



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



TEMA:

ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE MEDICIONES EN LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS
CON ALGORITMOS BASADOS EN ONDAS VIAJERAS EN LA LÍNEA DE TABACUNDO - CAYAMBE DE
LA RED DE SUBTRANSMISIÓN DE EMELNORTE.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Jaen Poll Sánchez Hurtado

DIRECTOR:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra, 2025



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1759452871		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sánchez Hurtado Jaen Poll		
DIRECCIÓN:	Natabuela - Flores Vásquez y Vencedores		
EMAIL:	ipsanchezh@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0993358868

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.
AUTOR (ES):	Sánchez Hurtado Jaen Poll
FECHA DE APROBACIÓN:	24/01/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 27 días del mes de enero de 2025

EL AUTOR:

Jaen Poll Sánchez Hurtado



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, BARZOLA IZA JHONNY JAVIER en calidad de director del señor estudiante SÁNCHEZ HURTADO JAEN POLL certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....
Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**DEDICATORIAS**

A Dios, Señor Todopoderoso, por cuidarme, bendecirme, guiarme, acompañarme y permitirme despertar cada día al lado de mi familia, afrontar cada día y superar todos los desafíos de la mano junto a mis seres queridos.

A mi madre, Esmeralda Sánchez, por siempre cuidarme, esforzarte y sacrificarte para que pudiera vivir lo que en algún momento no tuviste, por tu amor incondicional, por estar presente en todo momento, por tus sacrificios, por tus valores y humildad, por enseñarme a jamás olvidar mis raíces, por creer en mí y motivarme a siempre salir adelante.

A mi padre, Milton Camacho, por estar siempre para mí y nuestra familia, por inculcarme tus principios y valores, por enseñarme a siempre obrar en bien del prójimo y por tu incansable esfuerzo, por jamás rendirte, por todos los sacrificios que realizaste para que nunca nos faltara algo, y por creer y confiar en mí.

A mi hermano, Victor Camacho, por estar a mi lado cuando más lo necesitaba, por ser mi primer amigo y mejor acompañante, ya que, junto a nuestros padres, has sido mi motivación para superarme y ser cada día una mejor persona, por ser siempre mi querido hermano.

A mis tías, tíos y familiares, quienes, junto con el apoyo incondicional de mi familia, me ayudaron a superar todo tipo de inconvenientes, por creer en mí y motivarme en cada momento.

Jaen Poll Sánchez

**AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, Señor Todopoderoso, por no desampararme, guiarme y bendecirme a lo largo de esta etapa.

Agradezco a mis padres, Esmeralda Sánchez y Milton Camacho, por darme la vida, amarme incondicionalmente y apoyarme siempre. Gracias por sus esfuerzos, valores, por estar para mí en los momentos más difíciles y por ser un ejemplo constante de firmeza y dedicación. A mi hermano, Victor Camacho, por ser mi motivación diaria, ser mi amigo y compañero de vida, y la alegría del hogar. A mis familiares, por apoyarme en todo momento, acompañarme junto a mi familia y siempre creer en mí.

Agradezco a mi director de tesis, Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc., por su apoyo, paciencia y confianza en mis habilidades. Gracias por su tiempo, esfuerzo y enseñanzas, y por ser un ejemplo tanto en valores como principios morales. De igual manera, agradezco al Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MSc., mi asesor de tesis, por su apoyo, paciencia y consejos, y su ejemplo como educador comprometido con valores y dedicación.

Agradezco a los docentes y personal de la carrera, por su tiempo, dedicación, enseñanzas, consejos, experiencias compartidas y el acompañamiento durante toda esta etapa.

Agradezco a mis amigos, quienes ahora son más que compañeros y se convirtieron en personas especiales para mí. Gracias por los momentos compartidos, las anécdotas y experiencias que guardo con cariño, su tiempo, apoyo, confianza y amistad han sido invaluableles en este camino.

Jaen Poll Sánchez



INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I	16
INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Tema.....	16
1.2 Problema de investigación	16
1.2.1 Problemática a investigar.....	16
1.2.2 Pregunta de investigación.....	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
1.4 Alcance y delimitación	18
1.5 Justificación	19
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Antecedentes	21
2.2 Sistema Eléctrico de Transmisión.....	24
2.3 Fallas eléctricas	24
2.3.1 Tipos de fallas eléctricas	24
2.3.1.1 Fallas en serie o circuito abierto.....	25
2.3.1.2 Fallas en derivación o cortocircuito.....	25
2.3.2 Causas de fallas eléctricas.....	26
2.3.3 Redes de secuencia para el análisis de fallas eléctricas.....	26
2.3.4 Configuraciones de red	27
2.3.5 Localización de fallas eléctricas.....	28
2.3.5.1 Importancia de la localización de fallas eléctricas.....	28
2.3.5.2 Errores de medición y sensibilidad	28
2.4 Técnicas de localización de fallas eléctricas.....	28
2.4.1 Método de medición de impedancia	29
2.4.2 Método de ondas viajeras.....	29
2.4.3 Método de corrientes y tensiones	30
2.4.4 Método enfocado en el conocimiento.....	30



2.4.5	Algoritmos de impedancia para la localización de fallas eléctricas de un extremo.....	31
2.4.6	Algoritmos de impedancia para la localización de fallas eléctricas de dos extremos ...	31
2.5	Ondas viajeras para la localización de fallas eléctricas	32
2.5.1	Reflexiones en líneas de transmisión.....	32
2.5.2	Diagrama de Celosía y sus aplicaciones	32
2.5.3	Métodos de localización de fallas eléctricas por algoritmos basados en ondas viajeras	34
2.5.3.1	Método de onda viajera de un solo extremo (Método Tipo A).....	34
2.5.3.2	Método de onda viajera de doble extremo (Método Tipo B)	35
2.5.3.3	Método Tipo C	35
2.5.3.4	Método Tipo D.....	35
2.5.3.5	Método Tipo E	36
2.5.3.6	Método Tipo W.....	36
CAPÍTULO III		38
MATERIALES Y MÉTODOS.....		38
3.1	Introducción	38
3.2	Metodología.....	38
3.3	Descripción del lugar de estudio	41
3.4	Indicadores Globales.....	43
3.4.1	Frecuencia Media de Interrupción (FMIK)	43
3.4.2	Tiempo Total de Interrupción (TTIK)	44
3.5	Materiales	44
3.5.1	Software DlgSILENT PowerFactory.....	45
3.5.2	Software MATLAB – Simulink.....	45
3.6	Fundamentos matemáticos	46
3.6.1	Impedancia característica de la línea.....	46
3.6.2	Velocidad de propagación.....	47
3.6.3	Impedancias de fase y secuencia en líneas aéreas	48
3.6.3.1	Distancia entre los conductores de fase para el cálculo de impedancias	48
3.6.3.2	Impedancias propias y mutuas	48
3.6.3.3	Matriz primitiva de impedancias de fase.....	49
3.6.3.4	Matriz de secuencia de impedancias.....	50
3.6.4	Capacitancia de fase y secuencia en líneas aéreas	51



3.6.4.1	Distancia entre los conductores de fase para las capacitancias.....	51
3.6.4.2	Coeficientes de potencial propios y mutuos	51
3.6.4.3	Matriz de coeficiente de potencial primitivo.....	52
3.6.4.4	Matriz de capacitancia de fase y secuencia.....	52
3.6.5	Transformada de Wavelet.....	53
3.6.6	Transformada de Clarke	54
3.6.7	Método de localización de fallas eléctricas con ondas viajeras de un solo extremo	55
3.6.8	Método de localización de fallas eléctricas con ondas viajeras de doble extremo	56
3.6.9	Errores.....	56
3.7	Representación del caso de estudio	57
3.7.1	Importación del documento de EMELNORTE	58
3.7.2	Modelado de la Torre de subtransmisión del tramo Tabacundo - Cayambe	58
3.8	Modelamiento del caso de estudio en MATLAB – Simulink	64
3.9	Código para la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos en MATLAB	65
CAPÍTULO IV		69
RESULTADOS Y ANÁLISIS		69
4.1	Evaluación del modelamiento del caso de estudio en Simulink	70
4.2	Evaluación del código para la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras en MATLAB – Simulink	72
4.3	Localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de un solo extremo.....	75
4.3.1	Localización de una falla monofásica mediante el método de un solo extremo.....	76
4.3.2	Localización de una falla bifásica mediante el método de un solo extremo	83
4.3.3	Localización de una falla trifásica mediante el método de un solo extremo.....	90
4.4	Localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de doble extremo	97
4.4.1	Localización de una falla monofásica mediante el método de doble extremo	97
4.4.2	Localización de una falla bifásica mediante el método de doble extremo.....	104
4.4.3	Localización de una falla trifásica mediante el método de doble extremo	112
4.5	Análisis de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras	119
Conclusiones		123
Recomendaciones		125



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



Referencias bibliográficas 125
Anexos 129



INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Clasificación de las fallas eléctricas en los sistemas eléctricos de transmisión. 24

Fig. 2 Fallas en serie o circuito abierto: a) circuito abierto, b) fase a tierra con circuito abierto y c) circuito abierto con falla de fase a tierra [17]..... 25

Fig. 3 Fallas en derivación: a) fase a fase, b) fase a fase a tierra, c) fase a tierra, y d) trifásica [19]..... 26

Fig. 4 Componentes simétricas para las redes de secuencia de un sistema eléctrico: a) secuencia positiva, b) secuencia negativa y c) secuencia cero [22]..... 27

Fig. 5 Propagación de ondas viajeras en ambas direcciones [9]. 32

Fig. 6 Magnitud de onda de un circuito abierto: a) esquema de circuito abierto y b) diagrama de celosía [29]..... 33

Fig. 7 Magnitud de onda de un cortocircuito: a) esquema de cortocircuito y b) diagrama de celosía [29]. 33

Fig. 8 Funcionamiento del método de un solo extremo (Tipo A) [9]..... 34

Fig. 9 Funcionamiento del Método Tipo D [9]. 36

Fig. 10 Funcionamiento del Método Tipo E [9]..... 36

Fig. 11 Metodología para el análisis de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras..... 39

Fig. 12 Localización geográfica de la línea Tabacundo - Cayambe [31]..... 42

Fig. 13 Diagrama unifilar del sistema de lazo cerrado del anillo Tabacundo. 42

Fig. 14 Identificación del Anillo de Tabacundo en DIGSILENT PowerFactory..... 58

Fig. 15 Sistema de potencia para el modelamiento de la torre de subtransmisión del tramo Tabacundo - Cayambe..... 60

Fig. 16 Estructura rural sin cable de guarda de 69kV tipo S-1 [41]..... 61

Fig. 17 Configuración trifásica de la torre de subtransmisión a 69kV..... 61

Fig. 18 Diagrama de conexión del tramo Tabacundo - Cayambe en MATLAB - Simulink..... 64

Fig. 19 Proceso lógico para la localización de fallas eléctricas mediante ondas viajeras. 67

Fig. 20 Diagrama de conexión para la medición y captura de señales del tramo Tabacundo - Cayambe..... 70

Fig. 21 Señales de voltaje pico en estado estacionario: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe..... 71

Fig. 22 Señales de voltaje RMS en estado estacionario a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe..... 72

Fig. 23 Señales adimensionales $\alpha\beta 0$ en estado estacionario: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe..... 73

Fig. 24 Señales adimensionales $\alpha\beta 0$ en estado transitorio: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe..... 74

Fig. 25 Ondas viajeras incidentes y de reflexión del sistema en estado transitorio con 1 MHz. a) falla monofásica y b) falla trifásica. 75

Fig. 26 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz. 77

Fig. 27 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 79



Fig. 28 Ondas viajeras de señal de voltaje para una falla monofásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz. 80

Fig. 29 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz. 82

Fig. 30 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz. 84

Fig. 31 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 86

Fig. 32 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 88

Fig. 33 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 89

Fig. 34 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz. 91

Fig. 35 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 93

Fig. 36 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 95

Fig. 37 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz. 96

Fig. 38 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 1 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 98

Fig. 39 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 0.5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 100

Fig. 40 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 0.5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 102

Fig. 41 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 104

Fig. 42 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 106

Fig. 43 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 108

Fig. 44 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 110

Fig. 45 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 111

Fig. 46 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 113

Fig. 47 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 115

Fig. 48 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 117

Fig. 49 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe. 118

Fig. 50 Comparación de mejores resultados por tipo de falla con el método de un extremo.... 120



Fig. 51 Comparación de mejores resultados por tipo de falla con el método de doble extremo. 121

Fig. 52 Análisis general de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con el método de un extremo..... 122

Fig. 53 Análisis general de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con el método de doble extremo..... 122



INDICE DE TABLAS

TABLA I	43
TABLA II	59
TABLA III	63
TABLA IV	63
TABLA V	64
TABLA VI	65
TABLA VII	76
TABLA VIII	78
TABLA IX	79
TABLA X	81
TABLA XI	83
TABLA XII	85
TABLA XIII	87
TABLA XIV	88
TABLA XV	90
TABLA XVI	92
TABLA XVII	94
TABLA XVIII	95
TABLA XIX	97
TABLA XX	99
TABLA XXI	101
TABLA XXII	103
TABLA XXIII	105
TABLA XXIV	107
TABLA XXV	109
TABLA XXVI	110
TABLA XXVII	112
TABLA XXVIII	114
TABLA XXIX	116
TABLA XXX	117



RESUMEN

Este trabajo analiza la sensibilidad de las mediciones generadas por algoritmos basados en ondas viajeras además de la precisión de sus resultados en la localización de fallas eléctricas en la línea Tabacundo - Cayambe de 69 kV, que forma parte de la red de subtransmisión de EMELNORTE. La investigación se centra en los métodos de un extremo y doble extremo, evaluando su desempeño ante fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, de modo que, este estudio busca reducir errores que retrasan la restauración del servicio y aumentan los costos operativos, destacando la relevancia de métodos precisos en sistemas de subtransmisión.

La metodología incluye simulaciones realizadas en DIGSILENT PowerFactory, MATLAB y Simulink, considerando frecuencias de muestreo entre 500 kHz y 10 MHz, se emplean las transformadas de Clarke y wavelet para descomponer señales trifásicas en componentes α , β y 0, facilitando la detección de transitorios y variaciones asociadas a las fallas. Los resultados muestran que frecuencias de muestreo más altas, a partir de 5 MHz, reducen significativamente los errores, logrando estimaciones con desviaciones menores al 1%, además, se observó que la resistencia a tierra afecta la amplitud de las señales, pero no el tiempo de reflexión.

El análisis incluyó la evaluación de errores absolutos y relativos, confirmando que la selección adecuada de la frecuencia de muestreo y el método influye directamente en la precisión de la localización y los hallazgos destacan la aplicabilidad de estos algoritmos para mejorar el funcionamiento de los sistemas eléctricos, sugiriendo su potencial para líneas de subtransmisión similares.

Palabras clave:

Ondas viajeras, localización de fallas, transformada de wavelet, subtransmisión, fallas eléctricas.



ABSTRACT

This thesis analyzes the sensitivity of measurements generated by algorithms based on traveling waves, as well as the accuracy of their results in locating electrical faults on the 69 kV Tabacundo - Cayambe line, which is part of EMELNORTE's subtransmission network. The research focuses on single-end and double-end methods, evaluating their performance in response to single-phase, two-phase, and three-phase faults. This study aims to reduce errors that delay service restoration and increase operating costs, emphasizing the importance of accurate methods in subtransmission systems.

The methodology includes simulations conducted in DIgSILENT PowerFactory, MATLAB, and Simulink, considering sampling frequencies ranging from 500 kHz to 10 MHz. Clarke and wavelet transforms are used to decompose three-phase signals into α , β , and 0 components, facilitating the detection of transients and variations associated with faults. The results show that higher sampling frequencies, starting from 5 MHz, significantly reduce errors, achieving estimates with deviations of less than 1%. Additionally, it was observed that ground resistance affects the amplitude of the signals but not the reflection time.

The analysis included the evaluation of absolute and relative errors, confirming that the appropriate selection of the sampling frequency and method directly influences fault location accuracy. The findings highlight the applicability of these algorithms to improve the performance of electrical systems, suggesting their potential for similar subtransmission lines.

Keywords:

Traveling waves, fault location, wavelet transform, subtransmission, electrical faults.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Tema

Estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.

1.2 Problema de investigación

1.2.1 Problemática a investigar

Las redes aéreas de transmisión y subtransmisión son cruciales en los sistemas eléctricos de potencia (SEP), pues se encargan de conectar la generación de electricidad con los sistemas de distribución finales, debido a que, el suministro de energía eléctrica es vital tanto para las actividades cotidianas como el crecimiento industrial. Sin embargo, la sensibilidad de las mediciones que arrojan los algoritmos empleados en la localización de fallas eléctricas en sistemas de subtransmisión lleva a una problemática que cuestiona la precisión del rango de búsqueda generado por el algoritmo, esto en relación con parámetros relacionados con la ubicación tales como la longitud de la línea, altura a la que se encuentra, niveles de voltaje, dificultad de acceso, funcionamiento de protecciones, cambios en las cargas, sobre corrientes, variaciones bruscas de voltaje, entre otros.

La baja sensibilidad de funcionamiento de las protecciones eléctricas en sistemas de subtransmisión afecta a la capacidad de los algoritmos para producir resultados precisos y consistentes, incluso cuando se presentan pequeñas variaciones en los datos de entrada, pues dicha sensibilidad consiste en la capacidad que tienen las protecciones tales como interruptores de falla a tierra, relés de sobre corriente, protección diferencial y protección a distancia, para detectar y responder a condiciones inusuales en un sistema eléctrico, como cortocircuitos, sobrecargas o fallas a tierra. Las protecciones deben ser lo suficientemente sensibles para detectar estas condiciones de manera rápida y segura, de modo que, puedan aislar el sistema si es necesario, pero también deben ser selectivas para evitar la desconexión innecesaria del sistema.



Las mediciones inexactas o poco sensibles de los algoritmos llevan a una localización incorrecta de la falla, lo que a su vez genera retrasos en la restauración del servicio eléctrico, costos operativos innecesarios y conflictos en la movilización de los equipos de campo encargados de reparar la falla. De esta manera, algunos de los factores que afectan la sensibilidad de las mediciones en algoritmos de localización de fallas eléctricas basados en ondas viajeras son la precisión y ubicación de los equipos de medición, la calidad de la señal, el ruido eléctrico, la impedancia del sistema y las descargas atmosféricas.

Por esto, factores significativos, como las descargas atmosféricas, dan paso a la aparición de falsas alarmas e interferencias electromagnéticas que afectan las mediciones de corriente, voltaje y otras variables eléctricas, además de causar daños a los equipos de medición, como transformadores de corriente, sensores de voltaje y otros dispositivos utilizados en la localización de fallas eléctricas, afectando así la precisión y sensibilidad de las mediciones de ubicación.

1.2.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es la sensibilidad de las mediciones generadas por los algoritmos basados en ondas viajeras en la localización de fallas eléctricas en la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar la sensibilidad de las mediciones de los algoritmos basados en ondas viajeras para la precisión de la localización de fallas eléctricas mediante simulaciones de la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir los algoritmos basados en las ondas viajeras utilizados para la localización de fallas eléctricas y la influencia en la sensibilidad de las mediciones.
2. Analizar la sensibilidad de las mediciones en los algoritmos basados en ondas viajeras para la localización de fallas eléctricas en redes de subtransmisión.



3. Evaluar la sensibilidad de las mediciones para la localización de fallas eléctricas de los algoritmos basados en ondas viajeras mediante simulaciones de la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.

1.4 Alcance y delimitación

El presente proyecto de final de carrera se centra en el estudio de la sensibilidad de las mediciones reflejadas por algoritmos basados en ondas viajeras empleados en la localización de fallas eléctricas. Para alcanzar este objetivo, se realizará simulaciones de la red de subtransmisión de EMELNORTE, de modo que, se tomará como caso de estudio la línea Tabacundo - Cayambe, la cual trabaja con valores de voltaje de 69 kV, potencia activa de 7.8 MW, potencia reactiva de 0.6 Mvar y una corriente de 0.066 kA. Además, tiene una relación de voltaje de 69/13.8 kV en sus respectivos alimentadores y la extensión de su línea es de 8 km, tomando como referencia el alimentador Cayambe.

El estudio abarcará una detallada descripción de los algoritmos y estrategias utilizadas para la localización de fallas eléctricas basados en ondas viajeras, al igual que las variables que influyen en la sensibilidad de las mediciones de ubicación generadas por dichos algoritmos, de manera que, se identificarán los algoritmos más adecuados para su aplicación basándose en el caso de estudio y se realizará una revisión bibliográfica sobre la importancia y aplicación de los algoritmos, al igual que, las variables consideradas dentro de su ejecución.

Cabe mencionar que, dentro del contexto de la localización de fallas eléctricas, el estudio de la sensibilidad permite detectar incluso las fallas más pequeñas en los sistemas eléctricos, garantizando que se puedan detectar y corregir problemas antes de que se conviertan en situaciones más graves, como cortocircuitos y suspensiones de servicio eléctrico, pues el análisis del impacto que tiene la sensibilidad en las mediciones generadas por los algoritmos permitirá a los técnicos realizar reparaciones de manera más eficiente y precisa. Esto a su vez reducirá el tiempo de inactividad del sistema eléctrico y minimizará los costos asociados con la resolución de las fallas.



El enfoque central se orientará hacia el análisis de la sensibilidad de las mediciones de los algoritmos basados en ondas viajeras emulando fallas simétricas y asimétricas dentro del caso de estudio, la descripción de escenarios sometidos a fallas y la identificación de los parámetros considerados dentro de la localización de fallas, tales como la longitud de la línea, su altura, valores de impedancia y los factores que afectan las mediciones ya sean descargas atmosféricas, saturación de transformadores de corriente, malas condiciones de las estructuras de soporte y aislamiento, así como las protecciones a distancia y de fallas a tierra.

Es necesario mencionar que, para la determinación del caso base de la red de subtransmisión de EMELNORTE se hará uso de herramientas de búsqueda como revisas científicas, repositorios y bibliotecas digitales mediante la técnica de buscadores booleanos, mientras que, para la realización de las simulaciones y la evaluación de la sensibilidad de los algoritmos basados en ondas viajeras aplicados a la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE se empleará software específicos como MATLAB y Simulink, debido a la disponibilidad de licencia académica.

1.5 Justificación

El presente trabajo de final de carrera se justifica en el estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras, pues, es un aspecto que se ha vuelto crucial en entornos regulados, donde las normativas que incitan a mejorar la disponibilidad, calidad, fiabilidad y continuidad del suministro eléctrico se convierten en una condición primordial para los actuales sistemas de control y empresas distribuidoras, donde, la necesidad de optimizar costos y minimizar interrupciones, requiere de métodos cada vez más precisos.

De esta manera, la importancia del trabajo de investigación radica en que, las mediciones inexactas o poco sensibles presentes en los algoritmos conllevan una localización incorrecta, retrasos en la restauración del servicio eléctrico, costos operativos innecesarios y conflictos en la movilización de los equipos de campo



encargados de reparar las fallas. Así, el enfoque adoptado se muestra viable debido a que, las tecnologías emergentes, como las basadas en medidas de detección de ondas viajeras, al ser insensibles a los fenómenos de frecuencia de potencia, como las oscilaciones de potencia y la saturación de los transformadores de corriente, el ángulo de inicio de la falla y los factores de origen del sistema, proporcionan una mayor precisión y rendimiento en la localización de fallas, lo que aumenta los tiempos de respuesta del personal de mantenimiento y la disponibilidad de los activos en las empresas de transmisión y distribución.

De este modo, el impacto de este estudio dentro de la sociedad será del tipo académico – científico, teniendo como beneficiarios a las empresas de transmisión y distribución de energía eléctrica, al igual que, los consumidores finales, al proporcionar un análisis que permita minimizar las interrupciones en los sistemas de subtransmisión eléctrica. La viabilidad del proyecto se sustenta en la consideración de software específicos como MATLAB y Simulink debido a la disponibilidad de licencias académicas, y el desarrollo de simulaciones de la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE para la recreación de escenarios sometidos a fallas eléctricas bajo condiciones presentes en sistemas eléctricos de potencia.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

La expansión de las redes de energía eléctrica en las últimas décadas debido a la demanda energética ha dado lugar a un aumento significativo del número de líneas aéreas utilizadas en los sistemas de transmisión y distribución de electricidad en todo el mundo [1]. Las redes aéreas de transmisión y subtransmisión son componentes fundamentales de los sistemas eléctricos, puesto que permiten conectar las plantas de generación de electricidad con los centros de distribución, garantizando un servicio esencial para la vida cotidiana y el desarrollo industrial [2].

Ciertas redes de subtransmisión están bajo la propiedad y operación de empresas de distribución eléctrica locales, como el caso de la Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. EMELNORTE. Entidad que, hasta el año 2022, según su informe de rendición de cuentas, reporta la operación de 21 líneas de subtransmisión de 69 kV que abarcan una extensión total de 291.76 km, así como 2 líneas adicionales de 34.5 kV con una longitud total de 17.59 km [3]. Estas líneas se encargan de interconectar las subestaciones de distribución y facilitar la entrega de electricidad a los consumidores finales, asegurando un suministro eléctrico continuo y seguro [4].

De esta manera, dentro de los desafíos a los que se enfrentan empresas eléctricas como EMELNORTE están las diversas fuentes de daños, las cuales enfrentan las líneas aéreas, incluyendo problemas internos, mal funcionamiento de equipos, acciones de mantenimiento y operación, vegetación, así como descargas atmosféricas [2]. Las descargas atmosféricas, como los rayos, influyen directamente en la red al generar sobretensiones y valores de cresta elevados, estos pueden superar la capacidad de aislamiento de la cadena de aisladores, resultando en la formación de un arco o flameo inverso entre el conductor de fase y la estructura [1]. Por lo cual, este tipo de eventos afecta en la continuidad del servicio eléctrico al originar interrupciones, daños a equipos



y dispositivos de control, riesgos de seguridad, costos operativos al igual que daños a las estructuras de soporte [5].

La importancia de la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos radica en que permiten minimizar las interrupciones ocasionadas, reducir costos operativos y acelerar la restauración del servicio [6]. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y nuevas tendencias, una gran cantidad de empresas todavía dependen de las notificaciones de los clientes para detectar problemas y ubicar fallas, lo que es ineficiente en áreas extensas [7]. A pesar de los intentos con técnicas no convencionales, la localización automática de fallas eléctricas es la estrategia principal para abordar problemas en sistemas eléctricos, pues se enfoca en determinar la ubicación física de una falla mediante el procesamiento de ondas de tensión y corriente, considerándose dos categorías principales: corrientes y tensiones de frecuencia fundamental y ondas viajeras [8]. De esta manera, la sensibilidad de las mediciones hace referencia a la capacidad que tienen los algoritmos para producir resultados rápidos, precisos y consistentes, incluso cuando se enfrentan a variaciones en los datos de entrada y frecuencias de muestreo.

Las técnicas de instrumentación y medida se basan en que los algoritmos de un solo extremo son comunes cuando no hay comunicación entre los extremos de la línea, pero tienen ciertos errores debidos a la resistencia de la falla y a los ángulos de impedancia; por otro lado, los algoritmos de dos extremos, que tienen información de ambos terminales, son más precisos frente a estos errores y a la falta de homogeneidad en la línea protegida [9]. Los métodos basados en ondas viajeras son más precisos; buscan correlacionar las ondas incidentes y reflejadas en una línea de transmisión, ya que, durante un fallo, los transitorios resultantes se reflejan desde el punto de falla hacia los extremos de la línea, generando una señal correlacionada con una diferencia de tiempo de viaje que revela la localización precisa del incidente [8]-[9].

Las simulaciones son una herramienta importante para investigar la sensibilidad y precisión en la localización de fallas eléctricas, de modo que las redes deben evolucionar para minimizar las interrupciones del sistema y los cortes de electricidad, al



igual que cumplir las normas y reglamentos nacionales para así disponer de elementos que permitan localizar fallas eléctricas en caso de un mal funcionamiento de las protecciones [8]-[9].

Las fallas eléctricas en las líneas aéreas se dividen en dos tipos: fallas de circuito abierto o en serie y fallas de cortocircuito o en derivación [10]. Las fallas en serie provocan picos de tensión imprevistos en una fase, lo que afecta a la capacidad de transporte de las líneas en los sistemas eléctricos; las fallas en derivación, por su parte, surgen debido a problemas de aislamiento entre conductores y se clasifican como asimétricas o simétricas [10]. Las fallas asimétricas, como las fallas monofásicas, generan frecuentes desequilibrios en la red; las fallas simétricas, en cambio, están causadas por cortocircuitos entre las tres fases del sistema y representan entre el 2% y 5% de todas las interrupciones en los sistemas eléctricos [2], [11].

La transposición de líneas aéreas es esencial en el análisis de sistemas de transmisión y subtransmisión, pues la falta de balance en la distribución de cargas entre fases requiere modelos desbalanceados, desglosados en componentes positivas, negativas y secuencia cero [12]. Por otro lado, los transformadores de corriente garantizan la seguridad y protecciones en los sistemas de generación, transmisión y distribución [13]. Sin embargo, debido a la histéresis y la no linealidad del núcleo, durante una falla, la corriente secundaria puede contener armónicos [14].

De esta manera, en [9] se plantea que, para una mejor evaluación de los resultados, es crucial una metodología que se base en el estudio de sensibilidad respecto a los parámetros más impactantes en los algoritmos de localización de fallas y sus mediciones, los cuales son susceptibles a modificaciones en sus parámetros característicos, como resistencia de falla, incertidumbre en los parámetros de la línea y tiempos de generación de onda. Mientras que, en base a los resultados presentados en [15], se determina que, en un contexto técnico, el análisis de señales de alta frecuencia permite tener una ubicación exitosa de la distancia de una falla desde ambos extremos de una línea estudiada, pues el análisis de casos de estudio conformados por sistemas de



barras de líneas cortas, medias y largas proporciona información adicional para una solución viable.

2.2 Sistema Eléctrico de Transmisión

El sistema de transmisión eléctrica es una red integrada de infraestructuras eléctricas que permite la transferencia constante y segura de energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta los centros de distribución y consumo [2], [9]. Estas infraestructuras abarcan sistemas de compensación, transformadores, dispositivos de protección, conexiones, instrumentos de medición, sistemas de control y plataformas de comunicación [12], [16].

2.3 Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas son condiciones anormales en el sistema de energía eléctrica, puesto que causan desviaciones de la tensión, corriente, frecuencia y potencia nominales, interrumpiendo así el flujo normal de energía eléctrica proveniente de los generadores hacia las cargas [8].

2.3.1 Tipos de fallas eléctricas

Las fallas eléctricas se dividen en dos categorías principales: fallas en serie o circuito abierto y fallas en derivación o cortocircuito [10]. De esta manera, en Fig. 1 se presenta la clasificación de las fallas.

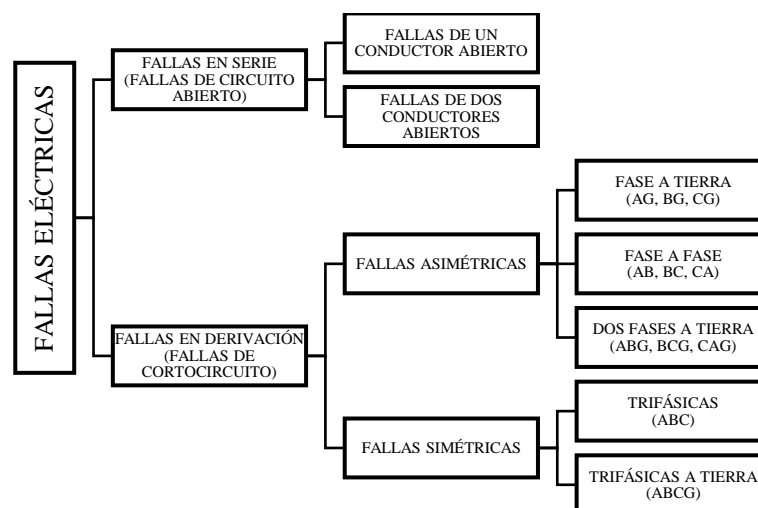


Fig. 1 Clasificación de las fallas eléctricas en los sistemas eléctricos de transmisión.



2.3.1.1 Fallas en serie o circuito abierto

Las fallas en serie se deben a varias causas, como jumpers dañados, la incapacidad de cerrar los tres polos de un disyuntor durante la operación manual o automatizada, y la presencia de un fusible quemado [17]. Durante una falla en serie, la corriente en la fase afectada se reduce debido a la pérdida de carga, no obstante, la fase no afectada sigue transportando la corriente de carga, aunque las fallas en serie no producen corrientes enormes en las fases afectadas, sí inducen un desequilibrio en el sistema eléctrico, lo que da lugar a corrientes desequilibradas [17]. En la Fig. 2 se representan los tipos de fallas en serie o circuito abierto presentes en un sistema.

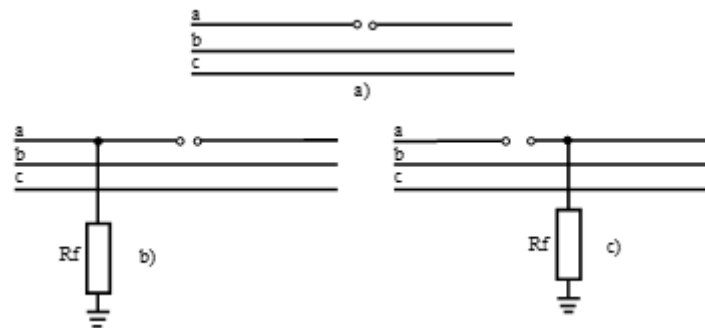


Fig. 2 Fallas en serie o circuito abierto: a) circuito abierto, b) fase a tierra con circuito abierto y c) circuito abierto con falla de fase a tierra [17].

