



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**“ESTUDIO PARA LA UBICACIÓN DE EQUIPOS DETECTORES DE FALLA EN
EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN”**

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

AUTORES: ROBERTO CARLOS GÓMEZ DELGADO

CESAR DIEGO CABRERA PULGARÍN

TUTOR: ING. PABLO DANIEL ROBLES LOVATO, MsC.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Roberto Carlos Gómez Delgado con documento de identificación N° 0106947120 y Cesar Diego Cabrera Pulgarín con documento de identificación N° 0106493802; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 04 de octubre del 2022

Atentamente,



Roberto Carlos Gómez Delgado
0106947120



Cesar Diego Cabrera Pulgarín
0106493802

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**

Nosotros, Roberto Carlos Gómez Delgado con documento de identificación N° 0106947120 y Cesar Diego Cabrera Pulgarín con documento de identificación N° 0106493802, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico con enfoque investigativo: “Estudio para la ubicación de equipos detectores de falla en el sistema eléctrico de distribución”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de octubre del 2022

Atentamente,

Roberto Carlos Gómez Delgado
0106947120

Cesar Diego Cabrera Pulgarín
0106493802

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Pablo Daniel Robles Lovato con documento de identificación N° 0101663342, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ESTUDIO PARA LA UBICACIÓN DE EQUIPOS DETECTORES DE FALLA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN”, realizado por Roberto Carlos Gómez Delgado con documento de identificación N° 0106947120 y por Cesar Diego Cabrera Pulgarín con documento de identificación N° 0106493802, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 04 de octubre del 2022

Atentamente,

PABLO DANIEL  Firmado digitalmente por PABLO DANIEL ROBLES LOVATO

ROBLES LOVATO Fecha: 2022.11.07 10:06:39 -05'00'

Ing. Pablo Daniel Robles Lovato, MsC.
0101663342

AGRADECIMIENTO

Al darme cuenta de la persona que me he convertido, solamente me queda decir ¡Gracias!

Gracias primero a Dios y a la virgen santísima por permitirme estar cumpliendo mis sueños de ser cada día mejor persona, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas.

Gracias a mis padres, quienes han sido el apoyo y el principal motivo para seguir adelante, siempre han estado en los momentos buenos y difíciles de mi vida siendo mis mejores guías de vida. Agradecerles que me dieron todo lo que necesite durante este trayecto, sobre todo el amor y la inspiración que ustedes me generan para convertirme en mejor persona y profesional. También agradecerles por los consejos que día a día me han dado, por sus oraciones, por sus palabras de aliento, por educarme con el ejemplo y por ser los mejores padres del mundo.

Gracias a mis hermanos, por siempre estar pendientes de mí, por apoyarme incondicionalmente en todas las decisiones que he tomado en mi vida, por ser la inspiración a nunca bajar los brazos, por brindarme todo el cariño y tener fe en mí.

Gracias infinitas a todos los que han estado durante mi vida universitaria. Este es el resultado de un sinfín de acciones que más tuvieron que ver con el amor y voluntad hacia mí.

Gracias por creer en mí.

Roberto Carlos Gómez Delgado

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios y la Virgen María por acompañarme en el transcurso de mi vida, por brindarme salud y sabiduría cada día para luchar por mis sueños. A mis padres, quienes desde pequeño me han dado su apoyo incondicional y su confianza para lograr mis metas propuestas. A mis hermanos y familia quienes me motivaron a seguir con mis estudios los cuales hoy se están finalizando. Finalmente agradezco a todas las personas que estuvieron presente durante mi vida universitaria brindándome su apoyo, y a mi pareja quien siempre creyó en mi e insistió en no descuidarme de mis estudios universitarios.

Cesar Diego Cabrera Pulgarín

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a Dios a la virgen santísima, quienes siempre han estado en el caminar de mi formación profesional, bendiciéndome y dándome fuerza para seguir con mi proyecto de vida.

Este logro va dedicado a mis padres, Nancy Mercedes y Manuel Gonzalo quienes han sabido aconsejarme, guiarme, corregirme y educarme en valores. Les dedico, porque a ustedes les debo todo lo que soy y lo que seré en un futuro, ustedes son el pilar fundamental de mi proyecto de vida.

Por supuesto también quiero dedicar esto a mis hermanos, Juan Diego, Edison Javier y Nancy Carolina ya que ustedes en los momentos difíciles han hecho hasta lo imposible por subirme los ánimos y verme feliz. Les dedicó esto porque siempre hemos sido los cuatro hermanos para todo.

Roberto Carlos Gómez Delgado

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios y a la virgen María quienes mediante la oración siempre estuvieron presente en mi vida para ayudarme a tomar buenas decisiones y corregir mis errores para así ser una mejor persona cada día.

A mis padres, Julio Cabrera y María Pulgarín quienes me apoyaron en toda mi formación académica, me supieron aconsejar y guiarme por el camino del bien para ser la persona que soy hoy, con mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi dedicación.

También, quiero dedicar este trabajo a mi tía Transito Ochoa, por abrirme las puertas de su casa para convertirse en mi segundo hogar durante mi etapa universitaria

También quiero dedicar este trabajo a todos mis hermanos por sus consejos y experiencias que me forjaron a seguir con mis estudios.

Diego Cesar Cabrera Pulgarín

RESUMEN

En este trabajo de titulación, se trabaja en la localización de la falla en el sistema de distribución eléctrica, basado en el procesamiento de análisis de señales de cortocircuito, se propone la simulación de casos con la ocurrencia de varios tipos de fallas con el programa CYME, la señal obtenida y descompuesta empleando la transformada Wavelet. La descripción para utilizar el método del árbol de expansión mínima hace que la ubicación de las fallas sea óptima para reducir el tiempo de reconexión, teniendo en cuenta la colocación de los reconectores que servirán como almacenadores de información. Para el proceso, es necesario desarrollar un algoritmo de localización que analice los fenómenos transitorios con buena precisión en el tiempo - frecuencia y descomponga la señal en diferentes niveles obteniendo los parámetros necesarios para determinar la distancia de la falla, obtenida la distancia de falla se propone utilizar el método Elbow para determinar el número adecuado de indicadores de falla a ser instalado para que la ubicación de falla sea precisa.

ABSTRACT

In this degree work, we work on the location of the fault in the electrical distribution system, based on the analysis processing of short-circuit signals, we propose the simulation of cases with the occurrence of various types of faults with the CYME program, the signal obtained and decomposed using the Wavelet transform. The description for using the minimum spanning tree method makes the location of the faults optimal to reduce the reclosing time, taking into account the placement of the reclosers that will serve as information storages. For the process, it is necessary to develop a location algorithm that analyzes the transient phenomena with good accuracy in time - frequency and decompose the signal into different levels obtaining the necessary parameters to determine the distance of the fault, obtained the fault distance is proposed to use the Elbow method to determine the appropriate number of fault indicators to be installed so that the fault location is accurate.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Detección de falla

Impedancia de cortocircuito

Transformación Wavelet

Localización de falla

Distancia de falla.

Índice de contenido

RESUMEN.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Estado del Arte.....	2
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Redes de Distribución Eléctrica.....	6
2.2 Tipo de fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia.....	6
2.3 Wavelets en los Sistemas Eléctricos de Potencia.....	7
2.4 Transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia.....	7
2.5 Transformada Wavelet.....	7
2.6 Método de la Onda Viajera.....	7
2.7 Método Elbow.....	8
3 METODOLOGÍA.....	9
3.1 Introducción.....	9
3.2 Caracterización del sistema eléctrico de distribución.....	10
3.3 Simulación y adquisición de datos.....	10
3.4 Extracción de información de las señales eléctricas.....	10
3.5 Estimación de distancia de falla.....	10
3.6 Ubicación de equipos detectores de falla.....	12
4 RESULTADOS.....	13
4.1 Caracterización del sistema.....	13
4.2 Caso 1.....	15
4.2.1 Cortocircuito trifásico lejos de la subestación.....	15
4.2.2 Cortocircuito trifásico cerca de la subestación.....	16
4.3 Caso 2.....	18
4.3.1 Falla simultanea.....	18
4.4 Caso 3.....	21
4.4.1 Falla bifásica.....	21
4.5 Estimación de la distancia.....	22
4.6 Ubicación de equipos detectores de falla.....	23
4.7 Resumen.....	25

5	DISCUSIÓN.....	30
6	CONCLUSIONES	31
7	BIBLIOGRAFÍA.....	32
8	ANEXOS	35

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de localización de fallas.	4
Figura 2: Diagrama de flujo.	9
Figura 3: Escenario.	14
Figura 4: Cortocircuito trifásico lejos de la subestación.	15
Figura 5: Señal de detalle Wavelet para calcular el td de la falla lejos de la subestación.....	16
Figura 6: Cortocircuito trifásico cerca de la subestación.	17
Figura 7: Señal de detalle Wavelet para calcular el td de la falla cerca de la subestación.....	18
Figura 8: Cortocircuito trifásico simultáneo.....	19
Figura 9: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del td de la falla 1.	20
Figura 10: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del td de la falla 2.	20
Figura 11: Cortocircuito bifásico.	21
Figura 12: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del td para el cortocircuito bifásico.....	22
Figura 13: Tiempo de detalle y la distancia real y calculada.	23
Figura 14: Método de codo para la localización de equipos detectores de fallas.....	24
Figura 15: Escenario con la localización de equipos detectores de fallas.....	25
Figura 16 Corriente nominal del nodo.	26
Figura 17 Corriente de falla del nodo.....	27
Figura 18 Voltaje nominal del nodo.	28
Figura 19 Voltaje de falla del nodo.....	29
Figura 20 Temática.	35
Figura 21 Formulación del problema.	35
Figura 22 Solución dada.	36

Índice de tablas

Tabla 1 Nomenclatura & Descripción	4
Tabla 2 Parámetros de la línea.....	10
Tabla 3 Información del algoritmo.....	11
Tabla 4 Características del sistema en estado normal.	14
Tabla 5 Casos de estudio.	15
Tabla 6 Resultados obtenidos tras la ocurrencia de la falla.....	22
Tabla 7 Corriente de falla y corriente nominal.....	25
Tabla 8 Voltaje nominal y voltaje de falla.	27

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Las redes de distribución se encargan de suministrar energía eléctrica a los consumidores mediante un conjunto de elementos eléctricos como conductores, equipos transformadores, protecciones y estructuras para su sujeción. En las redes de distribución surgen problemas por la localización de las fallas. Las fallas pueden interrumpir el suministro de electricidad al consumidor final y hacer que la red sea inestable, reduciendo así la fiabilidad del sistema eléctrico. Todos estos problemas pueden suponer pérdidas económicas para los consumidores, las centrales eléctricas y las distribuidoras [6].

Según el estudio [7] más del 80% de las interrupciones del sistema eléctrico se deben a fallos que se producen en los sistemas de distribución por diversos motivos, como la caída de rayos, los fallos de los componentes del sistema eléctrico por el envejecimiento de los equipos y los errores humanos [10]. Por ello, las distribuidoras tratan de utilizar tecnologías eficientes, acciones de mantenimiento y procedimientos correctivos para reducir la tasa de fallos y sus efectos destructivos.

La localización de fallas es uno de los aspectos más críticos en el sistema de distribución de energía eléctrica, por lo que una localización adecuada es esencial para ayudar al personal de mantenimiento eléctrico a localizar directamente el lugar correcto y solucionar el problema en el menor tiempo posible. Esto minimiza el tiempo de interrupción, restablece la energía y reduce los costos operativos [18].

A pesar de los avances tecnológicos y de la necesidad de mejorar el rendimiento, el proceso actual de localización de fallas sigue dependiendo de las llamadas de los clientes afectados. Cuando se produce una falla permanente, los responsables del centro de operaciones identifican el alimentador y la posible zona de ocurrencia. Entonces se envía al personal de mantenimiento a patrullar esa zona para identificarla y aislarla. En determinadas circunstancias, este procedimiento es ineficaz porque la zona afectada es considerablemente grande [5].

En general, para diagnosticar y localizar las fallas en los sistemas de distribución se utilizan métodos basados en la impedancia y las componentes de frecuencia fundamental, las ondas viajeras y el método del conocimiento [4]. El primer método requiere datos de medición de tensión y corriente a frecuencia fundamental para determinar la impedancia y estimar la localización de la falla utilizando uno o varios puntos de medición. Este método tiene la ventaja de ser implementado a un bajo coste, sin embargo, tiene el inconveniente de estimar múltiples localizaciones de fallas debido al gran número de ramificaciones que puede tener una red de distribución [27]. El método del conocimiento engloba los métodos basados en el análisis y la estadística, los dispositivos de distribución, la inteligencia artificial y los métodos híbridos. La aplicación del método del conocimiento requiere mediciones de voltaje y corriente en el alimentador, el estado

de funcionamiento de la subestación y del interruptor del alimentador, y los datos proporcionados por los dispositivos electrónicos inteligentes (IED) y los dispositivos de protección instalados a lo largo de los alimentadores [3]. El método de ondas viajeras para la localización de fallas en sistemas de distribución, que se utilizará para este trabajo, se basa en la transmisión y reflexión de ondas viajeras entre los terminales de la línea y el punto de falla. Este método requiere de dispositivos IEDs y de protección capaces de almacenar información de corriente y voltaje del funcionamiento de la red para obtener la forma de onda transitoria con lo cual se procede a la localización de la falla que se produce en el sistema de distribución eléctrico [12].

1.2 Estado del Arte

Se han propuesto varios métodos para la localización de averías, pero no son fácilmente aplicables a los sistemas de distribución. Esto se debe principalmente a las líneas cortas y heterogéneas, presencia de ramales laterales, las derivaciones de carga y un menor grado de instrumentación en los sistemas de distribución. En la actualidad, los principales métodos utilizados para localizar fallas a tierra monofásicas en las redes de distribución son la impedancia, la inyección S, la onda viajera y los métodos de diagnóstico de puertos [15].

