

**Análisis del modelo de carga y la generación distribuida en un localizador de fallas  
basado en la impedancia**

**Harold Andrés Cifuentes Chaves**

Universidad Tecnológica de Pereira  
Maestría en Ingeniería Eléctrica  
Pereira, Risaralda  
Octubre de 2017

**Análisis del modelo de carga y la generación distribuida en un localizador de fallas  
basado en la impedancia**

**Harold Andrés Cifuentes Chaves**

Tesis presentada como requisito preliminar para aspirar al título de  
**Magíster en Ingeniería Eléctrica**

Director:  
Ph.D. Juan José Mora Flórez

Universidad Tecnológica de Pereira  
Maestría en Ingeniería Eléctrica  
Pereira, Risaralda  
Octubre de 2017

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

Ph.D. Juan José Mora Flórez  
Director de la tesis

---

Ph.D. Alejandro Garcés Ruíz  
Jurado

---

Ph.D. Andrés Ricardo Herrera  
Jurado

---

Ph.D. Andrés Escobar Mejía  
Director programa de Maestría  
en Ingeniería Eléctrica

## **Agradecimientos**

*A Dios por inspirar mi vida y darme fuerza para seguir adelante. A mi tía por ser siempre una mamá e inculcarme todos esos valores esenciales para la vida, por ser mi apoyo en los momentos difíciles, a mi hermano Miguel por ser mi mejor amigo, mi gran apoyo, por darme valor para superar los obstáculos, a mi hermano David por su confianza y admiración. Agradezco a mi madre por vivir para siempre en mi corazón, a mi novia Paola por entrar en mi vida y llenarla de amor.*

*También agradezco al ingeniero Juan José Mora por toda la ayuda y confianza en este proceso, por los consejos y apoyo para cumplir con esta meta y a todos mis compañeros y amigos por todos esos momentos compartidos.*

*Gracias.  
Harold Andrés Cifuentes*

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>7</b>
1.1 Motivación .....	7
1.2 Definición del problema.....	8
1.3 Estado del arte .....	9
1.4 Objetivos .....	11
1.4.1 Objetivo general .....	11
1.4.2 Objetivos específicos .....	11
1.5 Propuesta de solución.....	11
1.6 Aportes del proyecto de grado .....	12
1.7 Estructura del documento.....	13
<b>2. Aspectos teóricos.....</b>	<b>14</b>
2.1 Método de localización de fallas para sistemas de distribución de energía eléctrica.....	14
2.1.1 Análisis para fallas monofásicas a tierra.....	15
2.1.2 Análisis para fallas bifásicas.....	16
2.1.3 Análisis para fallas trifásicas.....	18
2.1.4 Calculo de la impedancia de carga <b>Zc</b> .....	18
2.2 Método de localización de fallas para sistemas de distribución con generación distribuida.....	19
2.2.1 Fallas en la zona con posibilidad de flujo bidireccional.....	19
2.3 Modelado de carga en sistemas eléctricos de potencia.....	23
2.3.1 Modelos estáticos de carga.....	23
2.3.2 Modelos dinámicos de carga.....	25
2.4 Métodos numéricos para resolver modelos dinámicos de carga .....	28
2.4.1 Método de Euler .....	28
2.4.2 Método de Heun.....	28
2.4.3 Método de Runge-Kutta.....	28
<b>3. Metodología propuesta.....</b>	<b>30</b>
3.1 Algoritmo dinámico de localización de fallas para sistemas de distribución con modelos dinámicos de carga.....	30
3.1.1 Diagrama de flujo de la técnica.....	30