2.3.1.2 Fallas en derivación o cortocircuito

Se producen cuando hay una conexión en derivación entre uno o más conductores de fase a tierra o entre sí, creando una condición de cortocircuito [10]. Esta conexión permite que la corriente fluya por un camino alternativo de menor impedancia, resultando en un aumento significativo de la corriente en la fase afectada y una disminución del voltaje en dicha fase [17]. Las fallas en derivación pueden ser permanentes, provocando cortes a largo plazo, o transitorias, causando breves cortes que se resuelven por sí solos una vez extinguido el arco de la falla [18].

Como se observa en la Fig. 3, existen cuatro tipos de fallas en derivación: fase a tierra, fase a fase, dos fases a tierra y trifásicas, las fallas trifásicas se denominan fallas equilibradas, mientras que los otros tipos de fallas, se les denomina fallas desequilibradas [19]-[20].

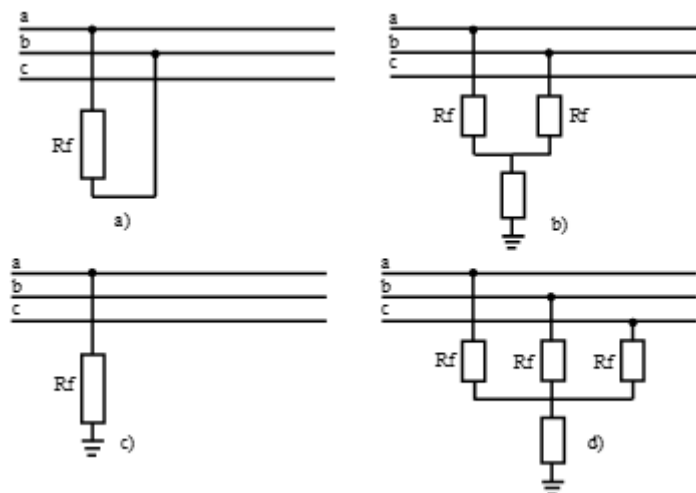


Fig. 3 Fallas en derivación: a) fase a fase, b) fase a fase a tierra, c) fase a tierra, y d) trifásica [19].

2.3.2 Causas de fallas eléctricas

Las fallas eléctricas de circuito abierto se producen como consecuencia de problemas en los acoplamientos de las líneas aéreas, eventos externos, así como por el mal funcionamiento de las tres fases de un interruptor o seccionador al abrirse o cerrarse [10]. Por otro lado, las condiciones meteorológicas son la causa más común de las fallas eléctricas de cortocircuito, de modo que, la caída de rayos, la acumulación de nieve o hielo, las lluvias intensas, los vientos o vendavales intensos y la contaminación por sal depositada en los aisladores de las líneas aéreas causan los problemas en las fallas de cortocircuito [18].

2.3.3 Redes de secuencia para el análisis de fallas eléctricas

En los sistemas eléctricos de energía, las redes de secuencia representan los componentes simétricos mediante redes de impedancia o reactancia adaptadas a cada componente (positiva, negativa y cero) [20]. Son fundamentales para comprender cómo se dispersan los flujos de corriente y las tensiones en el sistema durante las fallas o desequilibrios, además, estos componentes simétricos son necesarios para estimar las fallas asimétricas en distintos lugares de la red del sistema eléctrico [12], [21].

La red de secuencia positiva se usa en fallas simétricas, equivalente a la red de impedancia de secuencia, se caracteriza por tener un desfase de 120° en sentido horario, la secuencia negativa tiene signo opuesto en la impedancia positiva través de un sentido



antihorario, mientras que, la secuencia cero permanece internamente libre del punto de falla, con flujo de corriente derivado del voltaje y sin valor de desplazamiento [21]-[22]. En la Fig. 4 se representan las componentes de las redes de secuencia de un sistema eléctrico.

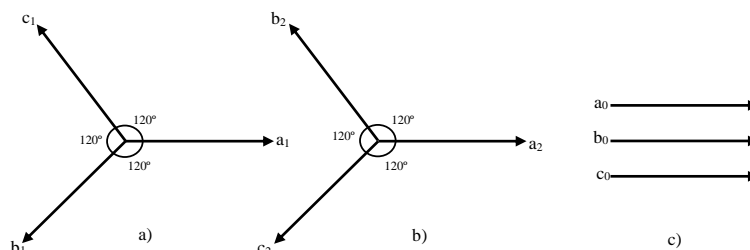


Fig. 4 Componentes simétricas para las redes de secuencia de un sistema eléctrico: a) secuencia positiva, b) secuencia negativa y c) secuencia cero [22].

2.3.4 Configuraciones de red

Es esencial considerar un método particular de localización de fallas eléctricas en estrecha relación con la configuración específica de la red eléctrica y su modelo.

- a) **Líneas aéreas de circuito único:** Utiliza un solo conjunto de conductores para transportar la energía desde el centro de generación hasta la región de consumo, son la forma más básica y sencilla de transmitir electricidad en sistemas de potencia [17].
- b) **Líneas de doble circuito:** Dos circuitos de transmisión trifásicos se conectan a la misma torre o siguen torres cercanas en la misma dirección, los niveles de tensión de los circuitos pueden ser iguales o diferentes; pero, debido a su proximidad en una línea de doble circuito, se produce un acoplamiento magnético mutuo, que es la influencia de la corriente en un circuito sobre el perfil de tensión en otro, y viceversa [17].
- c) **Líneas multiterminales y derivadas:** Tienen tres o más puntos de conexión a centros de generación, mientras que el número de terminales, ya sean tres, cuatro o más, define estas líneas [17]. Las líneas derivadas se distinguen por tener tres o más terminales de generación, cabe destacar que los ramales sólo están destinados a alimentar cargas y



terminar en redes pasivas, mientras que el resto de los terminales tienen redes activas que generan electricidad [17].

2.3.5 Localización de fallas eléctricas

La localización de fallas eléctricas es un proceso esencial en el SEP, cuyo propósito es identificar la ubicación de eventos no deseados, tanto permanentes como temporales, que interrumpen el flujo normal de energía eléctrica [8].

2.3.5.1 Importancia de la localización de fallas eléctricas

La importancia de la localización de fallas eléctricas radica en mantener la continuidad del servicio eléctrico [17]. Ante una falla permanente, la interrupción del flujo de energía causa cortes significativos, afectando a usuarios y generando sobrecargas en otras líneas, mientras que, las fallas temporales no resultan en cortes sostenidos, pero requieren una rápida identificación y acción para prevenir futuras fallas permanentes y cortes [19].

2.3.5.2 Errores de medición y sensibilidad

La ubicación precisa del punto de falla requiere una atención minuciosa hacia la minimización o eliminación de posibles errores que afecten la sensibilidad de las mediciones que genera el algoritmo, la utilización de métodos de uno y dos terminales, cuando hay canales de comunicación disponibles, surge como una estrategia para una adecuada ubicación de fallas, acompañadas por frecuencias de muestreo altas que mejoren la precisión de la distancia en un contexto absoluto y relativo [23]. Por otro lado, la eliminación de fuentes de errores específicas, como la saturación de transformadores de corriente, demanda enfoques especializados y algoritmos de compensación, que se ven influenciados por valores de resistencia a tierra altos, los cuales pueden afectar la precisión [13].

2.4 Técnicas de localización de fallas eléctricas

Según [24], la localización automática de fallas eléctricas se destaca como un enfoque ampliamente evolucionado. Por lo cual, para [25], este método se clasifica en varias categorías principales, tales como:

1. Método de corrientes y tensiones de frecuencia fundamental, principalmente en medición de impedancia.



2. Método fundamentado en el análisis del comportamiento y propiedades de las ondas viajeras.
3. Método que utiliza las señales de alta frecuencia presentes en las corrientes y tensiones originadas durante una falla.
4. Método enfocado en el conocimiento.

2.4.1 Método de medición de impedancia

Este método utiliza la ley de Ohm para calcular la ubicación de la falla, dividiendo la tensión entre la corriente para estimar la impedancia de la línea entre el punto de medición y la falla derivativa, de modo que, para la localización de fallas, se utilizan tensiones y corrientes a la misma frecuencia del sistema [8].

Los algoritmos basados en impedancias se aplican tanto en líneas de transmisión, subtransmisión como en distribución, permitiendo ubicar las fallas y estimar la distancia desde el punto de medición hasta la interrupción [8]. Sin embargo, la precisión de los algoritmos mejora significativamente si se dispone de información adicional sobre el sistema, siendo posible la implementación de métodos de dos terminales cuando hay canales de comunicación, en este caso, la compensación por el efecto reactivo se vuelve irrelevante, ofreciendo una determinación mejorada de la ubicación de la falla [9].

2.4.2 Método de ondas viajeras

El método basado en ondas viajeras es una técnica avanzada, ante una falla en una línea se produce un cambio abrupto en la tensión en el punto de incidencia, generando ondas de voltaje y corriente de alta frecuencia, conocidas como ondas viajeras, dichas ondas se propagan en ambas direcciones desde el punto de falla a una velocidad cercana a la luz, de modo que, la velocidad de propagación y el tiempo que tardan en alcanzar los terminales de medición son empleados para determinar la ubicación de la falla en el sistema [15], [24].

Cuando ocurre una falla, las ondas transitorias se desplazan en dirección a los extremos, reflejándose entre el punto de incidencia y los terminales hasta que el sistema alcanza el



estado estable posterior a la falla, ese comportamiento se representa a través de un diagrama de celosía [26].

La técnica de ondas viajeras se basa en la precisión temporal, requiriendo una referencia de tiempo estándar en ambos terminales receptores [9]. Este método destaca por su capacidad para ofrecer aproximaciones altamente precisas [26]; mientras que, su complejidad y costos asociados limitan su aplicabilidad, razón por la cual es un método adecuado para situaciones donde se requiere una alta precisión y se justifica la inversión en tecnología avanzada [24].

2.4.3 Método de corrientes y tensiones

Se centra en el análisis de señales transitorias generadas por fallas en líneas eléctricas, este enfoque supera las limitaciones de otros métodos, como la insuficiente generación de ondas viajeras en ciertos escenarios, al aprovechar el patrón de onda creado por la falla, el cual contiene información valiosa para la ubicación del evento [23].

Sin embargo, la precisión de este método enfrenta desafíos cuando la falla ocurre cerca de un voltaje de cero grados, lo que limita la generación de componentes de ondas viajeras [23]. Para mitigar este problema, el método se enfoca en la detección de transitorios de alta frecuencia, eliminando las complicaciones asociadas a la identificación de múltiples reflexiones [23].

Este método ha demostrado ser efectivo en la protección de líneas de transmisión, destacándose por su inmunidad frente a fenómenos de frecuencia de potencia, como oscilaciones y saturación en transformadores de corriente [23].

2.4.4 Método enfocado en el conocimiento.

Este método no se limita a principios tradicionales de medición y decisión, sino que aprovecha el conocimiento y la capacidad de aprendizaje automático para abordar la localización de fallas eléctricas de mejor manera [27].

En este contexto, este método se clasifica en:



- a) **Sistemas Expertos (XPS):** Imitan la toma de decisiones de un experto humano en un campo específico, incorporando reglas y conocimientos concretos del dominio para evaluar y diagnosticar posibles problemas en el sistema [8].
- b) **Redes Neuronales Artificiales (ANN):** Se utilizan para el reconocimiento de patrones en señales de alta frecuencia generadas por fallas, de modo que las ANN aprenden y se adaptan a partir de grandes conjuntos de datos, mejorando la capacidad del sistema para identificar patrones complejos y tomar decisiones más certeras [27].
- c) **Sistemas de Lógica Difusa (FLog):** Permiten manejar la incertidumbre e imprecisión en los datos, dentro del contexto de la localización de fallas es útil frente a condiciones no estacionarias o variaciones en las condiciones del sistema, aportando robustez ante escenarios inciertos [8].

2.4.5 Algoritmos de impedancia para la localización de fallas eléctricas de un extremo

Este enfoque utiliza fasores de voltaje y corriente registrados por un relé digital ubicado en un extremo de la línea durante la ocurrencia de una falla [15]. A partir de estos datos, se calcula la impedancia aparente entre el relé de protección y el punto de falla, expresada en ohmios, lo que permite determinar la distancia a la falla como un porcentaje de la longitud total de la línea [28].

Las ventajas de estos algoritmos radican en su simplicidad de implementación, la capacidad de proporcionar estimaciones de ubicación razonables y la dependencia exclusiva de datos registrados únicamente desde un terminal [28].

2.4.6 Algoritmos de impedancia para la localización de fallas eléctricas de dos extremos

Los métodos para determinar la ubicación de las fallas, que se fundamentan en la impedancia entre dos puntos, emplean la información obtenida del análisis de las señales de tensión y corriente durante la falla, calculando la impedancia vista entre el punto de monitoreo y el sitio donde ocurrió la falla [28].



No obstante, se deben considerar ajustes adicionales provenientes del extremo opuesto para corregir los errores relacionados con la reactancia generados debido a la resistencia en el punto de falla, características heterogéneas o las corrientes de carga [28].

2.5 Ondas viajeras para la localización de fallas eléctricas

Como se menciona en [24], las ondas viajeras son perturbaciones que se propagan a lo largo de líneas o cables en respuesta a fallas eléctricas, llevando así información sobre la ubicación y naturaleza de la falla. En la localización de fallas, se monitorizan las señales de voltaje y corriente para calcular el tiempo de llegada de las ondas viajeras y determinar la ubicación de la falla [15]. De esta manera, en la Fig. 5 se representa el comportamiento de propagación de ondas viajeras en un sistema eléctrico.

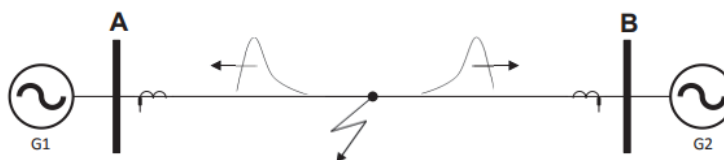


Fig. 5 Propagación de ondas viajeras en ambas direcciones [9].

2.5.1 Reflexiones en líneas de transmisión

Las reflexiones son un fenómeno que sucede cuando una onda electromagnética en propagación encuentra una interrupción o irregularidad en la línea, como podría ser un circuito abierto, un fallo de cortocircuito o una variación en la impedancia ocasionada por conexiones con transformadores, cables u otros componentes [29].

Cuando una onda viajera interactúa con una discontinuidad, la desalineación entre las características de impedancia originales de la línea y las introducidas por la nueva condición, ocasiona que parte de la energía se transmita a través de la irregularidad, mientras que, otra parte se refleja en dirección opuesta, ya que la relación entre las ondas incidentes y reflejadas se describe mediante coeficientes de reflexión y propagación, los cuales dependen de las propiedades de la línea y de la naturaleza específica de la discontinuidad [29].

2.5.2 Diagrama de Celosía y sus aplicaciones

El diagrama de celosía es una herramienta visual utilizada para analizar la propagación de ondas en SEP, especialmente en líneas de transmisión, dado que, este diagrama



facilita la comprensión de las reflexiones y propagaciones de ondas de tensión y corriente, en distintas condiciones de carga a lo largo de la línea [29].

En escenarios de circuito abierto (impedancia de carga elevada), como se muestra en la Fig. 6, las ondas incidentes se reflejan completamente en el extremo de la línea, generando ciclos de reflexión que mantiene la misma magnitud, pero con direcciones opuestas.

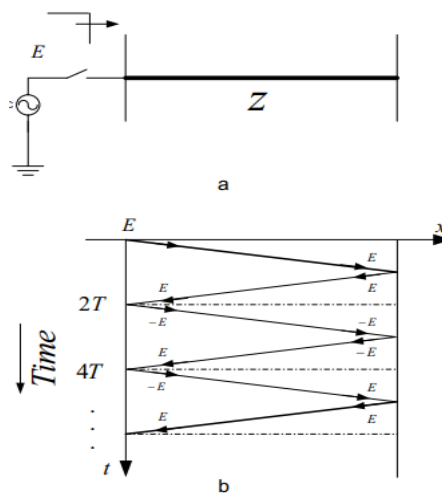


Fig. 6 Magnitud de onda de un circuito abierto: a) esquema de circuito abierto y b) diagrama de celosía [29].

Mientras que, en condiciones de cortocircuito (baja impedancia de carga), como en Fig. 7, la onda reflejada tiende a cancelarse con la onda incidente en momentos específicos, indicando un comportamiento característico de este tipo de falla.

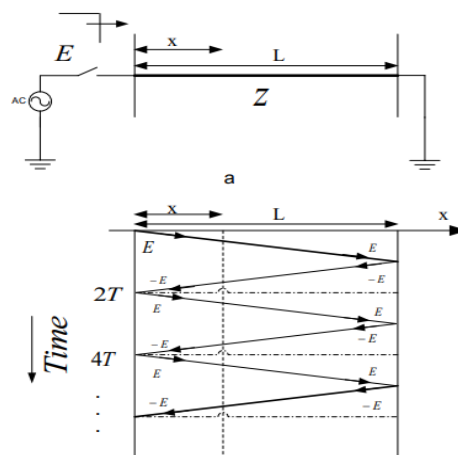


Fig. 7 Magnitud de onda de un cortocircuito: a) esquema de cortocircuito y b) diagrama de celosía [29].



A través de esta representación gráfica, con el diagrama de Celosía se identifican líneas paralelas que abarcan las posiciones y momentos de tiempo, lo que permite analizar cómo las ondas cambian su magnitud al propagarse y reflejarse dentro de la línea [29].

2.5.3 Métodos de localización de fallas eléctricas por algoritmos basados en ondas viajeras

Los métodos de ondas viajeras parten desde la consideración de uno o dos terminales y se clasifican en Tipo A, B, C, D y W, los cuales inicialmente se basaban en ondas de voltaje para identificar transitorios y localizar fallas, no obstante, con la evolución de los sistemas modernos, se considera el uso de ondas de corriente, introduciendo así el innovador Tipo E, un método que aprovecha transitorios generados por operaciones de interruptores de circuito [9], [25].

2.5.3.1 Método de onda viajera de un solo extremo (Método Tipo A)

Según lo mencionado en [8] y [25], el método de onda viajera de un solo extremo también denominado como "Método Tipo A" o "Final Único", es un enfoque de localización de fallas en líneas de transmisión que opera desde un solo extremo, este enfoque determina con precisión la ubicación de la falla al analizar los transitorios generados en el extremo de la línea. La localización se realiza mediante registros de las formas de onda de los transitorios, los cuales se evalúa la diferencia de tiempo entre el impulso inicial y el pulso reflejado desde el punto de falla [9]. De manera que, en Fig. 8, se representa el principio de funcionamiento del método de un solo extremo (Método Tipo A).

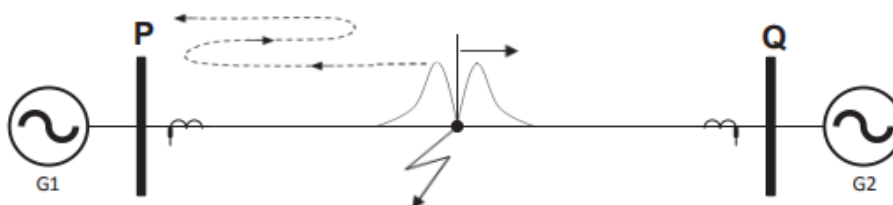


Fig. 8 Funcionamiento del método de un solo extremo (Tipo A) [9].

En este método, se asume que las impedancias efectivas en los extremos de la línea son menores que la impedancia de sobretensión, lo que provoca reflexiones significativas que se propagan a lo largo de la línea hacia el punto de falla, de manera que, el análisis



de estos transitorios en cualquiera de los extremos permite localizar con precisión la posición de la falla [30].

2.5.3.2 Método de onda viajera de doble extremo (Método Tipo B)

Según lo mencionado en [25] y [29], el método de onda viajera de doble extremo también denominado como “Método Tipo B”, aprovecha la información capturada por los relés locales y remotos presentes en un SEP. La disponibilidad de datos del relé remoto facilita el proceso de la localización de la falla, al emplear las marcas de tiempo registradas por el extremo opuesto, basándose en la llegada de las ondas, dado que, este enfoque se centra exclusivamente en la primera onda detectada en cada terminal, lo que reduce la complejidad de identificar correctamente las reflexiones generadas por la falla [8].

2.5.3.3 Método Tipo C

El Método Tipo C, comúnmente denominado “Análisis de reflexión temporal” se basa en un enfoque de extremo único y permite identificar la ubicación de fallas mediante la inyección de una señal en el sistema, similar al procedimiento empleado para identificar fallas en cables subterráneos, en los cuales se introduce un impulso desde el terminal local y la distancia a la falla se calcula evaluando el intervalo transcurrido desde que se genera el pulso hasta que se detecta la señal reflejada [25].

2.5.3.4 Método Tipo D

Según lo mencionado en [9] y [25], el Método Tipo D se destaca por su ilustración mediante el diagrama de Celosía y se basa en la energía liberada por las ondas de transitorios al alcanzar sus respectivos extremos. La energía se divide en tres formas: una parte regresa hacia la falla, otra continua a lo largo del tramo, y la última se disipa, ya sea en la barra o el extremo, ya que este fenómeno tiene lugar en ambos puntos afectados de la línea [30]. Por lo tanto, la Fig. 9 ilustra la representación del Método Tipo D mediante el diagrama de Celosía.

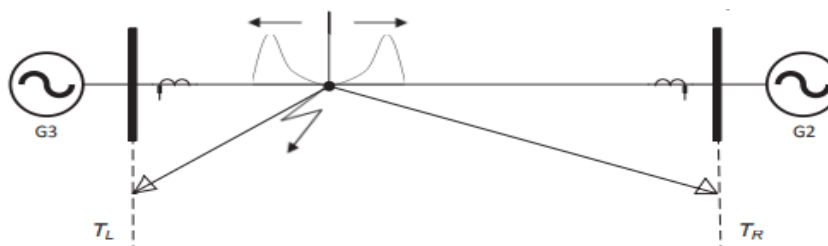


Fig. 9 Funcionamiento del Método Tipo D [9].

El Método Tipo D requiere una sincronización precisa y un mecanismo sencillo para centralizar las mediciones de ambos terminales, ya que estos elementos son clave para determinar con exactitud la ubicación de la falla [25].

2.5.3.5 Método Tipo E

Según lo indicado en [9], el Método Tipo E se caracteriza por la medición de un solo extremo, aprovechando los transitorios generados por el cierre de interruptores de potencia en líneas de transmisión abiertas o defectuosas, por lo cual, este método se distingue por su capacidad para localizar puntos de falla a través del análisis de transitorios generados por dichos interruptores. De manera que, el funcionamiento del Método Tipo E se representa en la Fig. 10.

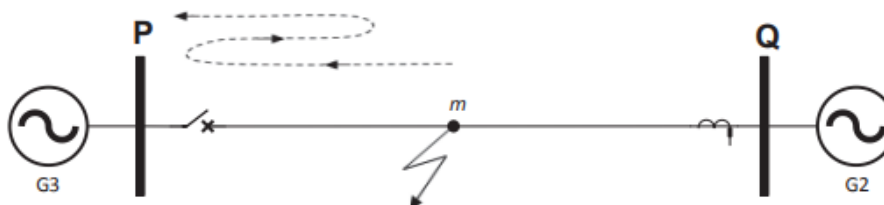


Fig. 10 Funcionamiento del Método Tipo E [9].

2.5.3.6 Método Tipo W

El Método Tipo W, también conocido como “Método de Área Amplia”, es un enfoque empleado en la ubicación de fallas en líneas de transmisión dentro de un sistema eléctrico, este método se implementa como respaldo en situaciones donde los dispositivos de localización de fallas eléctricas por ondas viajeras, ubicados en una o más subestaciones, no son capaces de identificar la forma de onda asociada con la falla, de modo que, al integrar la información de varias subestaciones, se convierte en una estrategia completa para una localización precisa [9].



Según lo mencionado en [30], el proceso inicia con la identificación de la subestación de referencia, que detectó primero la falla, seguida de las subestaciones adicionales que la registraron posteriormente, para cada una de estas, se calcula la ubicación utilizando el Método Tipo D, luego, se realiza una simulación digital para calcular el tiempo de viaje de la onda desde el punto de falla hasta las subestaciones involucradas, con lo cual, si la ubicación estimada concuerda será validada.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

El objetivo es analizar las mediciones reflejadas por algoritmos basados en ondas viajeras empleados en la localización de fallas eléctricas, para ello, se simuló la red de subtransmisión de EMELNORTE tomando como caso de estudio la línea Tabacundo - Cayambe. Las redes aéreas de transmisión y subtransmisión son un componente esencial en el funcionamiento y operación del SEP. Sin embargo, como se mencionó en el CAPÍTULO II, son componentes afectados por fallas eléctricas y, por ende, las mediciones que arrojan los algoritmos empleados en dichos sistemas conllevan a una problemática que cuestiona la precisión del rango de búsqueda generado por el algoritmo en relación con la ubicación de la falla.

Las mediciones inexactas o poco sensibles de los algoritmos implican una localización incorrecta de la falla, generando así retrasos en la restauración del servicio, coordinación de protecciones, costos operativos innecesarios y conflictos en la movilización de los equipos de campo. La baja sensibilidad de funcionamiento de las protecciones eléctricas es un factor que agrava la capacidad de los algoritmos para producir resultados incluso ante variaciones en los datos de entrada.

Este estudio incluyó la descripción de los algoritmos y estrategias utilizadas para su aplicación en el tramo analizado, para ello se investigó acerca de la importancia e implementación de los algoritmos en casos similares. Para la fundamentación teórica relacionada con el caso base, se utilizó herramientas de búsqueda como revistas científicas, repositorios y bibliotecas digitales, además, para la realización de las simulaciones, se emplearon softwares específicos como DIgSILENT PowerFactory, MATLAB y Simulink.

3.2 Metodología

La metodología que se adoptó para el análisis de las mediciones arrojadas por algoritmos basados en ondas viajeras en SEP se esquematiza en la Fig. 11,



representando así la secuencia que se optó para el desarrollo del trabajo de grado de “Estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE”.

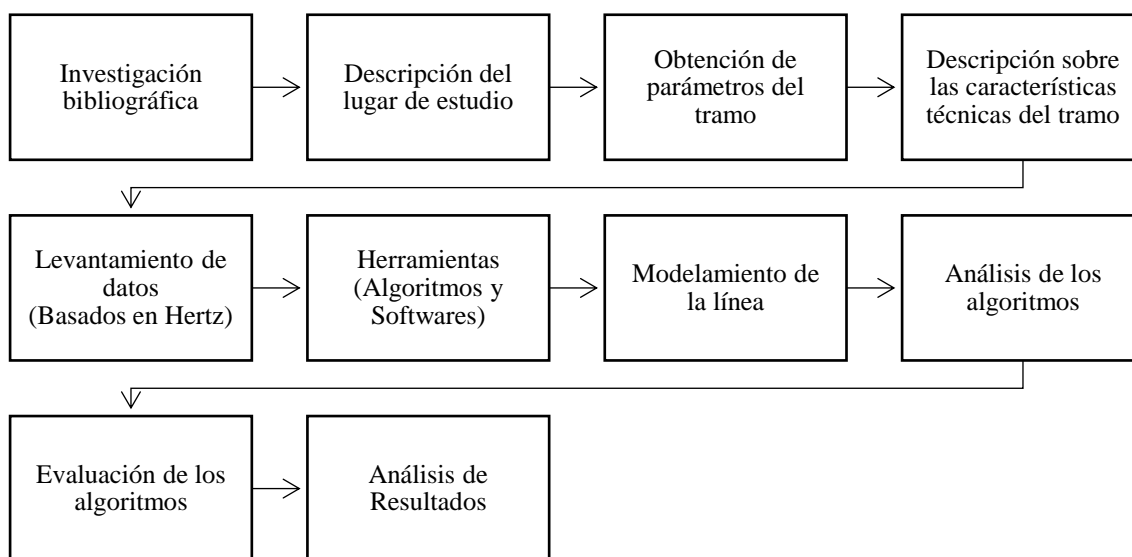


Fig. 11 Metodología para el análisis de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras.

- a) **Investigación bibliográfica:** Esta etapa abordada en el CAPÍTULO II, incluyó la recopilación de información sobre la importancia del análisis de las mediciones en los algoritmos empleados para la localización de fallas eléctricas. Además, se describió los algoritmos basados en ondas viajeras que influyen en dichas mediciones.
- b) **Descripción del lugar de estudio:** Se detallaron las principales características del lugar, como su ubicación geográfica y la representación técnica del diagrama unifilar correspondiente.
- c) **Obtención de parámetros del tramo:** Se utilizó DIgSILENT PowerFactory con la finalidad de identificar las características del tramo Tabacundo - Cayambe, además de revisar documentación oficial publicada por EMELNORTE.



- d) **Descripción sobre las características técnicas del tramo:** Se presentaron características técnicas mediante tablas, lo cual facilitó la identificación de información relevante para su integración a los softwares específicos.
- e) **Levantamiento de datos (Basados en Hertz):** Se identificaron los datos necesarios para el modelado de la línea, incluyendo el diseño de la torre y el cálculo de la parte mutua, considerando las altas frecuencias de muestreo de las ondas viajeras.
- f) **Herramientas (Algoritmos y Softwares):** Se emplearon algoritmos específicos en conjunto con los softwares DIgSILENT PowerFactory y MATLAB, para verificar los resultados del levantamiento de datos manuales en relación con el diseño de la torre.
- g) **Modelamiento de la línea:** Se diseñó la línea Tabacundo - Cayambe utilizando un esquema en el software Simulink.
- h) **Análisis de los algoritmos:** Se llevó a cabo un análisis de las mediciones proporcionadas por los algoritmos empleados.
- i) **Evaluación de los algoritmos:** Se evaluaron los resultados obtenidos del análisis para determinar la precisión de los algoritmos en la localización de fallas eléctricas.
- j) **Análisis de los resultados:** Se analizaron los resultados del trabajo de grado de “Estudio de la sensibilidad de mediciones en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE”.

En base a la metodología, el trabajo se llevó a cabo siguiendo una investigación del tipo cuantitativo, con enfoques explicativos y descriptivos, abordando de manera integral el estudio de las mediciones generadas por algoritmos basados en ondas viajeras en la localización de fallas eléctricas. Esto implicó el uso del método analítico para la revisión de datos numéricos junto con la contextualización de conceptos relacionados, además, con los principios explicativos y descriptivos se logró comprender cómo



conceptos relacionados con protecciones y fallas eléctricas influyen sobre la ubicación generada por los algoritmos.

A lo largo del trabajo se emplearon métodos científicos experimentales de modelado y simulación, diseñando así simulaciones controladas para evaluar la ubicación generada por los algoritmos y su interpretación, considerando la medición de variables y la comparación de resultados. También se realizaron análisis teóricos y matemáticos para comprender el principio de funcionamiento de las fallas eléctricas, su comportamiento en diferentes condiciones y el uso de software para analizar datos interpretativos sobre su localización.

3.3 Descripción del lugar de estudio

La Empresa Eléctrica Regional Norte S.A. "EMELNORTE" es una entidad estatal encargada de la distribución y comercialización de electricidad en el norte del Ecuador [31]. El área de concesión abarca las provincias de Carchi e Imbabura, así como los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo en Pichincha, Sucumbíos en la misma provincia, y los sectores rurales de Alto Tambo y Durango en Esmeraldas [31].

El trabajo se llevó a cabo considerando como caso de estudio a la línea Tabacundo - Cayambe, la cual se localiza en la provincia de Pichincha y forma parte de un sistema de lazo cerrado. Las coordenadas geográficas de los puntos inicial como final del tramo se muestran en la Fig. 12, siendo $0^{\circ}03'19.8''N$ $78^{\circ}13'39.0''W$ para la subestación Tabacundo, denominada también como (Cajas) que se encuentra bajo la concesión de Transelectric y $0^{\circ}03'00.9''N$ $78^{\circ}08'47.4''W$ para la Subestación Cayambe que opera bajo la concesión de EMELNORTE.