Además de todos los métodos mencionados anteriormente, el empleo de un indicador de falla (FI) es la forma más práctica y asequible para los sistemas de distribución, por lo que proporciona la mejor localización probable de fallos [20]. El FI en un sistema no requiere infraestructuras sofisticadas, por lo que es un método adecuado en la mayoría de los sistemas de distribución. La asignación de un FI a las redes podría restringir la zona de falla identificada por el centro de control de supervisión, por lo que el tiempo necesario para localizarla disminuiría sustancialmente. De este modo, se mejora el tiempo de restauración y los índices de fiabilidad del servicio. Sin embargo, es innecesario y costoso utilizar FI en todas las ubicaciones candidatas, por lo que es necesario un análisis rentable para determinar cuántos y dónde deben ubicarse los FI para sacarles el máximo partido [29].

En la actualidad, la detección de fallas de alta impedancia (HIF) puede estar disponible como una función de protección en los dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs) en las redes de distribución de energía [23]. El HIF puede definirse como una falta que atrae bajas corrientes para que se disparen los dispositivos de protección convencionales, como los relés de sobreintensidad o los fusibles. Debido a la baja magnitud de la corriente de falla, el HIF no daña los componentes del sistema, pero es un peligro para la seguridad pública porque a menudo implica un arco eléctrico que aumenta el riesgo de incendio [18].

A lo largo de los años han surgido varios métodos para detectar fallas en un sistema de distribución. En [25], se presenta un algoritmo para detectar fallas de alta impedancia mediante la extracción de características basadas en la transformada de wavelet (WT) y una Red Neuronal. La extracción de las características más relevantes de la señal se obtiene a partir de la clasificación de WT como Haar, Symlet, Daubechies, Coiflet y

Biorthogonal; para cada wavelet mencionada se realiza una descomposición de diferentes niveles que permite el análisis para detectar una falla.

En las redes de distribución se generan diferentes tipos de fallas de cortocircuito, por lo que en [9], se propone utilizar el paquete de software CYME que permite la construcción de una red de distribución y la simulación de varias fallas de cortocircuito. Matlab - Simulink utiliza la transformada wavelet que permite descomponer y reconstruir las señales originales descomponiendo la señal en diferentes niveles para mejorar la velocidad de detección de fallas.

El análisis del estado transitorio requiere de técnicas que aprovechen la relación entre los parámetros del sistema, la frecuencia transitoria y la velocidad de la onda. Por esta razón, en [16] sugiere utilizar WT, ya que las altas frecuencias tienen una mejor resolución en el tiempo. Una componente de alta frecuencia puede ser localizado con menos error relativo que un componente de baja frecuencia. A la inversa, las bajas frecuencias tienen mejor resolución en el dominio de la frecuencia que los componentes de alta frecuencia [13].

Existen varios métodos para la localización y cálculo de la distancia de falla en los sistemas de energía eléctrica, entre ellos el método de la onda viajera, que se aplica en la mayoría de los casos para la localización de fallas en los sistemas de transmisión. En los sistemas de distribución se aplica el método de la onda viajera, que tiene poca precisión cuando la configuración de las líneas cambia de impedancia, por lo que en [14], propone un método preciso de localización de fallas en la red de distribución basado en la onda viajera con múltiples puntos de medición. Para obtener múltiples puntos de medición en [24], [11], las redes de distribución utilizan relés digitales en las subestaciones, IED a lo largo de los alimentadores primarios, sensores SCADA en el circuito del alimentador y medidores inteligentes en los clientes, todos lo mencionado anteriormente tienen la propiedad de almacenar información sobre el funcionamiento de la red de distribución.

Además, un algoritmo para la estimación de la distancia de la falla en las redes de distribución utilizando la onda viajera transitoria y WT que proponen en [21], utilizando las señales de onda viajera actuales del bus de la subestación con los primeros tiempos de llegada de la componente de diferencia aérea y las secuencias de cero para calcular la distancia estimada de la falla y la misma puede ser analizada con la wavelet madre db6 y el nivel 1. Sin embargo, esto sólo es posible cuando hay fallas simétricas [30].

En la actualidad se utilizan herramientas computacionales de geoprocésamiento GIS para el diseño de una red de distribución eléctrica, obteniendo una base de datos georreferenciada en la que se aplica el algoritmo de mínima extensión (MST), una de las teorías matemáticas prácticas utilizadas en problemas de simulación de redes eléctricas, que puede optimizar la red eléctrica [22], [2]. Una base de datos georreferenciada también permite la aplicación de algoritmos como K-Means y Elbow para una localización más precisa de los dispositivos de protección [28], [26].

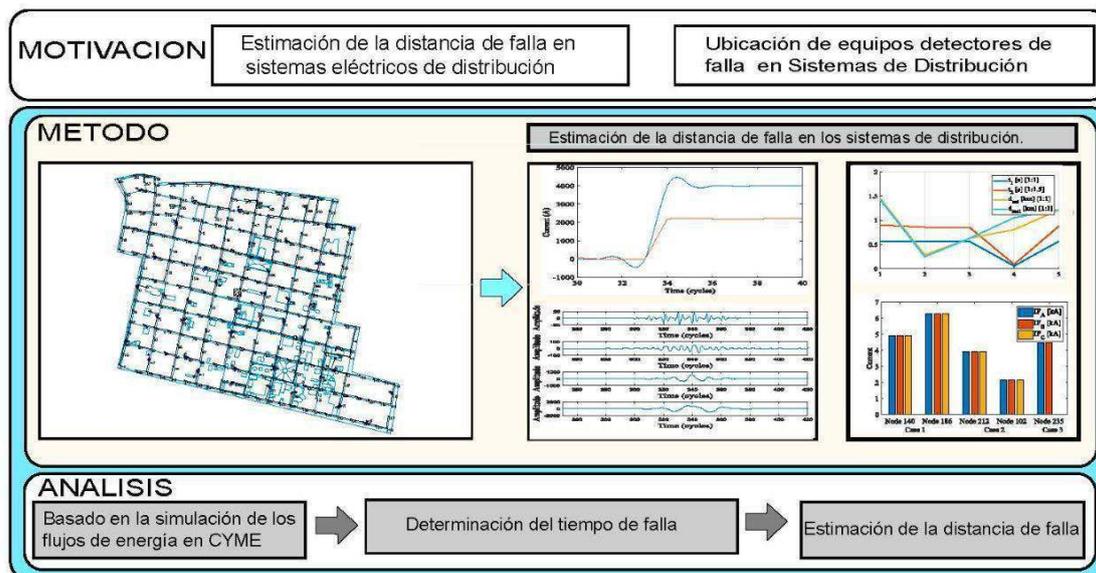


Figura 1: Esquema de localización de fallas.

Tabla 1 Nomenclatura & Descripción

Nomenclatura	Descripción
<i>SWT</i>	La transformada wavelet estacionaria
<i>HIF</i>	Fallas de alta impedancia
<i>IEDs</i>	Dispositivos electrónicos inteligentes
<i>GIS</i>	Sistema de información geográfica
<i>C</i>	Capacitancia
Δ_v	Caída de voltaje
<i>Z0</i>	Impedancia de secuencia cero
<i>f(t)</i>	Señal de análisis
<i>s</i>	Escala
μ	Traslación de la función wavelet en el dominio de la señal de análisis
<i>v</i>	Velocidad de propagación de la onda
Δ_F	Frecuencia de muestreo
<i>TPSCFS</i>	Cortocircuito trifásico lejos de la subestación
<i>STPC</i>	Cortocircuito trifásico simultáneo
<i>IF</i>	Corriente de falla
<i>VLN</i>	Voltaje de fase
<i>FI</i>	Indicador de falla
<i>WT</i>	Transformada Wavelet
<i>MST</i>	Árbol de expansión mínima
<i>L</i>	Inductancia
<i>S/E</i>	Subestación
<i>Z1</i>	Impedancia de secuencia positiva
<i>Wf(μ, s)</i>	Transformada wavelet en tiempo continuo
<i>t</i>	Tiempo
$\psi * \left(\frac{t - \mu}{s}\right)$	Función de transformada wavelet o wavelet función

d_f	Distancia de la falla medida desde la subestación de distribución hasta el nodo de falla
t_d	Tiempo de detalle Wavelet de la señal.
d_{real}	Distancia real medida desde la subestación al nodo de la falla
$TPSCNS$	Cortocircuito trifásico cerca de la subestación
$TPSC$	Cortocircuito bifásico
I	Corriente nominal

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Realizar un estudio que permita ubicar equipos detectores de falla a través de un algoritmo de estimación de distancia de falla.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar características relevantes del sistema Eléctrico de distribución que permita realizar la métrica establecida.
- Procesar y analizar la información para realizar la reconstrucción de la señal de cortocircuito mediante la transformada de Wavelets.
- Desarrollar un algoritmo de distancia de falla que permita la ubicación de detectores.

CAPÍTULO 1

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Redes de Distribución Eléctrica

Las redes de distribución eléctrica comprenden las líneas de subtransmisión, las subestaciones de distribución, los alimentadores primarios, los transformadores de distribución, las redes secundarias, las acometidas, el equipamiento de compensación, protección, maniobra, medición, control y comunicaciones, utilizados para la prestación del servicio de distribución de energía eléctrica a los diferentes usuarios tales como residenciales, comerciales e industriales [4], [8]. La red de distribución también está comprendida por elementos de maniobra como interruptores – seccionadores o disyuntores los cuales establecen un tramo de red a operar, también está compuesta por dispositivos electrónicos inteligentes (IED) e indicadores de falla (FI) los cuales se encargan de la protección y detección de fallas [24].

2.2 Tipo de fallas en los Sistemas Eléctricos de Potencia

En un sistema eléctrico trifásico, el tipo de fallas que pueden ocurrir se clasifican por la combinación de conductores o buses que fallan juntos. Además, las fallas pueden clasificarse como fallas atornilladas o fallas que ocurren a través de alguna impedancia, como un arco [6].

- **Cortocircuito monofásico a tierra (L-T):** Esta falla ocurre cuando una de las fases entra en contacto con la tierra en un punto determinado, con una impedancia de falla que por lo general es ignorada.
- **Cortocircuito bifásico (L-L):** Las fallas atornilladas de línea a línea, son más comunes que las fallas trifásicas. Este tipo de falla es aquella que ocurre cuando dos fases se interconectan en un punto determinado de falla con una impedancia de falla, la cual no está equilibrada dentro de las tres fases y su corriente de falla rara vez se calcula para los valores nominales de los equipos porque no proporciona la magnitud máxima de la corriente de falla.
- **Cortocircuito bifásico a tierra (L-L-T):** Esta falla ocurre cuando se conectan en un mismo punto dos fases con la tierra con la impedancia de falla y la impedancia de línea a tierra.
- **Cortocircuito trifásico (L-L-L):** Esta falla ocurre cuando los tres conductores se mantienen físicamente unidos con impedancia cero entre ellos, como si estuvieran atornillados. En un sistema simétrico equilibrado, la magnitud de la corriente de falla se equilibra por igual en las tres fases. Aunque este tipo de fallo no se produce con frecuencia, sus resultados se utilizan para la selección de dispositivos de protección, ya que este tipo de fallo generalmente produce los valores máximos de corriente de cortocircuito.

2.3 Wavelets en los Sistemas Eléctricos de Potencia

En los últimos años la aplicación de la Transformada Wavelet a los sistemas eléctricos de potencia ha permitido el análisis y procesamiento de señales de voltaje y corriente, identificando fenómenos transitorios en tiempo real [25]. La Transformada Wavelet se destaca por su capacidad de analizar ondas, proporcionando información simultánea de tiempo y frecuencia, con la cual es posible la clasificación de fallas en línea [25].

2.4 Transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia

Las redes de distribución están sujetas a fallas por diferentes tipos de origen o naturaleza, que afectan a los componentes de la red eléctrica, generando perturbaciones en su correcto funcionamiento y transitorios en las señales de corriente y tensión.

Por lo tanto, es necesario identificar cuándo se produce una falla utilizando el WT. La WT es una herramienta eficaz para la identificación de fallas debido a su funcionalidad para el procesamiento y análisis de las señales transitorias. El WT puede ser utilizado para obtener información simultánea sobre el tiempo y la frecuencia de una señal [25].

2.5 Transformada Wavelet

El análisis de la señal mediante WT se basa en la dilatación y traslación de una ondícula madre sobre la señal. La operación de escalado se realiza para dilatar y comprimir la ondícula madre, dando lugar a señales de baja y alta frecuencia, respectivamente [25].

$$W_{f(\mu,s)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * \psi_{\mu,s}(t) dt \quad (1)$$

Podemos definir $\psi_{\mu,s}$ como la señal Wavelet original:

$$\psi_{\mu,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \mu}{s}\right) \quad (2)$$

A esta familia se asocian diferentes wavelets madre: Daubechies, Coiflets y Symmlet; para los casos presentados aquí, hemos utilizado la wavelet Daubechies de nivel 4 [db4] para los casos presentados.

2.6 Método de la Onda Viajera

Se propone localizar la falla mediante el método de la onda viajera, que calcula la propagación de la onda. Este método depende de los parámetros inductivos y capacitivos en la ecuación (3) obtenida de la impedancia de secuencia positiva de secuencia cero [14].

$$v = \frac{1}{\sqrt{L * C}} \quad (3)$$

L representa la inductancia de la línea de distribución por unidad de longitud. En cambio, C representa la capacitancia de la línea de distribución por unidad de longitud. En cualquiera de los dos casos, los parámetros pueden expresarse en kilómetros o metros; así, la velocidad calculada se describirá en km/s o m/s . Las diferentes configuraciones de las líneas de distribución afectan a la forma en que las ondas viajan por la red; véase la tabla 2.

2.7 Método Elbow

El método del codo busca el punto en el que se observa un cambio brusco en la inercia, siendo ese punto el número estratégico de clusters a implementar dentro de dicho escenario [28], [26].

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Este proyecto tiene como finalidad instalar equipos detectores de falla a través de un algoritmo que determine la distancia de falla mediante la aplicación de métodos como la WT y la onda viajera. Para la aplicación de estos métodos es necesario obtener una base de datos que describa el comportamiento de la red y determinar los parámetros de las líneas de distribución.

