	33.4102	DA	Not Ok
1	C	4	ABC	160	L4	DF	163.75	160	32.9888	DA	Not Ok
2	A	15	AB	110	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	B	15	AB	110	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	B	15	BC	137	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
2	C	15	BC	137	L4	ND	Na	Na	Na	DF	Not Ok
7	B	16	Bg	85	L4	DF	87.9167	85	-1.1501	DA	Not Ok
7	B	16	BC	137	L4	DF	139.4444	136.9444	-3.576	DA	Not Ok
7	C	16	ABC	160	L4	DF	162.5	160	-1.4619	DA	Not Ok
7	B	16	ABC	160	L4	DF	162.9167	160	-1.1501	DA	Not Ok

Para todas las fallas en el punto F2, el relé R1 muestrea la corriente de la barra 4 a la 5 del modelo RTdl (ver figura 66). Según se observa en la tabla 32, el relé R1 presenta una NPF positiva y el índice F también es positivo. Sin embargo, el algoritmo ha detectado incorrectamente la dirección de la falla, resultando en un disparo hacia adelante cuando la dirección real es hacia atrás. La hipótesis para este error es similar a la propuesta para el relé R5 cuando se produce una falla en el punto F1.

Figura 65

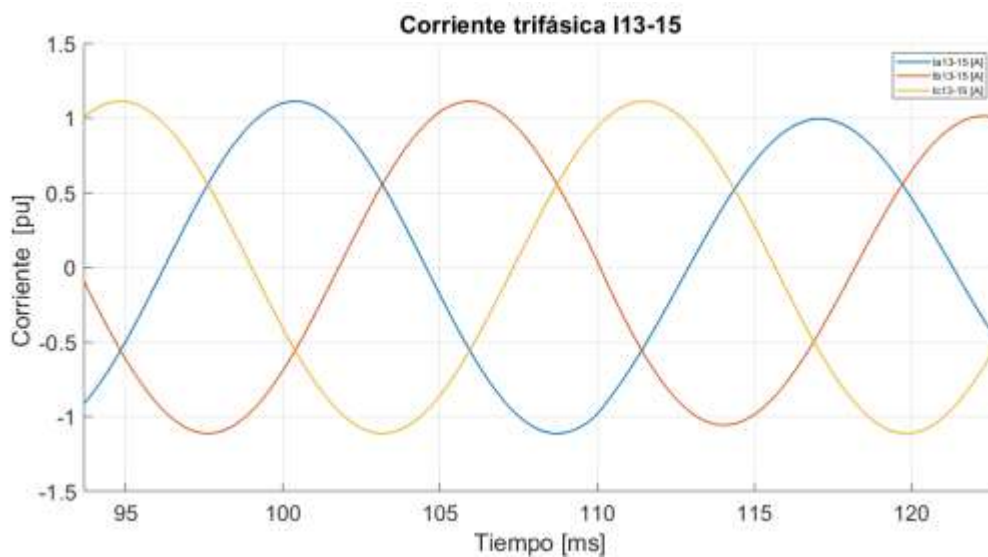
Corriente muestreada por el relé R1 durante la falla ABC en el punto F2



El relé R2 muestrea la corriente para la falla AB en el punto F2, que corresponde a la corriente que fluye de la barra 13 a la 15 en el modelo RTdl (como se muestra en la figura 67). A pesar de que esta falla no causa una deformación inmediata de la señal, el relé R2 no logra detectarla. Sin embargo, tras medio ciclo, se puede observar una caída de tensión en las fases A y B.

Figura 66

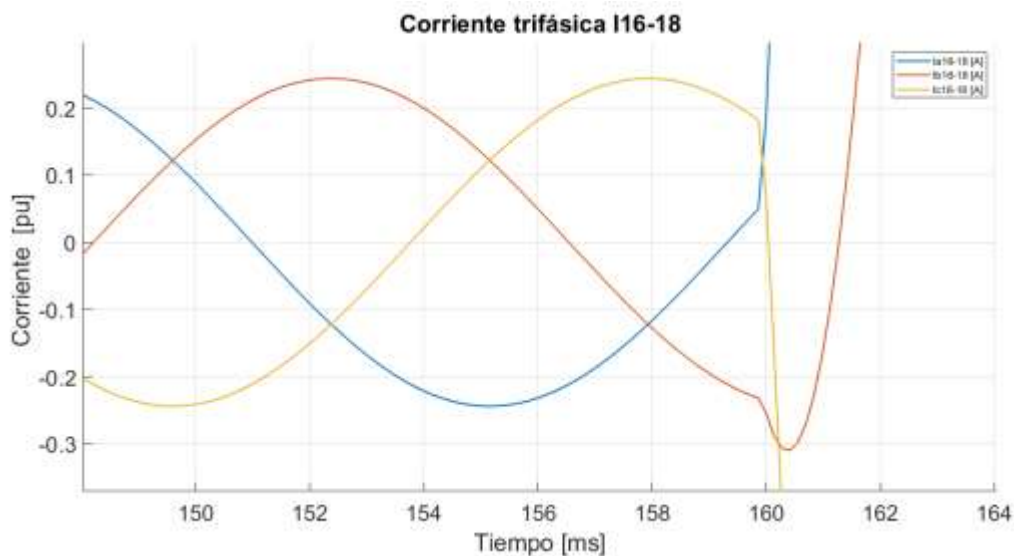
Corriente muestreada por el relé R2 durante la falla AB en el punto F2