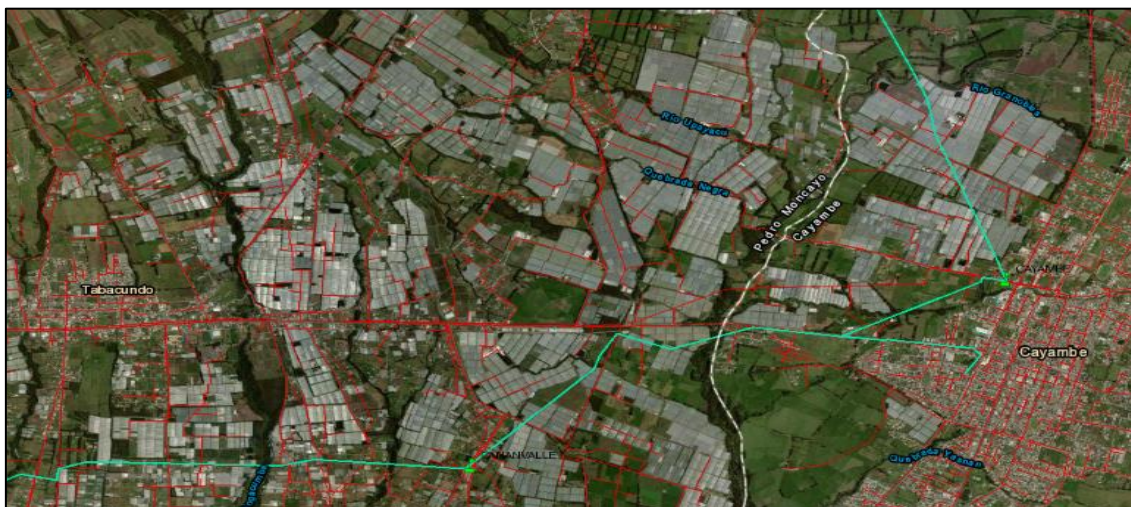


Fig. 12 Localización geográfica de la línea Tabacundo - Cayambe [32].

El diagrama unifilar del anillo Tabacundo se presenta en la Fig. 13, mientras que el esquema completo está en Anexo A.

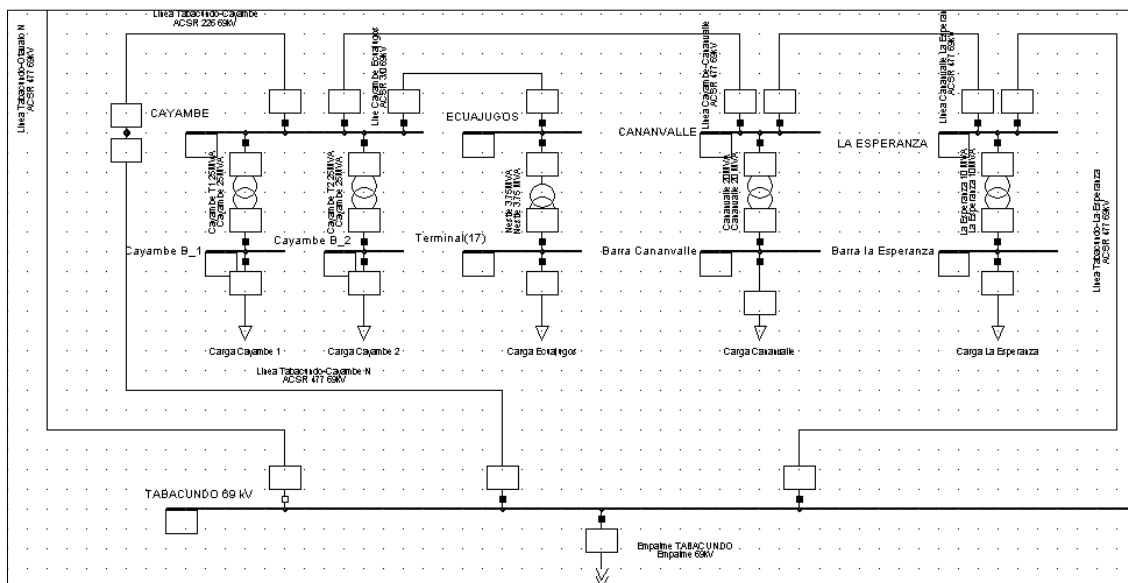


Fig. 13 Diagrama unifilar del sistema de lazo cerrado del anillo Tabacundo.

El diagrama unifilar del sistema en lazo cerrado del anillo Tabacundo incluye las subestaciones Cayambe, Cananvalle, La Esperanza y Tabacundo (Cajas). En TABLA I, se detalla la descripción técnica de la línea Tabacundo - Cayambe.



TABLA I

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL TRAMO TABACUNDO - CAYAMBE

Parámetro	Valor
Longitud de la línea	20.4 km
Altura de línea	18 m
Tipo de línea	Trifásica, un solo circuito
Cable de guarda	No
Tipo de conductor	ACSR
Código de conductor	Hawk
Calibre	CMC 477
Voltaje nominal	69 kV
Corriente nominal	670 A
Capacidad de conducción	661(670) A
Corriente de cortocircuito	36.3 kA
Potencia activa	7.8 MW
Potencia reactiva	0.6 Mvar

De acuerdo con lo indicado en [33], la subestación de Cayambe tiene dos transformadores de potencia, cada uno de 25 MVA y Tabacundo (Cajas) estará equipada con uno de 167 MVA, en cuanto a la relación de voltaje operaran a 69/13.8 kV y 230/69 kV, respectivamente.

3.4 Indicadores Globales

Los indicadores globales son medidas utilizadas para evaluar el rendimiento del sistema eléctrico en general, incluyendo aspectos como generación, transmisión, distribución y consumo de energía, lo que permite identificar áreas de mejora y tomar decisiones estratégicas [34]. De esta manera, los indicadores globales considerados son: FMIK, así como TTIK.

3.4.1 Frecuencia Media de Interrupción (FMIK)

Este indicador refleja cuantas veces, en promedio, se interrumpe el servicio por cada unidad de capacidad nominal instalada (kVA), dentro de un periodo determinado, el cual puede abarcar un mes o un año [35].



Por lo cual, es una medida genérica que se puede aplicar a cualquier tipo de red, incluidas las de subtransmisión; sin embargo, debe realizarse con cuidado, ya que las interrupciones a altos niveles de voltaje llegan a tener un impacto significativo en la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, por ende, afectan a gran cantidad de clientes y tienen mayor repercusión económica [36].

3.4.2 Tiempo Total de Interrupción (TTIK)

Este indicador se expresa en horas y refleja cuantas veces, en promedio, cada unidad de capacidad nominal instalada (kVA) estuvo fuera de funcionamiento, dentro de un periodo determinado, el cual puede abarcar un mes o un año [35].

El TTIK al igual que el FMIK, es aplicable a las líneas de subtransmisión y sirve para evaluar la confiabilidad del sistema eléctrico, por lo cual es esencial analizar tanto las causas, duración y origen de las interrupciones, para así comprender de mejor manera su impacto en la continuidad del suministro eléctrico.

3.5 Materiales

Para el desarrollo del presente proyecto de fin de carrera, se utilizó como referencia un documento perteneciente a EMELNORTE titulado como “Emelnorte Ext 2020.pfd”. Este documento contaba con información necesaria para el cumplimiento de los objetivos del trabajo, incluyendo detalles del sistema de conexión del anillo Tabacundo, impedancias de secuencia, valores de voltaje, corriente y diagramas de conexión.

De igual forma, se emplearon softwares específicos como DIgSILENT PowerFactory, MATLAB y la extensión Simulink, que permitieron comparar los valores simulados con los datos reales del documento base, estas herramientas también facilitaron actividades como el modelamiento de la línea de subtransmisión, al igual que la simulación y ejecución de los algoritmos empleados para la localización de fallas eléctricas basados en ondas viajeras.

Seguidamente, se detalla los softwares específicos y las aplicaciones del documento base empleadas para llevar a cabo el estudio de la sensibilidad de mediciones en la



localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE.

3.5.1 Software DIgSILENT PowerFactory

Es un programa especializado en el análisis de redes eléctricas, desde la generación hasta la distribución, así como en el diseño y control de instalaciones industriales y sistemas de energía renovables [37].

La primera parte de la simulación del caso de estudio de la línea Tabacundo - Cayambe se llevó a cabo utilizando el software DIgSILENT PowerFactory, mediante este programa, se creó un modelo de una torre de subtransmisión a 69kV típica de la zona examinada, ingresando las características geométricas del conductor y valores nominales de la línea. Este enfoque permitió obtener los parámetros necesarios para caracterizar las redes de secuencia del sistema eléctrico analizado y dio paso al desarrollo del equivalente de red necesario para el sistema.

3.5.2 Software MATLAB – Simulink

MATLAB es una plataforma interactiva utilizada para la programación, diseño y análisis de cálculos numéricos avanzados, permite la manipulación de matrices, la visualización de datos y el desarrollo de algoritmos mediante una serie de iteraciones hasta obtener e interpretar los resultados, representándolos a través de sus distintas herramientas y extensiones [38].

Simulink es una herramienta gráfica de MATLAB que facilita la descripción de sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques, permitiendo el análisis y desarrollo de tecnologías eléctricas, abarcando desde el control de motores eléctricos hasta el modelado de sistemas de potencia, incluyendo algoritmos de control de redes [38].

El desarrollo de las actividades con el software MATLAB, consistió en emplear un algoritmo que permitió comprobar los resultados obtenidos de la matriz de impedancias de secuencia y capacitancia del tramo Tabacundo - Cayambe, comparando los valores reflejados en el modelamiento de la torre de subtransmisión con la base de datos de EMELNORTE. Además, se modeló la línea del caso de estudio en Simulink, ingresando los datos y parámetros característicos de los elementos del tramo obtenidos con



DIgSILENT PowerFactory, incluyendo el uso de bloques de medición, llamada de funciones y ejecución de fallas.

Dicho esto, también se diseñó un algoritmo en MATLAB que en conjunto con la simulación del caso de estudio y la obtención de variables de Simulink, determine la posición más cercana al evento, considerando las características y parámetros del tramo, de modo que, el proceso se ejecuta en base al comportamiento de las ondas viajeras en conjunto con la conexión entre ambas herramientas.

3.6 Fundamentos matemáticos

Las ondas viajeras surgen como respuesta a las perturbaciones, tales como descargas atmosféricas, fallas entre líneas, y la apertura o cierre de interruptores, lo que resulta en cambios abruptos en los niveles de voltaje y corriente del SEP.

A continuación, se presentan las ecuaciones que permitieron llevar a cabo la simulación y el análisis de los algoritmos basados en dichas perturbaciones, proporcionando el fundamento matemático necesario para la aplicación de los materiales y métodos previamente descritos.

3.6.1 Impedancia característica de la línea

Según lo presentado en [8], la impedancia característica de la línea (Z_C), corresponde a la relación entre las ondas viajeras de corriente y voltaje que se propagan a lo largo de una línea, contando con un valor ideal entre 300Ω y 400Ω . Por lo cual, tomando en cuenta que es un parámetro inherente a la longitud total de la línea y considerando las pérdidas presentes en la misma, se representa mediante (1).

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

Donde:

Z_C : impedancia característica de la línea en ohmios (Ω).

R : resistencia de la línea por unidad de longitud en ohmios por metro (Ω/m).

L : inductancia de la línea por unidad de longitud en Henrios por metro (H/m).



G : conductancia de la línea por unidad de longitud en Siemens por metro (S/m).

C : capacitancia de la línea por unidad de longitud en Faradios por metro (F/m).

ω : frecuencia angular de la señal, definida como $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia en Hertz (Hz).

j : unidad imaginaria ($j = \sqrt{-1}$).

Así pues, de acuerdo con [8] la ecuación de la impedancia característica de la línea sin considerar las pérdidas y evaluando un sistema bajo un comportamiento ideal, es decir, asumiendo que R y G son cero, se representa a través de (2).

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Donde:

Z_c : impedancia característica de la línea en ohmios (Ω).

L : inductancia de la línea por unidad de longitud en Henrios por metro (H/m).

C : capacitancia de la línea por unidad de longitud en Faradios por metro (F/m).

3.6.2 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es aproximadamente el 98% de la velocidad de la luz y depende de las propiedades eléctricas de la línea, tanto inductivas como capacitivas, además corresponde al producto de la longitud de onda (λ) por la frecuencia del sistema [8]. Según lo mencionado en [7], la longitud de onda es la distancia entre dos puntos de una línea en la cual una onda cuenta con una reflexión.

Dicho esto, el valor de la velocidad de propagación cuando no se considera las pérdidas de la línea se calcula mediante (3).

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

Donde:



v_p : velocidad de propagación de ondas viajeras en metros por segundo (m/s).

3.6.3 Impedancias de fase y secuencia en líneas aéreas

Según lo mencionado en [39], calcular los valores de las impedancias de fase y secuencia en líneas aéreas permite analizar el comportamiento de los SEP, puesto que las impedancias de fase hacen referencia a la relación entre valores de resistencia y reactancia que tienen los conductores de la línea, mientras que las impedancias de secuencia permiten interpretar el comportamiento que tiene el sistema tanto en condiciones de equilibrio como desequilibrio.

3.6.3.1 Distancia entre los conductores de fase para el cálculo de impedancias

De acuerdo con lo señalado en [39], se recomienda utilizar el Sistema Inglés de Unidades (Imperial) para las distancias entre las posiciones de los conductores debido a la aplicabilidad de las ecuaciones, para posteriormente realizar la conversión al sistema de unidades necesario.

Para obtener los valores de impedancia de fase y secuencia de una línea se considera la distancia presente entre cada uno de los conductores, la cual se obtiene mediante (4).

$$D_{ij} = |d_i - d_j| \quad (4)$$

Donde:

D_{ij} : distancia entre los conductores de fase en pies (ft).

d_i : distancia del conductor i en pies (ft).

d_j : distancia del conductor j en pies (ft).

3.6.3.2 Impedancias propias y mutuas

La impedancia propia representa la impedancia individual de un conductor y su comportamiento en el sistema en relación consigo mismo, mientras que la impedancia mutua hace referencia a la impedancia presente entre dos conductores del mismo sistema y la influencia que mantienen entre ellos [39].



Para esto, empleando las ecuaciones de Carson modificadas, se obtienen las impedancias propias y mutuas de los conductores mediante (5) y (6) respectivamente.

$$Z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \left(\frac{1}{GMR_i} \right) + 7.93402 \right) \quad (5)$$

Donde:

Z_{ii} : impedancia propia del conductor i en ohmios por milla (Ω /milla).

r_i : resistencia del conductor i en ohmios por milla (Ω /milla).

GMR_i : radio medio geométrico del conductor i en pies (ft).

$$Z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left(\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7.93402 \right) \quad (6)$$

Donde:

Z_{ij} : impedancia mutua entre los conductores en ohmios por milla (Ω /milla).

D_{ij} : distancia entre los conductores en pies (ft).

Según lo mencionado en [39], estas expresiones simplifican la obtención de los términos, al considerar el acoplamiento magnético entre conductores y la influencia del retorno a tierra.

3.6.3.3 Matriz primitiva de impedancias de fase

La matriz primitiva describe las impedancias propias y mutuas, donde la resistencia y reactancia inductiva se ven afectadas por la distancia entre los conductores y las propiedades geométricas de la línea [39], definiéndose mediante (7).

$$Z_{primitiva} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde:

$Z_{primitiva}$: matriz primitiva de impedancias de fase en ohmios por milla (Ω /milla).



3.6.3.4 Matriz de secuencia de impedancias

Describe las impedancias de secuencia cero, positiva y negativa presentes en la diagonal principal, de modo que, permite interpretar el comportamiento de los SEP en condiciones de fallas eléctricas [39]. La matriz se obtiene mediante (8):

$$[Z_{012}] = [A_s]^{-1} \times [Z_{primitiva}] \times [A_s] \quad (8)$$

Donde:

Z_{012} : matriz de impedancias de secuencia en ohmios por milla (Ω /milla)

A_s : matriz para el análisis de sistemas trifásicos para la transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.

A_s^{-1} : operación inversa de la matriz de transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.

Para transformar las impedancias de fase en redes de secuencia, se considera la matriz de transformación de cantidades de fase a secuencia definida mediante (9).

$$A_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & as^2 & as \\ 1 & as & as^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

A_s : matriz para el análisis de sistemas trifásicos para la transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.

as : raíz cubica de la unidad con un ángulo de 120° ($1 \angle 120^\circ$).

Además, la operación inversa de la matriz de transformación se obtiene a través de (10), tomando en consideración el cambio en la ubicación de as .

$$[A_s]^{-1} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & as & as^2 \\ 1 & as^2 & as \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde:

A_s^{-1} : operación inversa de la matriz de transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.



3.6.4 Capacitancia de fase y secuencia en líneas aéreas

Facilita el análisis y modelado del comportamiento de una línea aérea, permitiendo evaluar su estabilidad, flujo de potencia, pérdidas, transitorios y picos de voltaje presentes en su operación [39].

3.6.4.1 Distancia entre los conductores de fase para las capacitancias

Para determinar los valores de capacitancia de fase y secuencia de una línea aérea, se considera la distancia entre cada conductor, esto según (11).

$$D_{ij} = |d_i - d_j^*| \quad (11)$$

Donde:

D_{ij} : distancia entre los conductores de fase en pies (ft).

d_i : distancia del conductor i en pies (ft).

d_j^* : conjugado de la distancia del conductor j en pies (ft).

Al igual que, en el cálculo de las impedancias de fase y secuencia en líneas aéreas, también se utiliza el Sistema Imperial y, posteriormente, se realiza la conversión al sistema de unidades requerido.

3.6.4.2 Coeficientes de potencial propios y mutuos

El coeficiente propio representa el potencial individual de un conductor y su comportamiento al generar un campo eléctrico en relación con su propia carga, por otro lado, el coeficiente mutuo hace referencia a la influencia del campo eléctrico de un conductor en el potencial del más cercano [39]. De esta manera, se determinan mediante (12), así como de (13).

$$P_{ii} = 11.17689 \cdot \ln \left(\frac{S_{ii}}{RD_i} \right) \quad (12)$$

Donde:

P_{ii} : coeficiente de potencial propio del conductor i en millas por microfaradios (milla/ μ F).



S_{ii} : distancia desde el conductor i hasta su imagen i' en pies (ft).

RD_i : radio del conductor i en pies (ft).

$$P_{ij} = 11.17689 \cdot \ln \left(\frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (13)$$

Donde:

P_{ij} : coeficiente de potencial mutuo entre los conductores i y j en millas por microfaradios (milla/ μ F).

S_{ij} : distancia desde el conductor i hasta la imagen del conductor j en pies (ft).

D_{ij} : distancia desde el conductor i hasta el conductor j en pies (ft).

3.6.4.3 Matriz de coeficiente de potencial primitivo

Es un arreglo que describe los coeficientes de potencial propios y mutuos, empleados para calcular la capacitancia de fase y secuencia de una línea aérea, y se obtiene mediante (14).

$$P_{primitiva} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Donde:

$P_{primitiva}$: matriz de coeficiente de potencial primitivo en millas por microfaradios (milla/ μ F).

3.6.4.4 Matriz de capacitancia de fase y secuencia

De acuerdo con lo presentado en [39], y tomando en cuenta el número de conductores de la línea aérea, se define mediante (15):

$$P_{primitiva} = P_{abc} \quad (15)$$

Donde:

P_{abc} : matriz de coeficientes de potencial de fase en millas por microfaradios (milla/ μ F).



Por lo tanto, la matriz de capacitancia de fase representa la capacitancia entre las distintas fases de la línea, mientras que la matriz de capacitancia de secuencia describe la capacitancia de cada línea en términos de componentes que son útiles para el análisis de fallas y sistemas asimétricos [39]. Así, se define la matriz de capacitancia de secuencia mediante (16), tomando en consideración que, el cálculo de las matrices A_s y A_s^{-1} , es similar a la aplicación descrita en la matriz de impedancias de secuencia.

$$[C_{012}] = [A_s]^{-1} \times [P_{primitiva}] \times [A_s] \quad (16)$$

Donde:

C_{012} : matriz de capacitancia de secuencia en millas por microfaradios (milla/ μ F).

A_s : matriz para el análisis de sistemas trifásicos para la transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.

A_s^{-1} : operación inversa de la matriz de transformación de cantidades de fase a secuencia positiva.

3.6.5 Transformada de Wavelet

La transformada de wavelet es una herramienta que permite descomponer señales en componentes de tiempo y frecuencia de manera simultánea, lo que resulta crítico para el análisis de transitorios y variaciones bruscas, pues a través de la función base, “wavelet madre”, la señal estudiada se descompone en coeficientes de aproximación, que son los encargados de capturar la información de baja frecuencia, y en coeficientes de detalle, que resaltan variaciones rápidas y discontinuidades, facilitando así la identificación de picos específicos en diferentes niveles de descomposición [15].

De esta manera, la transformada de wavelet se define a través de (17), mientras que la wavelet madre escalada y desplazada se representa mediante (18).

$$\Psi_f(s, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi_s(t) dt \quad (17)$$

Donde:

$\Psi_f(s, t)$: transformada de wavelet de la señal $f(t)$ en la escala s y en el tiempo t , expresada en unidades de $f(t)$.



$f(t)$: señal original.

Ψ_s : wavelet madre utilizada para la descomposición de la señal analizada, expresada en unidades de $f(t)$.

$$\Psi_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \Psi \cdot \left(\frac{t - \tau}{s} \right) \quad (18)$$

Donde:

$\Psi_s(t)$: wavelet escalada y desplazada en t , expresada en unidades de $f(t)$.

s : factor de escala que determina el tamaño de la wavelet.

Ψ : wavelet madre original, toma forma en base a características de análisis específicas, expresada en unidades de $f(t)$.

t : variable temporal de la señal en segundos (s).

τ : desplazamiento temporal de la wavelet en segundos (s).

3.6.6 Transformada de Clarke

La transformada de Clarke es una relación que convierte un sistema trifásico abc en un sistema $\alpha\beta 0$ adimensional, representando las magnitudes físicas de las fases en relaciones geométricas ortogonales con simetría entre las señales resultantes, facilitando así, el análisis del comportamiento de fallas eléctricas al reducir el acoplamiento electromagnético de las fases y dando paso a un estudio de los transitorios y variaciones presentes en el sistema [40].

De este modo, la transformada de Clarke se define mediante (19).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde:

V_a, V_b, V_c : voltajes de fase del sistema trifásico de referencia abc en voltios (V).



V_α : componente en el eje α del sistema de referencia estacionario.

V_β : componente en el eje β del sistema de referencia estacionario.

V_0 : componente común en el eje cero del sistema de referencia estacionario.

3.6.7 Método de localización de fallas eléctricas con ondas viajeras de un solo extremo

El método de localización de fallas eléctricas de un solo extremo no requiere comunicación entre los extremos de la línea, ya que identifica la llegada de la onda viajera inicial y su reflexión. De modo que, al analizar el tiempo de diferencia entre ambas, se calcula la ubicación de la falla.

Así, para determinar la ubicación de una falla eléctrica en la primera mitad del tramo de la línea, se define mediante (20), mientras que, para la segunda mitad, se determina mediante (21) respectivamente.

$$X = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \tau \cdot (t_2 - t_1) \quad (20)$$

Donde:

X : ubicación de la falla eléctrica en la primera mitad del tramo de la línea aérea de transmisión en metros (m).

v : velocidad con la que se propaga la onda viajera a través del tramo en metros por segundo (m/s).

τ : inverso de la frecuencia de muestreo en segundos (s).

t_1 : tiempo de llegada de la onda viajera inicial en segundos (s).

t_2 : tiempo de reflexión de la onda viajera final desde el punto de falla en segundos (s).

$$X = L - \frac{1}{2} \cdot v \cdot \tau \cdot (t_2 - t_1) \quad (21)$$

Donde:



X : ubicación de la falla eléctrica en la segunda mitad del tramo de la línea aérea de transmisión en metros (m).

L : longitud total de la línea aérea de transmisión en metros (m).

3.6.8 Método de localización de fallas eléctricas con ondas viajeras de doble extremo

El método de localización de fallas eléctricas de doble extremo requiere comunicación entre los extremos de la línea, puesto que calcula la ubicación de la falla a partir de la diferencia temporal de las ondas en relación con su llegada a su respectivo terminal.

De manera que, la ubicación de la falla empleando el método de doble extremo se obtiene mediante (22).

$$X = \frac{1}{2} \cdot [L + ((v \cdot \tau) \cdot (t_a - t_b))] \quad (22)$$

Donde:

X : ubicación de la falla eléctrica en la línea aérea de transmisión desde el extremo de referencia en metros (m).

t_a : tiempo de llegada de la onda viajera inicial al primer extremo de referencia de la línea en segundos (s).

t_b : tiempo de llegada de la onda viajera inicial al segundo extremo de referencia de la línea en segundos (s).

3.6.9 Errores

La evaluación de los errores en las mediciones es crucial para validar la aplicabilidad de los algoritmos, ya que facilita la identificación de las configuraciones y frecuencias de muestreo que ofrecen un mejor desempeño, garantizando un análisis más preciso en la localización de fallas eléctricas. Dentro de este contexto, se consideran tres métricas clave: el error absoluto, error relativo en función de la distancia real de la falla y el error relativo en función de la longitud total de la línea.

El error absoluto cuantifica la diferencia entre la distancia real y la distancia calculada de la falla, y se define mediante (23).



$$EA = |X_{real} - X_{calculada}| \quad (23)$$

Donde:

EA : error absoluto representado en metros (m).

X_{real} : ubicación real de la falla en kilómetros (km).

$X_{calculada}$: ubicación calculada de la falla mediante algoritmos basados en ondas viajeras, en kilómetros (km).

El error relativo de falla determina la precisión de la localización respecto a la ubicación real de la falla y se expresa como (24).

$$ERF = \frac{|X_{real} - X_{calculada}|}{X_{real}} \cdot 100\% \quad (24)$$

Donde:

ERF : error relativo de falla.

Mientras que, el error relativo de línea representa la precisión de la localización en relación con la longitud total de la línea, definiéndose mediante (25).

$$ERL = \frac{|X_{real} - X_{calculada}|}{L} \cdot 100\% \quad (25)$$

Donde:

ERL : error relativo de línea.

3.7 Representación del caso de estudio

Con el propósito de recrear el tramo analizado, el diagrama unifilar perteneciente a EMELNORTE, presente en el documento denominado “Emelnorte Ext 2020.pfd”, fue representado utilizando el software DIgSILENT PowerFactory.

Dicho diagrama representado en la Fig. 13, fue considerado como documento base para identificar datos relevantes del tramo en cuestión, tales como el tipo de conductor, la extensión de la línea, los valores nominales de voltaje y corriente, así como aquellos datos que se encuentran en la TABLA I, así pues, luego de identificar las características



eléctricas del conductor, se procedió a realizar el modelado de la torre en el mismo software obteniendo las redes de secuencia del sistema.

De esta manera, el proceso considerado para realizar la representación del tramo Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE, se detalla a continuación.

3.7.1 Importación del documento de EMELNORTE

Tras la instalación del software DIGSILENT PowerFactory, se procedió a analizar las características del anillo de Tabacundo. Se importó el documento base "Emelnorte Ext 2020.pfd" y se activó el caso de estudio, luego, en la pestaña Ibarra – Yachay se observó y analizó el caso a considerar, lo que permitió visualizar el diagrama unifilar de EMELNORTE, representado en la Fig. 14, dicho esto, la consideración de la información del documento permitió determinar los parámetros necesarios para el modelado de la torre de subtransmisión en el tramo Tabacundo - Cayambe.

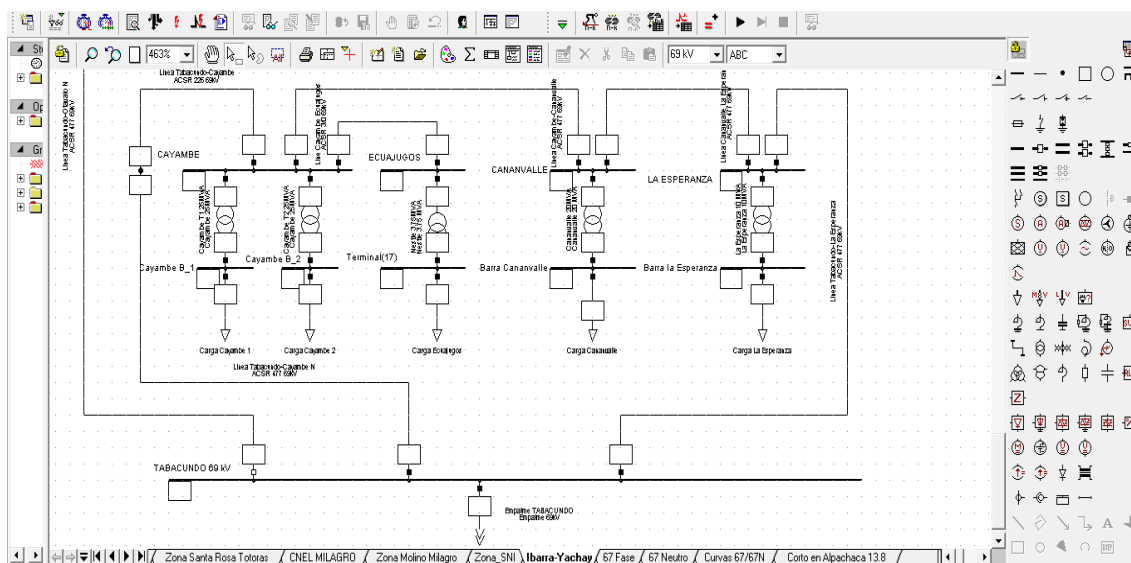


Fig. 14 Identificación del Anillo de Tabacundo en DIGSILENT PowerFactory.

3.7.2 Modelado de la Torre de subtransmisión del tramo Tabacundo - Cayambe

Considerando el contenido de la TABLA I, donde se proporcionó la descripción técnica de la línea, se procedió a realizar el diseño del modelo de la torre de subtransmisión utilizando el software DIGSILENT PowerFactory, para esto, según lo presentado en [41]



y la información que se encuentra en el Anexo B, en la TABLA II se detallan las características y propiedades del conductor ACSR Hawk 477.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL CONDUCTOR

Parámetro	Característica
Tipo de cable	Hawk
Material del conductor	Aluminio/Acero
Número de hilos	33
Capacidad de corriente	661A
Área del aluminio	477 kcmil
Sección total	273,07 mm ²
Peso unitario	976,9 kg/km
Trenzado (Composición)	26/7 (#Hilos de aluminio / #Hilos de acero)
Diámetro exterior	21.7932 mm
Radio Equivalente GMR	8.80872 mm
Resistencia DC a 20°	0.117 ohm/km

Para comenzar el desarrollo del modelado de la torre de subtransmisión de la línea Tabacundo - Cayambe, se creó un nuevo proyecto desde la ventana principal del programa, se asignó un nombre al proyecto en curso y se estableció la frecuencia en 60Hz. Posteriormente, se configuró un sistema de potencia compuesto por dos terminales que operan a 69kV, junto con el conductor ACSR Hawk 477, tal como se observa en la Fig. 15, además se tomó la decisión de prescindir del cable de guarda, dado que se obtuvieron las redes de secuencia del sistema trifásico en una matriz 3x3, optando así por un único sistema.

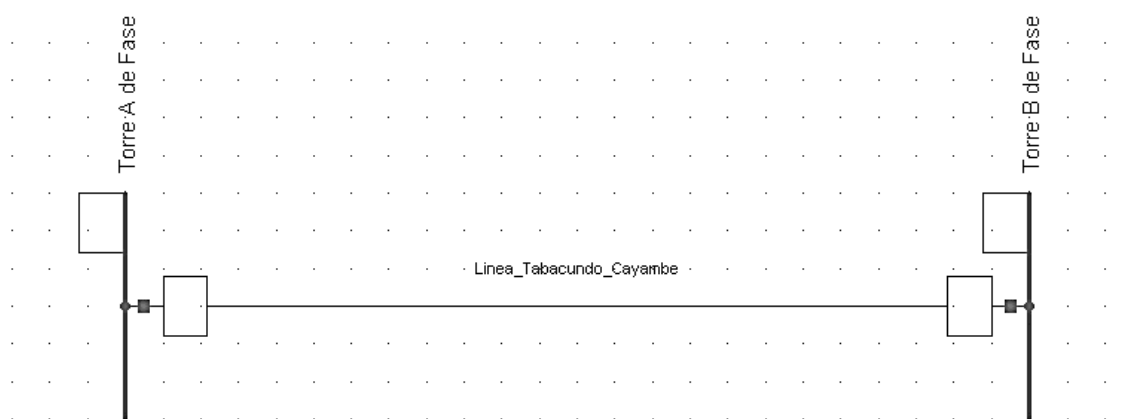


Fig. 15 Sistema de potencia para el modelamiento de la torre de subtransmisión del tramo Tabacundo - Cayambe.

Se procedió a definir el acoplamiento de la línea y crear un nuevo modelo de torre con sus características específicas, como frecuencia, número de circuitos, parámetros geométricos, transposición y conductividad del suelo. Posteriormente, se ingresaron las características del conductor de fase en el apartado correspondiente al circuito, incluyendo la información presentada en la TABLA II, junto con los datos del material y la resistencia del conductor a una temperatura específica.

Consecuentemente, se ingresó la configuración geométrica de la torre, para esto, se consideró una estructura rural sin cable de guarda de 69kV tipo S-1, como se observa en la Fig. 16. Esta elección se fundamentó debido a que, de acuerdo con lo expuesto en [42], las estructuras propuestas cubren las necesidades de utilización de torres de subtransmisión a nivel nacional, de modo que, su construcción cumple con los requisitos estipulados en las normas INEN 1964, 1965, 1966 y 1967, [43], [44], [45] y [46].