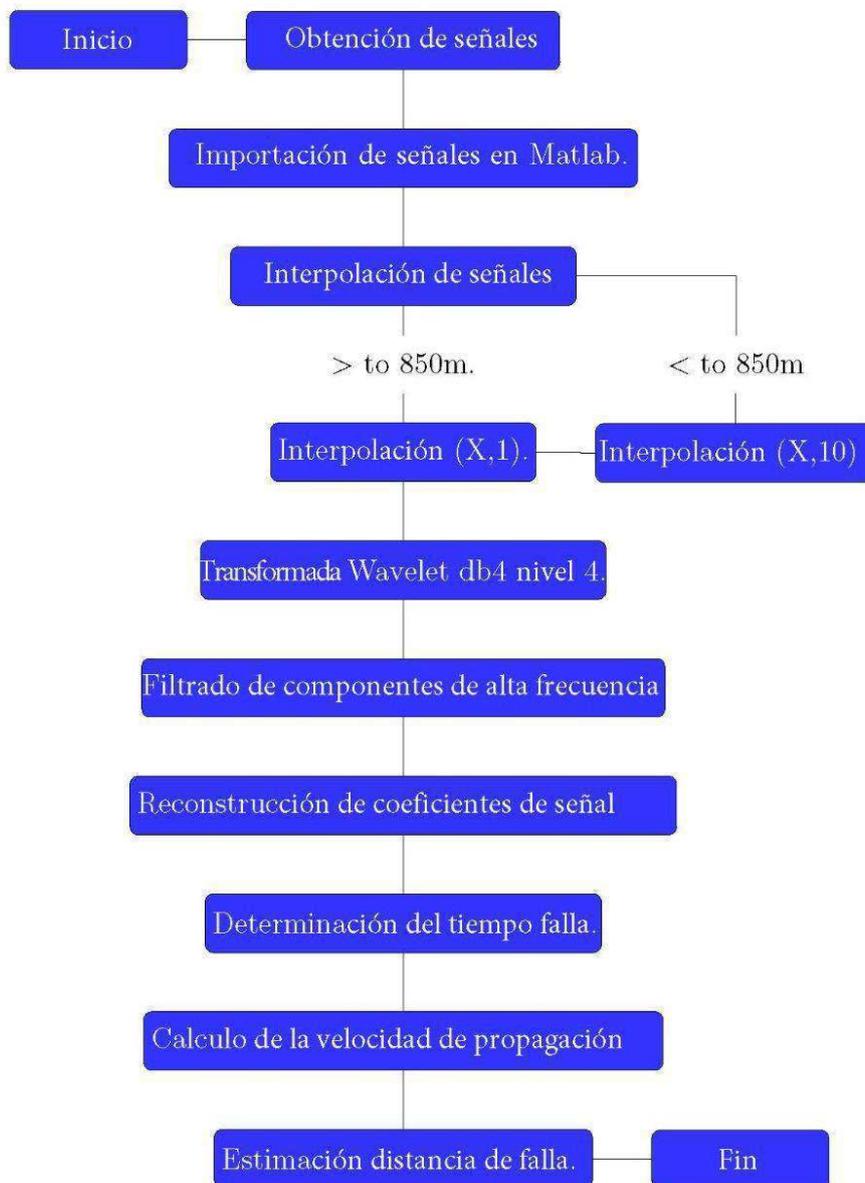


Figura 2: Diagrama de flujo.

3.2 Caracterización del sistema eléctrico de distribución

Para el desarrollo del trabajo se realiza la caracterización del sistema de distribución, esta caracterización incluirá parámetros y características relevantes del sistema tales como la longitud de las líneas, impedancias de los elementos de distribución, conexiones de alimentadores de distribución y la configuración de cada uno de los elementos de protección utilizados en el sistema de distribución, con el fin de conocer los tiempos de respuesta ante cualquier eventualidad para aislar y proteger los elementos conectados al mismo.

3.3 Simulación y adquisición de datos

En esta etapa tiene como objetivo principal la adquisición de una base de datos que describa el funcionamiento del sistema eléctrico de distribución tanto en estado normal de operación como de falla. Para obtener dicha base de datos se emplea CYME, que permite simular la estabilidad transitoria de los IEDs y equipos de protección, los cuales tienen la capacidad de almacenar datos del funcionamiento del sistema eléctrico.

3.4 Extracción de información de las señales eléctricas.

En esta etapa se construye la señal de corriente eléctrica mediante la base de datos obtenidos por el programa CYME, luego se aplica WT de la familia daubechies (db4) de nivel 4, la cual identifica las corrientes de falla y obtienen los picos máximos de corriente, luego reconstruye la señal para determinar los tiempos que corresponden a los dos primeros picos máximos de corriente de falla. Este proceso se aplica para determinar el tiempo de detalle (t_d) que posteriormente se utilizara para determinar la distancia de falla.

3.5 Estimación de distancia de falla.

Se propone determinar la distancia de falla mediante la WT, y el método de la onda viajera, que calcula la velocidad de propagación de la señal de onda. Para esto se determina la velocidad de propagación en base a los parámetros inductivos y capacitivos de las líneas del sistema de distribución que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Parámetros de la línea.

Línea	L (H/km)	C (F/km)	v (km/s)
Línea 139-140	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 166-186	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 102-103	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 197-212	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614
Línea 235-236	0,0011796	1,0242E-08	287705,1614

Se propone determinar la distancia de falla mediante la WT, y el método de la onda viajera, que calcula la velocidad de propagación de la señal de onda. Para esto se determina la velocidad de propagación en base a los parámetros inductivos y capacitivos, que se utiliza para el cálculo de la distancia de falla, agregando a eso los parámetros del t_d y frecuencia de muestreo la cual es 3.3 kHz , lo cual se representan en la ecuación (4).

$$d_f = \frac{t_d * \Delta_F}{2} * v \quad (4)$$

Las diferentes configuraciones de las líneas del sistema de distribución afectan la forma en que las ondas viajan a lo largo de la red, por esta razón se determina la distancia de falla en un sistema sin cambio de impedancia homopolar positiva y se calcula el error porcentual en base a la ecuación (5).

$$error(\%) = \frac{|d_f - d_{real}|}{d_{real}} * 100 \quad (5)$$

Tabla 3 Información del algoritmo.

I: Corriente
T: Tiempo
C, L, Fo: Variable auxiliar
t_d : Tiempo de detalle Wavelet de la señal
v: Velocidad
d_f : Distancia de falla
Pasos del algoritmo:
Paso 0: Introducción de los datos de la corriente de cortocircuito
Paso 1: Inicialización de las variables
Paso 2: Datos para el cálculo del nodo de falla
C_s : Capacitancia [F/km]
L_s : Inductancia [H/km]
Paso 3: Cálculo de la distancia con la transformada Wavelet
[C,L] = wavedec(I,4,db4)
Save max(C)
Fo = wrcoef('d',C,L,'db4')
Paso 4: Encontrar los dos picos máximos después del fallo
Imprimir t_d
Paso 5: Calcular v
Paso 6: Ubicación del nodo de la falla
Paso 7: Estimación del porcentaje de error
Paso 8: Graficar los resultados
Paso 9: Finalizar

3.6 Ubicación de equipos detectores de falla

Para obtener una ubicación de falla precisa mediante la determinación de la distancia de falla se propone instalar IF en el sistema de distribución propuesto, para lo cual se necesita primero calcular el número necesario de IF mediante el método Elbow, y luego determinar la ubicación óptima mediante k-means.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

Las redes de distribución eléctrica son vulnerables a la presencia de fallas debido a que afectan a la confiabilidad del sistema, por lo cual se implementan equipos de protección, IEDs para fortalecer la red ante la presencia de anomalías. Mediante los avances tecnológicos, en la actualidad los equipos de protección, medición e IEDs son capaces de almacenar información sobre el respectivo funcionamiento del sistema eléctrico.

4.1 Caracterización del sistema

Se diseña una red de distribución de 22 kV georreferenciada mediante el programa QGIS del cual se pueden obtener coordenadas de la ubicación de la red. Estas coordenadas se importan a Matlab en el que se aplica el MST, partiendo de un vértice raíz y encontrando todos sus nodos enlazados y las relaciones que permiten conectarlos, siendo el peso a considerar la menor distancia [19]. Un MST de peso mínimo es un dígrafo ponderado por aristas conectado a todos los vértices sin la presencia de bucles [8], [17].

Luego de aplicar MST se obtiene un alimentador de 295 nodos, el cual está conformado por 48 transformadores trifásico de dos devanados cuyas potencias en kVA son de 30, 50, 175, 112.5, 150, 200 y un transformador monofásico de 75 kVA, 54 cargas concentradas y 5 reconectores para la protección de los diferentes ramales derivados del alimentador, todo esto da como resultado un alimentador de 5 MVA de carga instalada que se puede observar en la figura 3 y en la tabla 4.

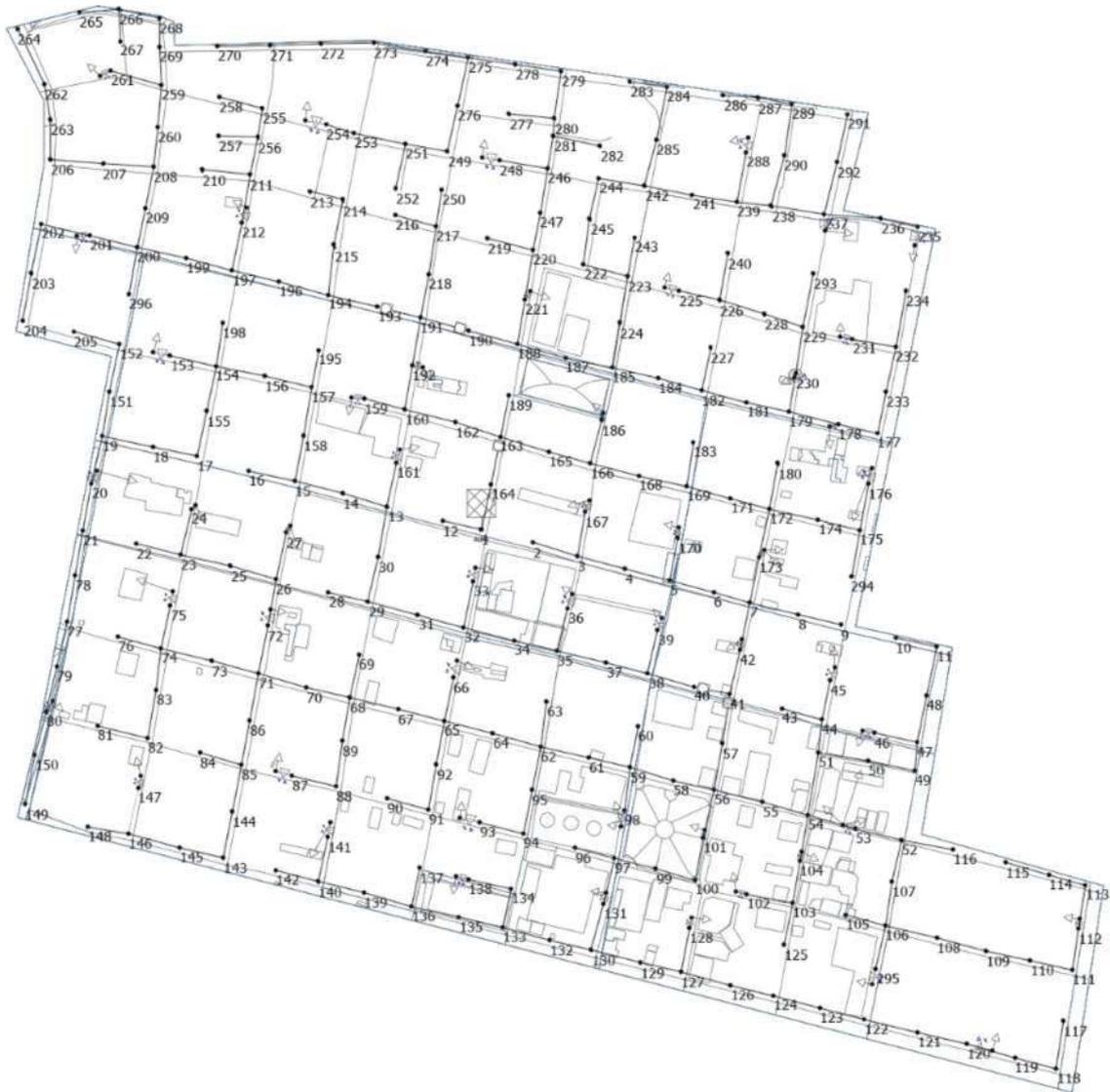


Figura 3: Escenario.

Tabla 4 Características del sistema en estado normal.

Capacidad de S/E	5 MVA
Carga total	
Potencia real	3.686 MW
Potencia reactiva	2.325 MVAR
Potencia aparente	4.358 MVA
Carga utilizada	
Potencia real	3.614 MW
Potencia reactiva	1.534 MVAR
Potencia aparente	3.926 MVA
Pérdidas totales	0.823 MVA
Max. ΔV	2.85 %
Longitud	15899 m

Una vez obtenido la red de distribución se presenta en la tabla 5 los casos de estudios desarrollados.

Tabla 5 Casos de estudio.

Caso	Tipo de falla	Nodo de falla
Cortocircuito trifásico lejos y cerca de la subestación	Tres fases	140 - 186
Cortocircuito trifásico simultáneo	Tres fases	212 - 102
Cortocircuito bifásico	Tres fases	235

4.2 Caso 1

4.2.1 Cortocircuito trifásico lejos de la subestación.

Según los casos de estudio expuestos, se parte de una falla de cortocircuito trifásico en el nodo 140 que se encuentra ubicado a 1427 metros de la subestación de medio voltaje. Los datos de cortocircuito se generan a partir del almacenamiento de eventos por parte del dispositivo de protección y maniobra que para este caso de estudio es el reconectador 41-57 que posee una frecuencia de muestreo de 3.3 kHz. A partir de estos datos se origina la forma de onda de operación del sistema en estado de falla que se visualiza en la figura 4.