El relé R7 muestrea la corriente para la falla ABC en el punto F2, que corresponde a la corriente que fluye de la barra 16 a la 18 en el modelo RTdl (ver figura 68). Este relé R7 muestra un Flujo Normal de la Potencia Negativo (NPF) y el índice F también presenta un signo negativo, tal como se evidencia en la tabla 29. Sin embargo, el algoritmo interpretó erróneamente la dirección de esta falla, resultando en un disparo hacia adelante. Esto es incorrecto, ya que la dirección real de las fases B y C es hacia atrás.

Figura 67

Corriente muestreada por el relé R7 durante la falla AB en el punto F2



5.7.7.3. Tasa de fallos de disparos incorrectos en los relés direccionales de sobrecorriente El 10,76% de los disparos de los relés son clasificadas de manera incorrecta por el algoritmo (tablas 31, 32) en la tabla 33 se presenta la tasa de falla de cada relé.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Tabla 33

Tasa de fallas de detecciones incorrectas de los relés de sobre corriente direccionales

ID relé	Fallas totales	Número Detecciones correctas	Detecciones incorrectas	Tasa de detecciones incorrectas
1	36	26	10	27.778%
2	36	32	4	11.112%
3	36	35	1	2.778%
4	36	36	0	0%
5	36	26	10	27.778%
6	36	36	0	0%
7	36	32	4	11.112%
8	36	36	0	0%

5.7.8. Manual Del Usuario

El manual del usuario se construyó en el Apéndice B.

6. Conclusiones

- Este artículo investigativo tuvo como fin desarrollar una herramienta software, que analiza el comportamiento de los relés de sobre corriente direccional ante fallas para sistemas eléctricos con N barras, con K pares de líneas acopladas magnéticamente y elevada penetración de renovables, todos los objetivos específicos fueron cumplidos como se evidencia en el desarrollo del trabajo de grado.
- El sistema de prueba que se simuló (figura 41) tiene 9 nodos, ahora para realizar la simulación transitoria de este modelo monofásico el número de nodos pasa a ser 31, un aumento de 345%, esto se debe a la imposibilidad de mezclar los circuitos RL o RC en un solo parámetro, como es típico en el dominio de la frecuencia que usa los números complejos, y plantea retos de cómputo para el usuario final.
- Los relés de sobre corriente direccionales en sistemas con alta penetración de renovables no tienen una tasa de confiabilidad del 100% como se observa en la tabla 33, las mayores falsas detecciones están en los relés R1 y R5 que están ubicados en la barra 5 (figura 41) y muestrean las corrientes de las dos ramas acopladas magnéticamente, por el modelo usado para simular el acoplamiento magnético (figura 4) se crea un camino de corriente entre las barras 6 y 7 del diagrama unifilar, esto implica que la falla se propague también por este camino ficticio y cree un funcionamiento anómalo en los disparos de los relés R1 y R5, como se evidencia en las tablas 31 y 32.
- El relé R2 no detento la falla AB en el punto F2 (figura 67), la detección de la falla se hace por medio de la ecuación 7, al tener más fuentes de tensión en el sistema (GD) las fuentes fijan la tensión de la barra a la que se encuentran conectada y los barrajes lejos de las fallas

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

tienen mejores perfiles de tensión y no se ven inmediatamente afectados por la falla, es necesario estudiar otra ecuación para la identificación de los fallos en sistemas con alta penetración de renovables.

- Los relés de sobre corriente direccionales diseñados para sistemas de generación centralizada no operan de manera predecible en los sistemas de alta penetración de renovables y los acoplamientos magnéticos afectan la dirección de los disparos con el modelo que se usó en este trabajo de grado.
- La longitud de la ventana para el cálculo del indicador F si afecta el indicador después de los 2.25 ms recomendados por el documento “Algoritmo Eficiente de Relé Direccional Basado en Corriente”.

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Referencias

Anderson, P. (1973). *Analysis of Faulted Power Systems*. Wiley-Interscience.

Ceballos, J. (2015). *C/C++ curso de programación*. Editorial RA-MA.

Centelsa. (s.f.). *Cables ACSR* (folleto).

https://centelsa.com/productos_centelsa/productos_colombia/CABLE_DE_ALUMINIO_DESNUDO/CABLES_DE_ALUMINIO_DESNUDO_CABLES_ACSR.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2020). Plan Energético Nacional 2020-2050.

https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf

Grainger, J. J., Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-HillEducation.

Ley 002 de 2021. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. 07 de enero del 2021. D.O. No. 51.571.

Martinez-Velasco, J. (2020). *Transient Analysis of Power Systems*. Wiley.