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

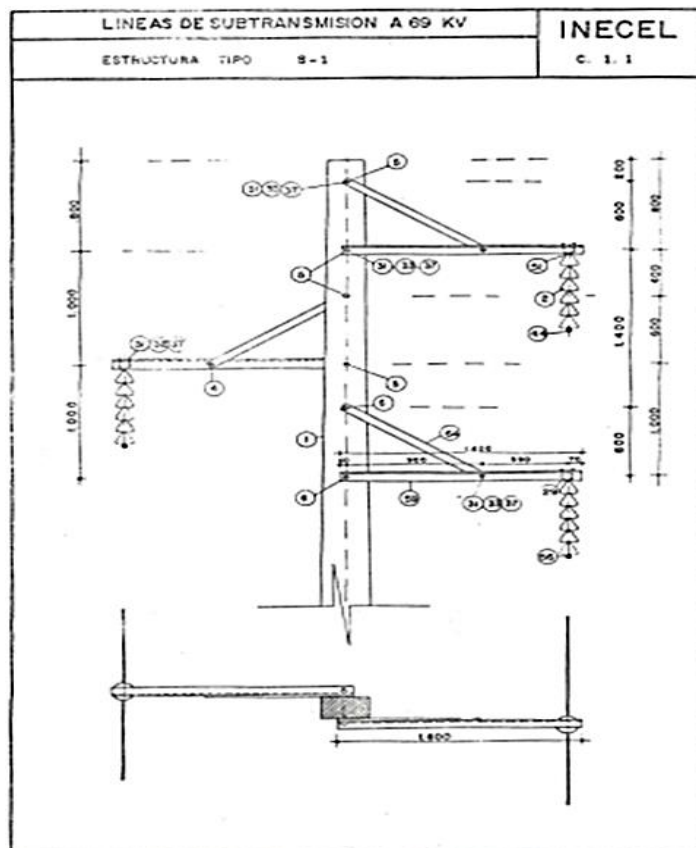


Fig. 16 Estructura rural sin cable de guarda de 69kV tipo S-1 [42].

De esta manera, en Fig. 17 se representan las dimensiones de la estructura tipo S-1 a 69kV que se consideró para las redes de secuencia del tramo Tabacundo - Cayambe.

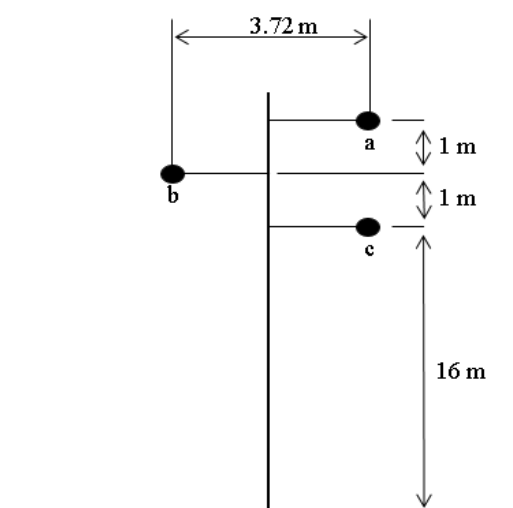


Fig. 17 Configuración trifásica de la torre de subtransmisión a 69kV.



A partir de la geometría de la torre, se generó el modelo acoplado de las fases mediante el cálculo correspondiente del software. Esto permitió obtener la matriz de secuencia, que describe las impedancias y capacitancias de secuencia cero, positiva y negativa, pues estos valores son esenciales para comprender cómo se comporta el sistema bajo diferentes condiciones.

Para calcular los valores de las impedancias propias y mutuas del tramo Tabacundo - Cayambe, se determinaron las distancias entre los conductores de fase usando (4) y los valores indicados en la Fig. 17. Según lo mencionado anteriormente, es recomendable utilizar el sistema Imperial para las distancias entre las posiciones de los conductores, ya que facilita la aplicación de las ecuaciones, a lo cual, consecuentemente, se realizó la conversión de la matriz de impedancias y capacitancia de secuencia final al sistema SI.

Posteriormente, se calcularon las impedancias mediante (5) y (6) respectivamente, de esta manera, considerando los datos del conductor presentados en la TABLA II y su conversión al sistema Imperial, se construyó la matriz primitiva de impedancias de fase utilizando (7).

Es necesario considerar que, no se realizó la reducción de Kron a las redes de secuencia, debido a que es una técnica que se emplea para reducir el número de elementos en una matriz de impedancias y capacitancias, simplificando así los cálculos. En este caso, al no contemplar un conductor de guarda en el sistema, la matriz de impedancias ya se encontraba simplificada.

Dicho esto, se empleó (8), (9) y (10) respectivamente, para obtener la matriz resultante de impedancias de secuencia e identificar las componentes de secuencia cero, positiva y negativa. Así pues, los resultados se representan mediante la TABLA III, donde se comparan con los datos de EMELNORTE en el documento “Emelnorte 2020.pfd”, así como con los valores obtenidos en el modelado de la torre de 69kV.



TABLA III

COMPARACIÓN DE IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DEL TRAMO TABACUNDO - CAYAMBE

Parámetro	Cálculos	Modelado de la torre	Información EMELNORTE
Resistencia de secuencia cero	2.9789 Ω	2.8811 Ω	2.9 Ω
Reactancia inductiva de secuencia cero	17.154 Ω	16.5170 Ω	17.1 Ω
Resistencia de secuencia positiva	1.202 Ω	1.1773 Ω	1.2 Ω
Reactancia inductiva de secuencia positiva	4.407 Ω	4.7608 Ω	4.4 Ω
Resistencia de secuencia negativa	1.202 Ω	1.1773 Ω	1.2 Ω
Reactancia inductiva de secuencia negativa	4.407 Ω	4.7608 Ω	4.4 Ω

De manera similar, para calcular los coeficientes de capacitancia propios y mutuos, se determinaron las distancias entre los conductores de fase mediante (11), con los valores presentados en la TABLA II y la información de la ubicación de los conductores presente en la Fig. 17.

A partir de estos datos, se calculó los coeficientes de capacitancia a través de (12) y (13) respectivamente, y se construyó la matriz de coeficientes de potencial primitivos usando (14). Luego, una vez determinada la matriz primitiva y considerando la igualdad de (15), se calculó la matriz de capacitancia de secuencia aplicando los principios de (9), (10) y (16) respectivamente.

Finalmente, los resultados de la capacitancia de secuencia se presentan en la TABLA IV, los cuales también son ingresados en el modelado de la torre de 69kV en el software Simulink.

TABLA IV

CAPACITANCIA DE SECUENCIA PARA EL TRAMO TABACUNDO - CAYAMBE

Parámetro	Cálculos
Capacitancia de secuencia cero	4.3222 nF
Capacitancia de secuencia positiva	9.9429 nF
Capacitancia de secuencia negativa	9.9429 nF



3.8 Modelamiento del caso de estudio en MATLAB – Simulink

En el modelamiento del tramo Tabacundo - Cayambe, se utilizaron bloques de diversas bibliotecas disponibles en Simulink para llevar a cabo la simulación en estado estacionario del sistema, de modo que la representación visual del sistema se encuentra en la Fig. 18.

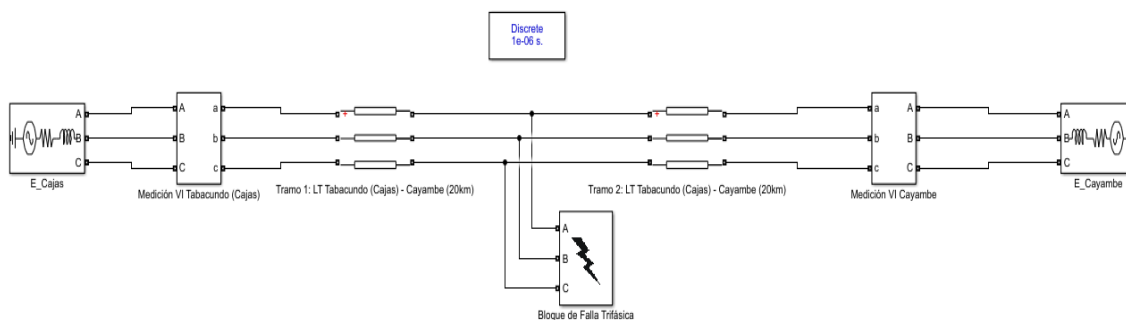


Fig. 18 Diagrama de conexión del tramo Tabacundo - Cayambe en MATLAB - Simulink.

Los valores empleados para configurar los bloques fueron obtenidos del equivalente de red del caso de estudio realizado en DIGSILENT PowerFactory que son presentados en la TABLA V, con lo cual, junto con los datos disponibles en TABLA I y TABLA II, al igual que, la comparación de los datos de TABLA III y TABLA IV, se registraron los datos necesarios para la simulación del sistema.

TABLA V

VALORES DEL EQUIVALENTE DE RED DEL TRAMO TABACUNDO - CAYAMBE

Parámetros	Voltaje [kV]	Impedancia Sec. (+)	Impedancia Sec. (-)	Impedancia Sec. (0)
S/E Tabacundo (Cajas)	68.7762 -34.1150°	0.1215 + j3.1791 Ω	0.1169 + j3.1195 Ω	0.0448 + j1.2282 Ω
S/E Cayambe	68.4934 -34.6934°	1.9467 + j9.8715 Ω	1.9421 + j9.8119 Ω	4.4557 + j27.2565 Ω

De esta manera, con la simulación del sistema, se obtuvieron los valores correspondientes al estado estacionarios, reflejando los valores de voltaje y corriente que fluyen desde la S/E Tabacundo (Cajas) hasta la S/E Cayambe, los cuales se reflejan en la TABLA VI.



TABLA VI

VALORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE DEL SISTEMA EN ESTADO ESTACIONARIO

Parámetros	S/E Tabacundo (Cajas)	S/E Cayambe
Voltaje A	68.7761	68.4923
	-34.1148°	-34.694°
Voltaje B	68.7762	68.4936
	-154.112°	-154.304°
Voltaje C	68.7762	68.4937
	85.887°	85.884°
Corriente A	0.094	0.094
	-41.359°	138.684°
Corriente B	0.094	0.094
	-161.45°	18.578°
Corriente C	0.094	0.094
	78.697°	-101.45°

3.9 Código para la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos en MATLAB

El código desarrollado para la localización de fallas eléctricas se desarrolló en base a algoritmos que utilizan la teoría de ondas viajeras a través de la aplicación de métodos de localización de un extremo y de doble extremo, de manera que, la incidencia y reflexión de las señales resultantes se interpretan mediante el comportamiento del diagrama de celosía.

En primer lugar, el código inicializa con la simulación de una falla eléctrica en el sistema modelado en Simulink, empleando los parámetros de la línea de subtransmisión para reflejar con precisión el comportamiento real del sistema eléctrico de potencia frente a distintos tipos de fallas. A continuación, se utiliza la función `wavedec` de MATLAB para descomponer las señales de voltaje generadas por la simulación en distintos niveles de coeficientes de detalle y aproximación, esto mediante la transformada de wavelet discreta.

Previo a este proceso, las señales trifásicas fueron convertidas en componentes adimensionales monofásicos a través de la transformada de Clarke, pasando de un sistema trifásico abc a un sistema $\alpha\beta 0$ con un desfase de 90° , por lo tanto, estas señales



se registraron como variables en el apartado de Command Window mediante la comunicación existente entre MATLAB y Simulink.

Posteriormente, se empleó la función `detcoef` para extraer los coeficientes de detalle necesarios y determinar los vectores de longitud adecuados, los cuales se utilizaron para generar gráficos que representan la llegada y reflexión de las señales, luego de la ocurrencia de cada tipo de falla según corresponda al caso de estudio analizado.

En consecuencia, mediante la aplicación de las operaciones presentadas en (20), (21) y (22), se determinó la ubicación aproximada de las fallas eléctricas que corresponden a los métodos de un extremo y doble extremo, tomando a consideración parámetros como la frecuencia de muestreo, la velocidad de propagación de la onda, los tiempos de incidencia y reflexión de las ondas, la sección del tramo donde se genera la falla y la longitud total de la línea.

A su vez, para la evaluación de los errores relacionados con las mediciones generadas por los algoritmos se consideró la aplicación de las expresiones reflejadas en (23), (24) y (25) que hacen referencia al error absoluto, error relativo en función del tramo de la falla y el error relativo en función de la longitud total de la línea, respectivamente.

Por lo cual, en lo que se refiere al código, este cuenta con funciones condicionales que simplifican la interacción del usuario, permitiendo ingresar parámetros característicos de cada escenario en relación con el tipo de falla, permitiendo así analizar distintos casos y ajustar las simulaciones para mejorar la interpretación de los resultados.

De esta manera, el flujograma que representa el proceso lógico del código se muestra en Fig. 19, mientras que, en Anexo C, se detalla el contenido de este.

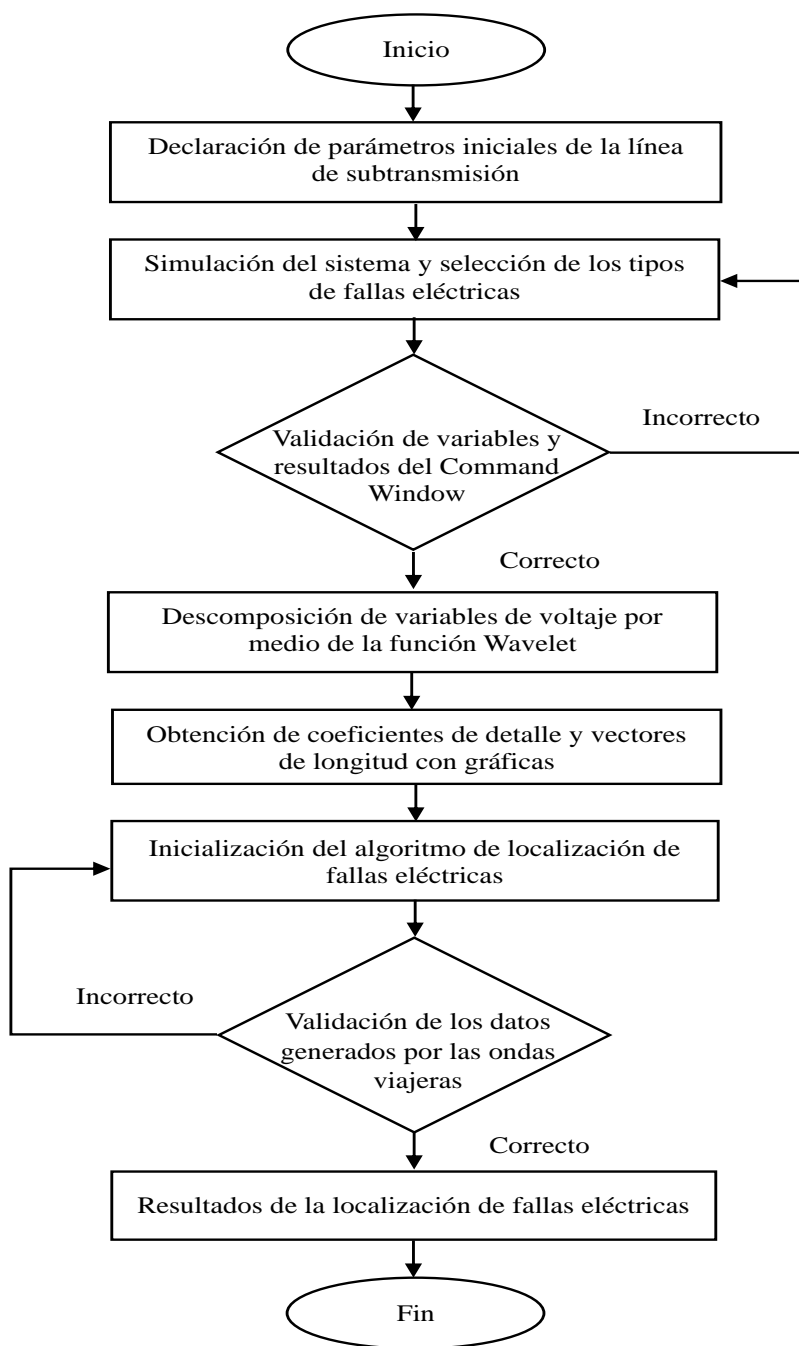


Fig. 19 Proceso lógico para la localización de fallas eléctricas mediante ondas viajeras.

En este capítulo se presentó la metodología considerada para llevar a cabo la simulación y análisis de las mediciones obtenidas por algoritmos basados en ondas viajeras para la localización de fallas eléctricas. Para ello, se modeló la red de subtransmisión de EMELNORTE, específicamente el tramo Tabacundo - Cayambe, abordando así



problemáticas relacionadas con la recopilación de datos para la localización precisa de fallas. Este proceso implicó una revisión bibliográfica que incluyó herramientas como revisas científicas y bibliotecas digitales para comprender la relevancia y aplicación de estos algoritmos.

La metodología comprendió varias etapas, entre ellas: la descripción del lugar de estudio, la definición de fundamentos matemáticos, la obtención de parámetros de la línea, el modelado de la torre de subtransmisión, el cálculo de las redes de secuencia, el análisis de los métodos y el desarrollo del código en conjunto con la aplicación de los algoritmos. Para el desarrollo de la metodología se emplearon softwares específicos como DIgSILENT PowerFactory, MATLAB y Simulink para realizar el modelado de la torre, la simulación del sistema, la ejecución del código y el análisis de datos.

Para la localización de las fallas, se implementaron tanto los métodos de un extremo como de doble extremo, en combinación con la transformada de Clarke y wavelet discreta, pues esta metodología permitió la localización de distintos tipos de fallas.

Finalmente, se emplearon funciones disponibles en los softwares mencionados para realizar la simulación y análisis del caso de estudio, ya que los resultados obtenidos fueron continuamente comparados con los datos base de EMELNORTE, asegurando así el comportamiento esperado y la precisión de las simulaciones.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo se enfoca en la implementación de los algoritmos a través de la aplicación de los métodos de un extremo y doble extremo a lo largo de la línea Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE, de manera que, el objetivo es representar, mediante gráficas y tablas, los resultados correspondientes a las mediciones y su respectivo análisis de la sensibilidad con respecto a la precisión que tienen dichos métodos en la localización de las fallas eléctricas, manteniendo así relación con lo expuesto en CAPITULO I, CAPÍTULO II y CAPÍTULO III.

Es así como, partiendo desde la consideración de los parámetros técnicos y eléctricos de la línea, y las características propias de la red, se realizó el modelamiento del sistema para la simulación de fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas. Posteriormente, se empleó la transformada de Clarke a las señales de voltaje obtenidas, convirtiéndolas en variables del sistema trifásico abc en un sistema monofásico $\alpha\beta 0$ adimensional, que cuenta con un desfase de 90° en lugar de 120° .

Dicho esto, a través de la comunicación existente entre MATLAB y Simulink, se registraron las variables necesarias del sistema transitorio en el Command Window de MATLAB, pues a dichas variables se les aplicó la transformada de wavelet, para descomponer las señales en componentes de tiempo y frecuencia, obteniendo así los coeficientes de detalle y vectores de longitud en niveles específicos, esto a razón de destacar las variaciones y discontinuidades presentes en las señales de voltaje analizadas.

Estas gráficas permiten visualizar las ondas de llegada y reflexión en cada uno de los terminales al basarse en la teoría del diagrama de celosía, dando así paso a la aplicación del algoritmo de localización correspondiente. En este punto, la frecuencia de muestreo es un factor por destacar, puesto que es necesario que coincida con la utilizada en la simulación inicial, ya que determina la cantidad de muestras que se analizan por



segundo, identificando así los cambios en las señales y su relación con el tiempo, convirtiendo señales continuas en discretas.

Por último, se calcula la localización de las fallas eléctricas y se determinan los errores absolutos y relativos tanto para la longitud total de línea como en relación con el tramo analizado.

De esta manera, en este capítulo se reflejan los resultados obtenidos y se realiza una comparación con las ubicaciones esperadas, analizando así la sensibilidad de los algoritmos y la influencia que tienen ciertas frecuencias de muestreo específicas en la precisión de los métodos.

4.1 Evaluación del modelamiento del caso de estudio en Simulink

El modelado del tramo Tabacundo - Cayambe consiste en la representación de la S/E Tabacundo (Cajas), la S/E Cayambe y la línea trifásica de 20km que conecta ambos extremos, de manera que, en la Fig. 18 se muestra el diagrama de conexión correspondiente a la sección del tramo de estudio utilizado para la simulación de los diferentes escenarios de fallas. Mientras que, en la Fig. 20 se representa la conexión de los bloques que permiten realizar la medición y captura de las señales para cada escenario de estudio.

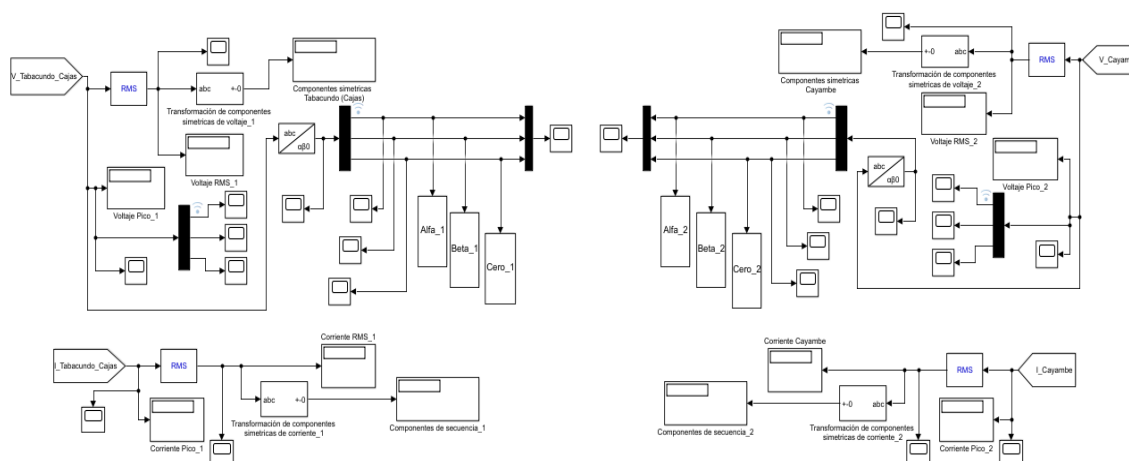


Fig. 20 Diagrama de conexión para la medición y captura de señales del tramo Tabacundo - Cayambe.

Para la evaluación del modelamiento del sistema se registran los valores pico y RMS en estado estacionario, tanto para la S/E Tabacundo (Cajas) como para la S/E Cayambe.



Los valores pico de voltaje para cada una de las subestaciones se representan en la Fig. 21, ya que proporcionan información relevante sobre las variaciones y discontinuidades presentes en las señales durante las fallas.

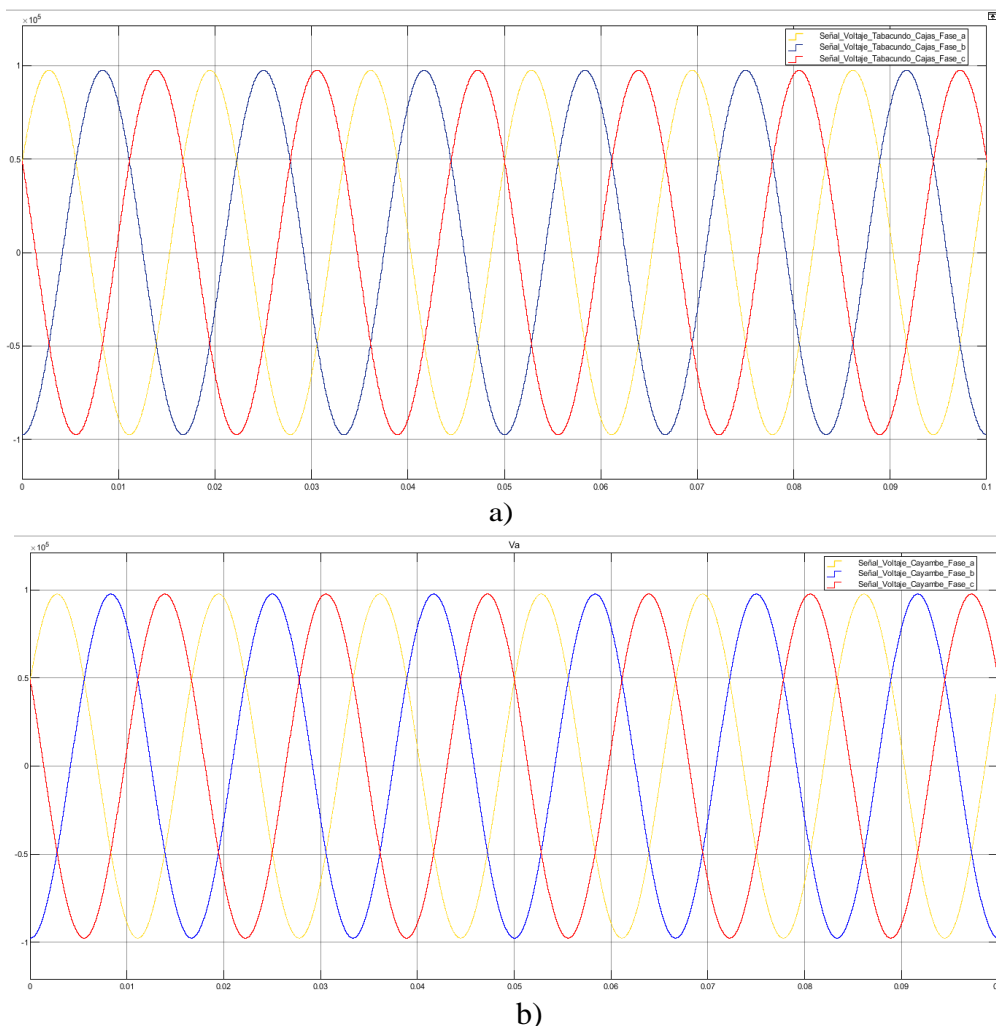


Fig. 21 Señales de voltaje pico en estado estacionario: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe.

De esta manera, los valores pico de las subestaciones se correlacionan con los datos presentados en la TABLA VI, demostrado que se cumple con el comportamiento esperado del sistema real en estado estacionario.

Por otro lado, la consideración de los valores RMS de ambos extremos es esencial, puesto que son términos que demuestran la estabilidad y potencia entregada del sistema en relación con las condiciones reales, dicho esto, los voltajes RMS de cada subestación se representan en la Fig. 22, respectivamente.

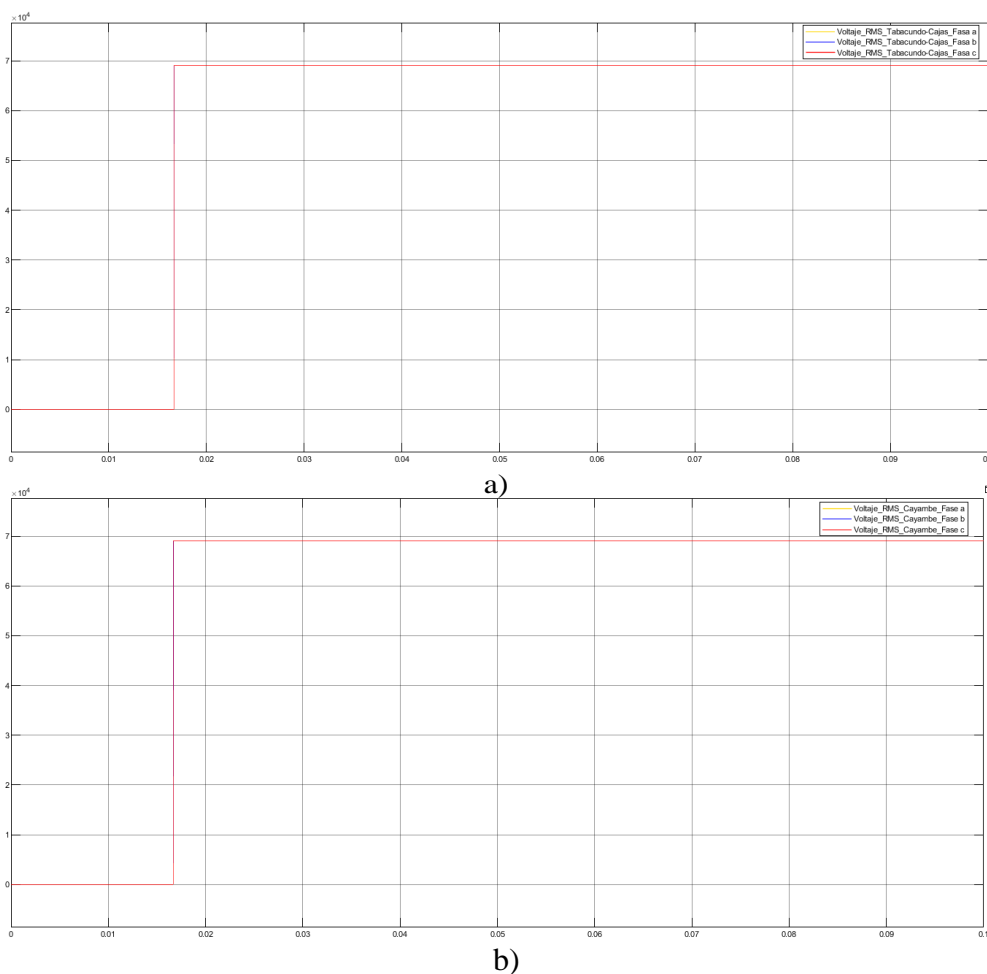


Fig. 22 Señales de voltaje RMS en estado estacionario a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe.

Es así como, las gráficas de los valores RMS obtenidos indican una correcta configuración y definición de los parámetros propios del sistema, ya que las condiciones iniciales coinciden con la base de datos de EMELNORTE, lo cual permite identificar los cambios bruscos generados en el comportamiento de las ondas viajeras durante la simulación de los distintos tipos de fallas eléctricas.

4.2 Evaluación del código para la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras en MATLAB – Simulink

En este apartado se analiza el comportamiento de las ondas viajeras y la aplicación del código al simular diversos escenarios de fallas eléctricas.

Posterior a la simulación, se emplea la transformada de Clarke para convertir las señales trifásicas del sistema *abc* en señales monofásicas adimensionales $\alpha\beta 0$, con un desfase de 90° en lugar de 120°. Este proceso permite obtener los valores de los coeficientes



necesarios para la localización de las fallas eléctricas, de manera que, en la Fig. 23 se muestran las señales adimensionales del sistema en estado estacionario de ambos terminales de la línea, una vez aplicada la transformada de Clarke.

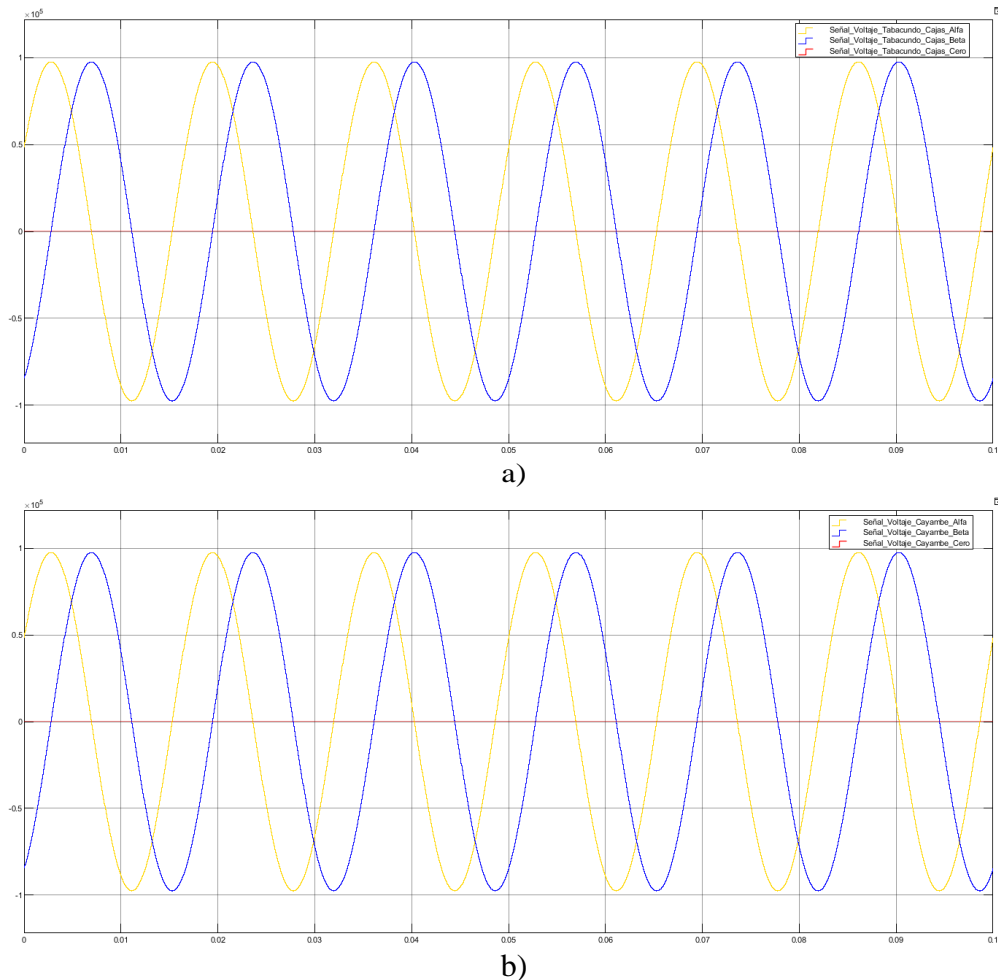


Fig. 23 Señales adimensionales $\alpha\beta 0$ en estado estacionario: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe.