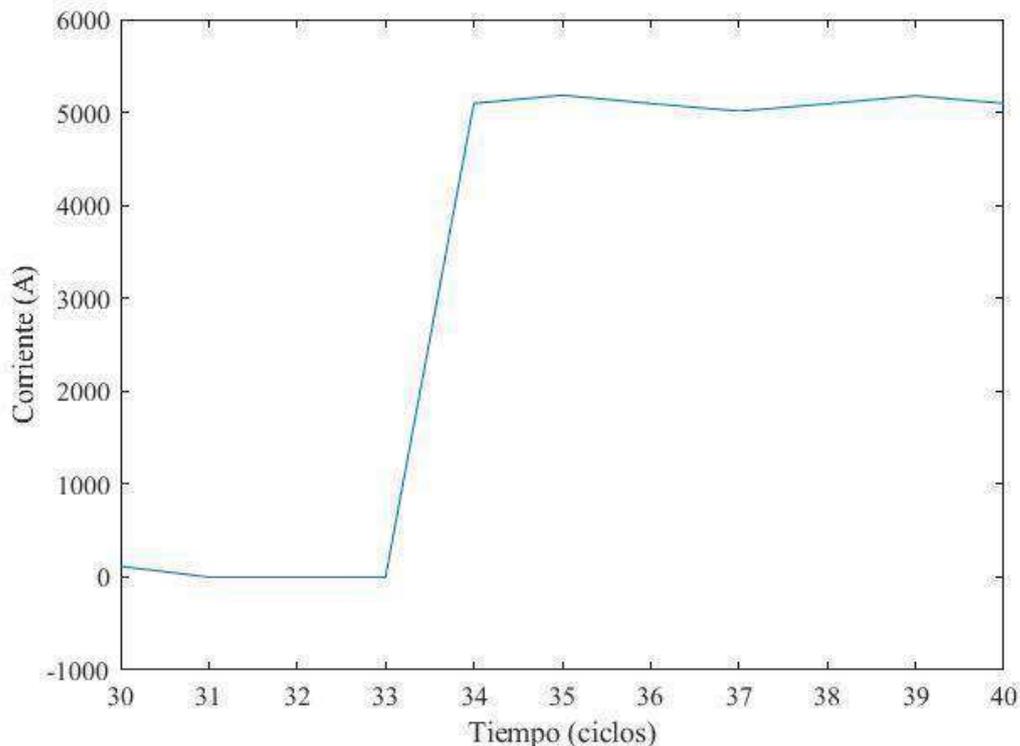


Figura 4: Cortocircuito trifásico lejos de la subestación.

A partir de la señal de falla obtenida se utiliza una WT de familia Db4 de nivel 4, con la cual la señal se reconstruye a partir de la estructura de descomposición wavelet utilizando su máximo nivel. Las señales reconstruidas para todos los casos son similares con la única

variación en su amplitud debido al número de coeficientes calculados. Una de las variables esenciales para la aplicación del método de la onda viajera y la posterior localización de la falla es el tiempo t_d , que resulta de la diferencia de los tiempos correspondientes a los dos picos consecutivos de corriente en el instante de falla, que se calcula para cada caso.

Para la aplicación del algoritmo de localización e identificación de fallas, es necesario determinar el tiempo t_d a partir de la señal presentada en la figura 5, que corresponde al análisis de la identificación de falla lejos de la subestación situada en el nodo 140.

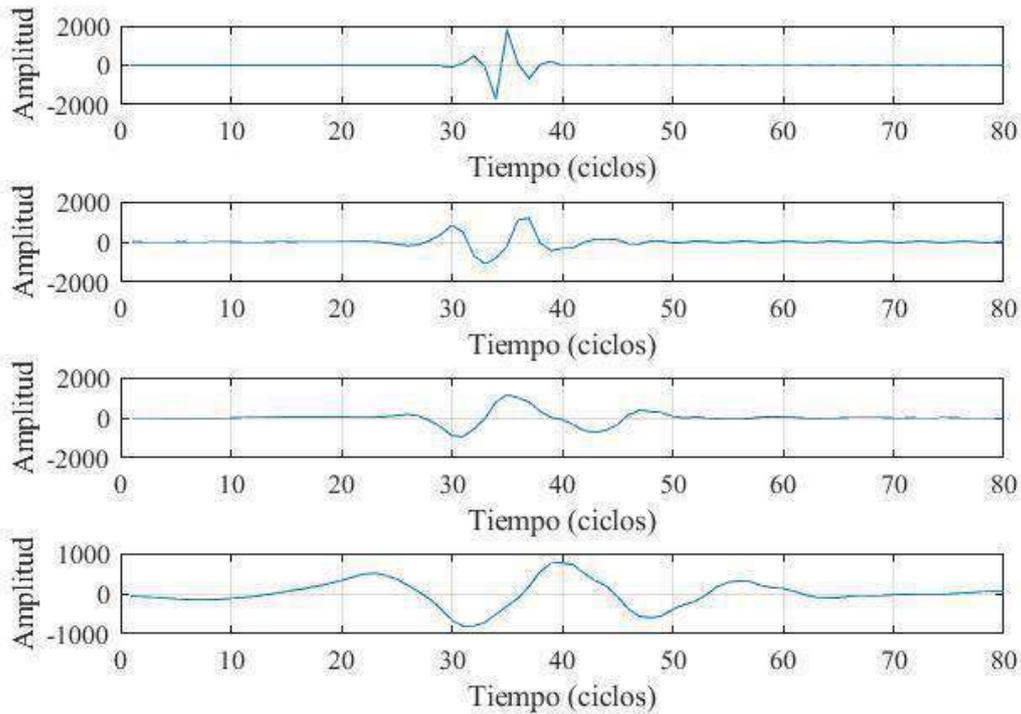


Figura 5: Señal de detalle Wavelet para calcular el t_d de la falla lejos de la subestación.

4.2.2 Cortocircuito trifásico cerca de la subestación.

se produce una falla de cortocircuito trifásica en las proximidades de la subestación a una distancia de 274,6 correspondiente al nodo 186. La señal de falla presentada en la figura 6 se obtiene del almacenamiento de eventos por parte del dispositivo de protección y maniobra, el cual es el reconector 163-164. En este caso, como la falla es menor a una distancia de 850 metros, se procede a interpolar para tener un mejor muestreo.

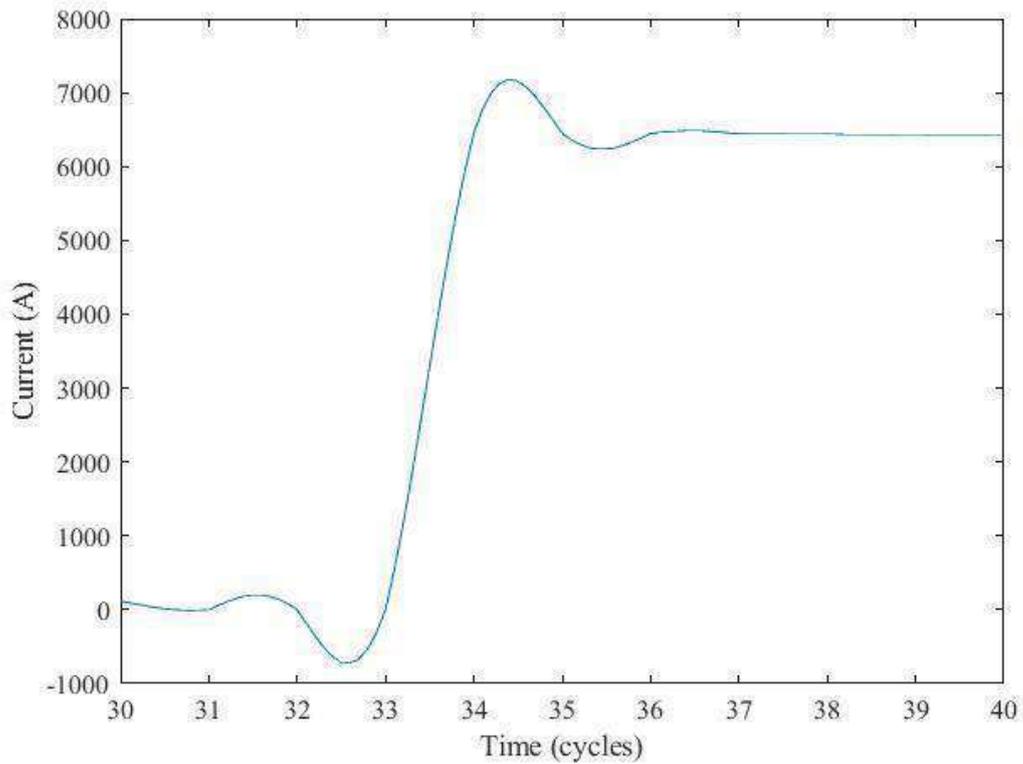


Figura 6: Cortocircuito trifásico cerca de la subestación.

Ahora, como la falla ocurre en el nodo 186, ubicado cerca de la subestación, la información de la base de datos obtenida por el reconfigurador es interpolada debido a la pequeña cantidad de datos. Esto permite una mejor señal para la identificación de la falla y la determinación del tiempo t_d que se obtiene de la señal que se presenta en la figura 7.

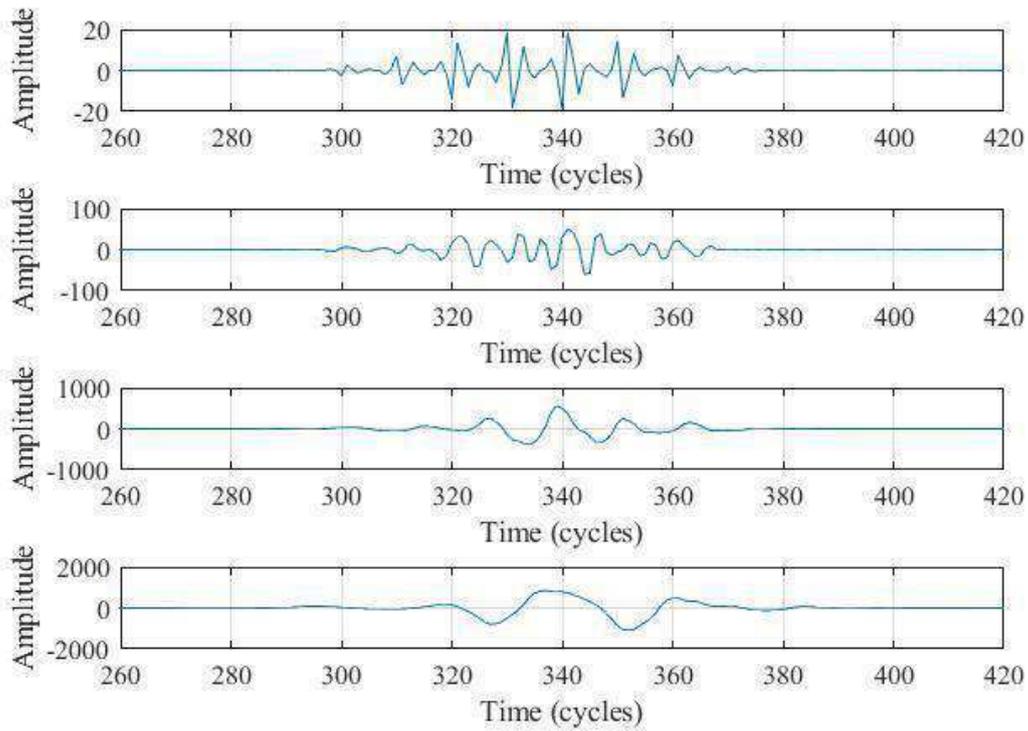


Figura 7: Señal de detalle Wavelet para calcular el t_d de la falla cerca de la subestación.

4.3 Caso 2

4.3.1 Falla simultanea

Un segundo caso es el de un cortocircuito trifásico simultáneo. Por tanto, tenemos dos distancias, la primera a 625,8 metros, inferior al umbral que debemos interpolar, y la segunda a 1051,7 metros, tomada desde la subestación. Las señales se obtienen de los reconectores 41-57 y 191-193 y se visualizan en la figura 8.

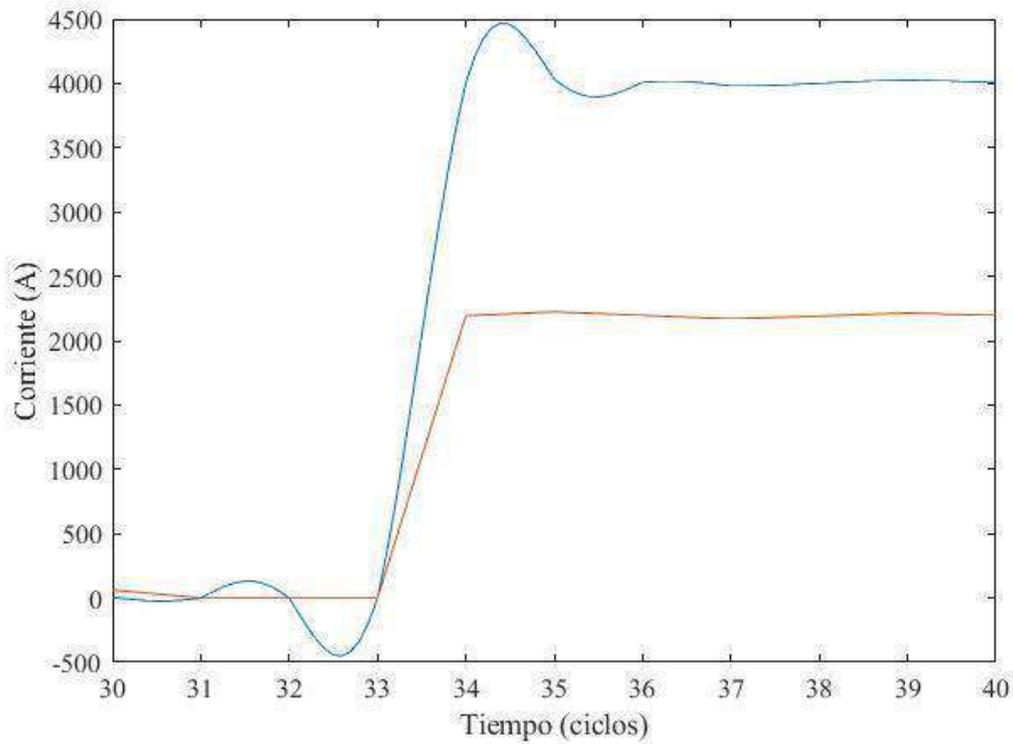


Figura 8: Cortocircito trifásico simultáneo.