3.1.2 Etapa 1: Determinar el tipo de falla. ....	31
3.1.3 Etapa 2: Seleccionar el primer tramo del sistema. ....	31
3.1.4 Etapa 3: Aplicar el método de localización de fallas. ....	32
3.1.5 Etapa 4: Actualizar la tensión y corriente en cada sección del sistema.....	32
3.1.6 Análisis en el dominio fasorial.....	32
3.1.7 Análisis en el dominio del tiempo.....	33
3.1.8 Factor de corrección de la carga.....	34
3.1.9 Inclusión del modelo de carga dentro del localizador de fallas.....	35
3.1.10 Etapa 5: Calcular la distancia a la falla.....	37
3.2 Algoritmo robusto de localización de fallas considerando generación distribuida en sistemas de distribución de energía.....	38
3.2.1 Diagrama de flujo de la técnica.....	38
<b>4. Aplicación de la metodología propuesta.....</b>	<b>43</b>
4.1 Descripción de los sistemas de prueba.....	43
4.2 Estrategia de prueba para evaluar de forma intensiva el desempeño de los localizadores. 44	44
4.3 Escenarios de prueba para el algoritmo descrito la sección 3.1. ....	46
4.3.5 Análisis de resultados para el algoritmo descrito en la sección 3.1. ....	46
4.3.6 Análisis de sensibilidad para el algoritmo descrito en la sección 3.1. ....	49
4.4 Escenarios de prueba para el algoritmo descrito en la sección 3.2. ....	50
4.4.5 Análisis de resultados para el algoritmo descrito en la sección 3.2. ....	50
4.4.6 Análisis de sensibilidad para el algoritmo descrito en la sección 3.2. ....	53
4.5 Escenarios de prueba para el algoritmo robusto de localización de fallas .....	54
4.5.4 Análisis de resultados para el algoritmo robusto de localización de fallas. ....	54
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>58</b>
5.1 Conclusiones generales.....	58
5.2 Trabajos futuros .....	59
<b>Bibliografía .....</b>	<b>60</b>

# Capítulo 1

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

La calidad de la energía se compone de dos aspectos: la calidad del suministro y la calidad de la atención al cliente. El primero tiene que ver con la forma de onda y la continuidad del servicio, mientras que el segundo hace referencia a la gestión de la empresa para relacionarse con sus clientes. Este trabajo se enfoca en mejorar la calidad del suministro por medio de una eficiente y oportuna localización de las fallas, lo cual permitirá a las empresas distribuidoras de energía, mejorar sus índices de continuidad del servicio. El tema de localización de fallas en sistemas de transmisión está relativamente resuelto debido a que cuenta con mediciones en ambos terminales y equipos más especializados para la localización. Por el contrario, en los sistemas de distribución es un problema complejo debido a las características propias de estas redes, como cargas desbalanceadas, diferentes conductores a lo largo del sistema, topología radial con múltiples ramales, entre otros [1].

Adicionalmente, la inclusión de fuentes no convencionales de energía, como la eólica, geotérmica, solar fotovoltaica, solar térmica, pequeñas hidroeléctricas, entre otras, impone nuevos retos al operador del sistema. Estas fuentes se introducen en el sistema como unidades de generación distribuida cerca del usuario final, y hacen que se presenten cambios en las direcciones de los flujos de potencia en algunas zonas del sistema.

Por otra parte, el modelado de carga en sistemas de potencia, es un tema aun no resuelto, debido a que no se tiene un modelo que represente exactamente el comportamiento real de cualquier tipo de carga. Esta labor es compleja debido a que el comportamiento real de la carga es estocástico. Además, las cargas están compuestas por diferentes elementos como motores, hornos, lámparas, entre muchos otros, y se debe realizar un modelo que represente de manera agregada todos los componentes que están conectados a la red.

Otro aspecto importante, es la incertidumbre asociada a los parámetros reales de los sistemas de potencia, tales como: factor de potencia, tamaño y desbalance de la carga, longitud de los alimentadores, calibre de los conductores, variación en el nivel de tensión, entre otros. Estas incertidumbres se deben considerar para realizar pruebas más realistas a los localizadores de fallas.

Finalmente, la investigación de este proyecto se enfoca en el desarrollo de una metodología de localización de fallas paralelas de baja impedancia para sistemas de distribución, en donde se consideran modelos estáticos y dinámicos de carga, por medio de un análisis dinámico de localización de fallas. Por otro lado, se consideran múltiples generadores distribuidos en el sistema de potencia y se realizan pruebas considerando incertidumbre en los parámetros del sistema.