MathWorks. (s.f.a). *Introducción a MATLAB*. Recuperado el día 09 de julio del 2023.

https://la.mathworks.com/help/matlab/getting-started-with-matlab.html?s_tid=CRUX_lftnav

MathWorks. (s.f.b). *Aspectos fundamentales del lenguaje*. Recuperado el día 09 de julio del 2023.

<https://la.mathworks.com/help/matlab/language-fundamentals.html>

MatPower. (s.f.). *MatPower*. Recuperado el día 09 de Julio del 2023. <https://matpower.org/about/>

Moore, R. (2016). *Electromagnetic Composites Handbook*. McGraw-HillEducation.

Payam Sadegh, M., Samet, H., Ghanbari, T., Tajdinian, M. (2021). Identificación de la dirección de falla utilizando un nuevo índice basado en corriente fundado en la tasa de cambio de la

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

corriente de falla.. *Electric Power System*, Volumen (201), pp. 1-15.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107511>

Power-Grid-Model. (s.f.). *Power Grid Model*. Recuperado el día 09 de julio del 2023.

<https://power-grid-model.readthedocs.io/en/stable/>

PyPSA. (12 de mayo de 2023a). *Pandapower*. <https://pypi.org/project/pandapower/>

PyPSA. (27 de junio de 2023b). *PyPSA - Python for Power System Analysis*.

<https://pypi.org/project/pypsa/>

Python. (s.f.). *El tutorial de Python*. Recuperado el día 09 de julio del 2023.

<https://docs.python.org/es/3/tutorial/>

Samet, H., Ghanbari, T., Jarrahi, M., Jafarabadi Ashtiani, H. (2019). Algoritmo Eficiente de Relé

Direccional Basado en Corriente. *IEEE Systems*, Volumen 13(2), pp. 1262-1272.

[10.1109/JSYST.2018.2868861](https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2868861).

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

Apéndices

Apéndice A. Software para el Cálculo del Flujo de Potencia Trifásico Transitorio en los Sistemas de Potencia y Simulación del Comportamiento de los Relés de Sobre Corriente Direccionales.

A continuación, se presenta el enlace de Google Drive en el cual se pueden descargar las siguientes carpetas:

1) *Condiciones Iniciales:*

- a) Cal_ParConcen_Cond_Inici.mlx
- b) ModelMatpower.m

2) *Funciones:*

- a) Cal_i_3f_Aco.
- b) Cal_i_AcMag
- c) Cal_lhis_3f_Acople
- d) Cal_lhis_3f_AcMag
- e) i_t_3fas
- f) lhis_inicial
- g) lhistAcop
- h) Mod_G_Fall
- i) Plotl3f
- j) PlotV3f
- k) Relé3fas
- l) ReléMono
- m) TableRelé
- n) Ybarra_EMTP

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

o) Ybarra_EMTP_AcMAg

3) *Resultados_Relés*

a) *Union_data*

i) ResultadosFall.csv

b) JoinTable.mlx

c) ResultFall_11_AB_115_ms.csv

d) ResultFall_11_ABC_157_ms.csv

e) ResultFall_11_Ag_70_ms.csv

f) ResultFall_11_BC_130_ms.csv

g) ResultFall_11_BC_87_ms.csv

h) ResultFall_11_Cg1_90_ms.csv

i) ResultFall_12_AB_110_ms.csv

j) ResultFall_12_ABC_160_ms.csv

k) ResultFall_12_Ag_70_ms.csv

l) ResultFall_12_BC_137_ms.csv

m) ResultFall_12_BG_85_ms.csv

n) ResultFall_12_Cg_95_ms.csv

4) *ResultConlnic*

a) DeltaT.mat

b) i.txt

c) ImpedAtierra.mat

d) ImpedEntreLine.mat

e) Isource.txt

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

f) Muesciclo.mat

g) NPF.mat

h) V.txt

5) *Banner.txt*

6) *SP_EMTP_Compom_Relés.mlx*

Enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1fcy5q7hkUY0R7zJ1q6nAlV4mklovyLws?usp=drive_link

Apéndice B. Manual Para el Uso del Software.

A continuación, se presenta el enlace de Google Drive en el cual se puede descargar el siguiente documento:

1. ManualDeUsuario.pdf

https://drive.google.com/file/d/1U417kPkb78PwPIFtheF8WokADtt_dtKe/view?usp=drive_link

Apéndice C. Resultados del modelo de prueba.

A continuación, se presenta el enlace de Google Drive en el cual se pueden descargar el siguiente documento que contiene las tablas con los resultados del sistema de pruebas:

1. ResultadosModeloPrueba

- a. Datos Relés
- b. Table Vbarra (estado estable)
- c. Table Corriente (estado estable)
- d. Muestras de $V_{(t)}$ trifásicas
- e. Muestras de $i_{(t)}$ trifasicas

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jn-oE9twZIwoPKDp4XXuzpVc2aMrZbE6-WbpMre97NQ/edit?usp=drive_link