Cuando ocurren dos fallas simultáneas, una ubicada en el nodo 212 y la segunda en el nodo 102, que pertenecen a la zona 41-57 y 191-193 del reconfigurador, respectivamente, se obtuvieron dos bases de datos diferentes en las que se realizó un análisis independiente de cada señal para identificar la falla ocurrida y determinar los tiempos t_d de cada señal de falla, las cuales se presentan en la figura 9 y figura 10.

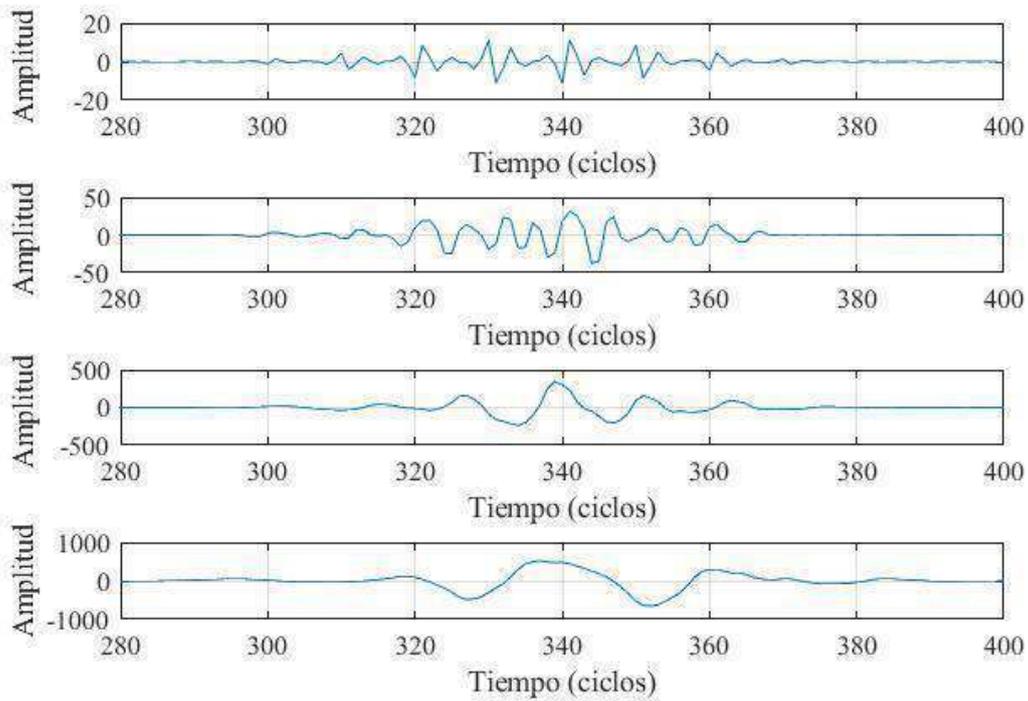


Figura 9: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del t_d de la falla 1.

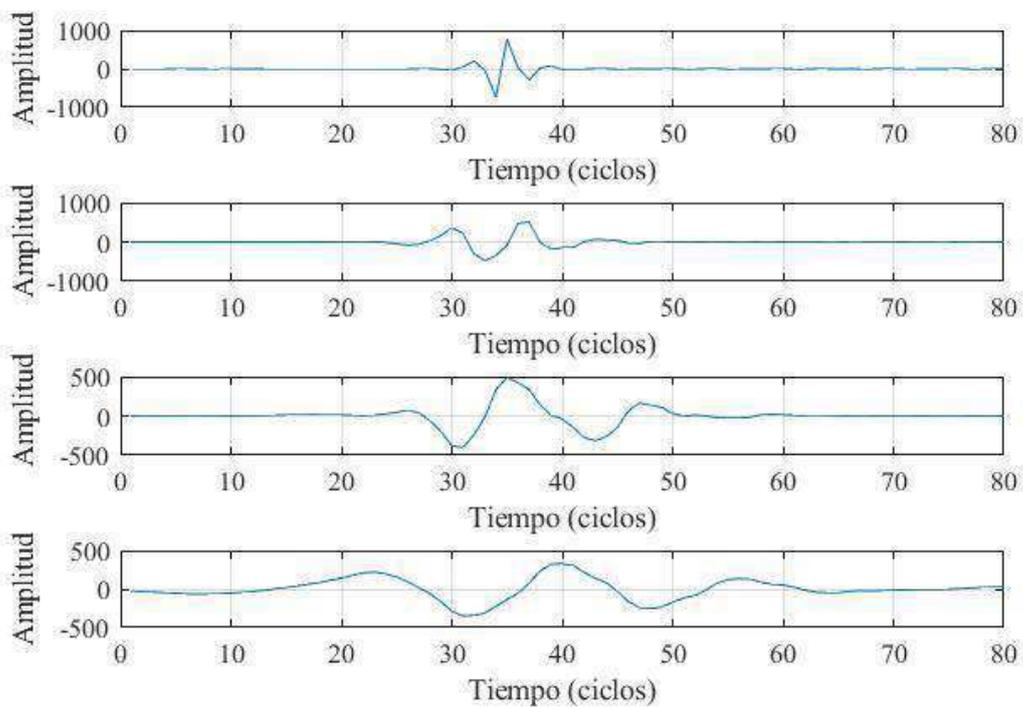


Figura 10: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del t_d de la falla 2.

4.4 Caso 3

4.4.1 Falla bifásica

Se produce una falla bifásica dentro de la zona del reconectador 190-191 situada en el nodo 235 a 1219 metros de la subestación. Mediante el reconectador 190-191 se obtienen la base de datos de corriente para la construcción de la señal, misma que se interpoló para suavizar la señal y esta es presentada en la figura 11.

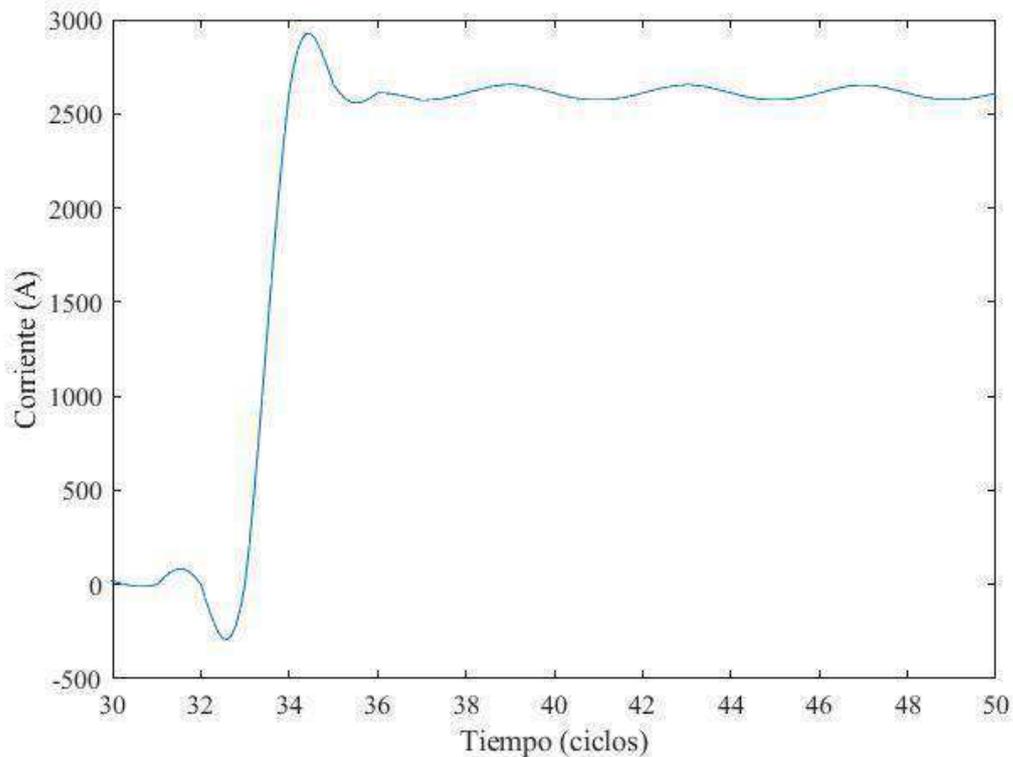


Figura 11: Cortocircito bifásico.

En la figura 12 muestra la señal de detalle wavelet para obtener el tiempo t_d que permite luego calcular la distancia de falla.

El tiempo de detalle se obtiene del nivel 3 y 4, en donde se aprecia de mejor manera los picos máximos de corriente de falla.

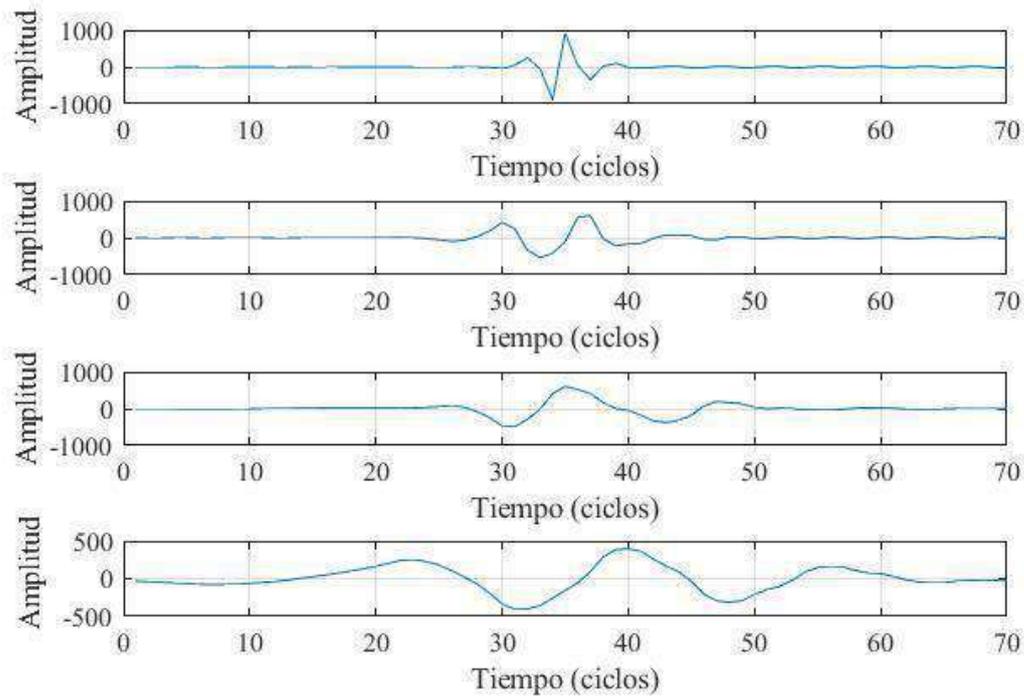


Figura 12: Señal de detalle Wavelet para el cálculo del t_d para el cortocircuito bifásico.

4.5 Estimación de la distancia.

Para el cálculo de la distancia de falla de cada caso se utiliza el método de WT y la onda viajera. El primer método se encarga de identificar la ocurrencia de una falla para luego determinar el tiempo t_d , mientras que el segundo método determina la velocidad de la onda de la señal de cortocircuito dado la ecuación (3), con la cual se obtienen las velocidades de propagación de cada caso que se pueden visualizar en la tabla 2. Mediante la aplicación de los dos métodos mencionados se obtienen datos de tiempo y velocidad para determinar la distancia de falla, la cual también necesita de la frecuencia de muestro de los equipos de protección que almacenan datos de eventos del sistema de distribución. Obtenido todos los datos mencionados anteriormente se aplica la ecuación (4) para determinar la distancia de falla, cuyos resultados se presentan en la tabla 6.

Tabla 6 Resultados obtenidos tras la ocurrencia de la falla.

Casos	Tipo de falla	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$d_{cal}(km)$	$d_{real}(km)$	$error$ (%)	Nodo
Caso 1	TPSCFS	0,5667	0,6	1,4531	1,427	1,8626	140
	TPSCNS	0,5649	0,5715	0,28413	0,2476	3,4701	186
Caso 2	STPC	0,5649	0,5715	0,62706	0,6258	0,2	212
	STPC	0,0567	0,06	0,80768	1,0517	23,202	102

Caso 3	TPSC	0,5649	0,5849	1,2117	1,219	0,5963	235
--------	------	--------	--------	--------	-------	--------	-----

Para comprobar que el algoritmo desarrollado estima correctamente la distancia de falla se presenta en la figura 13 la curva de los tiempos y distancias determinadas, en la cual se analiza que la distancia de falla varía dependiendo de los tiempos de detalle y que las distancias calculadas son similares a las distancias reales con lo que se puede decir que los resultados obtenidos son correctos.