## 1.2 Definición del problema

Los sistemas eléctricos de potencia están sujetos a fallas causadas por diferentes eventos, tales como: contactos de las líneas con los árboles o animales, descargas atmosféricas, desastres naturales, vandalismo, accidentes, ruptura de aislamiento, entre otros. Estas fallas se pueden clasificar en dos grandes grupos: serie y paralelo [2]. Las fallas serie son generalmente conductores abiertos sin contacto con otros elementos, mientras que las fallas paralelas son cortocircuitos a tierra o con otras fases, las cuales pueden ser: monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra, trifásicas y trifásicas a tierra. En este estudio se analizarán las fallas paralelas debido a que son las de mayor incidencia en la red eléctrica [3]. Estas fallas afectan la calidad de la energía con respecto a la continuidad del suministro, lo cual afecta tanto a los operadores de red como a los clientes, produciendo bajos índices de calidad y pérdidas económicas [4].

Respecto a la continuidad del servicio, en el ámbito internacional se encuentra una amplia diversidad de indicadores que se clasifican en dos grupos: frecuencia de las interrupciones y duración de las mismas. En Colombia, la calidad del servicio se determina a través de indicadores impuestos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, mediante la resolución 174 de 2014. Estos índices son de obligatorio cumplimiento por parte de las empresas de energía, las cuales son sancionadas económicamente al no cumplir con los requisitos establecidos por la CREG. Por esto, es indispensable que el operador de red mantenga un suministro de energía permanente.

Con el objetivo de mejorar la calidad de la energía en términos de continuidad del servicio, se desarrollan estrategias de localización de fallas que involucran la identificación del punto de falla y la restauración del suministro. Estas estrategias se encuentran bien establecidas para los sistemas de transmisión, donde se cuenta con medidas de tensión y de corriente en ambos extremos de las líneas, homogeneidad de los conductores y ausencia de cargas intermedias [1]. Sin embargo en sistemas de distribución el problema es más complejo debido a la cantidad de ramificaciones, al desbalance, a la presencia de cargas intermedias, entre otros.

Para resolver el problema de localización en sistemas de distribución se han desarrollado métodos basados en la estimación de la impedancia a partir de las medidas de tensión y de corriente obtenidas en la subestación conocidos como métodos basados en el modelo del circuito (MBM) y métodos basados en minería de datos denominados métodos basados en el conocimiento (MBC).

Este estudio se enfoca en el desarrollo de un método de localización de fallas basado en el modelo. Estos métodos tienen la limitante de ser muy dependientes de la representación circuital del sistema de potencia: el modelo de las líneas, generadores, cargas, compensadores y demás elementos del sistema. Para que estos métodos presenten resultados de buena calidad, se debe contar con una representación adecuada del sistema de potencia. Sin embargo, contar con un modelo adecuado no es una tarea fácil debido a que hay elementos difíciles de modelar, tal es el caso de la carga, la cual tiene un comportamiento dinámico y variable con el tiempo. Mientras que existen elementos como los generadores, líneas de transmisión, o dispositivos de compensación que presentan modelos ampliamente estudiados y aceptados.



### 1.3 Estado del arte

El tema de localización de fallas en sistemas de distribución de energía ha sido ampliamente estudiado por diversos autores [1], [5-10], [29-31]. En estos estudios, se utilizan métodos de localización basados en la impedancia del sistema, los cuales consisten en determinar la distancia a la falla, calculando la impedancia vista desde la subestación con las medidas de tensión y corriente en la misma. Es importante notar que los sistemas de distribución generalmente cuentan con medidas asociadas a la subestación principal, por lo que este tipo de métodos son muy útiles. Por otro lado, estos métodos utilizan la topología y parámetros del sistema para definir una ecuación o un conjunto de ecuaciones que permiten determinar la distancia a la falla. Algunos de los métodos presentados en [4-5] y el presentado en [6] utilizan las componentes de secuencia para definir una ecuación de estimación de la distancia a la falla. Mientras que otros de los métodos presentados en [4-5] y los presentados en [7-10], [29-31] utilizan las componentes de fase para localizar la falla.