Es así como, en ambas figuras no se observan perturbaciones en las señales adimensionales de los extremos, lo que descarta desequilibrios entre fases o fallas a tierra, por lo cual, se confirma que el sistema se encuentra en equilibrio y en condiciones óptimas para la simulación de fallas eléctricas, representando el comportamiento esperado para estados estacionarios y transitorios en comparación con un sistema real.

De esta manera, en la Fig. 24 se representan las señales generadas por la presencia de fallas monofásicas y trifásicas en la mitad de la línea.

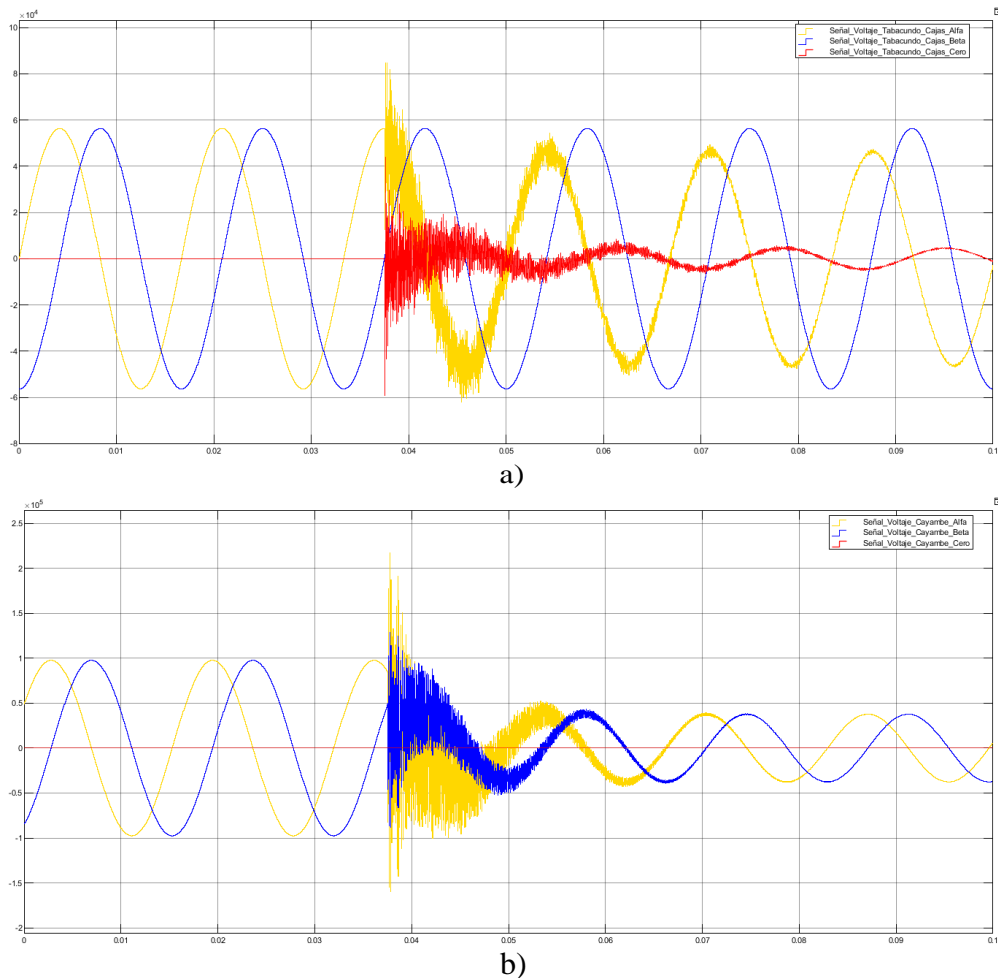


Fig. 24 Señales adimensionales $\alpha\beta 0$ en estado transitorio: a) S/E Tabacundo (Cajas) y b) S/E Cayambe.

Dicho esto, a través de la transformada de Clarke, se evidencian cambios en la falla monofásica y trifásica, mostrando las perturbaciones presentes en el comportamiento de cada una de las componentes, lo que permite identificar la presencia y naturaleza de cada tipo de falla, puesto que, a pesar de presentarse como componentes adimensionales aun representan los comportamientos esperados en un sistema trifásico ideal.

Posterior a esto, las señales generadas por las fallas se registran en el ambiente de MATLAB, específicamente en el Command Window, de modo que, el proceso lógico del código se inicializa con la declaración de los parámetros de la línea, seguido del cálculo de los valores necesarios para la localización de las fallas eléctricas, tomando a consideración que la frecuencia de muestreo utilizada debe coincidir con la implementada durante la simulación.



Por consiguiente, para determinar los coeficientes de detalle y los vectores de longitud necesarios en niveles específicos se emplea la transformada de wavelet discreta, empleando la db4 como wavelet madre, debido a su capacidad para identificar perturbaciones y variaciones en las señales.

Es así como, con la ejecución del código se visualizan las ondas de llegada y reflexión en cada terminal, considerando que, según la naturaleza de la falla, se analiza la componente adimensional correspondiente. Dicho esto, en la Fig. 25 se muestran las ondas viajeras generadas tras la simulación de una falla monofásica y una falla trifásica en la mitad de la línea, considerando una frecuencia de muestreo de 1MHz.

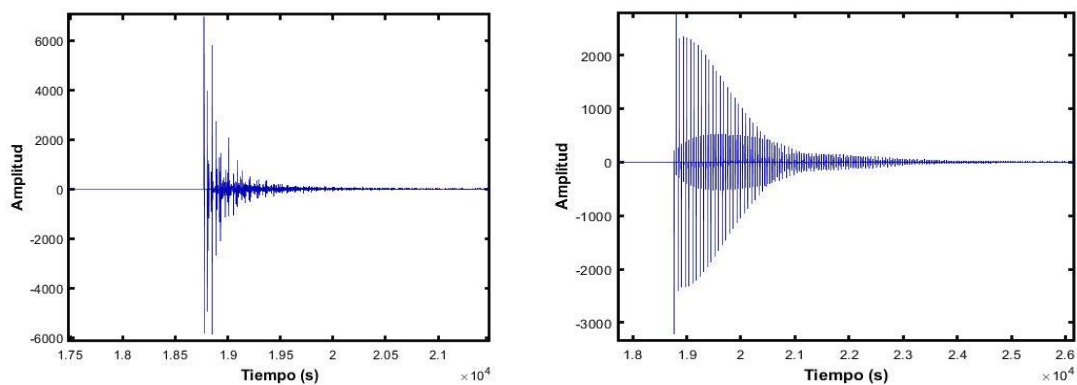


Fig. 25 Ondas viajeras incidentes y de reflexión del sistema en estado transitorio con 1 MHz. a) falla monofásica y b) falla trifásica.

En dicha gráfica, se observa la diferencia en la amplitud de las señales y el tiempo de ocurrencia de estas, pues son aquellas diferencias las que reflejan a cada una de las componentes y la naturaleza de la falla.

Por lo tanto, con la representación del comportamiento de cada una de las ondas viajeras se continúa con el registro de la diferencia de tiempo y el cálculo de la localización de cada una de las fallas eléctricas en base al tiempo de referencia en las que se generan, las características del sistema y la consideración de uno o dos extremos.

4.3 Localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de un solo extremo

Para la localización de cada una de las fallas eléctricas simuladas en la línea Tabacundo - Cayambe, se recrearon fallas a diversas distancias a lo largo de la línea, con la



finalidad de obtener la ubicación calculada y comparar dicho resultado con la distancia esperada idealmente, para ello se aplicaron diferentes valores de frecuencia de muestreo a distintos tramos de la línea, con el fin de definir la precisión de cada cálculo, determinando errores absolutos y relativos en función de la longitud del tramo.

4.3.1 Localización de una falla monofásica mediante el método de un solo extremo

El primer escenario consiste en una falla monofásica y su localización a través del método de un solo extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se utilizaron diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz.

De esta manera, a través de la TABLA VII, se presentan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla monofásica al 20% de la línea.

TABLA VII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	4.120	119.665	2.992	0.598
0.75	4	3.923	76.510	1.913	0.383
1	4	3.531	468.859	11.721	2.344
2	4	3.973	27.466	0.687	0.137
5	4	4.002	1.960	0.049	0.009
10	4	3.943	56.892	1.422	0.284

Los valores reflejados en la TABLA VII demuestran que, la precisión en la localización de una falla monofásica al 20% de la línea mejora al incrementar la frecuencia de muestreo. A 0.5 MHz, se obtuvo un error absoluto de 119.665 m y un error relativo de falla del 2.992%, sin embargo, al aumentar la frecuencia a 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz, la precisión mejoró significativamente, reduciendo el error relativo de falla a 0.687%, 0.049% y 1.422%, respectivamente.



Es importante destacar que, para una falla monofásica generada a 4 km de uno de los terminales con una frecuencia de muestreo de 5 MHz, el margen de error relativo fue inferior al 1% y el error absoluto fue menor a 30 m, presentándose como la opción más precisa ante la sensibilidad del algoritmo a una frecuencia de muestreo específica.

Por esta razón, en la Fig. 26, se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 4 km con una frecuencia de 5 MHz, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

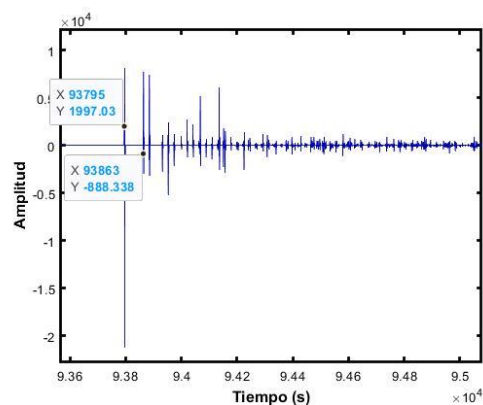


Fig. 26 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz.

Esto determina que, la sensibilidad del algoritmo para una falla monofásica al 20% de la línea es mayor a frecuencias superiores a 2 MHz, proporcionando una localización más precisa y confiable de las fallas, lo que es crucial para aplicaciones prácticas en sistemas de protección y mantenimiento de líneas de subtransmisión. Además, en la Fig. 26 se evidencia un pico inicial que corresponde a la onda incidente generada tras la falla, seguida de una oscilación amortiguada que representa la reflexión de las ondas, identificando así los cambios presentes en las señales captadas por el sistema y cercanas al comportamiento real de un sistema en estado transitorio.

De esta manera, a través de la TABLA VIII, se presentan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla monofásica al 40% de la línea.



TABLA VIII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	7.062	937.717	11.721	4.689
0.75	8	7.847	153.019	1.913	0.765
1	8	7.945	54.932	0.687	0.275
2	8	7.945	54.932	0.687	0.275
5	8	7.886	113.784	1.442	0.569
10	8	7.974	25.506	0.319	0.128

A través de los valores reflejados en la TABLA VIII se evidencia que, la precisión en la localización de una falla monofásica al 40% de la línea mejora significativamente al aumentar la frecuencia de muestreo. A 0.5 MHz, se observa un error absoluto de 937.717 m, con un error relativo de falla del 11.721%, lo que refleja una baja precisión, sin embargo, al incrementar la frecuencia a 1 MHz, la precisión mejora considerablemente, reduciendo el error absoluto a 54.932 m y el error relativo a 0.687%.

Por el contrario, frecuencias más altas, como 5 MHz y 10 MHz, muestran errores relativos más bajos, alcanzando valores de 1.442% y 0.319%, respectivamente, estos resultados confirman que, el algoritmo en este caso es más sensible y preciso cuando se emplean frecuencias superiores a 1 MHz, pues en particular la frecuencia de 10 MHz destaca por tener un error absoluto de 25.506 m y un error relativo respecto a la extensión de la línea de tan solo 0.128%, manteniendo diferencias inferiores a 30 m de distancia y un error relativo menor al 1%.

Por lo tanto, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 8 km con una frecuencia de 10 MHz se refleja en la Fig. 27, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

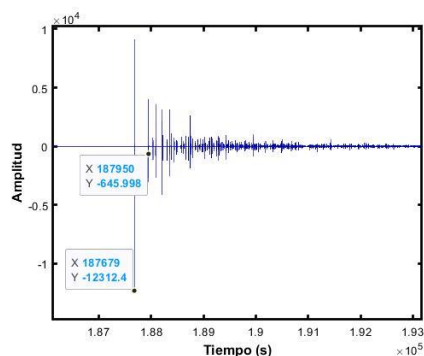


Fig. 27 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

Esto demuestra que, la sensibilidad del algoritmo para una falla monofásica al 40% de la línea es mayor a frecuencias superiores a 1 MHz y cercanas a 10 MHz, determinando así una localización precisa, lo que es crucial para aplicaciones prácticas como la disminución en costos por movilización y tiempos de respuesta en el campo. Asimismo, en la Fig. 27 se evidencian picos iniciales que representan los cambios bruscos en las señales, reflejando el incremento y caída de los valores de voltaje en el sistema, a la vez que son seguidos por oscilaciones regulares que representan la reflexión de las ondas en estado transitorio.

Por consiguiente, a través de la TABLA IX, se presentan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla monofásica simulada al 60% de la línea.

TABLA IX

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 60% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	12.349	349.194	2.910	4.689
0.75	12	12.153	153.019	1.275	0.765
1	12	12.055	54.932	0.458	0.275
2	12	12.055	54.932	0.458	0.275
5	12	11.996	3.920	0.033	0.020
10	12	12.055	54.932	0.458	0.275



Los valores representados en la TABLA IX indican que, con 0.5 MHz, se registra un error absoluto de 349.194 m y un error relativo de falla del 2.910%, lo cual evidencia una menor precisión en la localización. Sin embargo, al aumentar la frecuencia a 1 MHz y 2 MHz, el error absoluto disminuye significativamente a 54.932 m con un error relativo de falla a 0.458%, mostrando un notable incremento en la precisión del algoritmo.

En cambio, a una frecuencia de 5 MHz, se alcanza un buen nivel de exactitud, con un error absoluto mínimo de 3.920 m y un error relativo de falla de tan solo 0.033%, esto destaca la sensibilidad del algoritmo para identificar las perturbaciones presentes en las señales al emplear frecuencias superiores a 2 MHz, demostrando una notable mejora en términos de precisión.

Por lo tanto, se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 12 km con una frecuencia de 5 MHz a través de la Fig. 28, evidenciando así las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

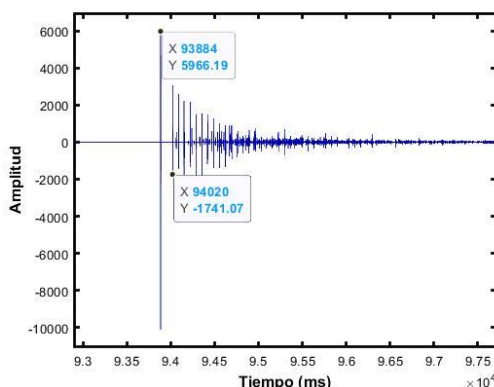


Fig. 28 Ondas viajeras de señal de voltaje para una falla monofásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz.

Así pues, la sensibilidad del algoritmo para una falla monofásica al 60% de la línea es mayor a frecuencias superiores a 1 MHz y cercanas a 5 MHz, determinando que, a



frecuencias superiores se establecen valores periódicos, identificando así frecuencias específicas para mejores resultados en cuanto a la localización de fallas monofásicas.

Además, a través de la Fig. 28 se observa un pico inicial pronunciado que corresponde a la onda incidente, seguida de una onda amortiguada que indica la reflexión de la onda, representando así los cambios presentes en las señales captadas por el sistema y cercanas al comportamiento real de un sistema en estado transitorio, manteniendo relación con la amplitud de las señales y el tiempo de ocurrencia.

Por último, mediante la TABLA X se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla monofásica simulada al 80% de la línea.

TABLA X

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	16.469	468.859	2.930	2.344
0.75	16	16.077	76.510	0.478	0.383
1	16	16.175	174.597	1.091	0.873
2	16	16.027	27.466	0.172	0.137
5	16	15.998	1.960	0.012	0.010
10	16	16.057	56.892	0.356	0.284

En la TABLA X se observa una mejora en la precisión de la localización de una falla monofásica al 80% de la línea al aumentar la frecuencia de muestreo. A una frecuencia de 0.5 MHz, el error absoluto registrado es de 468.859 m, acompañados de un error relativo de falla del 2.930%, lo que refleja limitaciones significativas en la precisión. No obstante, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto se reduce considerablemente a 76.510 m, con un error relativo de 0.478%, lo cual representa una mejora notable en los resultados.

Para frecuencias más altas, como 2 MHz y 5 MHz, los errores son mínimos, con valores absolutos de 27.466 m y 1.960 m, respectivamente, y errores relativos de falla tales



como 0.172% y 0.012%, respectivamente. Por otro lado, la frecuencia de 10 MHz muestra un ligero aumento en el error absoluto a 56.892 m, con un error relativo de 0.356%, lo cual se mantiene dentro de los márgenes aceptables de precisión.

Esto evidencia que las frecuencias cercanas a 0.5 MHz proporcionan resultados aceptables para ciertos escenarios, mientras que frecuencias superiores a 1 MHz garantizan una localización más precisa de la falla. De manera que, con errores inferiores a 30 m y porcentajes de error menores al 1%, el método demuestra su robustez al identificar perturbaciones o variaciones en las señales.

Por esta razón, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 16 km con una frecuencia de 5 MHz se refleja en la Fig. 29, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

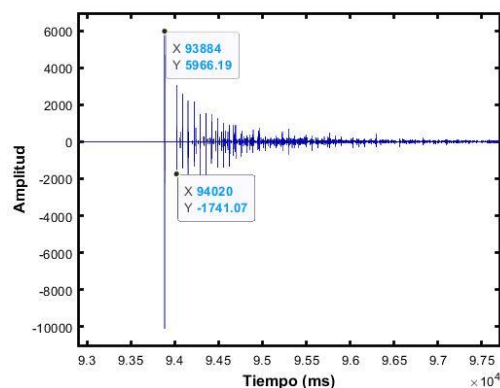


Fig. 29 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz.

La sensibilidad del algoritmo es evidente, garantizando un rendimiento superior con frecuencias de muestreo elevadas, de modo que para una falla monofásica al 80% de la línea ante una frecuencia de muestreo de 5 MHz su valor de localización es aceptable, reflejando errores poco significativos en la interpretación de los resultados.

Dicho esto, a través de la Fig. 29 se observa un comportamiento propio del sistema en estado transitorio, reflejando la incidencia y reflexión de las ondas viajeras en relación de un terminal, pues ante una frecuencia de muestreo elevada la amplitud y tiempo de ejecución de las ondas incrementa proporcionalmente.



4.3.2 Localización de una falla bifásica mediante el método de un solo extremo

El segundo escenario consiste en una falla bifásica y su localización a través del método de un extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se utilizaron diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como: 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz.

De esta manera, mediante el uso de la TABLA XI se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla bifásica simulada al 20% de la línea.

TABLA XI

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	4.120	119.665	2.992	0.598
0.75	4	3.923	76.510	1.913	0.383
1	4	3.825	174.597	4.365	0.873
2	4	3.973	27.466	0.687	0.137
5	4	4.002	1.960	0.049	0.010
10	4	4.022	56.892	1.442	0.284

Los valores presentados en la TABLA XI destacan que, a una frecuencia de muestreo de 0.5 MHz, se tiene un error absoluto de 119.665 m y un error relativo de falla del 2.992%, si bien no comprometen la validez de la localización de la falla, reflejan una menor precisión en comparación con frecuencias más altas, no obstante, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto disminuye significativamente a 76.510 m, acompañado de un error relativo del 1.913%, lo que representa una mejora considerable en la precisión.

Por el contrario, con frecuencias superiores, como 2 MHz y 5 MHz, se muestran errores absolutos más bajos: 27.466 m y 1.960 m respectivamente, con errores relativos bajos tales como 0.687 y 0.049%, respectivamente. Esto resalta la sensibilidad del algoritmo



al manejar variaciones en la frecuencia, asegurando una localización de falla más precisa.

Sin embargo, es necesario notar la diferencia marcada entre la frecuencia de 1 MHz y 10 MHz, mientras que a 1 MHz se observa un error absoluto elevado de 174.597 m, con un error relativo de 4.365%, a 10 MHz estos valores disminuyen a 56.892 m y 1.442%, respectivamente. Este comportamiento evidencia que la precisión de la localización mejora notablemente a partir de frecuencias de 2 MHz, alcanzando un valor adecuado en 5 MHz, donde los errores son prácticamente aceptables.

Por esta razón, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 4 km con una frecuencia de 5 MHz se refleja en la Fig. 30, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

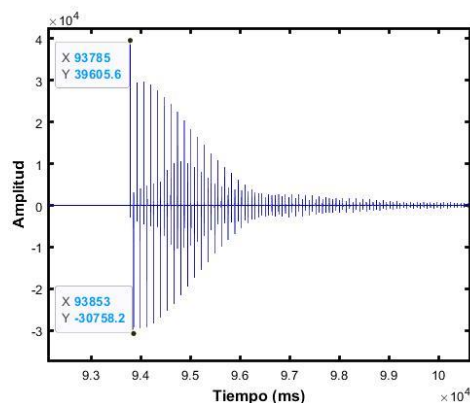


Fig. 30 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5 MHz.

Por lo tanto, la sensibilidad del algoritmo para una falla bifásica al 20% de la línea es acertada a una frecuencia cercana a 5 MHz, determinando que, si bien las frecuencias superiores establecen valores periódicos, un valor específico refleja mejores resultados.

Adicionalmente, a través de la Fig. 30 se observa un comportamiento diferente a las fallas monofásicas, presentando cambios en las ondas amortiguadas al descender progresivamente sin picos pronunciados y diferencias de tiempo representativas, manteniendo una relación directa entre la amplitud de las ondas y el tiempo de ejecución de cada una.



A continuación, mediante el uso de la TABLA XII se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla bifásica simulada al 40% de la línea.

TABLA XII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	7.651	349.194	4.365	1.746
0.75	8	7.847	153.019	1.913	0.765
1	8	7.945	54.932	0.687	0.275
2	8	7.945	54.932	0.687	0.275
5	8	8.063	62.773	0.785	0.314
10	8	8.004	3.920	0.049	0.020

Los resultados reflejados en la TABLA XII indican que, al analizar la localización de una falla bifásica al 40% de la línea, la precisión mejora significativamente conforme se incrementan las frecuencias de muestreo. Para una frecuencia de 0.5 MHz, el error absoluto es de 349.194 m, con un error relativo de falla del 4.365%, lo cual evidencia una baja precisión, sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error disminuye considerablemente a 153.019 m, con un error relativo de 1.913%, mostrando una mejora progresiva en la precisión de los resultados.

A frecuencias superiores, como 1 MHz y 2 MHz, la distancia calculada se aproxima mucho más a los 8 km esperados, presentando errores absolutos mínimos de 54.932 m y 0.687%, mientras que, a 5 MHz, aunque la distancia calculada excede ligeramente la real, el error absoluto continúa siendo bajo, alcanzando 62.773 m, lo cual valida que la precisión sigue siendo aceptable.

En consecuencia, el algoritmo demuestra una mayor sensibilidad y fiabilidad a partir de los 2 MHz, donde las distancias calculadas son considerablemente cercanas a las reales y los errores son más reducidos.



No obstante, la frecuencia de 10 MHz resulta la opción más adecuada, ya que refleja una distancia calculada con una desviación de apenas 3.920 m respecto a la ubicación real, manteniendo un error relativo de 0.049% en relación con la longitud de ocurrencia de la falla.

De modo que, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 8 km con una frecuencia de 10 MHz se refleja en la Fig. 31, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

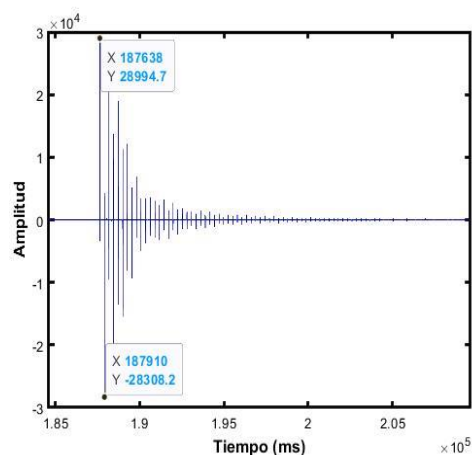


Fig. 31 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

Esto indica que, la sensibilidad del algoritmo para una falla bifásica al 40% de la línea es mayor a frecuencias superiores a 1 MHz, pero es más acertada a frecuencias cercanas a 10 MHz, proporcionando así una localización más precisa.

Además, en la Fig. 31 se observa la presencia de picos iniciales pronunciados e incluso a lo largo de la amortiguación de las ondas, reflejando variaciones considerables en cuanto al estado transitorio del sistema, marcando cambios significativos en la amplitud de las señales en cuanto a las variaciones de tiempo que son mínimas.

A continuación, a través de la TABLA XIII se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla bifásica simulada al 60% de la línea.



TABLA XIII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 60% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	11.761	239.330	1.994	1.197
0.75	12	11.368	631.679	5.264	3.158
1	12	11.761	239.330	1.994	1.197
2	12	12.055	54.932	0.458	0.275
5	12	11.937	62.773	0.523	0.314
10	12	11.996	3.920	0.033	0.020

En base al contenido de la TABLA XIII, a frecuencias de 0.5 MHz y 1 MHz, los errores absolutos se mantienen en 239.330 m, lo que representa una precisión baja, aunque mejorable, sin embargo, al considerar una frecuencia de 0.75 MHz, el error aumenta de forma significativa hasta 631.679 m.

A partir de 2 MHz, el algoritmo demuestra una notable mejora en la precisión, reduciendo el error absoluto a 54.932 m, con un error relativo de falla de apenas 0.458%, con 5 MHz el error absoluto se mantiene bajo con 62.773 m, mientras que, con una frecuencia de 10 MHz, se registra un error absoluto mínimo de tan solo 3.920 m y un error relativo de falla del 0.033%, lo que demuestra que para una falla bifásica al 60% de la línea, frecuencias iguales o superiores a 2 MHz son necesarias para garantizar una localización precisa y cercana a la distancia real de la falla.

De esta manera, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 12 km con una frecuencia de 10 MHz se refleja en la Fig. 32, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

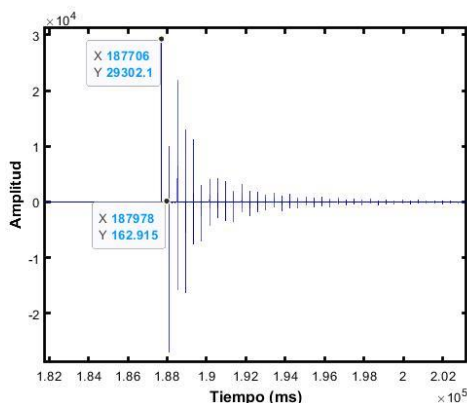


Fig. 32 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

La diferencia entre los resultados del algoritmo es evidente, reflejando una mejor localización con frecuencias de muestreo altas, pues para una falla bifásica al 60% de la línea y con una frecuencia de muestreo de 10 MHz su valor de localización es acertado, reflejando errores menores a 30 m de diferencia, siendo significativos al momento de necesitar del despeje de una falla. Así pues, en la Fig. 32 se observa un comportamiento esperado en el sistema tras la ocurrencia de un evento, ya que refleja la llegada y reflexión de las ondas viajeras, los picos presentes en la amplitud de las señales y el tiempo de ocurrencia de la falla.

Por último, a través de la TABLA XIV se representan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla bifásica simulada al 80%.

TABLA XIV

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	15.880	119.665	0.748	0.598
0.75	16	16.469	468.859	2.930	2.344
1	16	15.880	119.665	0.748	0.598
2	16	16.027	27.466	0.172	0.137
5	16	16.057	56.892	0.356	0.284
10	16	15.998	1.960	0.012	0.010



Los resultados presentados en la TABLA XIV indican que la localización de una falla bifásica al 80% de la línea depende de la frecuencia de muestreo utilizada. Con frecuencias de 0.5 MHz y 1 MHz, el error absoluto se mantiene en 119.665 m, acompañada de un error relativo de falla del 0.748%, lo que indica una precisión aceptable, no obstante, al considerar 0.75 MHz, el error aumenta significativamente a 468.859 m, lo que refleja una reducción en la precisión del algoritmo.

Por otro lado, a frecuencias superiores, como 2 MHz, la localización mejora notablemente, alcanzando un error absoluto de tan solo 27.466 m y un error relativo de falla de 0.172%, aunque con 5 MHz el error absoluto se incrementa levemente a 56.892 m, sigue siendo bajo y consistente, con 10 MHz el algoritmo alcanza su mayor nivel de exactitud, reduciendo el error absoluto 1.960 m, con un error relativo de falla mínimo.

Por esta razón, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 16 km con una frecuencia de 10 MHz se refleja en la Fig. 33, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

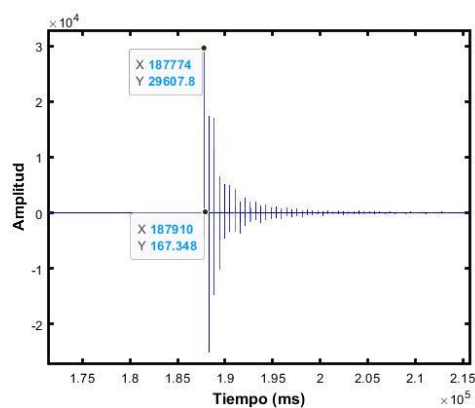


Fig. 33 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

A través de la Fig. 33 se observa el comportamiento del sistema en estado transitorio, reflejando los picos de amplitud de las señales que corresponden a la incidencia y reflexión de las ondas viajeras en relación con un terminal, pues ante una alta frecuencia de muestreo la amplitud y el tiempo de ejecución de las ondas incrementa



proporcionalmente, destacando que presenta bajas perturbaciones significativas al momento de considerar los tiempos de ejecución de las ondas. Razón por la cual, la precisión del algoritmo es acertada ante frecuencias de muestreo altas, ya que para una falla bifásica al 80% de la línea con una frecuencia de muestreo de 10 MHz su valor de localización es aceptable, reflejando errores pocos significativos en la interpretación de los resultados.

4.3.3 Localización de una falla trifásica mediante el método de un solo extremo

El tercer escenario consiste en una falla trifásica y su localización a través del método de un extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se utilizan diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como: 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz.

De esta manera, a través de la TABLA XV se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla trifásica simulada al 20% de la línea.

TABLA XV

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	4.708	708.188	17.705	3.541
0.75	4	3.923	76.510	1.913	0.383
1	4	3.825	174.597	4.365	0.873
2	4	3.973	27.466	0.687	0.137
5	4	4.002	1.960	0.049	0.010
10	4	4.031	31.386	0.785	0.157

Los valores reflejados en la TABLA XV muestran que, a una frecuencia de muestreo de 0.5 MHz el error absoluto alcanza los 708.188 m, con un error relativo de falla del 17.705%, lo que denota una baja precisión que limita la validez de los resultados en aplicaciones prácticas. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, se



observa una mejora en la precisión, reduciendo el error absoluto a 76.510 m y el error relativo a 1.913%, lo que representa un avance gradual en la exactitud de la localización.

En contraste, con 1 MHz el error absoluto vuelve a incrementarse a 174.597 m, surgiendo una menor consistencia en los resultados obtenidos, no obstante, con frecuencias superiores como 2 MHz y 5 MHz, los errores disminuyen drásticamente, alcanzando valores de 27.466 m y 1.960 m, respectivamente, con 10 MHz, aunque el error absoluto se incrementa levemente a 31.386 m, el algoritmo mantiene un error relativo de falla de 0.049%, lo que reafirma su alta precisión.

Estos resultados destacan que, en el caso de fallas trifásicas al 20% de la línea, la precisión del método de un solo extremo mejora sustancialmente a partir de 2 MHz, proporcionando localizaciones más confiables y válidas para su análisis.

Por consiguiente, en la Fig. 34 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 4 km con una frecuencia de 5 MHz, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

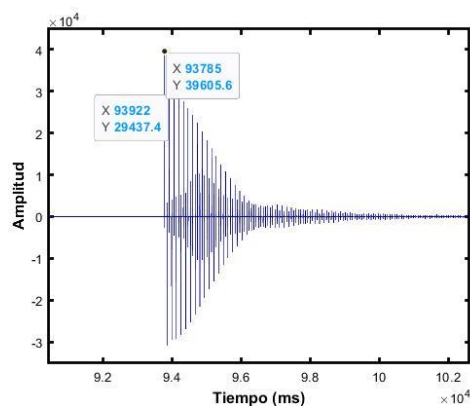


Fig. 34 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 4 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 5MHz.

En la Fig. 34 se observa un comportamiento decreciente que relaciona la amplitud de la señal con el tiempo en el que ocurre la falla, representando así los cambios en las señales captadas por el sistema y cercanas al comportamiento real del mismo en estado



transitorio. Además, esto determina que, la sensibilidad del algoritmo para una falla trifásica al 20% de la línea es mayor a frecuencias superiores a 2 MHz, representando una localización más precisa, lo que es significativo para aplicaciones prácticas en sistemas de protección y mantenimiento de líneas de subtransmisión.

A continuación, a través de la TABLA XVI se reflejan los valores generados por el algoritmo de un solo extremo al recrear una falla trifásica simulada al 40% de la línea.