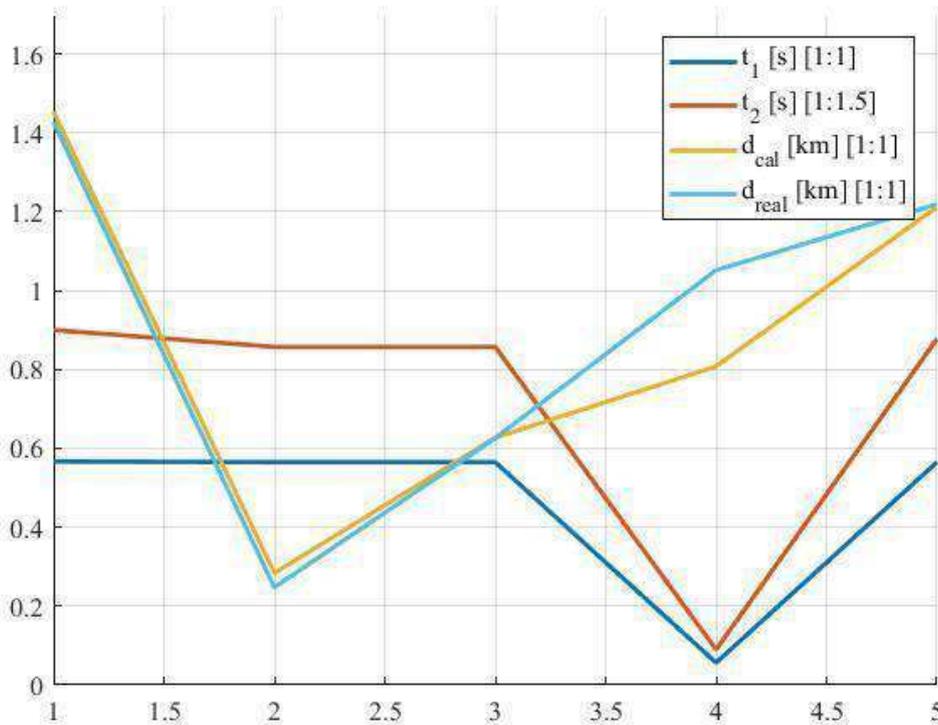


Figura 13: Tiempo de detalle y la distancia real y calculada.

4.6 Ubicación de equipos detectores de falla.

Dado que las redes de distribución eléctrica son considerablemente extensas, el cálculo de la distancia puede localizar una falla en diferentes ubicaciones del sistema por lo cual se determina la ubicación para la instalación de equipos detectores de falla que para el caso de estudio serán los FI. Para optimizar recursos y determinar el número de FI necesarios se aplica el método de Elbow el cual se presenta en la figura 14, que da como resultado instalar 8 FI en el sistema eléctrico de distribución presentado.

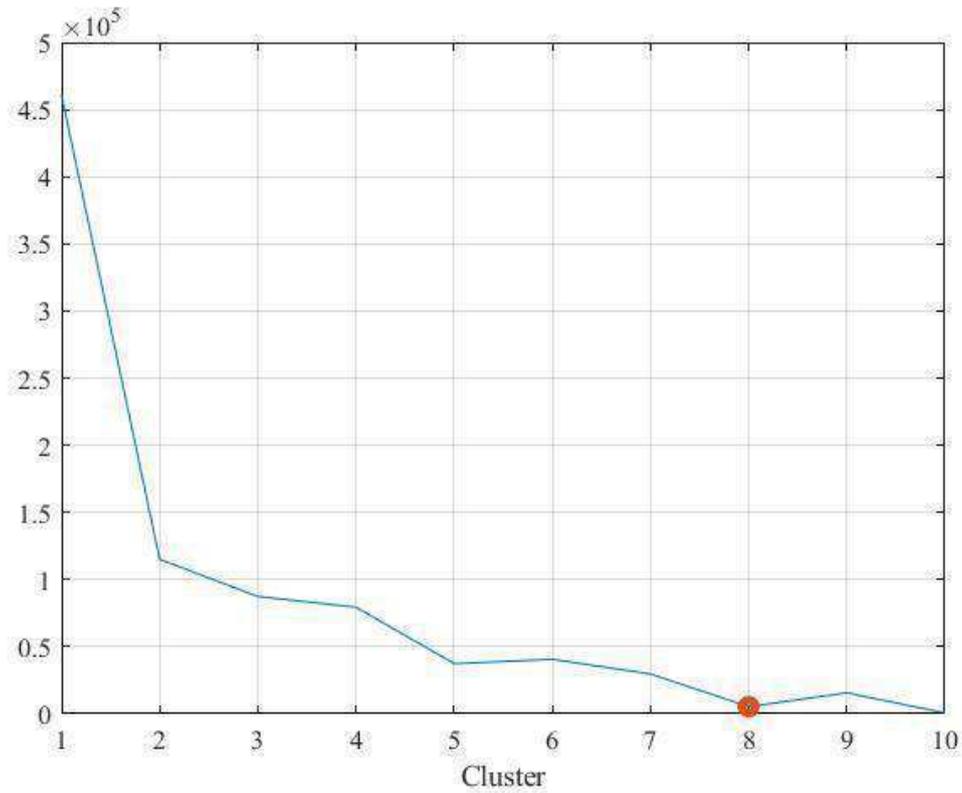


Figura 14: Método de codo para la localización de equipos detectores de fallas.

Determinado el número de FI necesarios se procede a determinar su ubicación adecuada mediante el algoritmo de k-means, el cual presenta como resultado en la figura 15, la ubicación estratégica a ser instalado los FI para monitorear las zonas.

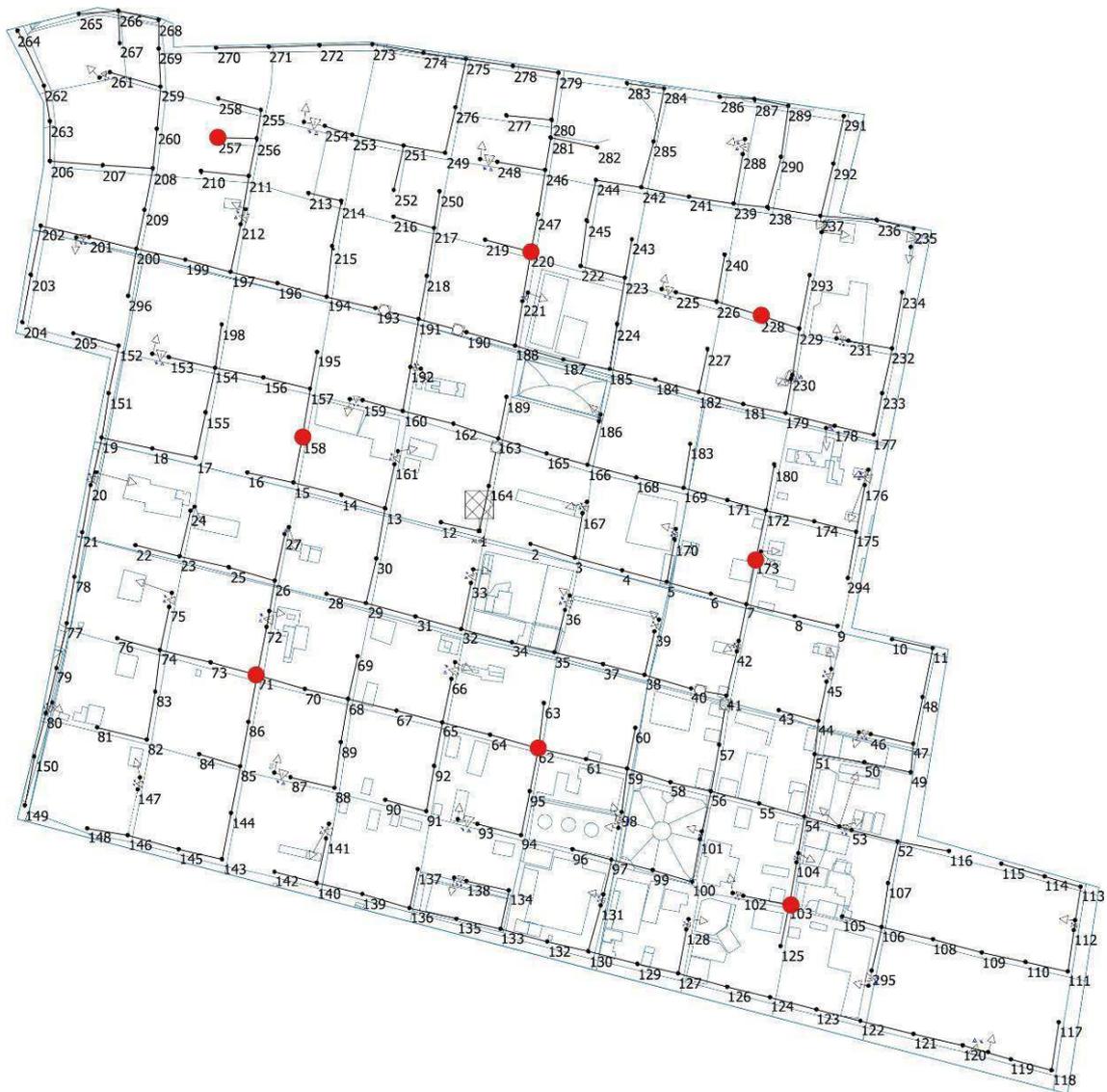


Figura 15: Escenario con la localización de equipos detectores de fallas.

4.7 Resumen

En la tabla 7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de corriente de la base de datos que generan los reconectores tanto en estado de falla como en su estado de operación normal.

Tabla 7 Corriente de falla y corriente nominal.

Casos	Nodos	IF_A (kA)	IF_B (kA)	IF_C (kA)	I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)
Caso 1	140	4,9372	4,9372	4,9372	1,3	1,3	1,3
	186	6,2784	6,2784	6,2784	1,9	1,8	1,9
Caso 2	212	3,9035	3,9035	3,9035	2	2	2
	102	2,1351	2,1351	2,1351	0,8	0,8	0,8
Caso 3	235	4,4482	4,4482	0	1,1	1,1	1,1

Cuando la red de distribución se encuentra en su funcionamiento normal las corrientes de línea son bajas debido a que la red se encuentra funcionando a 22 kV. En la figura 16 se puede observar que los valores de corriente son diferentes esto debido a que cada nodo del alimentador está conectado a cargas diferentes. Esto quiere decir, que en el nodo 212 se tiene la carga más alta debido a que la corriente es la más alta de los casos estudiados y en el nodo 102 se tiene la carga mas baja debido a que la corriente es la más baja en estos casos.

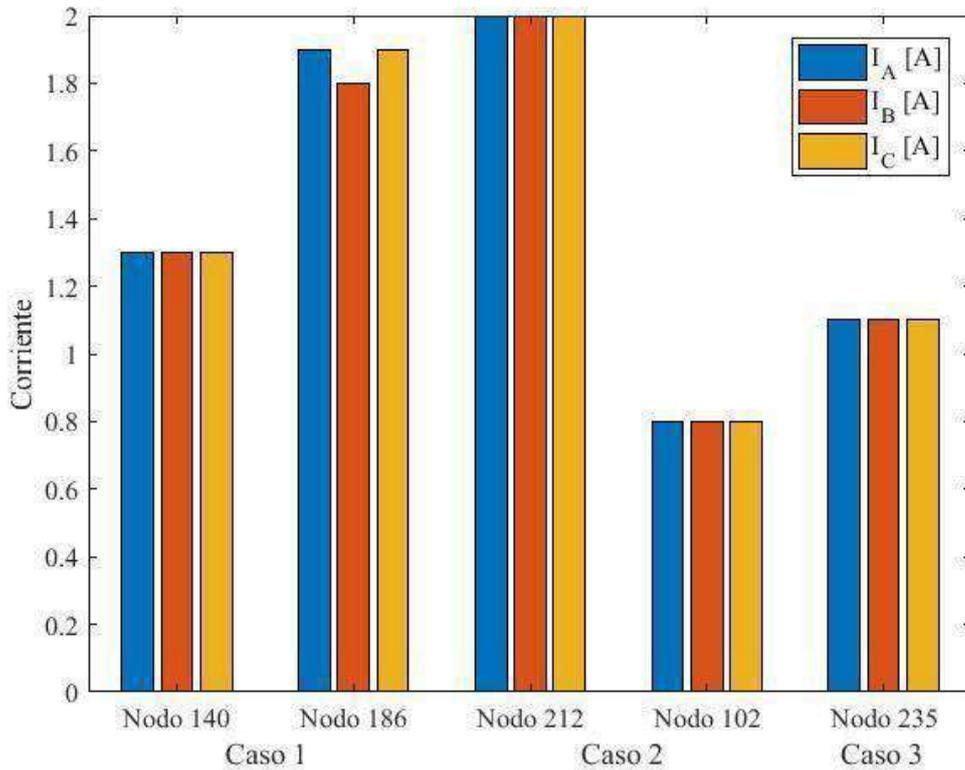


Figura 16 Corriente nominal del nodo.

Al presentarse una falla en la red de distribución los valores de voltaje se reducen considerablemente por lo que la corriente aumenta su valor a gran escala. En la figura 17 se puede analizar que la mayor corriente de cortocircuito se origina en el nodo 186 debido que se encuentra cerca de la subestación y en el nodo 102 la corriente de cortocircuito menor debido a que tiene poca carga y esta mas lejos de la subestación.