Actualmente, existe un mayor interés en el uso de energías renovables para un desarrollo sostenible y ambientalmente responsable. Para el caso de Colombia se tiene la aprobación de la ley 1715 del 13 de Mayo del 2014, que tiene como objetivo *“promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con el mismo propósito busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda”*. En cumplimiento de esta ley, se tendrá un número considerable de generadores distribuidos en el sistema eléctrico, lo cual traerá nuevos retos para el operador del sistema.

En consecuencia, el uso de fuentes renovables a través de generación distribuida hace que se presenten cambios en las direcciones de los flujos de potencia en el sistema de distribución, lo cual afecta la operación del sistema. En [10-13], [15], [29], se proponen técnicas de localización de fallas para sistemas con generación distribuida:

En [15] se propone una técnica de localización de fallas para sistemas de distribución considerando generación distribuida e incertidumbres asociadas a la resistencia de falla, magnitud de la carga, modelo de carga, tipo de falla y nodo en falla. El enfoque presentado usa medidas en la subestación y los generadores distribuidos. Además, utiliza las redes y componentes de secuencia para la estimación de la distancia a la falla. Como conclusiones más importantes se presenta el desarrollo de un método de localización de fallas robusto el cual ayuda a mantener altos índices de continuidad, lo que mejora la calidad de la energía para los sistemas eléctricos modernos.

[12] es una tesis de maestría que presenta una nueva metodología para la localización de fallas en sistemas de distribución considerando generación distribuida bajo entornos de variación en los parámetros del modelo del sistema eléctrico. El método propuesto consiste en el desarrollo de una única ecuación para la estimación de la distancia a la falla independiente del tipo de falla. Esta ecuación se utiliza para la zona con posibilidad de flujo bidireccional, es decir, entre la subestación y el generador distribuido más alejado

de la subestación. La técnica utiliza las redes y componentes de secuencia para la localización de la falla. Además utiliza equivalentes de thevenin en el tramo analizado con el fin de obtener las tensiones y corrientes en el nodo de recibo para el tramo en estudio. La metodología propuesta presenta un buen desempeño ante diferentes condiciones operativas en sistemas con generación distribuida.

[13] es una tesis de ingeniería eléctrica que propone una metodología la cual considera el efecto de la carga para la localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida. La técnica desarrolla un modelo carga de impedancia, corriente y potencia constante que se implementa dentro del localizador de fallas como una admitancia de carga. Estos modelos estáticos dan una buena representación de la carga, lo cual permite estimar de una manera más precisa la localización de la falla.

En [29] se presenta un método de localización de fallas para sistemas de distribución con generación distribuida, el cual utiliza los fasores de tensión y corriente medidos en la subestación y en cada una de las unidades de generación. Este método se aplica a redes desbalanceadas con múltiples fuentes. El método propuesto utiliza los equivalentes de thevenin de secuencia positiva, negativa y cero de cada tipo de fuente (fotovoltaica, eólica, solar, turbinas a gas, células solares, etc.) obtenidos de los valores de tensión y corriente en pre-falla y falla, para determinar la impedancia de thevenin respectiva. Con la impedancia trifásica de las fuentes conocida, se puede determinar la matriz de impedancia nodal trifásica del sistema de distribución. Esta matriz y las medidas de tensión y corriente en pre-falla y falla, se utilizan para la estimación de la sección en falla. El método fue probado de forma intensiva en un sistema de distribución de 60 nodos, obteniendo resultados satisfactorios aun cuando se tienen condiciones de baja penetración de la generación distribuida. El método mejora su desempeño para una mayor penetración de generación distribuida.

En [10] se presenta un método de localización de fallas línea-línea para sistemas de distribución con generación distribuida. En este método la red de distribución se divide en dos partes: una zona con flujo de potencia unidireccional que comprende la parte del sistema después del generador distribuido y otra zona con posibilidad de flujo bidireccional entre el alimentador principal y el generador distribuido. Luego con las medidas de tensión y corriente en la subestación y en cada unidad de generación distribuida se hace la localización de la falla. La técnica propuesta se utiliza en la zona con posibilidad de flujo bidireccional y considera diferentes resistencias de falla. La metodología propuesta comienza asumiendo que la falla se encuentra en el primer tramo de línea, si la distancia calculada con las ecuaciones de localización de la falla es mayor a uno, entonces se cambia al siguiente tramo actualizando los valores de tensión y corriente, hasta encontrar la sección bajo falla. La técnica utiliza componentes de fase para hacer la estimación de la distancia a la falla. Se muestra que los resultados son mejores para la localización de la falla en la zona con posibilidad de flujo bidireccional que para la zona con flujo de potencia unidireccional.