TABLA XVI

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	7.651	349.194	4.365	1.746
0.75	8	7.847	153.019	1.913	0.765
1	8	7.945	54.932	0.687	0.275
2	8	7.945	54.932	0.687	0.275
5	8	8.063	62.773	0.785	0.314
10	8	8.004	3.920	0.049	0.020

Los valores presentados en la TABLA XVI reflejan que, a una frecuencia de muestreo de 0.5 MHz, el algoritmo presenta un error absoluto elevado de 349.194 m y un error relativo de falla del 4.365%, lo que evidencia una baja precisión en la localización de la falla. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto se reduce a 153.019 m y el error relativo a 1.913%, demostrando una mejora significativa en la precisión del método.

En frecuencias de 1 MHz y 2 MHz, los resultados muestran una notable consistencia, con un error absoluto de 54.932 m y un error relativo de 0.687%, lo que indica una mayor validez y precisión en la localización. Por otro lado, a frecuencias más altas como 5 MHz y 10 MHz, la distancia calculada es de 8.063 km y 8.004 km, respectivamente, manteniendo errores absolutos de 62.773 m y 3.920 m, además de errores relativos de 0.785% y 0.049%.



Estos resultados confirman que frecuencias de 1 MHz y superiores ofrecen una localización más precisa y consistente para fallas trifásicas, consolidando la aplicación del algoritmo en estas condiciones.

Por consiguiente, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 8 km con una frecuencia de 10 MHz se ilustra en la Fig. 35, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

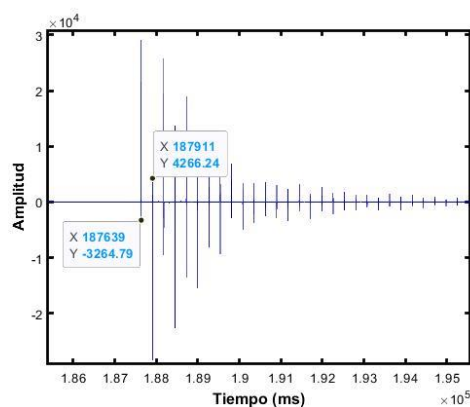


Fig. 35 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 8 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

A través de la Fig. 35 se observa que, los picos iniciales representan los cambios presentes en las señales al momento de generarse la falla, reflejando el incremento y reducción de los valores de voltaje en el sistema, a la vez que son seguidos por oscilaciones regulares que representan la reflexión de las ondas en estado transitorio. Asimismo, se destaca la presencia de pequeñas perturbaciones presentes en las ondas viajeras, variaciones que son significativas al momento de capturar los valores de localización para las fallas trifásicas.

Por lo tanto, a través de la TABLA XVII se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla provocada entre las tres fases al 60% desde el extremo local.



TABLA XVII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 60% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	12.349	349.194	2.910	1.746
0.75	12	12.153	153.019	1.275	0.765
1	12	12.055	54.932	0.458	0.275
2	12	12.055	54.932	0.458	0.275
5	12	11.937	62.773	0.523	0.314
10	12	11.996	3.920	0.033	0.020

Los valores presentados en la TABLA XVII reflejan que, con la frecuencia de muestreo de 0.5 MHz, el error absoluto asciende a 349.194 m y el error relativo de falla alcanza el 2.910%, lo que evidencia una precisión limitada. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto se reduce significativamente a 153.019 m y el error relativo disminuye a 1.275%, reflejando una mejora notable en la localización de la falla.

A frecuencias de 1 MHz y 2 MHz, los resultados muestran una mayor precisión, con errores absolutos de 54.932 m y un error relativo de 0.458%, lo que indica una localización más precisa y válida, además con 5 MHz y 10 MHz, los errores se minimizan aún más, alcanzando valores de 62.773 m y 3.920 m, respectivamente.

Estos resultados demuestran que, en el caso de fallas trifásicas, el método de un solo extremo es significativamente más preciso y confiable a frecuencias de 2 MHz o superiores, esto asegura una alta sensibilidad en la determinación de la ubicación de la falla.

Por lo tanto, mediante la Fig. 36 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 12 km con una frecuencia de 10 MHz, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

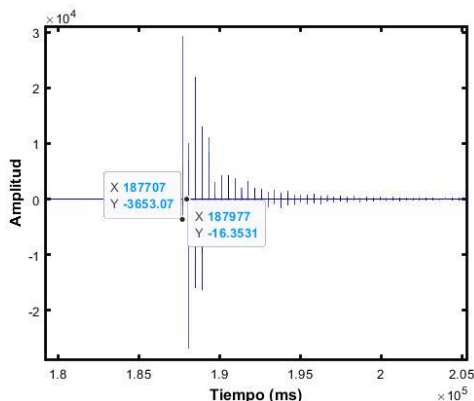


Fig. 36 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 12 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

A través de la Fig. 36 se observa que, el comportamiento del sistema en estado transitorio refleja los picos de amplitud de las señales que corresponden a la incidencia y reflexión de las ondas viajeras en relación con un solo terminal, pues ante una frecuencia de muestreo alta, la amplitud y el tiempo de ejecución de las ondas incrementa proporcionalmente, destacando que presenta bajas perturbaciones conforme sucede la falla, por lo cual, la precisión del algoritmo de un extremo es acertada ante frecuencias de muestreo altas, ya que para una falla trifásica al 60% de la línea sus resultados en gran parte están bajo criterios aceptables, reflejando errores poco significativos. Por último, a través de la TABLA XVIII se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla provocada entre las tres fases al 80%.

TABLA XVIII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE UN EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	15.292	708.188	4.426	3.541
0.75	16	15.684	315.839	1.974	1.579
1	16	16.175	174.597	1.091	0.837
2	16	15.880	119.665	0.748	0.598
5	16	16.116	115.745	0.723	0.579
10	16	16.027	27.466	0.172	0.137



Los resultados presentados en la TABLA XVIII indican que, a una frecuencia de muestreo de 0.5 MHz, el error absoluto es de 708.188 m, con un error relativo de falla del 4.426%, lo que proporciona una precisión limitada pero mejorable, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto se reduce a 315.839 m y el error relativo de falla baja al 1.974%, lo que refleja una mejora significativamente en la localización.

Sin embargo, con una frecuencia de 1 MHz, el error absoluto se reduce aún más, alcanzando 174.597 m, acompañada de un error relativo de falla del 1.091%, lo que destaca la tendencia en los resultados a una mayor precisión, pues con frecuencias superiores, como 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz, los resultados son notablemente precisos, con errores absolutos de 119.665 m, 115.745 m y 27.466 m respectivamente, ya que, a 10 MHz, el error relativo de falla es tan bajo como 0.172%, lo que reafirma la precisión del método en este rango de frecuencia.

Estos datos reafirman que, para fallas trifásicas al 80% de la línea, las frecuencias de muestreo de 1 MHz en adelante garantizan una localización precisa y consistente, minimizando errores tanto absolutos como relativos. De este modo, mediante la Fig. 37 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 16 km con una frecuencia de 10 MHz, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

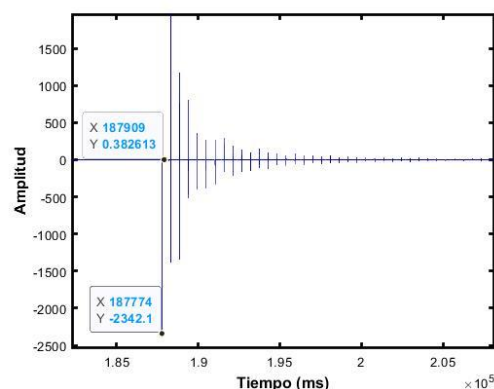


Fig. 37 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 16 km de la S/E Tabacundo (Cajas) con el método de un extremo y frecuencia de muestreo a 10MHz.

En base al comportamiento de las ondas viajeras en la Fig. 37 se observa que, mantienen una relación decreciente entre la amplitud y el tiempo de ocurrencia de la



falla, evidenciando un amortiguamiento periódico de las oscilaciones. Además, estos resultados determinan que, la sensibilidad del algoritmo para una falla trifásica al 80% de la línea es mayor a frecuencias superiores 1 MHz.

4.4 Localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de doble extremo

Para la localización de fallas eléctricas mediante el método de doble extremo, se recrearon fallas a diferentes distancias a lo largo de la línea, para así obtener la ubicación más cercana al valor real, para esto se consideraron distintos valores de frecuencia de muestreo, con el fin de definir la precisión de cada cálculo, determinando errores absolutos y relativos en función de la longitud del tramo.

4.4.1 Localización de una falla monofásica mediante el método de doble extremo

El cuarto escenario consiste en una falla monofásica y su localización a través del método de doble extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se utilizaron diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como: 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz. Por lo tanto, a través de la TABLA XIX se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla monofásica simulada al 20% de la línea.

TABLA XIX

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	1.761	2239.330	55.983	11.197
0.75	4	2.153	1846.981	46.175	9.235
1	4	2.349	1650.806	41.270	8.254
2	4	2.202	1797.937	44.948	8.990
5	4	2.114	1886.216	47.155	9.431
10	4	2.202	1797.937	44.948	8.990



Los resultados reflejados en la TABLA XIX evidencian que, el método de doble extremo aplicado para localizar fallas monofásicas al 20% de la línea presenta limitaciones de precisión, particularmente a frecuencias de muestreo bajas y medias.

Para una frecuencia de muestreo de 0.5 MHz el error absoluto es elevado, alcanzando 2239.330 m, con un error relativo de falla del 55.983%, lo que señala una baja fiabilidad en las mediciones iniciales. Aunque se observa una leve mejora al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz y 1 MHz, los errores relativos aún superan el 40%, lo cual indica que las frecuencias medias no ofrecen una precisión suficiente para este escenario.

Por otro lado, al emplear frecuencias de 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz, se logra reducir los errores, aunque estos permanecen por encima de los márgenes ideales de precisión, por lo cual, este comportamiento sugiere que el método de doble extremo es altamente sensible a las diferencias de tiempo entre terminales ante una falla monofásica, lo que dificulta la localización precisa de fallas bajo estas condiciones específicas de la línea y la configuración del sistema.

Dentro de este contexto, en la Fig. 38 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 4 km con una frecuencia de 1 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

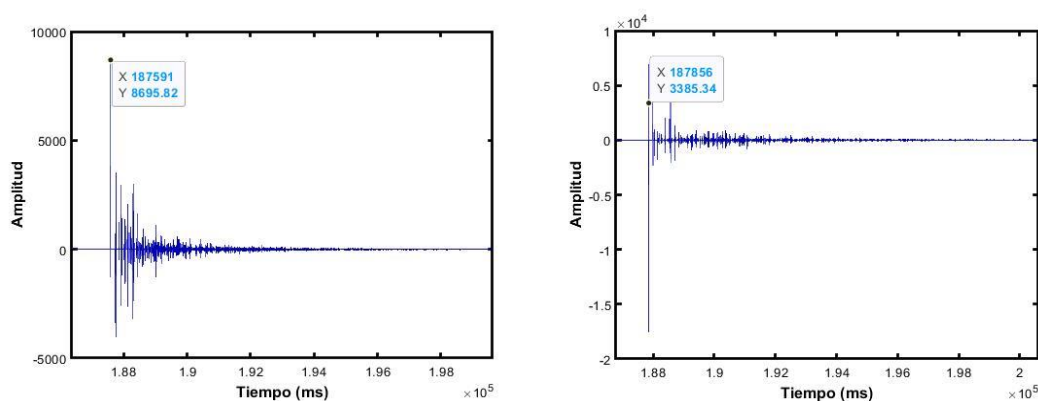


Fig. 38 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 1 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.



A través de la Fig. 38 se identifica la diferencia de tiempo en la incidencia de las ondas viajeras para cada uno de los terminales de la línea, al igual que la desigualdad en el comportamiento oscilatorio amortiguado de las señales, de modo que, la primer onda incidente es registrada por la S/E Tabacundo (Cajas) en conjunto con un pico positivo que representa la magnitud de voltaje generada en el sistema, posteriormente es la S/E Cayambe la que registra la onda viajera, esto se debe a la lejanía que tiene este extremo en relación con la ocurrencia de la falla y su pico incidente de carácter negativo, que corresponde a una caída de voltaje en el terminal.

En este sentido, el método de localización de doble extremo ya no se centra en la incidencia y reflexión de las ondas en un solo terminal, sino que se basa en la comunicación presente entre cada uno de los extremos en relación con la respuesta del sistema ante un estado transitorio y la transmisión de las ondas a lo largo de la línea, por lo cual la precisión depende en cierta manera de que tan cercana a un extremo ocurre una falla.

Es así como, a través de la TABLA XX se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla monofásica simulada al 40% de la línea.

TABLA XX

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	8.234	234.429	2.930	1.172
0.75	8	7.646	354.094	4.425	1.770
1	8	7.352	648.356	8.104	3.242
2	8	7.499	501.225	6.265	2.506
5	8	7.469	530.651	6.633	2.653
10	8	7.381	618.930	7.737	3.095

Los resultados presentados en la TABLA XX destacan que, con 0.5 MHz, el método de doble extremo muestra un error absoluto de 234.429 m y un error relativo de falla de



2.930%, lo cual se considera una precisión inicial aceptable. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz y 1 MHz, los errores aumentan significativamente, alcanzando 354.094 m y 648.356 m en términos absolutos, con errores relativos de falla superiores al 4% y 8%, lo que refleja una marcada disminución en la precisión bajo estas condiciones.

Al aumentar la frecuencia de muestreo a 2 MHz, se observa una reducción con un error absoluto de 501.225 m y un error relativo de 6.265%, indicando que la localización sigue siendo imprecisa para este escenario. No obstante, la frecuencia de 5 MHz presenta una variación en la precisión, con un error absoluto de 530.651 m y un error relativo de 6.633%, lo que sugiere que la sensibilidad del algoritmo se ve influenciada por la distancia de la falla y la resolución de los datos muestreados.

Estos resultados evidencian que para una falla monofásica las frecuencias superiores no siempre garantizan una mayor precisión en la localización. Dicho esto, en la Fig. 39 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 8 km con una frecuencia de 0.5 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

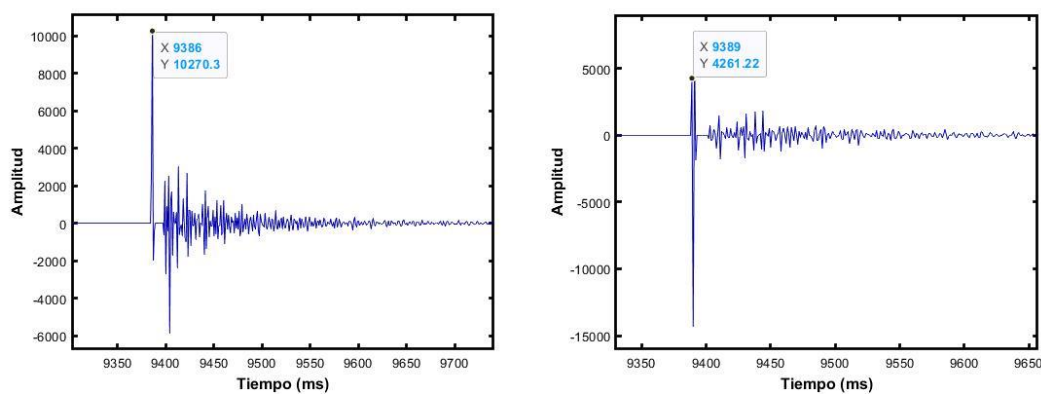


Fig. 39 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 0.5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

A través de la Fig. 39 se observa que, la representación de las ondas viajeras responde al comportamiento del sistema ante una falla del tipo monofásica al 40% de la línea, reflejando la diferencia en la amplitud de los picos para cada uno de los terminales, al



igual que el tiempo de ocurrencia que tienen las señales. Para este caso, el extremo de la S/E Tabacundo (Cajas) es la primera en detectar la onda incidente generada por la falla con un pico positivo pronunciado, mientras que seguidamente es la S/E Cayambe la que registra la onda generada por la falla a través de un pico positivo moderado.

Por lo cual, la diferencia de tiempo para cada uno de los extremos representa un error menor al 10%, ya que a pesar de que a frecuencias bajas se mejora la resolución temporal, aun se refleja el comportamiento de la incidencia y reflexión de las ondas viajeras ante un sistema de subtransmisión con 20 km de longitud.

Dicho esto, a través de la TABLA XXI se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla monofásica al 60% de la línea.

TABLA XXI

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 60% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	11.766	234.429	1.954	1.172
0.75	12	12.746	746.443	6.220	3.732
1	12	12.648	648.356	5.403	3.242
2	12	12.501	501.255	4.177	2.506
5	12	12.531	530.651	4.422	2.653
10	12	12.619	618.930	5.158	3.095

Los datos presentados a través de la TABLA XXI indican que, para una falla monofásica al 60% de la línea, la precisión del método de doble extremo varía significativamente con la frecuencia de muestreo.

A 0.5 MHz, se observa un error absoluto de 234.429 m con un error relativo de falla de 1.954%, indicando una precisión moderada. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, los errores aumentan considerablemente, alcanzando un error absoluto de



746.443 m y un error relativo de falla de 6.220%, lo que resalta una disminución notable en la precisión del método a esta frecuencia.

Por otro lado, las frecuencias de 1 MHz y 2 MHz muestran una reducción en los resultados, con errores absolutos de 648.356 m y 501.255 m, respectivamente, y errores relativos de falla de 5.403% y 4.177%, aunque la precisión no mejora con estas frecuencias, los valores obtenidos aun reflejan una menor discrepancia en la relación con la distancia real, a 5 MHz, el rendimiento es menos acertado, con un error absoluto 530.651 y un error relativo del 4.422%. Con 10 MHz, se registra un error absoluto de 618.930 m y un error relativo de 5.158%, lo que demuestra que las frecuencias altas no garantizan una localización más precisa en este escenario, ya que la diferencia en los errores relativos de la falla en su mayoría es superior al 4% y en relación con la línea superan el 2%.

De esta manera, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 12 km con una frecuencia de 0.5 MHz, se reflejan en la Fig. 40, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

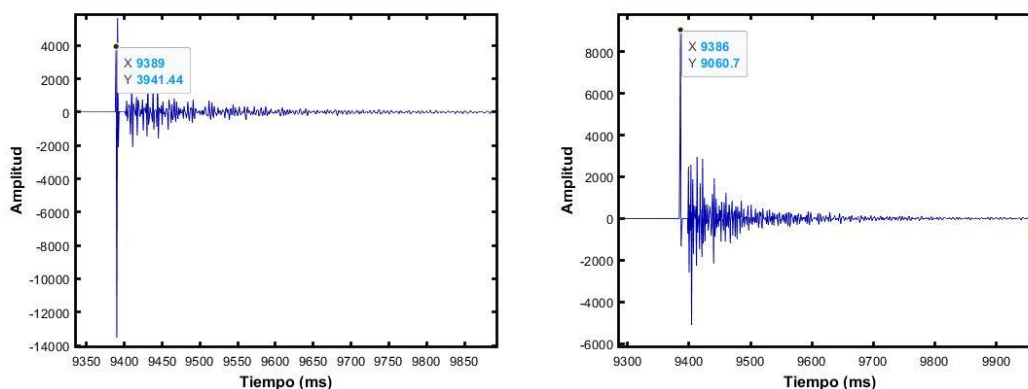


Fig. 40 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 0.5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

Es así como, en la Fig. 40 se observan los tiempos de llegada de cada una de las ondas incidentes generadas por la falla a cada uno de los respectivos terminales, identificando que la primera onda es captada por la S/E Cayambe y posteriormente por la S/E Tabacundo (Cajas), esto debido a la naturaleza de la falla al encontrarse en el segundo



tramo de la línea. Por otro lado, la diferencia en el comportamiento de la amplitud de las señales es notable al destacar como responde cada uno de los terminales ante una falla monofásica y el tiempo que le conlleva a cada una adoptar un estado posterior al evento, reflejándose así en picos pronunciados o moderados.

Por último, en la TABLA XXII se determinan los resultados de una falla monofásica al 80% de la línea.

TABLA XXII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA MONOFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	18.239	2239.330	13.996	11.197
0.75	16	17.847	1846.981	11.544	9.235
1	16	17.651	1650.806	10.318	8.254
2	16	17.798	1797.937	11.237	8.990
5	16	17.886	1886.216	11.789	9.431
10	16	17.798	1797.937	11.237	8.990

Los valores presentados en la TABLA XXII denotan que, la precisión del método varía considerablemente según la frecuencia de muestreo, ya que a 0.5 MHz y 0.75 MHz, los errores absolutos son elevados, alcanzando 2239.330 m y 1846.981 m, respectivamente, con errores relativos de falla del 13.996% y 11.544%, lo que refleja una baja precisión a estas frecuencias, no obstante, al incrementar la frecuencia a 1 MHz, el error absoluto se reduce a 1650.806 m, con un error relativo de falla de 10.318%, destacando una ligera mejora en la localización.

Por otro lado, con 2 MHz los resultados muestran un comportamiento similar al de 10 MHz, con un error absoluto de 1797.937 m y un error relativo de falla de 11.237%, esto indica que, aunque las frecuencias de 1 MHz presentan menor error en la localización de la falla monofásica al 80% de la línea, el comportamiento del método varía en



relación con la distancia de la falla y la frecuencia utilizada, resaltando la importancia de ajustar los parámetros del algoritmo para condiciones específicas.

Por último, el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla monofásica a 16 km con una frecuencia de 0.5 MHz con el método de doble extremo se ilustra en la Fig. 41, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

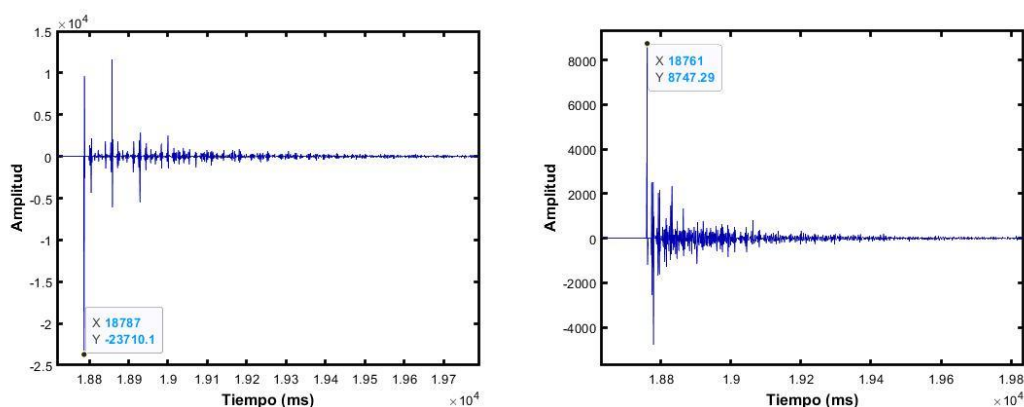


Fig. 41 Ondas viajeras generadas por una falla monofásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

A través de la Fig. 41 se identifica la diferencia de tiempo en la llegada de las ondas viajeras para cada uno de los terminales de la línea, al igual que la desigualdad en el comportamiento oscilatorio amortiguado de las señales, en otras palabras, la primer onda incidente es registrada por la S/E Cayambe acompañada por un pico positivo que representa el incremento de voltaje generado en el extremo, posteriormente es la S/E Tabacundo (Cajas) la que registra la onda viajera, esto se debe a la lejanía de 16 km que tiene este extremo en relación con la ocurrencia de la falla y su pico de magnitud que corresponde a una caída de voltaje presente en dicho terminal.

4.4.2 Localización de una falla bifásica mediante el método de doble extremo

El quinto escenario corresponde a una falla del tipo bifásica y su localización a través del método de doble extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se



utilizaron diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como: 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz.

Por lo tanto, a través de la TABLA XXIII se reflejan los valores generados por el algoritmo al provocar una falla bifásica simulada al 20% del terminal local.

TABLA XXIII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	3.526	473.759	11.844	2.369
0.75	4	3.722	277.585	6.940	1.388
1	4	4.115	114.764	2.869	0.574
2	4	4.115	114.764	2.869	0.574
5	4	3.938	61.793	1.545	0.309
10	4	3.968	32.366	0.809	0.162

Los valores reflejados en la TABLA XXIII indican que, a 0.5 MHz el error absoluto es alto, alcanzando 473.759 m, con un error relativo de falla del 11.844%, lo que evidencia una precisión limitada del método a bajas frecuencias. Al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, se observa una mejora en la precisión, reduciéndose el error absoluto a 277.585 m y el error relativo a 6.940%, aunque estos valores aún están por encima de los niveles ideales.

La precisión mejora notablemente a partir de 1 MHz y 2 MHz, donde el error absoluto disminuye a 114.764 m y el error relativo de falla a 2.869%, mostrando un comportamiento aceptable, por otro lado, las frecuencias de 5 MHz y 10 MHz ofrecen mejores resultados, con un error absoluto de 61.793 m, y un error relativo de falla de 1.545% para 5 MHz, mientras que, para 10 MHz los valores se reducen a 32.366 m y 0.809%, respectivamente.

Estos resultados confirman que, frecuencias superiores a 1 MHz no solo proporcionan mayor exactitud, sino que también demuestran una linealidad en la mejora del método



para localizar fallas bifásicas al 20% de la línea. Para ello, en la Fig. 42 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 4 km con una frecuencia de 10 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

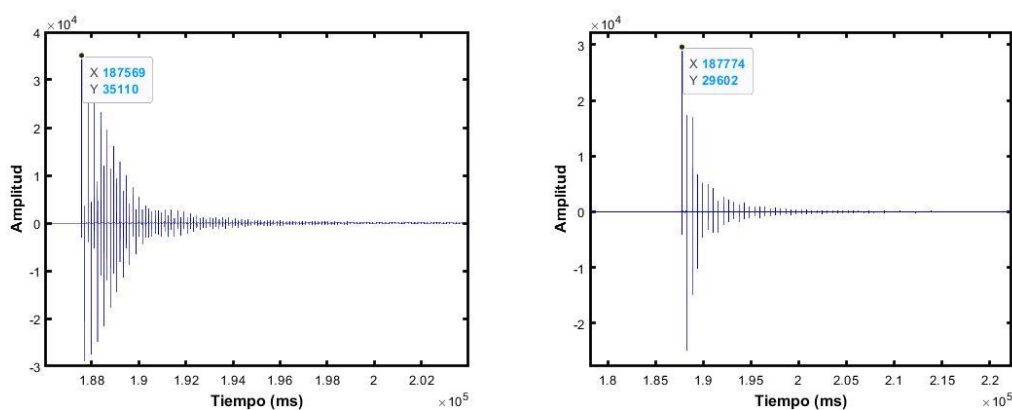


Fig. 42 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

Las ondas presentadas en la Fig. 42 denotan que, la diferencia de tiempo se relaciona con la distancia que tiene cada señal en cuanto a la ubicación de la falla, de tal modo que, la primera onda incidente es registrada por la S/E Tabacundo (Cajas) acompañada por continuos picos positivos en la amplitud de la señal, posteriormente es la S/E Cayambe la que registra la onda viajera, acompañada por un amortiguamiento de la falla más temprano a comparación de su similar, lo cual indica el impacto que tiene una falla bifásica al 20% de la línea para cada uno de los terminales.

Por lo cual, el método de localización de doble extremo refleja una mejor precisión en cuanto a la localización de las fallas, denotando el comportamiento del sistema en estado transitorio ante la propagación de las ondas.

Es así como, a través de la TABLA XXIV se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla bifásica al 40% de la línea.



TABLA XXIV

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	8.234	234.429	2.930	1.172
0.75	8	8.038	38.255	0.478	0.191
1	8	8.234	234.429	2.930	1.172
2	8	7.940	59.832	0.748	0.299
5	8	7.999	0.980	0.012	0.005
10	8	7.999	0.980	0.012	0.005

Los resultados presentados en la TABLA XXIV indican una marcada variabilidad en la precisión de la distancia, en función de la frecuencia de muestreo, puesto que con 0.5 MHz y 1 MHz, el error absoluto se mantiene en 234.429 m, con un error relativo de falla del 2.930%, lo que refleja una precisión moderada ante las condiciones evaluadas. Sin embargo, al aumentar la frecuencia a 0.75 MHz, el método muestra una mejora significativa, reduciendo el error absoluto a 38.255 m y el error relativo de falla a 0.478%, lo cual denota una precisión considerablemente mayor.

Con una frecuencia de 2 MHz, el método mantiene un desempeño destacado, con un error absoluto 59.832 m y un error relativo de 0.748, a frecuencias más altas, como 5 MHz y 10 MHz se logran los mejores resultados, reduciendo el error absoluto a 0.980 m y el error relativo de falla a un mínimo de 0.012%, lo que pone en manifiesto la alta sensibilidad y fiabilidad del método a frecuencias más altas en la localización de este tipo de falla.

Por ello, a través de la Fig. 43 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 8 km con una frecuencia de 5 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

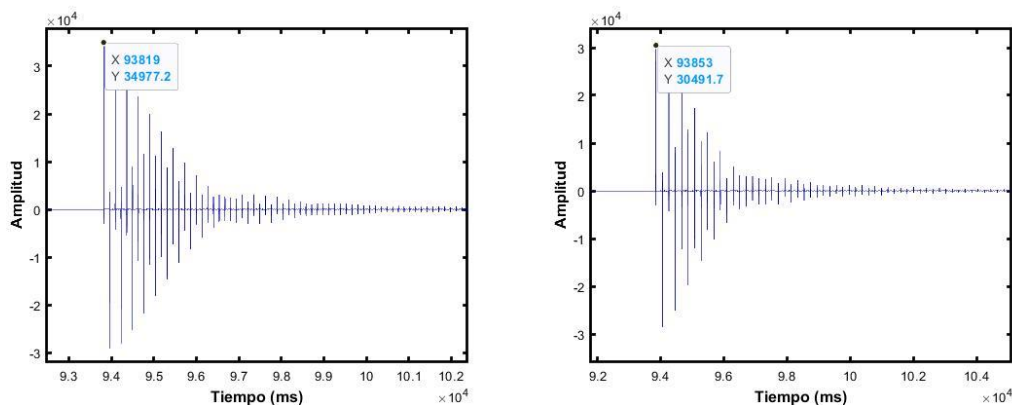


Fig. 43 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

A través de la Fig. 43 se observa que, la representación de las ondas viajeras responde al comportamiento del sistema ante una falla del tipo bifásica al 40% de la línea, reflejando la diferencia en los tiempos de ocurrencia de cada una de las ondas viajeras en relación con la llegada a cada terminal, sin embargo, la diferencia de amplitud de cada una de las señales no es pronunciada a pesar del amortiguamiento de las señales a lo largo del evento.

Para este caso, el extremo de la S/E Tabacundo (Cajas) es la primera en detectar la onda incidente generada por la falla con un pico positivo pronunciado, mientras que, seguidamente la S/E Cayambe es la que registra la onda generada por la falla a través de un pico positivo, por lo cual la diferencia de tiempo para cada uno de los extremos representa un error menor al 1%, demostrando así que ante las condiciones específicas de la línea, la localización de una falla bifásica al 40% tiene una mejor precisión.

Por consiguiente, a través de la TABLA XXV se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla bifásica al 60% de la línea.



TABLA XXV

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 60% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	11.766	234.429	1.954	1.172
0.75	12	11.962	38.255	0.319	0.191
1	12	11.766	234.429	1.954	1.172
2	12	12.060	59.832	0.499	0.299
5	12	12.001	0.980	0.008	0.005
10	12	12.001	0.980	0.008	0.005

Los valores presentados en la TABLA XXV demuestran que, la precisión del método mejora con el incremento de la frecuencia de muestreo, ya que a 0.5 MHz y 1 MHz, el error absoluto se mantiene en 234.429 m, acompañado de un error relativo de falla del 1.954%, lo que indica una precisión moderada pero mejorable, no obstante, al aumentar la frecuencia a 0.75 MHz, se observa una mejora notable, con un error absoluto reducido a 38.255 m y un error relativo de falla que disminuye a 0.319%.

Al considerar una frecuencia de 2 MHz, el desempeño sigue siendo aceptable, con un error absoluto de 59.832 m y un error relativo de falla de 0.499, sin embargo, las frecuencias de 5 MHz y 10 MHz destacan por ofrecer la mayor precisión, con un error absoluto mínimo de 0.980 m y un error relativo de falla de tan solo 0.008%.

Por lo tanto, mediante la Fig. 44 se ilustra el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 12 km con una frecuencia de 5 MHz, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

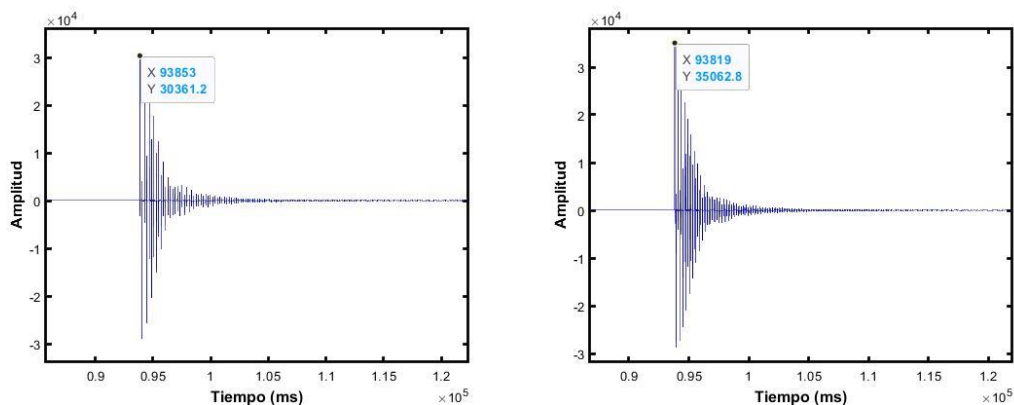


Fig. 44 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 5 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

Las señales de las ondas viajeras presentadas en la Fig. 44 denotan que, la S/E Cayambe es la primera en registrar la llegada de la onda viajera incidente, seguida por un temprano amortiguamiento de las ondas, posteriormente es la S/E Tabacundo (Cajas) la que registra la llegada de la onda inicial después de 34 ms, presentando un comportamiento similar al de su opuesto, representando así el estado transitorio del sistema durante la falla eléctrica. Por lo cual, a través de la diferencia de tiempo es como el método de localización de doble extremo refleja una mejor precisión en cuanto a la localización de las fallas.