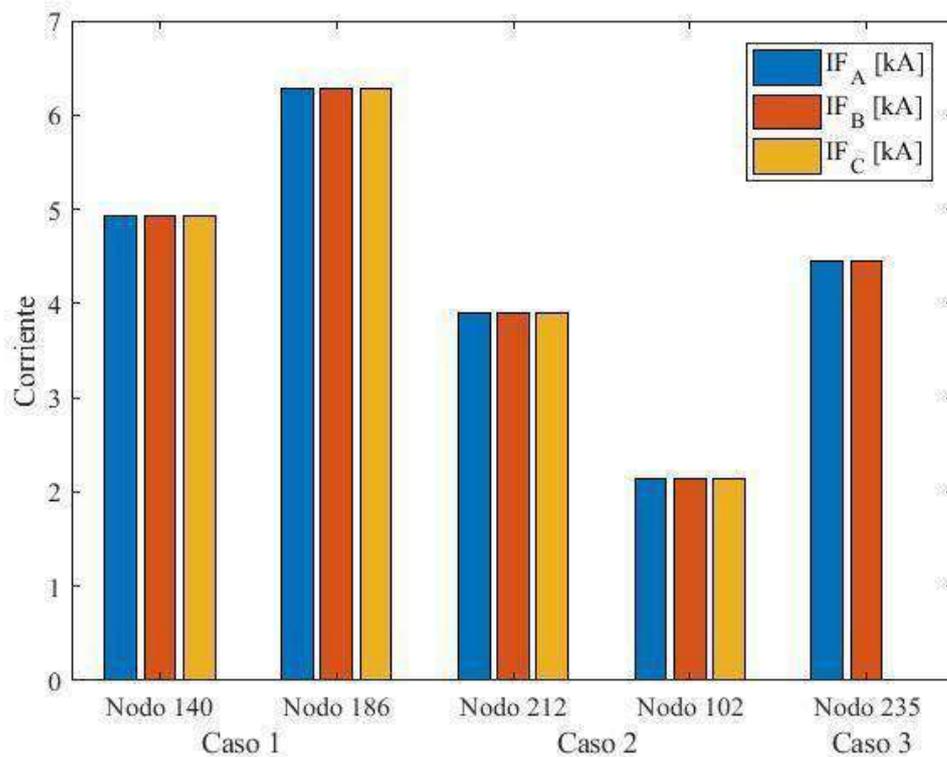


Figura 17 Corriente de falla del nodo.

La base de datos generada por los reconfiguradores también contienen valores de voltaje, los cuales son diferentes para cada caso debido a la caída de voltaje de cada línea, lo cual se evidencia en la tabla 8.

Tabla 8 Voltaje nominal y voltaje de falla.

Casos	Nodos	Voltaje nominal de fase (kV)			Voltaje de falla de fase (kV)		
		VLNA	VLNB	VLNC	VLNA	VLNB	VLNC
Caso 1	140	12.671	12.671	12.671	0.0017369	0.0017369	0.0017369
	186	12.692	12.692	12.692	0.0002725	0.0002725	0.0002725
Caso 2	212	12.692	12.692	12.692	0.0016125	0.0016125	0.0016125
	102	12.673	12.673	12.673	0.0007874	0.0007874	0.0007874
Caso 3	235	12.691	12.691	12.691	63.432.678	63.432.678	12.709.157

La caída de voltaje depende de las propiedades de las líneas del sistema de distribución y de su distancia. En la figura 18 se puede observar cómo los valores de voltaje son diferentes en cada caso propuesto, esto debido a que cada uno de ellos está dado en una ubicación diferente.

Los voltajes de fase de cada nodo son iguales, debido a esto se escala la grafica para lograr mayor visualización de los resultados obtenidos en los casos de estudio.

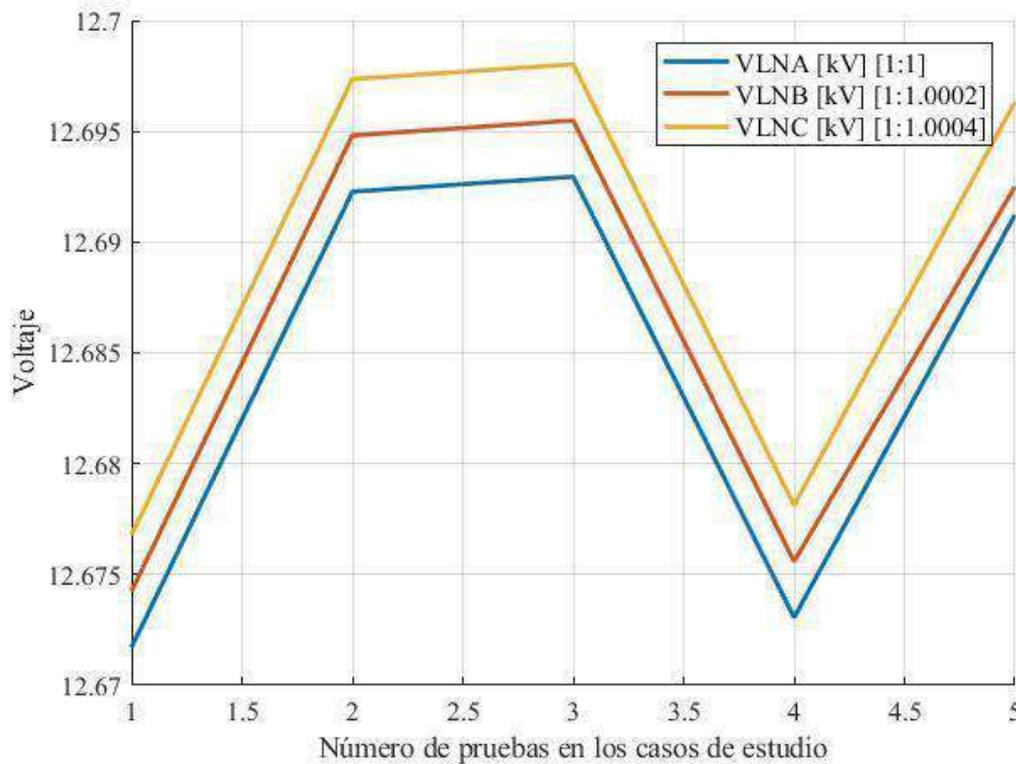


Figura 18 Voltaje nominal del nodo.

Cuando ocurre una falla en cualquier parte del sistema de distribución, los niveles de voltaje se reducen drásticamente hasta llegar a valores cercanos a cero, esto se puede evidenciar en la figura 19, donde en cada caso de falla los valores de voltaje están cercanos a cero.

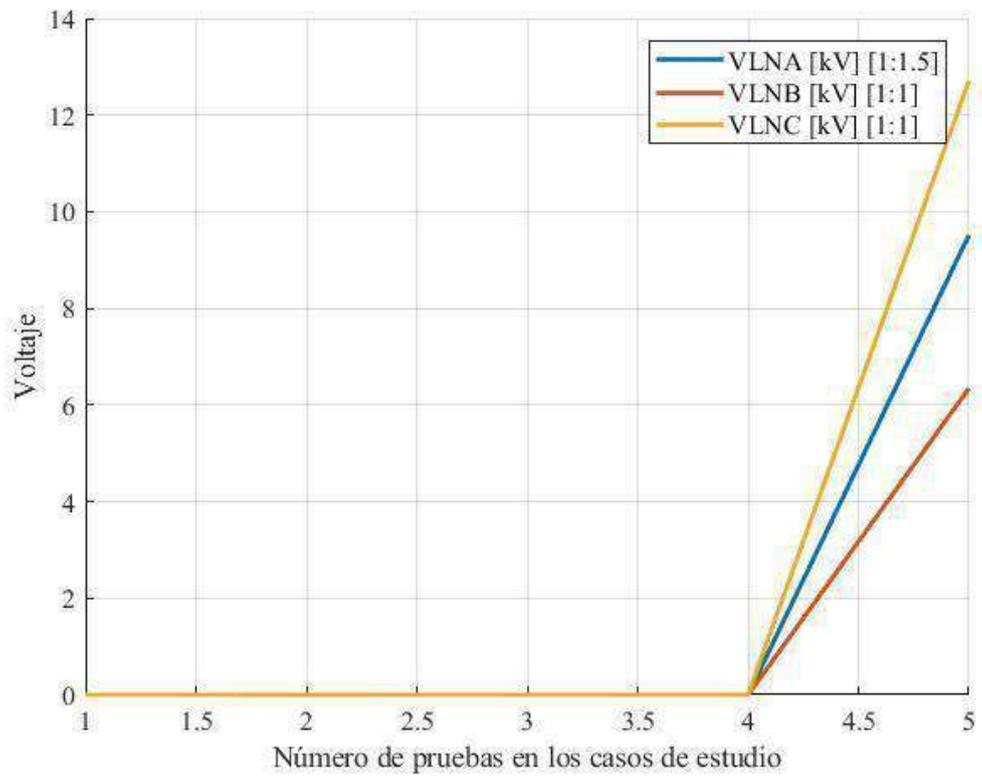


Figura 19 Voltaje de falla del nodo.

5 DISCUSIÓN

En los resultados del trabajo se evidencia que el rendimiento del algoritmo de localización de fallas basado en los métodos de WT y la onda viajera dependen de la configuración de las líneas del sistema de distribución. Esto coincide con el estudio presentado en [15], donde describe los principales problemas para la ubicación de fallas en sistemas de distribución.

En [24] y [11], describe los equipos y dispositivos de protección capaces de almacenar información sobre los eventos que pueden ocurrir en los sistemas de distribución. Para los casos de estudio propuesto se empleó reconectores como equipos de protección debido a que tienen como propiedades almacenar información de eventos a una frecuencia de muestro de 3.3 kHz.

En el presente estudio para identificar fallas de las señales de corriente obtenidas de la base de datos de los reconectores se emplea el método de WT de la familia daubechies (db4) de nivel4, dado que en [25] describe que Daubechies es parte de la clasificación de WT y explica que es la más utilizada para el análisis de señales de tipo transitorias.

Mediante los resultados obtenidos se evidencia que el cálculo de la distancia no es suficiente para la ubicación exacta de falla debido a que en el sistema de distribución existen diferentes puntos de la red con iguales distancias, por lo que se procede a instalar indicadores de falla, debido a que en [20] explica que la instalación de un IF restringe la zona de avería identificada con lo cual el tiempo necesario para localizar la falla disminuye.

6 CONCLUSIONES

La localización de averías en los sistemas de distribución eléctrica es de gran importancia para mejorar su fiabilidad y reducir el tiempo de interrupción del servicio eléctrico; en este artículo se relaciona la transformada wavelet con la onda viajera para proponer un método de localización de averías.

La caracterización del sistema de distribución muestra que la variación de los parámetros de la línea influye en el cálculo de la velocidad a través de la onda viajera y los diferentes equipos de protección instalados en el alimentador, cuya frecuencia de muestreo varía en función de la marca y el modelo.

Para el cálculo de la distancia de la falla, es necesario elegir correctamente la wavelet madre, lo que permitirá identificar de mejor manera los dos picos máximos tras la falla siendo esta aproximada, que puede tener hasta un 30% de error permitido.

La señal de falla obtenida por el equipo de protección de la red puede ser adquirida de equipos lejanos o cercanos a la subestación. Hay que tener en cuenta que, si los datos para la construcción de la señal de falta son insuficientes para obtener una señal suavizada, se deben interpolar para tener una base de datos más amplia y aproximar mejor la falta; se han realizado pruebas que muestran en este trabajo que la distancia óptima para interpolar debe ser menor a 850 metros.

El cálculo de la distancia no es suficiente para localizar el punto de falla debido a que pueden existir diferentes puntos en el sistema de distribución con distancias similares, por lo cual es necesario instalar FI para tener identificada de manera visual la zona en la cual se da la falla.

La metodología implementada en este caso de estudio fue capaz de localizar las fallas en el sistema de distribución a través de las señales de corriente de cortocircuito visualizadas por los reconectores cercanos a la falla. Encontrar los coeficientes de detalle correctos, ya que estos coeficientes influyen directamente en el cálculo de la distancia. Siendo el tiempo de duración de la avería, hay que tener en cuenta que la metodología propuesta sólo puede utilizarse en escenarios en los que no hay cambios de impedancia en las líneas de distribución.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aboshady, F.M., Thomas, D.W., Sumner, M., 2019. A new single end wideband impedance based fault location scheme for distribution systems. *Electric Power Systems Research* 173, 263–270. doi:10.1016/J.EPSR.2019.04.034.
- [2] Alotaibi, M.A., Salama, M.M.A., 2018. An incentive-based multistage expansion planning model for smart distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems* 33, 5469–5485. doi:10.1109/TPWRS.2018.2805322.
- [3] Azeroual, M., Boujoudar, Y., Bhagat, K., El Iysaouy, L., Aljarbouh, A., Knyazkov, A., Fayaz, M., Qureshi, M.S., Rabbi, F., EL Markhi, H., 2022. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: Kenitra city (morocco) as a case study. *Electric Power Systems Research* 209, 108026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622002528>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108026>.
- [4] Dashtdar, M., 2018. Fault location in distribution network based on fault current analysis using artificial neural network. *International Journal of Electrical and Computer Sciences (IJECS)* 1, 18– 32. URL: <https://pmdpublishing.com/index.php/IJECS/article/view/75><https://pmdpublishing.com>, doi:10.33544/MJECE.V1I2.75.
- [5] Dashti, R., Daisy, M., Mirshekali, H., Shaker, H.R., Hosseini Aliabadi, M., 2021. A survey of fault prediction and location methods in electrical energy distribution networks. *Measurement* 184, 109947. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121008824>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109947>.
- [6] Dashti, R., Daisy, M., Shaker, H.R., Tahavori, M., 2017. Impedancebased fault location method for four-wire power distribution networks. *IEEE Access* 6, 1342–1349. doi:10.1109/ACCESS.2017.2778427.
- [7] Gholami, M., Abbaspour, A., Moeini-Aghtaie, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Lehtonen, M., 2020. Detecting the location of short-circuit faults in active distribution network using pmu-based state estimation. *IEEE Transactions on Smart Grid* 11, 1396–1406. doi:10.1109/TSG.2019.2937944.
- [8] Guamán, A., Valenzuela, A., 2021. Distribution network reconfiguration applied to multiple faulty branches based on spanning tree and genetic algorithms. *Energies* 14. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6699>, doi:10.3390/en14206699.
- [9] Guo, M.F., Yang, N.C., You, L.X., 2018. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks. *International Journal of Electrical Power Energy Systems* 99, 706–721. doi:10.1016/J.IJEPES.2018.01.013.
- [10] Gururajapathy, S., Mokhlis, H., Illias, H., 2017. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, 949–958. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303386>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021>.
- [11] Jiang, Y., 2021. Data-driven probabilistic fault location of electric power distribution systems incorporating data uncertainties. *IEEE Transactions on Smart Grid* 12, 4522–4534. doi:10.1109/TSG.2021.3070550.
- [12] Jianwen, Z., Hui, H., Yu, G., Yongping, H., Shuping, G., Jianan, L., 2020. Single-phase ground fault location method for distribution network based on traveling wave time-frequency characteristics. *Electric Power Systems Research* 186, 106401. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106401>.