Adicionalmente y debido a que estos métodos son muy dependientes de la topología del sistema, se han desarrollado modelos de carga que representan mejor el comportamiento real de la carga en estado estable y transitorio. Esto se hace con el objetivo de tener una mejor representación del sistema de potencia y por lo tanto, mejorar el desempeño del localizador de fallas.

En [13], [15-16], se consideran modelos estáticos de carga de impedancia, corriente y potencia constante para la localización de fallas en sistemas de distribución con generación distribuida. Estos modelos permiten obtener una representación matemática del comportamiento de la carga ante variaciones de tensión en el barraje y frecuencia del sistema. Sin embargo, estos modelos no representan fielmente el comportamiento dinámico de la carga en el estado transitorio.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Desarrollar y validar una metodología para la localización de fallas que considere la dinámica de la carga y la generación distribuida en sistemas de distribución de energía.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- a) Investigar el estado del arte de los métodos de localización de fallas basados en el modelo.
- b) Implementar modelos dinámicos de carga en el sistema de potencia de prueba
- c) Desarrollar una metodología para la consideración de la dinámica de la carga dentro del localizador de fallas.
- d) Desarrollar una metodología que considere modelos estáticos de carga en el localizador de fallas.
- e) Incluir la generación distribuida dentro de la metodología de localización de fallas y en los sistemas de prueba.
- f) Realizar un análisis de sensibilidad del método desarrollado, considerando las variaciones propuestas en el sistema de distribución
- g) Realizar pruebas de localización de fallas para validar la metodología propuesta en un sistema típico de distribución de energía eléctrica.
- h) Modificar los aplicativos del grupo de investigación para considerar la metodología propuesta.
- i) Documentar la investigación realizada.

## **1.5 Propuesta de solución**

En este trabajo se propone una metodología que permite realizar un análisis de localización de fallas en el dominio del tiempo considerando la dinámica de la carga tanto en el estado estable como en el transitorio. El algoritmo es dinámico, debido a que utiliza datos de carga en cada instante de tiempo. Esta técnica utiliza dos barridos diferentes: un barrido en el dominio del tiempo y uno en el dominio fasorial, con el objetivo de incluir el comportamiento dinámico de la carga dentro del localizador de fallas. Los modelos dinámicos se resuelven utilizando el método numérico para ecuaciones diferenciales de Runge-Kutta de cuarto orden. Adicionalmente, la carga se expresa como una admitancia, compuesta de conductancia y susceptancia que varían en función del tiempo, con el fin de incluirla en la actualización de la tensión y corriente en cada uno de los tramos del sistema.

Adicionalmente, la metodología considera los modelos estáticos de carga de impedancia constante, corriente constante, potencia constante y modelos híbridos y la generación distribuida dentro del localizador de fallas y el sistema de potencia. Este algoritmo

funciona para múltiples unidades de generación distribuida por medio de un barrido de medidas aguas abajo desde la subestación principal y aguas arriba desde el generador distribuido más lejano. La técnica considera dos zonas para la ocurrencia de la falla en el sistema: cuando la falla está aguas abajo del generador distribuido más alejado de la subestación, se encuentra en la zona con flujo de potencia unidireccional, de lo contrario la falla se encuentra en la zona con posibilidad de flujo bidireccional (aguas arriba de este GD). Para cada una de las zonas, se define un conjunto de ecuaciones que permite estimar la distancia a la falla.

Finalmente, la metodología considera incertidumbre en los parámetros como: variaciones en el modelo, factor de potencia, tamaño y desbalance de la carga, longitud de los alimentadores, calibre de los conductores, variaciones en la configuración de la línea, variación en el nivel de tensión, impedancia equivalente en la subestación, efecto capacitivo, cargas monofásicas y trifásicas, conexiones de carga en delta y en estrella y diferentes condiciones operativas que representan las variaciones aleatorias en el sistema real. Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad al algoritmo propuesto.