Por último, a través de la TABLA XXVI se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla bifásica provocada al 80% de la línea.

TABLA XXVI

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA BIFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	16.474	473.759	2.961	2.369
0.75	16	16.278	277.585	1.735	1.388
1	16	15.885	114.764	0.717	0.574
2	16	15.885	114.764	0.717	0.574
5	16	16.062	61.793	0.386	0.309
10	16	16.032	32.366	0.202	0.162



Los resultados obtenidos para la localización de una falla bifásica al 80% de la línea utilizando el método de doble extremo, presentados en la TABLA XXVI, evidencian una tendencia general hacia una mayor precisión conforme se incrementa la frecuencia de muestreo. A 0.5 MHz, el error absoluto es significativo, alcanzando 473.759 m, acompañado de un error relativo de falla de 2.961%, lo que refleja una precisión incierta. Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto disminuye a 277.585 m, y el error relativo de falla se reduce a 1.735%, demostrando una mejora notable.

De esta manera, mediante 1 MHz y 2 MHz, la distancia calculada muestra una mayor cercanía a la distancia real, con un error absoluto de 114.764 m y un error relativo de falla de 0.717%, lo que garantiza una localización más precisa y consistente, mientras que, a 5 MHz, el error absoluto disminuye a 61.793 m, con un error relativo de falla de 0.386%, no obstante, con 10 MHz, se logra una precisión excepcional, al reducir el error absoluto a 32.366 m y el error relativo de 0.202%, destacando así en su mayoría la presencia de errores inferiores al 1%. De este modo, a través de la Fig. 45 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla bifásica a 16 km con una frecuencia de 10 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

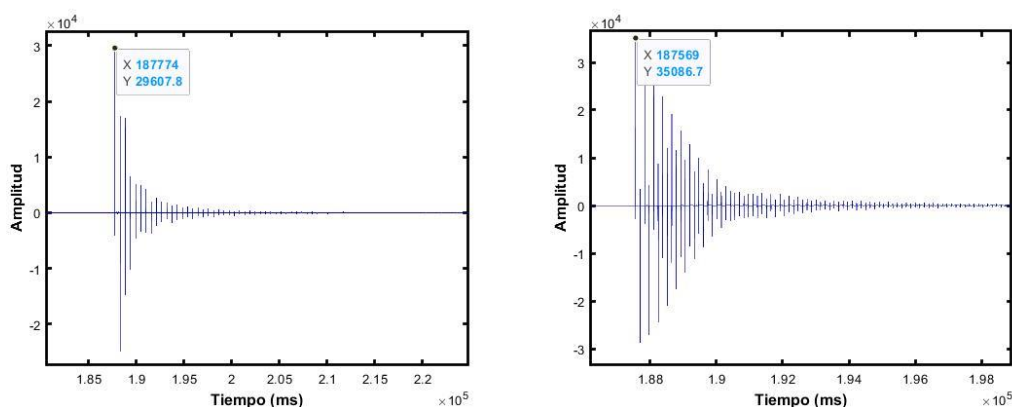


Fig. 45 Ondas viajeras generadas por una falla bifásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.



Las ondas presentadas en la Fig. 45 denotan que, la diferencia de tiempo en la llegada a cada uno de los terminales se relaciona con la distancia que tienen en cuanto a la ubicación de la falla, de tal modo que, la primera onda incidente es registrada por la S/E Cayambe acompañada por picos pronunciados en la amplitud de la señal, posteriormente es la S/E Tabacundo (Cajas) la que registra la onda viajera, acompañada por un amortiguamiento de la falla más temprano en comparación con su similar, lo cual indica el impacto que tiene una falla bifásica al 60% de la línea para cada terminal.

Por lo cual, el método de localización de doble extremo refleja una mejor precisión en cuanto a la localización de las fallas, denotando el comportamiento del sistema en estado transitorio ante la propagación de las ondas y la reducción en los errores de forma lineal.

4.4.3 Localización de una falla trifásica mediante el método de doble extremo

El sexto escenario corresponde a una falla del tipo trifásica y su localización a través del método de doble extremo, a distancias de 4km, 8km, 12km y 16km, que corresponden al 20%, 40%, 60% y 80% de la longitud total de la línea, para ello se utilizaron diversos valores de frecuencia de muestreo, tales como: 500kHz, 750kHz, 1MHz, 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz. Dicho esto, a través de la TABLA XXVII se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla trifásica simulada al 20% de la línea.

TABLA XXVII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 20% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	4	3.526	473.759	11.844	2.369
0.75	4	3.722	277.585	6.940	1.388
1	4	4.115	114.764	2.869	0.574
2	4	4.115	114.764	2.869	0.574
5	4	3.938	61.793	1.545	0.309
10	4	3.968	32.366	0.809	0.162



Los valores de la TABLA XXVII muestran que, la precisión mejora significativamente al incrementar la frecuencia de muestreo, de manera que, con 0.5 MHz el error absoluto alcanza los 473.759 m, con un error relativo del 11.844%, indicando una baja precisión, mientras que, al incrementar la frecuencia a 0.75 MHz, el error absoluto disminuye a 277.585 m, junto a un error relativo de falla del 6.940%, lo que demuestra una mejora notable.

Dicho esto, al considerar frecuencias de 1 MHz y 2 MHz, el error absoluto se reduce aún más a 114.764 m, con un error relativo del 2.869% para ambas frecuencias, de modo que, se observa una reducción gradual en los errores a medida que aumenta la frecuencia. Por lo tanto, al utilizar una frecuencia de 5 MHz, el error absoluto se reduce a 61.793 m, con un error relativo de falla del 1.545%, lo que representa un nivel de precisión más aceptable, pero con 10 MHz, se logra el mayor nivel de exactitud, con un error absoluto de solo 32.366 m y un error relativo de falla del 0.809%, además de un error relativo en relación con la longitud de la línea de apenas 0.162%, destacando dicha frecuencia como la opción más viable para la localización precisa de fallas trifásicas.

De esta manera, a través de la Fig. 46 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 4 km con una frecuencia de 10 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

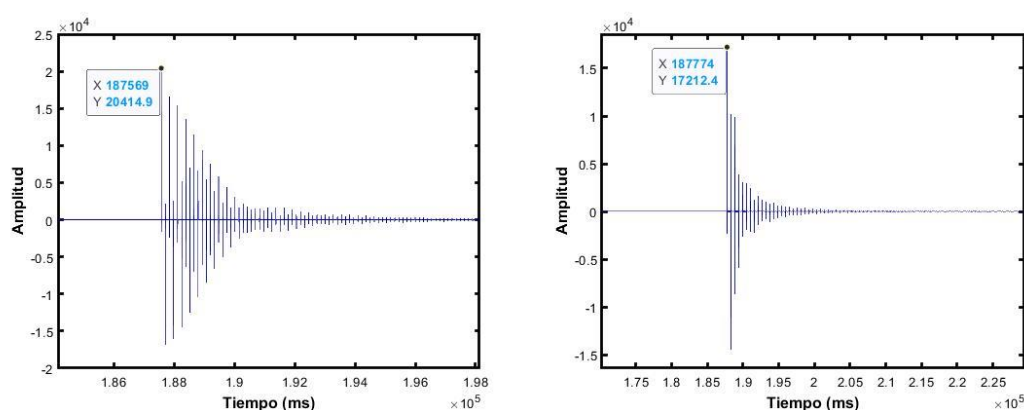


Fig. 46 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 4 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.



Las señales de ondas reflejadas en la Fig. 46 destacan que, el primer extremo en detectar la onda incidente es la S/E Tabacundo (Cajas) presentando continuos picos positivos en la amplitud de su señal, por otro lado, la S/E Cayambe es el segundo terminal en recibir la señal de la onda viajera registrada por la falla, caracterizándose por tener menor rango de amplitud en comparación con su homónima.

Por lo tanto, a través de la TABLA XXVIII se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla entre las tres fases, al 40% de la línea.

TABLA XXVIII

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 40% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	8	8.234	234.429	2.930	1.172
0.75	8	8.038	38.255	0.478	0.191
1	8	8.234	234.429	2.930	1.172
2	8	7.940	59.832	0.748	0.299
5	8	7.999	0.980	0.012	0.005
10	8	7.999	0.980	0.012	0.005

Los valores presentados en la TABLA XXVIII muestran que, con una frecuencia de 0.5 MHz y 1 MHz, el error absoluto alcanza 234.429 m, con un error relativo de falla del 2.930%, lo que indica una precisión moderada. Sin embargo, al considerar una frecuencia de muestreo de 0.75 MHz, se observa una mejora significativa, ya que el error absoluto se reduce a 38.255 m, con un error relativo de falla del 0.478%, lo que demuestra un incremento notable en la precisión.

A partir de 2 MHz, aunque el error absoluto aumenta ligeramente a 59.832 m, el error relativo permanece en un nivel aceptable de 0.748%, evidenciando un desempeño adecuado con errores inferiores al 1%. No obstante, al considerar frecuencias superiores como 5 MHz y 10 MHz, se identifica un cambio drástico en la localización de la falla,



alcanzando un error absoluto mínimo de 0.980 m y un error relativo de falla de solo 0.012%, destacando la alta sensibilidad y fiabilidad del método a estas frecuencias.

Es así como, a través de la Fig. 47 se representa el comportamiento de las ondas generadas por la simulación de una falla trifásica a 8 km con una frecuencia de 10 MHz con el método de doble extremo, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

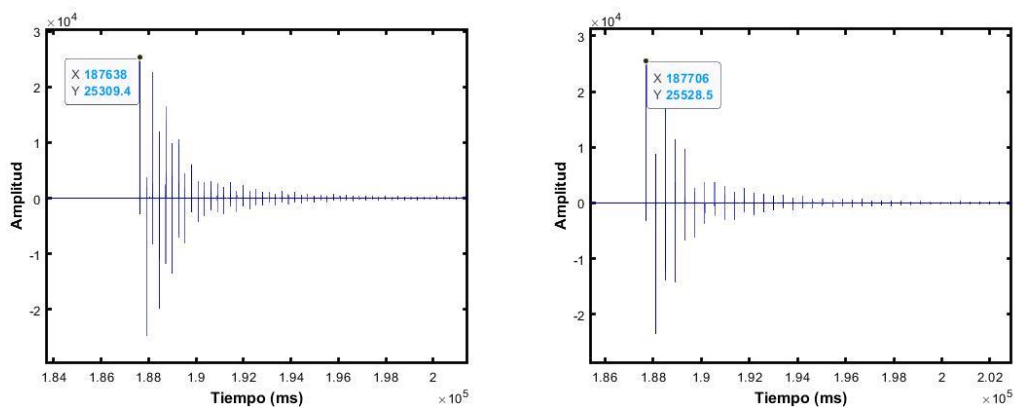


Fig. 47 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 8 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

En base a las señales mostradas en la Fig. 47 se comprende que, la representación de las ondas viajeras responde al comportamiento del sistema ante una falla del tipo trifásica al 40% de la línea, reflejando la diferencia en los tiempos de ocurrencia de cada una de las ondas viajeras en relación con la llegada a cada terminal, sin embargo, la diferencia de amplitud de cada una de las señales no es pronunciada a pesar del amortiguamiento de las señales a lo largo del evento.

Para este caso, el extremo de la S/E Tabacundo (Cajas) es la primera en detectar la onda incidente generada por la falla con un pico positivo pronunciado, mientras que, seguidamente la S/E Cayambe es la que registra la onda generada por la falla a través de un pico positivo de igual manera pronunciado, por lo cual, la diferencia de tiempo para cada uno de los extremos representa un error menor al 1% demostrando que para las condiciones específicas de la línea la localización de una falla trifásica al 40% tiene una mejor precisión.



Por consiguiente, a través de la TABLA XXIX se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla entre las tres fases, al 60% del terminal local.

TABLA XXIX

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 60% DE LA LÍNEA CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	12	11.766	234.429	1.954	1.172
0.75	12	11.962	38.255	0.319	0.191
1	12	11.766	234.429	1.954	1.172
2	12	12.060	59.832	0.499	0.299
5	12	12.001	0.980	0.008	0.005
10	12	12.001	0.980	0.008	0.005

En los resultados presentados en la TABLA XXIX se determina que, con frecuencias de 0.5 MHz y 1 MHz, el error absoluto es de 234.429 m, con un error relativo de 1.954%, lo que indica una precisión moderada. Mientras que, al establecer una frecuencia de 0.75 MHz, el error absoluto disminuye significativamente a 38.255 m, con un error relativo de 0.319%, reflejando una notable mejora en la precisión.

Por otro lado, al considerar frecuencias más altas, se evidencia un desempeño consistente y preciso en la localización de fallas, pues con 2 MHz, el error absoluto se incrementa ligeramente a 59.832 m, con un error relativo de 0.499%, lo cual, aunque muestra un incremento respecto a 0.75 MHz, sigue dentro de valores aceptables para la estimación de errores. Es así como, a partir 5 MHz y 10 MHz el algoritmo logra una notable reducción en el error absoluto, alcanzando apenas 0.980 m y un error relativo de solo 0.008%, resultados que destacan por su cercanía a valores ideales de la localización precisa.

De modo que, el comportamiento de las ondas se ilustra mediante la Fig. 48, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

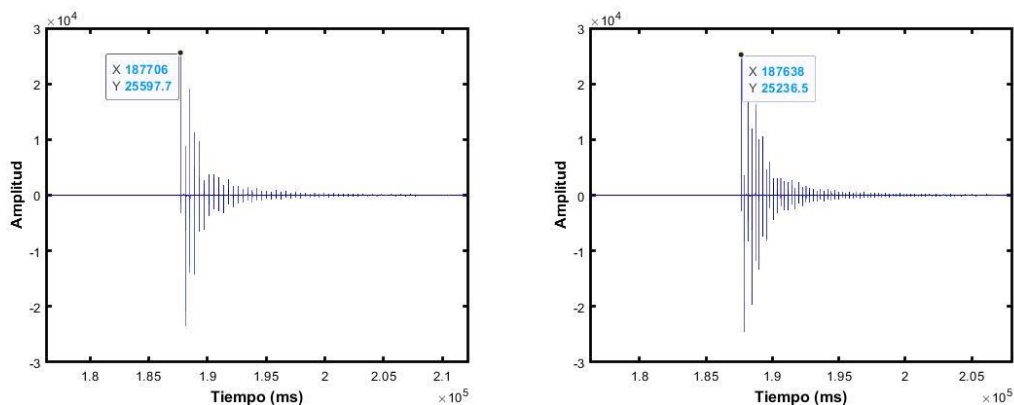


Fig. 48 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 12 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.

Las señales de las ondas viajeras plasmadas en la Fig. 48 denotan que, la S/E Cayambe es la primera en registrar la llegada de la onda viajera incidente, seguida por un temprano amortiguamiento de las ondas, posteriormente es la S/E Tabacundo (Cajas) la que registra la llegada de la onda inicial después de 68 ms, presentando un comportamiento similar al de su opuesto, representando así el estado transitorio del sistema durante la falla eléctrica, por lo cual, a través de la diferencia de tiempo es como el método de localización de doble extremo refleja una mejor precisión en cuanto a la localización de este tipo de fallas. Por último, a través de la TABLA XXX se reflejan los valores generados por el algoritmo al recrear una falla entre las tres fases al 80% del terminal local.

TABLA XXX

LOCALIZACIÓN DE UNA FALLA TRIFÁSICA AL 80% CON EL MÉTODO DE DOBLE EXTREMO.

Frecuencia de muestreo (MHz)	Distancia real (km)	Distancia calculada (km)	Error absoluto (m)	Error relativo falla (%)	Error relativo línea (%)
0.5	16	16.474	473.759	2.961	2.369
0.75	16	16.278	277.585	1.735	1.388
1	16	15.885	114.764	0.717	0.574
2	16	15.885	114.764	0.717	0.574
5	16	16.062	61.793	0.386	0.309
10	16	16.032	32.366	0.202	0.162



Los resultados reflejados en la TABLA XXX evidencian que, a una frecuencia de 0.5 MHz, el error absoluto alcanza 473.759 m, equivalente a un error relativo de 2.961%, mientras que, con una frecuencia de 0.75 MHz, se observa una mejora significativa con un error absoluto de 277.585 m y un error relativo del 1.735%.

Con frecuencias de 1 MHz y 2 MHz, la precisión se incrementa notablemente, reduciendo el error absoluto a 114.764 m, lo que representa un error relativo del 0.717%, valores que indican una mayor cercanía con la distancia real de la falla. Posteriormente, al utilizar una frecuencia de 5 MHz, el método demuestra una mayor sensibilidad y exactitud, con un error absoluto de solo 61.793 m y un error relativo de 0.386%, reflejando un desempeño adecuado.

Sin embargo, al incrementar la frecuencia a 10 MHz, el error absoluto se reduce a 32.366 m, con un error relativo de 0.202%, destacando la capacidad del método para identificar con precisión la ubicación de la falla a frecuencias de muestreo más altas. Estos resultados confirman que, para fallas trifásicas, el aumento progresivo de la frecuencia de muestreo mejora de forma consistente la precisión en la localización.

Dicho esto, el comportamiento de las ondas se ilustra mediante la Fig. 49, evidenciando las características de amplitud y los tiempos de incidencia y reflexión correspondientes.

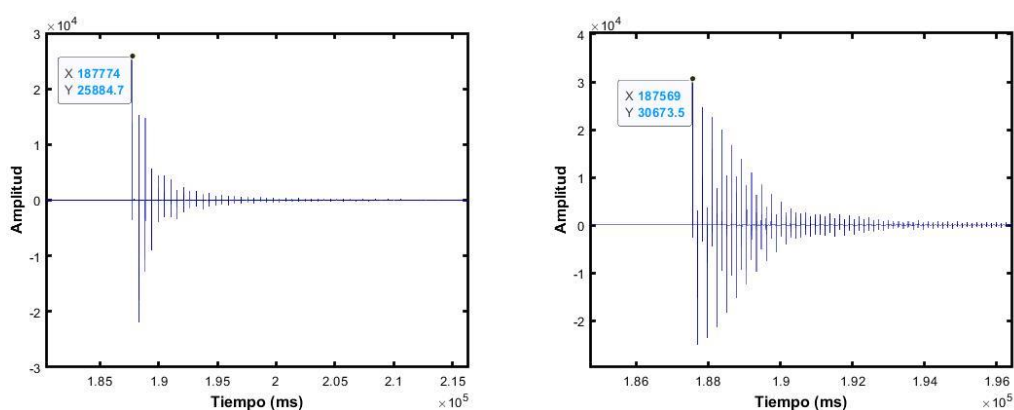


Fig. 49 Ondas viajeras generadas por una falla trifásica a 16 km con el método de doble extremo y frecuencia de muestreo a 10 MHz: a) Tabacundo (Cajas) y b) Cayambe.



En base a las señales representadas en la Fig. 49 se comprende que, la diferencia del tiempo en la llegada a cada uno de los terminales se relaciona con la distancia que tiene cada uno en cuanto a la ubicación de la falla, de tal modo que, la primera onda incidente es registrada por la S/E Cayambe acompañada por picos pronunciados en la amplitud de la señal, posteriormente es la S/E Tabacundo (Cajas) la que registra la onda viajera, acompañada por un amortiguamiento de la falla más temprano a comparación de su opuesta, lo cual indica el impacto que tiene una falla trifásica al 80% de la línea para cada uno de los terminales, en comparación con la oscilaciones presentes a lo largo del evento.

4.5 Análisis de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras

La localización de fallas eléctricas con algoritmos basados en ondas viajeras en la línea de Tabacundo - Cayambe de la red de subtransmisión de EMELNORTE denota que los algoritmos basados en los métodos de un extremo y doble extremo reflejan diferencias significativas en sus resultados a lo largo de los distintos casos de estudio.

La estimación en la precisión de los resultados y la sensibilidad que tiene cada tipo de algoritmo en relación con la naturaleza de la falla se relaciona con las variaciones presentes en ciertos factores, como el tipo de falla, la frecuencia de muestreo, la longitud del tramo de análisis y la ubicación de la falla respecto a los terminales. Así mismo, la consideración de uno o dos terminales, representa una disminución en los errores de estimación del punto de falla, especialmente en líneas de subtransmisión como el tramo analizado.

La localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de un solo extremo demuestra que, para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, una frecuencia de 5 MHz o superior genera errores absolutos inferiores al 1%, con estimaciones cercanas a los 10 m en la mayoría de los casos, esto se observa en los resultados presentados en la TABLA X, TABLA XIV y TABLA XVII, donde se evidencia que, frecuencias de muestreo más altas mejoran significativamente la precisión en la localización de las fallas, análisis que se representa en la Fig. 50.

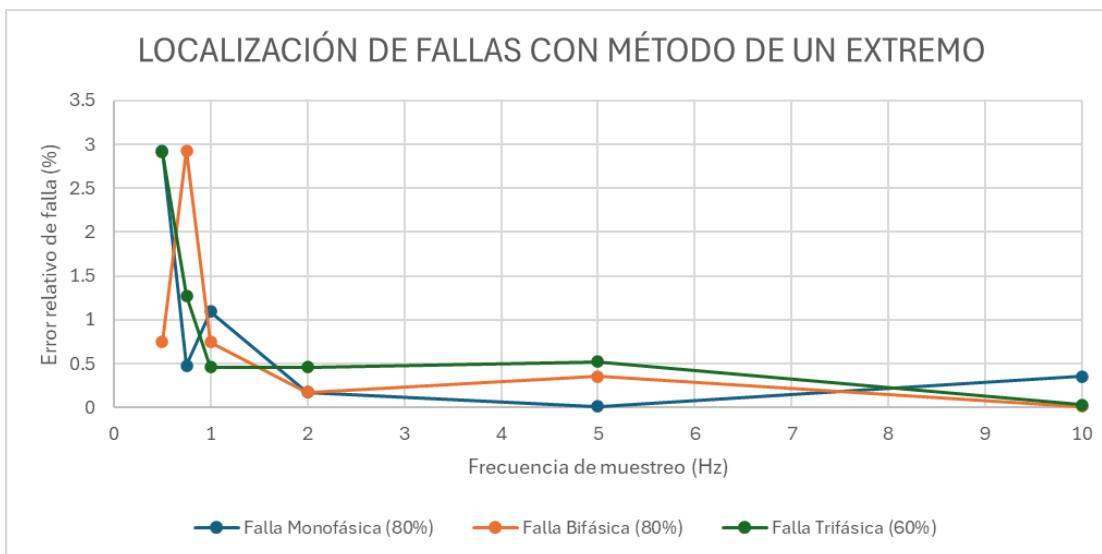


Fig. 50 Comparación de mejores resultados por tipo de falla con el método de un extremo.

Además, se destaca que para longitudes superiores al 60% de la línea, los errores de estimación tienden a ser menores, comportamiento que se evidencia en los picos de amplitud de las señales que corresponden a la incidencia y reflexión de las ondas, al igual que el amortiguamiento de las oscilaciones en relación con el tiempo de ocurrencia de la falla, lo cual se observa de mejor manera en la Fig. 29, Fig. 33 y Fig. 36, que corresponden a las señales generadas por los mejores resultados de cada una de las tablas y consideradas en la representación de la Fig. 50.

Sin embargo, su desempeño en frecuencias más bajas es inconsistente, particularmente en las fallas bifásicas, donde los errores aumentan significativamente como el caso de la TABLA VIII que supera el 5% como error relativo para la falla y el 3% en relación con el tramo, esto destaca la necesidad de seleccionar cuidadosamente la frecuencia de muestreo según el tipo de falla y la precisión deseada.

Por otro lado, la localización de fallas eléctricas mediante algoritmos basados en ondas viajeras con el método de doble extremo demuestra un comportamiento más uniforme, especialmente en las fallas bifásicas y trifásicas, donde la utilización de datos provenientes de ambos terminales permite reducir los errores en comparación a frecuencias más bajas, puesto que con frecuencias de muestreo de 10 MHz se logra obtener una estimación de la falla con una diferencia de 1 m y un error relativo de línea



del 0.008% y 0.005% en relación con el tramo, valores que se reflejan en la TABLA XXIV y TABLA XXIX, además, la sensibilidad del algoritmo está directamente influenciada por la proximidad de la falla a los terminales, destacándose su capacidad para identificar con mayor precisión fallas cercanas al punto medio entre cada extremo, comportamientos que se representan en las Fig. 43 y Fig. 48, mientras que en la Fig. 51 se representa la comparación de los mejores resultados para cada tipo de falla.

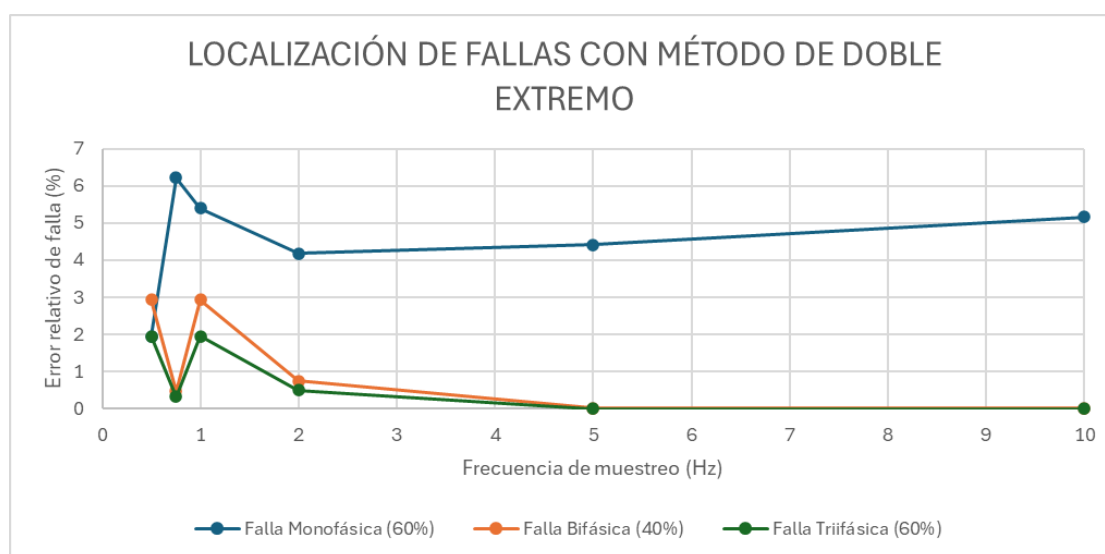


Fig. 51 Comparación de mejores resultados por tipo de falla con el método de doble extremo.

No obstante, para la localización de fallas monofásicas se considera la aplicación de frecuencias de muestreo más específicas, ya que reflejan inconsistencias, particularmente a frecuencias medias con errores relativos superiores al 5% en algunos casos, lo que denota que, el método de doble extremo es altamente sensible a las diferencias de tiempo entre los terminales ante una falla monofásica, lo que dificulta la localización bajo las condiciones específicas del sistema, de manera que, este comportamiento se debe a la asimetría inherente de la falla y la generación de perturbaciones, al generarse desequilibrios en las señales medidas, ya que afecta la identificación precisa de los tiempos de llegada y reflexión en cada uno de los terminales, requiriendo así compensaciones adicionales en el algoritmo y exigencias en cuanto a la sincronización del sistema. De esta manera, en Fig. 52 y Fig. 53 se representa una comparación general de las variaciones generadas por el método de un



extremo y doble extremo respectivamente, en relación con la localización de fallas eléctricas monofásicas, bifásicas y trifásicas.

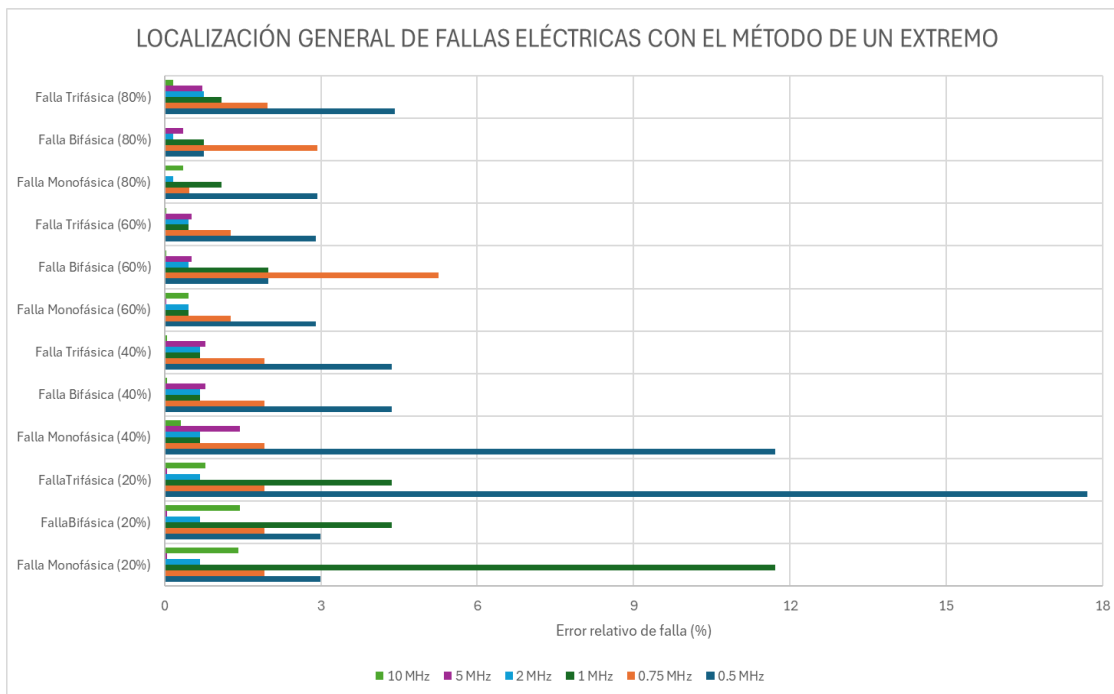


Fig. 52 Análisis general de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con el método de un extremo.

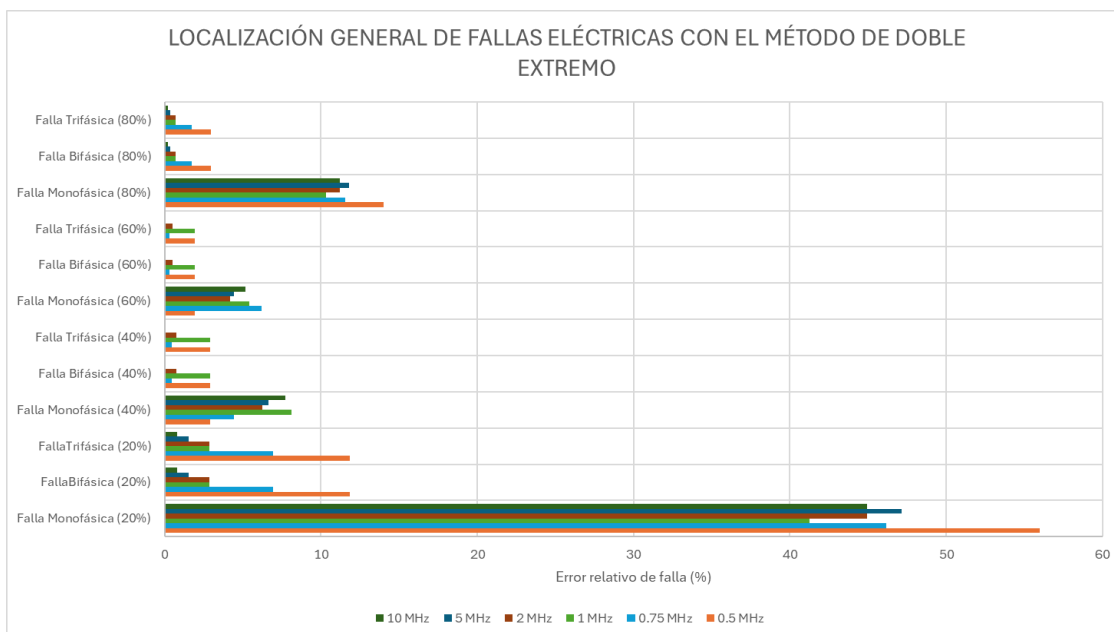


Fig. 53 Análisis general de la sensibilidad de las mediciones obtenidas en la localización de fallas eléctricas con el método de doble extremo.



Además, la implementación de estos algoritmos tiene implicaciones prácticas considerables, pues una localización adecuada permite reducir los índices FMIK y TTIK, indicadores claves para evaluar la calidad del suministro eléctrico en donde errores relativos en relación con la distancia de la falla y la longitud de la línea inferiores al 1% marcan una diferencia significativa, puesto que, al proporcionar una ubicación exacta de la falla, se minimiza la dependencia de la visualización tradicional por parte de los equipos de campo, mejorando los tiempos de respuesta, toma de decisiones y reduciendo los costos asociados con la movilización de personal y recursos. En el contexto de líneas de subtransmisión, una interrupción prolongada afecta considerablemente la estabilidad de la red eléctrica, subrayando así la importancia de contar con algoritmos que permitan una restauración rápida en concordancia con las protecciones del sistema.