- [//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620302078](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620302078),
doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106401>.
- [13] Jianwen, Z., Jiabin, D., 2019. Traveling wave fault location for lines combined with overhead-lines and cables based on empirical wavelet transform. 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering, ICECE 2019 , 285– 289doi:10.1109/ICECE48499.2019.9058522.
- [14] Li, P., Liu, X., Yuan, Z., Chen, W., Yu, L., Xu, Q., Lin, Y., 2020. Precise fault location method of traveling wave in distribution grid based on multiple measuring point. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020 , 1867–1872doi:10.1109/EI250167.2020.9346873.
- [15] Liang, J., Jing, T., Niu, H., Wang, J., 2020. Two-terminal fault location method of distribution network based on adaptive convolution neural network. IEEE Access 8, 54035–54043. doi:10.1109/ACCESS.2020.2980573.
- [16] Magagula, X.G., Hamam, Y., Jordaan, J.A., Yusuff, A.A., 2017. A fault classification and localization method in a power distribution network. 2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017 , 1337–1343doi:10.1109/AFRCON.2017.8095676.
- [17] Michau, G., Pustelnik, N., Borgnat, P., Abry, P., Nantes, A., Bhaskar, A., Chung, E., 2017. A primal-dual algorithm for link dependent origin destination matrix estimation. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks 3, 104–113. doi:10.1109/TSIPN.2016.2623094.
- [18] Mortazavi, S.H., Moravej, Z., Shahrtash, S.M., 2019. A searching based method for locating high impedance arcing fault in distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery 34, 438–447. doi:10.1109/TPWRD.2018.2874879.
- [19] Mosbah, M., Arif, S., Mohammedi, R.D., Hellal, A., 2017. Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm, in: 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), pp. 1–6. doi:10.1109/ICEE-B.2017.8192170.
- [20] Mršić, P., Zeljković, , Lekić, , Erceg, B., Matić, P., Zubić, S., Balcerek, P., 2018. Minimization of power interruption time in mv distribution networks with fault locators based on optimal placement of fault passage indicators, in: 2018 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL), pp. 1–7. doi:10.1109/INDEL.2018.8637620.
- [21] Myint, S., Wichakool, W., 2019. A traveling wave-based fault section and fault distance estimation algorithm for grounded distribution systems. 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019 , 472–477doi:10.1109/GTDASIA.2019.8715933.
- [22] Pavón, W., Inga, E., Simani, S., 2019. Optimal routing an ungrounded electrical distribution system based on heuristic method with micro grids integration. Sustainability 11. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1607>, doi:10.3390/su11061607.
- [23] Santos, W.C., Lopes, F.V., Brito, N.S., Souza, B.A., 2017. Highimpedance fault identification on distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery 32, 23–32. doi:10.1109/TPWRD.2016.2548942.

- [24] Silos-Sanchez, A., Villafafila-Robles, R., Lloret-Gallego, P., 2020. Novel fault location algorithm for meshed distribution networks with ders. *Electric Power Systems Research* 181, 106182. doi:10.1016/J.EPSR.2019.106182.
- [25] Silva, S., Costa, P., Gouvea, M., Lacerda, A., Alves, F., Leite, D., 2018. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network. *Electric Power Systems Research* 154, 474–483. doi:10.1016/J.EPSR.2017.08.039.
- [26] Syakur, M.A., Khotimah, B.K., Rochman, E.M.S., Satoto, B.D., 2018. Integration k-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 336, 012017. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/336/1/012017>, doi:10.1088/1757-899x/336/1/012017.
- [27] Tavoosi, J., Shirkhani, M., Azizi, A., Ud Din, S., Mohammadzadeh, A., Mobayen, S., 2022. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research* 210, 108073. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622002978>, doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108073>.
- [28] Valenzuela, A., Inga, E., Simani, S., 2019. Planning of a resilient underground distribution network using georeferenced data. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 644 12, 644. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/644/htm><https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/644>, doi:10.3390/EN12040644.
- [29] Wang, X., Zhang, H., Shi, F., Wu, Q., Terzija, V., Xie, W., Fang, C., 2020. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid* 11, 774–785. doi:10.1109/TSG.2019.2938667.
- [30] Zhang, C., Song, G., Wang, T., Yang, L., 2019. Single-ended traveling wave fault location method in dc transmission line based on wave front information. *IEEE Transactions on Power Delivery* 34, 2028–2038. doi:10.1109/TPWRD.2019.2922654.

8 ANEXOS

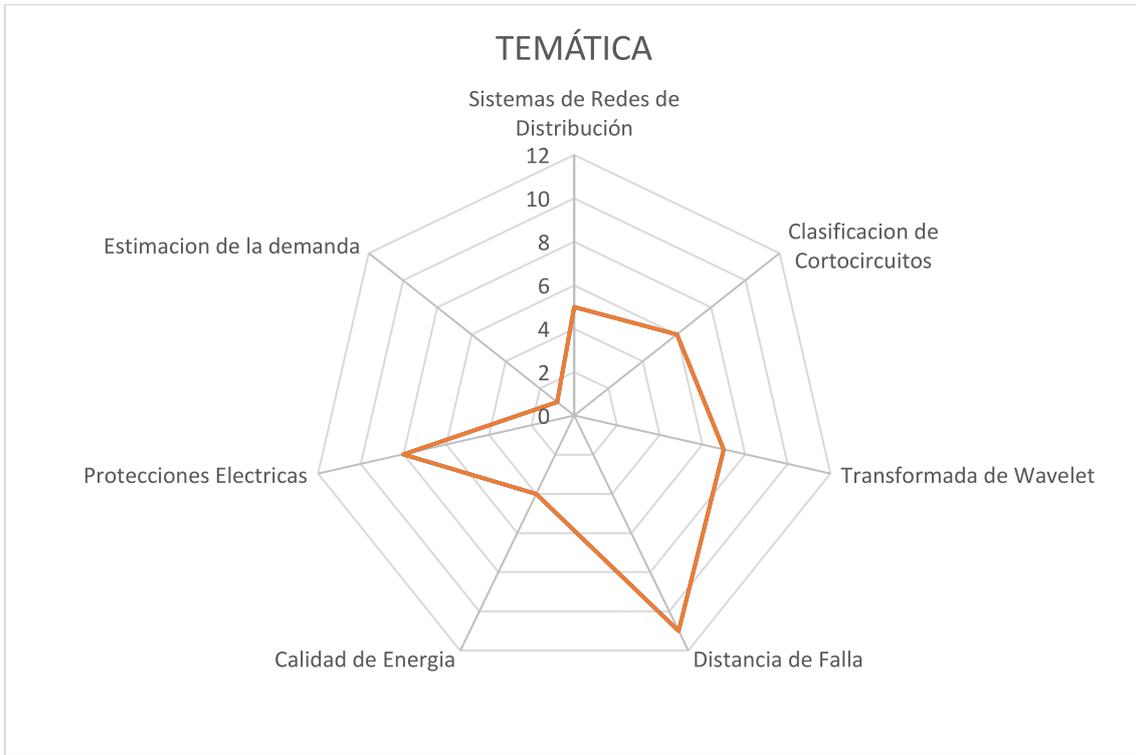


Figura 20 Temática.

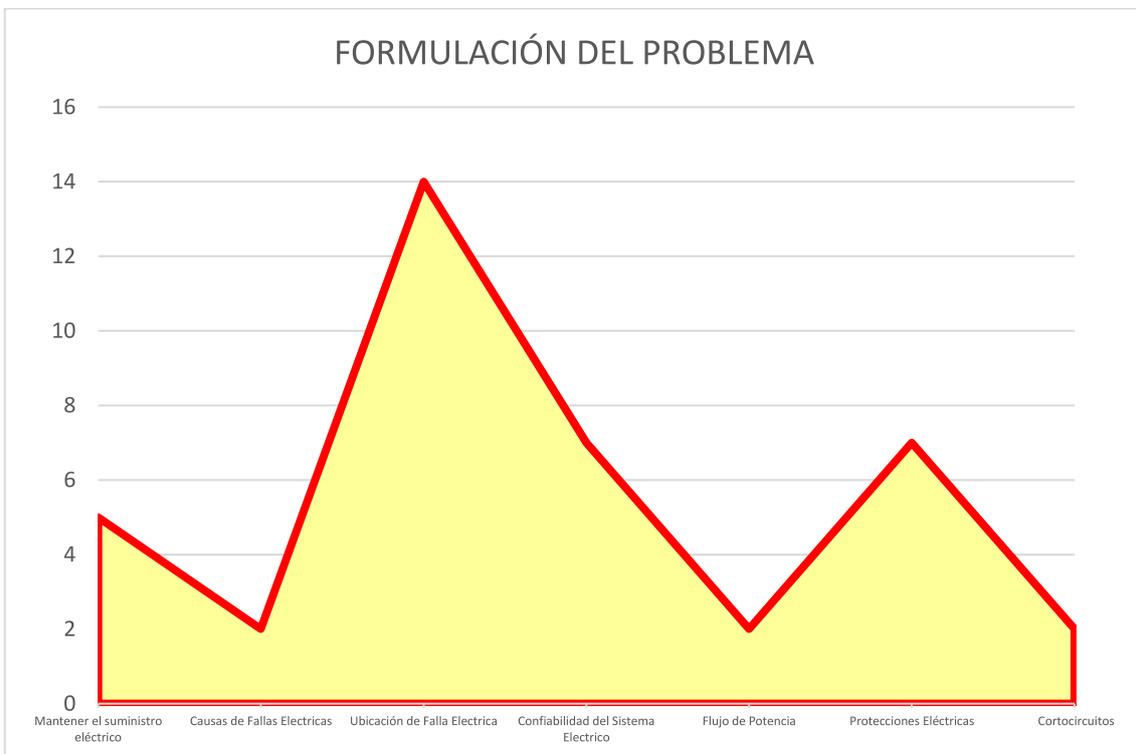


Figura 21 Formulación del problema.

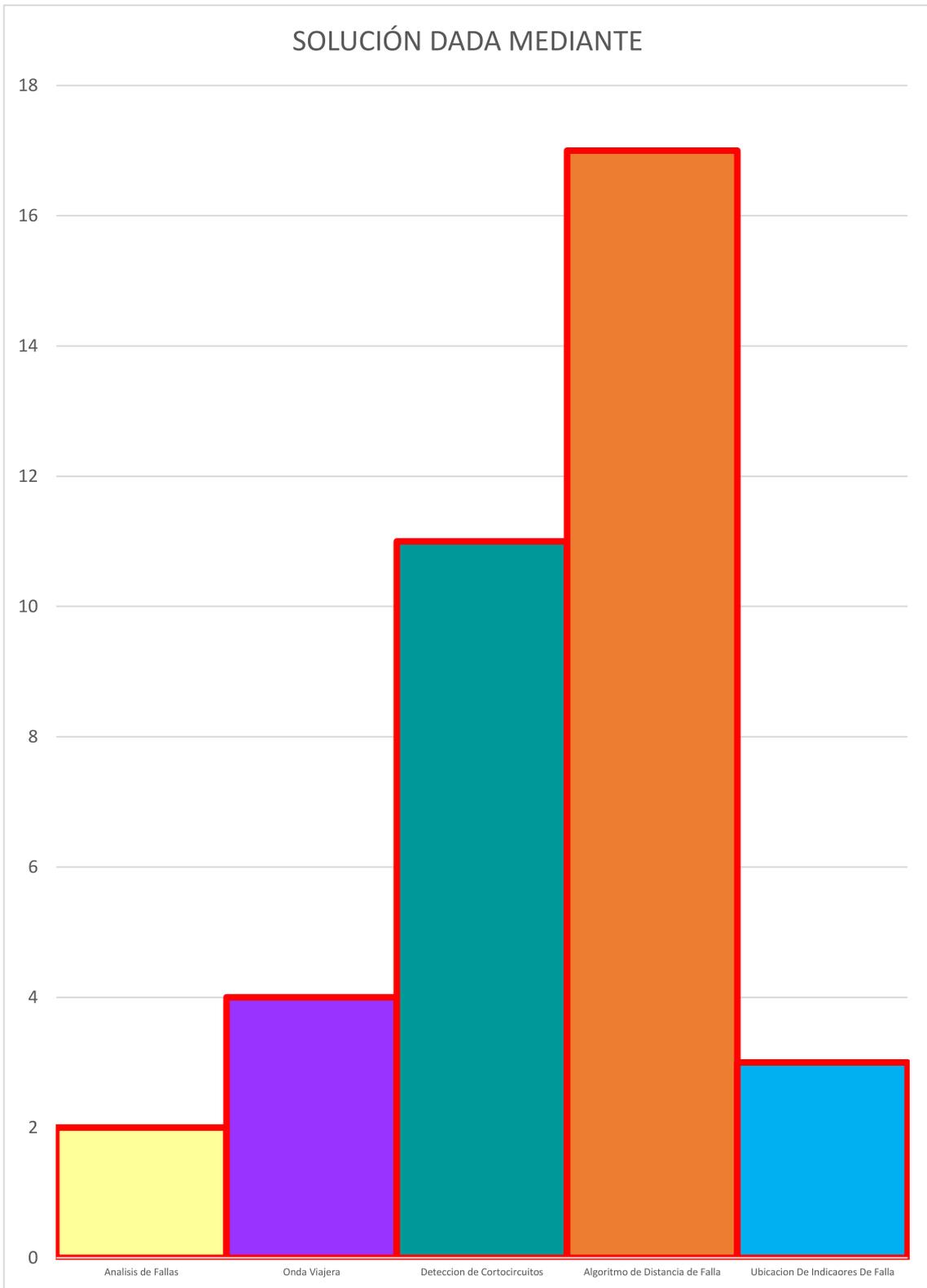


Figura 22 Solución dada.