Un aspecto importante identificado es que, al variar la resistencia a tierra durante la evaluación del modelamiento del sistema, no existen cambios representativos en la incidencia y reflexión de las señales, aunque sí se presenta un impacto notable en la amplitud de las señales. Esto reafirma que, la sensibilidad de los algoritmos está más influenciada por la frecuencia de muestreo, el tipo de falla, simetría de las fallas, la longitud del tramo de análisis y la ubicación de la falla respecto a los terminales, que por los valores de resistencia a tierra.

Es así como, en base a los resultados de los distintos escenarios, el análisis de la sensibilidad de los algoritmos evidencia que el método de un extremo es más efectivo para fallas monofásicas a altas frecuencias mientras que el método de doble extremo muestra un desempeño más uniforme y robusto, particularmente en fallas bifásicas y trifásicas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demuestran la aplicabilidad de los algoritmos para localizar fallas eléctricas mediante ondas viajeras en sistemas de subtransmisión, resaltando su potencial innovador en este campo.



Los algoritmos de localización de fallas eléctricas, tanto de un extremo como de doble extremo, reflejan una alta sensibilidad a la frecuencia de muestreo, factor clave para mejorar la precisión en la localización de fallas. Sin embargo, se identificaron escenarios donde los errores en la distancia calculada son elevados, especialmente en sistemas de corta distancia como el analizado, lo que evidencia la necesidad de realizar estudios más detallados para mejorar la elección del método y los parámetros según las condiciones específicas del sistema.

El análisis de sensibilidad realizado permitió determinar que la frecuencia de muestreo tiene un impacto significativo en la precisión de la localización de fallas, a frecuencias bajas, como 0.5 MHz, se observaron errores absolutos y relativos elevados, afectando la estimación de la falla. En contraste, frecuencias a partir de 5 MHz mejoran significativamente la precisión, reduciendo los errores a niveles mínimos, destacando la importancia de seleccionar frecuencias de muestreo adecuadas no solo en función del tipo de falla, sino también considerando la distancia de subtransmisión y la topología del sistema eléctrico.

Así pues, el uso de las transformadas de Clarke y wavelet fue determinante para determinar la sensibilidad y precisión de los algoritmos, pues la transformada de Clarke simplifica el análisis de señales trifásicas, mientras que la transformada de wavelet identifica perturbaciones clave, permitiendo una localización precisa de las fallas. Además, el modelamiento previo del sistema es esencial para garantizar la validez de los resultados, permitiendo así comparar los valores de los parámetros eléctricos de la línea como las impedancias y capacitancias de secuencia, asegurando que los algoritmos trabajen con datos representativos del sistema real.

Es así como, este estudio reafirma la relevancia de los algoritmos basados en ondas viajeras como una herramienta innovadora para la localización de fallas eléctricas en sistemas de subtransmisión, resaltando la importancia de analizar la sensibilidad de las mediciones ante factores clave como la frecuencia de muestreo, el tipo de falla, simetría de la falla y la ubicación de estas.



Recomendaciones

Se recomienda desarrollar e implementar un modelo de inteligencia artificial que permita seleccionar de manera óptima el método de localización y el rango de frecuencia de muestreo más adecuado, esto en función de las condiciones específicas del sistema eléctrico, modelo el cual puede ser entrenado utilizando datos de la red de la línea en estudio, incluyendo parámetros como la longitud de la línea, las características de los equipos de protección, las resistencias a tierra y las condiciones de operación.

Para obtener un análisis más detallado y robusto, se sugiere considerar un rango de frecuencias de muestreo más amplio que los utilizados en este estudio (500 kHz a 10 MHz), incorporando así frecuencias adicionales que permitirán observar comportamientos no identificados previamente, generando una mayor resolución en los resultados y ofreciendo datos más precisos sobre la sensibilidad del algoritmo ante diferentes condiciones de operación.

Se recomienda realizar estudios que incluyan la extracción manual de coeficientes de detalle y vectores de longitud de las señales de corriente y voltaje en cada punto de la línea, este enfoque permitiría un análisis más exhaustivo y detallado de las señales, proporcionando una validación adicional de los resultados obtenidos mediante métodos automáticos, además, permitirá identificar con mayor precisión cómo las perturbaciones específicas en las señales afectan la localización de fallas y cómo estas pueden ser reducidas o empleadas para mejorar los algoritmos.

Referencias bibliográficas

- [1] V. M. Polo, J. B. Peña, and L. Pacheco, "Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, pp. 167-176, 2017.
- [2] V. M. Navarrete Ronquillo, "Clasificación de fallas eléctricas en líneas de transmisión usando técnicas de procesamiento de señales dispersas y ruidosas," Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21243>
- [3] R. A. Mejía, "Informe Ejecutivo de Rendición de Cuentas," 2023 ed. Ibarra: Empresa Eléctrica Regional Norte S.A., 2023.
- [4] MERNNR, "Plan Maestro de Electricidad del Ecuador," in *Expansión y Mejora de la Distribución*, ed, 2020, p. 245.



- [5] L. P. Bautista Fernández, "Identificación de 11 tipos de fallas en líneas de transmisión de alta tensión utilizando redes neuronales," Universidad Santo Tomás, 2018. [Online]. Available: <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/12670>
- [6] S. H. Mortazavi, Z. Moravej, and S. M. Shahrtash, "A Searching Based Method for Locating High Impedance Arcing Fault in Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 438-447, 2019-04-01 2019, doi: 10.1109/tpwrd.2018.2874879.
- [7] R. Gómez, D. Cabrera, and P. Robles, "Estudio para la localización de fallas en sistemas de distribución eléctrica," *Ingenius*, no. 30, pp. 64-78, 2023-07-01 2023, doi: 10.17163/ings.n30.2023.06.
- [8] S. Das, S. Santoso, and S. Ananthan, *Fault Location on Transmission and Distribution Lines: Principles and Applications*. Wiley (in English), 2021, p. 288.
- [9] W. F. Gutama Feijoo, "Localización de fallas en líneas de transmisión mediante mediciones sincrofasoriales y ondas viajeras," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2019. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20074>
- [10] A. Raza, A. Benrabah, T. Alquthami, and M. Akmal, "A Review of Fault Diagnosing Methods in Power Transmission Systems," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, doi: 10.3390/app10041312.
- [11] R. A. Tîrnovan and M. Cristea, "Advanced techniques for fault detection and classification in electrical power transmission systems: An overview," in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 21-23 May 2019 2019, pp. 1-10, doi: 10.1109/MPS.2019.8759695.
- [12] L. M. Pumisacho Galarza, "Modelación y simulación de líneas de transmisión considerando multiples fases y el efecto de retorno por tierra," Universidad Politécnica Salesiana, 2019. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18030>
- [13] M. Rajendran and V. Perumal, "Saturation analysis on current transformer," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 18, pp. 2169-2176, 2018.
- [14] B. F. C. Quiñónez, R. C. U. de Souza, A. G. U. de Souza, A. J. M. Peralta, J. E. E. Sandoval, and J. D. M. Bautista, "Estudio de saturación de transformadores de corriente: análisis y simulación," *Brazilian Applied Science Review*, vol. 5, no. 2, pp. 1222-1243, 2021.
- [15] C. K. Morales Pérez, "Ubicación de fallas en líneas de transmisión en sistemas de potencia desbalanceados mediante la transformada de wavelet," Universidad Politécnica Salesiana, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22576>
- [16] ARCERNR, "Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano," ed: Control Recursos y Energía, 2022.
- [17] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*, 2 ed. (in English), 2019.
- [18] R. Belu, C. Press, Ed. *Building Electrical Systems and Distribution Networks: An Introduction (Nano and Energy)*, 1 ed. (in English), 2020.
- [19] K. N. Encala Pihuave and M. N. Tonato Guerrero, "Coordinación de protecciones en sistemas eléctricos de distribución, mediante el uso de Relés SEL-751," Universidad Politécnica Salesiana, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24673>



- [20] G. N. Rivera Mayo, "Ubicación de fallas en líneas de transmisión eléctrica basado en el análisis de señales transitorias," Universidad Politécnica Salesiana, 2020. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18806>
- [21] J. Das, *Short-Circuits in AC and DC Systems: ANSI, IEEE, and IEC Standards*. CRC Press (in English), 2017.
- [22] J. Das, *Understanding symmetrical components for power system modeling*, 1 ed. Wiley-IEEE Press (in English), 2017.
- [23] R. R. Cruz Jihuallanca, "Metodología para localizar fallas en las líneas de transmisión L-6018 66kv y L-1030 33kv asistido por computador-2018," Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2020. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12918/5265>
- [24] L. Cruz, D. Carrión, and A. Riofrio, "Localización de Fallas Mediante la Transformada Wavelet en Líneas de Transmisión," (in Spanish), *Revista Técnica "energía"*, vol. 13, no. 1, pp. 79-89 pp., 2017, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.10>.
- [25] J. S. Castañeda Bermúdez and Y. A. Salguero Lozano, "El método de localización de fallas mediante ondas viajeras y su implementación en sistemas con generación distribuida. Estudio de caso," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/31375>
- [26] C. E. Polanco Puentes and L. E. Polanco Puentes, "Plan de Mejoramiento de la Localización de Fallas en Líneas de Transmisión y Subtransmisión de Enel-Codensa SA ESP," Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2020. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/10656/12577>
- [27] F. J. Mera López, "Clasificación y ubicación de fallas en líneas de transmisión utilizando el algoritmo de retro-propagación del clasificador," Universidad Politécnica Salesiana, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24835>
- [28] M. d. I. Á. Correa Vallejo, "Desarrollo de una herramienta computacional para localización de fallas en líneas aéreas de transmisión mediante el tratamiento de señales almacenadas en archivos COMTRADE," Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21329>
- [29] G. Gharehpetian, A. Yazdani, and B. Zaker, *Power System Transients: Modelling Simulation and Applications*, 1 ed. CRC Press (in English), 2023.
- [30] E. Mestizo Sánchez, "Mantenimiento predictivo de líneas de transmisión con el uso de equipos de onda viajera," Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/17555>
- [31] J. P. Arteta, "Informe Ejecutivo de Rendición de Cuentas," 2022 ed. Ibarra: Empresa Eléctrica Regional Norte S.A., 2022.
- [32] EMELNORTE. "Inicio - Geoportál EMELNORTE." <https://www.emelnorte.com/eern/> (accessed 2024).
- [33] S. Neppas, "Coordinación de protecciones en las líneas de subtransmisión de Emelnorte con relés direccionales," Universidad Técnica del Norte, 2022.
- [34] A. Levy and J. Carrasco, *Calidad y confiabilidad de los servicios eléctricos en América Latina*: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.
- [35] *REGULACIÓN Nro. ARCERNNR 002/20 (Codificada)*, 2023.
- [36] (2021). *Estudio de Continuidad de Suministro Respuestas a Observaciones al Informe Preliminar*. [Online] Available: <https://s3.us-east-1.amazonaws.com/cen-data->



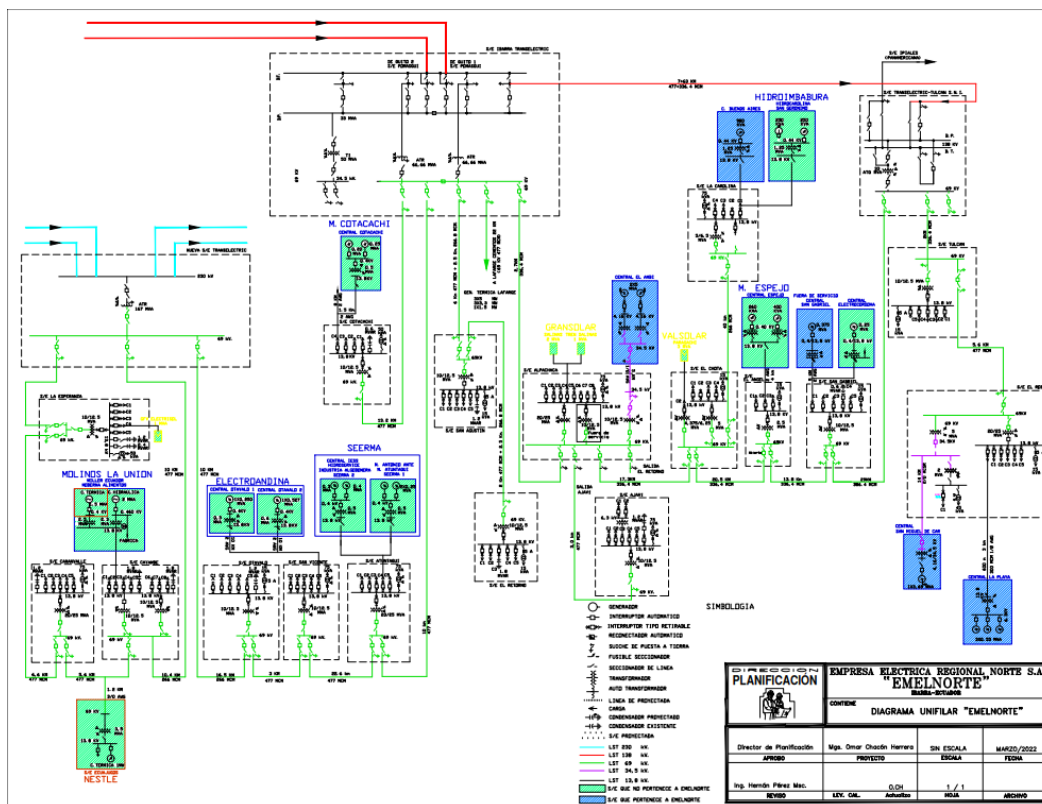
[ingestion-prd/extraido/2021/12/Respuesta-Observaciones-Informe-Preliminar-ECS-2021.pdf](#)

- [37] DlgSILENT. "Company - DlgSILENT." <https://www.digsilent.de/en/> (accessed 2024).
- [38] MathWorks. "MATLAB y Simulink para generación, transporte y distribución de energía." <https://la.mathworks.com> (accessed 2024).
- [39] W. H. Kersting and R. Kerestes, *Distribution System Modeling and Analysis with MATLAB® and WindMil®*, 5th ed. CRC Press, 2022.
- [40] MathWorks. "Clarke Transform." <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/clarktransform.html> (accessed 2024).
- [41] NEXANS, "Cable ACSR/GA 477 KCMIL (Hawk)," ed.
- [42] INECEL, "Estructuras tipo para líneas de subtransmisión a 69 KV," 1985. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6081>
- [43] (2013). *NTE INEN 1964:Postes de hormigón armado y preesforzado para soportes de instalaciones de líneas y redes aéreas de energía eléctrica y telecomunicaciones. Definiciones.* [Online] Available: <https://archive.org/details/ec.nte.1964.1993/page/n7/mode/2up>
- [44] (2013). *NTE INEN 1965:Postes de hormigón armado y preesforzado para soportes de instalaciones de líneas y redes aéreas de energía eléctrica y telecomunicaciones. Requisitos.* [Online] Available: <https://archive.org/details/ec.nte.1965.1993/page/n15/mode/2up>
- [45] (2013). *NTE INEN 1966:Postes de hormigón armado y preesforzado para soportes de instalaciones de líneas y redes aéreas de energía eléctrica y telecomunicaciones. Muestreo.* [Online] Available: <https://archive.org/details/ec.nte.1966.1999/page/n9/mode/2up>
- [46] (2013). *NTE INEN 1967:Postes de hormigón armado y preesforzado para soportes de instalaciones de líneas y redes aéreas de energía eléctrica y telecomunicaciones. Ensayos.* [Online] Available: <https://archive.org/details/ec.nte.1967.1993/page/n1/mode/2up>



Anexos

Anexo A Diagrama unifilar del sistema de subtransmisión de EMELNORTE.





Anexo B Características eléctricas de los conductores de aluminio con alma de acero (ACSR)t.

Palabra clave	Área de aluminio, cmil	Trenzado Al/St	Capas de aluminio	Diámetro exterior, pulgadas	Resistencia			RMG D, pies	Reactancia por conductor a 1 pie de espaciamiento, 60 Hz	
					De, 20°C, Ω/1 000 pies	CA, 60 Hz			X _i inductiva, Ω/milla	X _c capacitiva, MSΩ . milla
						20°C, Ω/milla	50°C, Ω/milla			
Warwing	266,800	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	266,800	26/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300,000	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Merlin	336,400	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336,400	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397,500	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397,500	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264	0.441	0.1004
rücker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284	0.432	0.0992
Hawk	477,000	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477,000	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980
Osprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969
Dove	556,500	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965
Rook	636,000	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950
Grosbeak	636,000	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795,000	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897
Cardinal	954,000	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0890
Ortolan	1,033,500	45/7	3	1.213	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1,113,000	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855
Pheasant	1,272,000	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466	0.372	0.0847
Bobolink	1,431,000	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470	0.371	0.0837
Plover	1,431,000	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814
Bluebird	2,156,000	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

Anexo C Código de los algoritmos empleados para la localización de fallas eléctricas mediante los métodos de un extremo y doble extremo.

```

%% Selección del método de localización de las fallas
disp('Seleccione el método que desea utilizar:');

disp('1. Un extremo');
disp('2. Doble extremo');

metodo = input('Ingrese el número correspondiente al método (1 o 2): ');

% Validar la entrada del usuario
while metodo < 1 || metodo > 2 || ~isnumeric(metodo)
    disp('Opción no válida. Por favor, ingrese 1 o 2. ');
    metodo = input('Ingrese el número correspondiente al método (1 o 2): ');
end

%% Configuración de la Frecuencia de Muestreo
disp('Seleccione la frecuencia de muestreo utilizada en la simulación:');

disp('1. 500 kHz');
disp('2. 750 kHz');
disp('3. 1 MHz');
disp('4. 2 MHz');
disp('5. 5 MHz');
    
```




UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



```

disp('6. 10 MHz');
disp('7. Ingresar un valor personalizado');
disp(' ');
% Solicitar la entrada del usuario para la frecuencia de muestreo
opcion_frecuencia = input('Ingrese el número correspondiente a la opción deseada (1-7): ');
% Validación de la entrada del usuario
while opcion_frecuencia < 1 || opcion_frecuencia > 7 || ~isnumeric(opcion_frecuencia)
    disp('Opción no válida. Por favor, ingrese un número entre 1 y 7. ');
    opcion_frecuencia = input('Ingrese el número correspondiente a la opción deseada (1-7): ');
end
% Asignar el valor de la frecuencia de muestreo según la opción seleccionada
if opcion_frecuencia == 7
    % Opción para ingresar un valor personalizado
    f_muestreo = input('Ingrese el valor de la frecuencia en Hz (ejemplo: 3e6 para 3 MHz o 400e3 para 400 kHz): ');
    frecuencia_str = sprintf('% .2f Hz', f_muestreo);
else
    % Opciones predefinidas
    switch opcion_frecuencia
        case 1
            f_muestreo = 500e3; % 500 kHz
            frecuencia_str = '500 kHz';
        case 2
            f_muestreo = 750e3; % 750 kHz
            frecuencia_str = '750 kHz';
        case 3
            f_muestreo = 1e6; % 1 MHz
            frecuencia_str = '1 MHz';
        case 4
            f_muestreo = 2e6; % 2 MHz
            frecuencia_str = '2 MHz';
        case 5
            f_muestreo = 5e6; % 5 MHz
            frecuencia_str = '5 MHz';
        case 6
            f_muestreo = 10e6; % 10 MHz
  
```



```
frecuencia_str = '10 MHz';

end

end

% Mostrar la frecuencia seleccionada

fprintf('Frecuencia seleccionada: %s, registrada como %e Hz\n', frecuencia_str, f_muestreo);

%% Declaración de valores iniciales (Generales)

L_linea = 1.1615e-3; % Inductancia por longitud (H/km) de secuencia positiva de la línea
C_linea = 9.9429e-9; % Capacitancia por longitud (F/km) de secuencia positiva de la línea
L_total = 20; % Longitud total de la línea de transmisión (km)

% Cálculo de la velocidad de propagación de las ondas viajeras
v = 1 / sqrt(L_linea * C_linea);

% Mostrar los valores en el Command Window

fprintf('Los valores iniciales de la línea son:\n');
fprintf('Inductancia (L) de la línea: %.10f H/km\n', L_linea);
fprintf('Capacitancia (C) de la línea: %.10f F/km\n', C_linea);
fprintf('Velocidad de propagación de las ondas viajeras en la línea: %.2e m/s\n', v);
fprintf('Frecuencia de muestreo (f): %.2e Hz\n', f_muestreo);
fprintf('Longitud total de la línea de subtransmisión: %.2f km\n', L_total);

%% Selección de métodos

if metodo == 1

disp('== MÉTODO DE UN EXTREMO ==');

%% Selección del Tramo de la Línea

disp('Seleccione en qué tramo de la línea simuló la falla:');

disp('1. Primer tramo');
disp('2. Segundo tramo');

tramo = input('Ingrese el número correspondiente al tramo (1 o 2): ');

% Validar la entrada del usuario

while tramo < 1 || tramo > 2 || ~isnumeric(tramo)

disp('Opción no válida. Por favor, ingrese 1 o 2.');
```



```

disp('3. Trifásica');

% Solicitar el tipo de entrada que se simulo

falla_tipo = input('Ingrese el número correspondiente al tipo de falla (1-3): ');

% Validar la entrada del usuario

while falla_tipo < 1 || falla_tipo > 3 || ~isnumeric(falla_tipo)

    disp('Opción no válida. Por favor, ingrese un número entre 1 y 3. ');

    falla_tipo = input('Ingrese el número correspondiente al tipo de falla (1-3): ');

end

%Proceso de descomposición de Wavelet y visualizacion de las gráficas de las ondas de llegada y reflexión

if tramo == 1

disp('== PRIMER TRAMO SELECCIONADO ==');

if falla_tipo == 1

    % Falla Monofásica

    [cAmA, LAmA] = wavedec(Cero_1, 1, 'db4');

    Cero_1w = detcoef(cAmA, LAmA, 1);

    figure;

    plot(Cero_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

elseif falla_tipo == 2

    % Falla Bifásica

    [cAbA, LAbA] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');

    Alfa_1w = detcoef(cAbA, LAbA, 1);

    figure;

    plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

elseif falla_tipo == 3

    % Falla trifásica

    [cAtA, LAtA] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');

    Alfa_1w = detcoef(cAtA, LAtA, 1);

    figure;

    plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

end

%Solicitar valores de tiempo para las ondas viajeras al usuario

disp('En base a las gráficas, ingrese los valores de la onda incidente y su reflexión:');

% Validación para el valor de t1A (onda de llegada)

t1A = input('Ingrese el valor de t1A (onda de llegada A) en microsegundos: ');

while ~isnumeric(t1A) || t1A <= 0

```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



```

disp('Error: Ingrese un número positivo para t1A. ');
t1A = input('Ingrese el valor de t1A (onda de llegada A) en microsegundos: ');
end
% Validación para el valor de t2A (onda de regreso)
t2A = input('Ingrese el valor de t2A (onda de regreso A) en microsegundos: ');
while ~isnumeric(t2A) || t2A <= 0 || t2A <= t1A
    if t2A <= 0
        disp('Error: Ingrese un número positivo para t2A. ');
    elseif t2A <= t1A
        disp('Error: El valor de t2B debe ser mayor que t1A. ');
    end
    t2A = input('Ingrese el valor de t2A (onda de regreso A) en microsegundos: ');
end
% Mostrar los valores ingresados
fprintf('Los valores que usted ingresó son:\n');
fprintf('t1A: %.2f μs\n', t1A);
fprintf('t2A: %.2f μs\n', t2A);
% Solicitar la distancia real de la falla al usuario
fprintf('Ingrese la distancia real a la que se simuló la falla (en km): ');
Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');
% Validar la entrada del usuario
while ~isnumeric(Distancia_Actual) || Distancia_Actual <= 0
    disp('Error: Ingrese un número positivo para la distancia. ');
    Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');
end
%% Cálculo de la localización de la falla en el primer tramo de la línea
xA = (1/2) * v * (1/f_muestreo) * ((t2A*2) - (t1A*2));
Distancia_Calculada = xA;
ErrorAbsoluto = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual))* 1000;
ErrorRelativoFalla = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/Distancia_Actual)* 100;
ErrorRelativoLinea = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/L_total)* 100;
% Mostrar resultados de la localización de la falla en el primer tramo de la línea
disp('Resultados de la localización de una falla en el primer tramo de la línea:');
fprintf('Frecuencia de muestreo: %.2e Hz\n', f_muestreo);
fprintf('Distancia calculada: %.3f km\n', Distancia_Calculada);
  
```



```

fprintf('Distancia real: %.3f km\n', Distancia_Actual);

fprintf('Error Absoluto: %.3f m\n', ErrorAbsoluto);

fprintf('Error Relativo (Falla): %.3f %%\n', ErrorRelativoFalla);

fprintf('Error Relativo (Línea): %.3f %%\n', ErrorRelativoLinea);

elseif tramo == 2

disp('== SEGUNDO TRAMO SELECCIONADO ==');

if falla_tipo == 1

% Falla Monofásica

[cBmB, LBmB] = wavedec(Cero_1, 1, 'db4');

Cero_1w = detcoef(cBmB, LBmB, 1);

% Visualización de los coeficientes de detalle

figure;

plot(Cero_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);%Grafica de la señal

elseif falla_tipo == 2

% Falla Bifásica

[cBbB, LBbB] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');

Alfa_1w = detcoef(cBbB, LBbB, 1);

% Visualización de los coeficientes de detalle

figure;

plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

elseif falla_tipo == 3

% Falla trifásica

[cBtB, LBtB] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');

Alfa_1w = detcoef(cBtB, LBtB, 1);

figure;

plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

end

% Solicitar valores de tiempo para las ondas viajeras al usuario

disp('En base a las gráficas, ingrese los valores de la onda incidente y su reflexión:');

% Validación para el valor de t1B (onda de llegada)

t1B = input('Ingrese el valor de t1B (onda de llegada B) en microsegundos: ');

while ~isnumeric(t1B) || t1B <= 0

disp('Error: Ingrese un número positivo para t1A. ');

t1B = input('Ingrese el valor de t1B (onda de llegada B) en microsegundos: ');

end

```



```

% Validación para el valor de t2A (onda de regreso)

t2B = input('Ingrese el valor de t2B (onda de regreso B) en microsegundos: ');

while ~isnumeric(t2B) || t2B <= 0 || t2B <= t1B

    if t2B <= 0

        disp('Error: Ingrese un número positivo para t2B. ');

    elseif t2B <= t1B

        disp('Error: El valor de t2B debe ser mayor que t1B. ');

    end

    t2B = input('Ingrese el valor de t2B (onda de regreso B) en microsegundos: ');

end

% Mostrar los valores ingresados

fprintf('Los valores que usted ingresó son:\n');

fprintf('t1B: %.2f μs\n', t1B);

fprintf('t2B: %.2f μs\n', t2B);

% Solicitar la distancia real de la falla al usuario

fprintf('Ingrese la distancia real a la que se simuló la falla (en km): ');

Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');

% Validar la entrada del usuario

while ~isnumeric(Distancia_Actual) || Distancia_Actual <= 0

    disp('Error: Ingrese un número positivo para la distancia. ');

    Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');

end

% Cálculo de la localización de la falla en el primer tramo de la línea

xB = L_total - (1/2) * v * (1/f_muestreo) * ((t2B*2) - (t1B*2));

Distancia_Calculada = xB;

ErrorAbsoluto = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual))* 1000;

ErrorRelativoFalla = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/Distancia_Actual)* 100;

ErrorRelativoLinea = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/L_total)* 100;

% Mostrar resultados de la localización de la falla en el segundo tramo de la línea

disp('Resultados de la localización de una falla en el segundo tramo de la línea::');

fprintf('Frecuencia de muestreo: %.2e Hz\n', f_muestreo);

fprintf('Distancia calculada: %.3f km\n', Distancia_Calculada);

fprintf('Distancia real: %.3f km\n', Distancia_Actual);

fprintf('Error Absoluto: %.3f m\n', ErrorAbsoluto);

fprintf('Error Relativo (Falla): %.3f %%\n', ErrorRelativoFalla);

```



```

fprintf('Error Relativo (Línea): %.3f %%\n', ErrorRelativoLinea);

end

elseif metodo == 2

disp('== MÉTODO DE DOBLE EXTREMO ==');

%% Seleccionar el tipo de falla simulada

disp('Seleccione el tipo de falla que simulo:');

disp('1. Monofásica');

disp('2. Bifásica');

disp('3. Trifásica');

% Solicitar el tipo de entrada que se simulo

falla_tipo = input('Ingrese el número correspondiente al tipo de falla (1-3): ');

% Validar la entrada del usuario

while falla_tipo < 1 || falla_tipo > 3 || ~isnumeric(falla_tipo)

disp('Opción no válida. Por favor, ingrese un número entre 1 y 3. ');

falla_tipo = input('Ingrese el número correspondiente al tipo de falla (1-3): ');

end

%Proceso de descomposicion de Wavelet y visualizacion de las graficas de las ondas de llegada y reflexion

if falla_tipo == 1

% Falla Monofásica

[cAmAB, LAmAB] = wavedec(Cero_1, 1, 'db4');

[cBmAB, LBmAB] = wavedec(Cero_2, 1, 'db4');

Cero_1w = detcoef(cAmAB, LAmAB, 1);

Cero_2w = detcoef(cBmAB, LBmAB, 1);

% Visualización de los coeficientes de detalle

figure;

plot(Cero_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

figure;

plot(Cero_2w,'Color', [0, 0, 0.7]);% Grafica de la señal

elseif falla_tipo == 2

% Falla Bifásica

[cAbAB, LAbAB] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');

[cBbAB, LBbAB] = wavedec(Alfa_2, 1, 'db4');

Alfa_1w = detcoef(cAbAB, LAbAB, 1);

Alfa_2w = detcoef(cBbAB, LBbAB, 1);

% Visualización de los coeficientes de detalle

```




```

figure;
plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

figure;
plot(Alfa_2w,'Color', [0, 0, 0.7]);

elseif falla_tipo == 3

% Falla trifásica

[cAtAB, LAtAB] = wavedec(Alfa_1, 1, 'db4');
[cBtAB, LBtAB] = wavedec(Alfa_2, 1, 'db4');

Alfa_1w = detcoef(cAtAB, LAtAB, 1);
Alfa_2w = detcoef(cBtAB, LBtAB, 1);

% Visualización de los coeficientes de detalle

figure;

plot(Alfa_1w,'Color', [0, 0, 0.7]);

figure;

plot(Alfa_2w,'Color', [0, 0, 0.7]);

end

%% Solicitar valores de tiempo para las ondas viajeras al usuario

disp('En base a las gráficas, ingrese los valores de las ondas incidentes:');

% Solicitar el primer valor y verificar que sea positivo

t1A = input('Ingrese el valor de t1A (onda de llegada A) en microsegundos: ');

while ~isnumeric(t1A) || t1A <= 0

disp('Error: Ingrese un número positivo para t1A. ');

t1A = input('Ingrese el valor de t1A (onda de llegada A) en microsegundos: ');

end

% Solicitar el segundo valor y verificar que sea positivo

t1B = input('Ingrese el valor de t1B (onda de llegada B) en microsegundos: ');

while ~isnumeric(t1B) || t1B <= 0

disp('Error: Ingrese un número positivo para t1B. ');

t1B = input('Ingrese el valor de t1B (onda de llegada B) en microsegundos: ');

end

% Mostrar los valores ingresados

fprintf('Los valores que usted ingresó son:\n');

fprintf('t1A: %.2f µs\n', t1A);

fprintf('t1B: %.2f µs\n', t1B);

%% Solicitar la distancia real de la falla al usuario

```



```

fprintf('Ingrese la distancia real a la que se simuló la falla (en km): ');
Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');

% Validar la entrada del usuario
while ~isnumeric(Distancia_Actual) || Distancia_Actual <= 0
    disp('Error: Ingrese un número positivo para la distancia. ');
    Distancia_Actual = input('Distancia actual (km): ');
end

%% Cálculo de la localización de la falla en el primer tramo de la línea
xAB = (1/2) * (L_total + (v * (1/f_muestreo) * ((t1A*2) - (t1B*2))));
Distancia_Calculada = xAB;
ErrorAbsoluto = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual))* 1000;
ErrorRelativoFalla = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/Distancia_Actual)* 100;
ErrorRelativoLinea = (abs(Distancia_Calculada - Distancia_Actual)/L_total)* 100;

%% Mostrar resultados de la localización de la falla usando ambos extremos de la línea
disp('Resultados de la localización de una falla usando ambos extremos de la línea:');
fprintf('Frecuencia de muestreo: %.2e Hz\n', f_muestreo);
fprintf('Distancia calculada: %.3f km\n', Distancia_Calculada);
fprintf('Distancia real: %.3f km\n', Distancia_Actual);
fprintf('Error Absoluto: %.3f m\n', ErrorAbsoluto);
fprintf('Error Relativo (Falla): %.3f %%\n', ErrorRelativoFalla);
fprintf('Error Relativo (Línea): %.3f %%\n', ErrorRelativoLinea);

end

```