### **1.6 Aportes del proyecto de grado**

Como aportes de esta investigación, se destaca:

1. Desarrollo de una técnica para considerar cualquier modelo estático de carga en el localizador de fallas
2. Desarrollo de una metodología para considerar modelos dinámicos de carga en el localizador de fallas por medio de un barrido en el dominio del tiempo.
3. Metodología de solución de modelos dinámicos de carga por medio de métodos numéricos.
4. Indicador de desempeño del localizador de fallas para el análisis en el estado transitorio
5. Factor de corrección de la carga para mitigar las incertidumbres en la magnitud de la carga para cada una de las fases del sistema trifásico desbalanceado
6. Desarrollo de una metodología para considerar múltiples unidades de generación distribuida en el sistema de distribución con modelos estáticos y dinámicos de carga.
7. Implementación de los modelos estáticos y dinámicos para cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas tanto en el software ATPDraw como en MATLAB.
8. Consideración de la incertidumbre en los parámetros del sistema para la localización de fallas

Adicionalmente, en las herramientas del grupo de investigación se realizaron los siguientes ajustes:

- a) Obtención de las señales de tensión y corriente en el dominio del tiempo en la subestación y todos los generadores distribuidos, para todas las fallas y condiciones operativas analizadas en la herramienta HVA
- b) Implementación de los modelos estáticos y dinámicos de carga en el sistema IEEE 34 nodos desarrollado en ATPDraw

- c) Modificación de la herramienta AtpXchange del grupo de investigación para obtener información de los modelos de carga de los sistemas implementados en ATPDraw.

Los productos que se obtienen de la investigación son:

1. **“Time domain analysis for fault location in power distribution systems considering the load dynamics”**. Artículo publicado en Electric Power Systems Research - ELSEVIER 2017. Categoría Q1.
2. **“Fault location in power distribution systems considering a dynamic load model”**. Artículo publicado en la revista Ingeniería e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia 2015. Categoría A1.
3. **“An iterative fault location strategy for modern distribution systems”**. Artículo en proceso de revisión por la revista International Journal of Electrical Power and Energy Systems 2017. Categoría Q1.
4. **“Fault location method considering static and dynamic load models for power distribution systems with distributed generation”**. Artículo en proceso de redacción.

### 1.7 Estructura del documento

El documento está dividido en cinco capítulos. El primer capítulo es introductorio y en él se expone la motivación del proyecto, la definición del problema, los objetivos generales y específicos, la propuesta de solución y los principales aportes de la investigación.

En el capítulo dos se presentan los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo de esta investigación. Inicialmente se presenta el método de localización de fallas basado en la impedancia para sistema de distribución con y sin generación distribuida. Posteriormente se presentan los modelos de carga estáticos y dinámicos más utilizados en la literatura. Finalmente, se presentan los métodos numéricos más usados para resolver ecuaciones diferenciales.

En el capítulo tres se presenta la descripción de la metodología implementada y se explica detalladamente cada una de las etapas que se deben seguir para realizar la localización de fallas considerando los modelos estáticos y dinámicos de carga y la generación distribuida en el sistema de distribución.

En el capítulo cuatro se muestra la validación de la metodología propuesta. Inicialmente se describe el sistema de prueba utilizado y se presentan las pruebas y resultados del localizador de fallas propuesto.

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y los trabajos futuros que surgen de este proyecto.

## Capítulo 2

### 2. Aspectos teóricos

En este capítulo, se presenta una revisión de los aspectos teóricos asociados al problema de investigación que se aborda en este proyecto. Se presentan las definiciones básicas del método de localización en componentes de secuencia utilizado en este estudio, se muestran los modelos de carga más utilizados en la literatura para sistemas eléctricos y finalmente, se presentan los métodos numéricos para resolver los modelos dinámicos.

#### 2.1 Método de localización de fallas para sistemas de distribución de energía eléctrica.

La técnica de localización de fallas propuesta, se basa en el método desarrollado en [18]. Este método hace parte de un conjunto de métodos basados en la impedancia, los cuales determinan la distancia desde la subestación hasta la falla, utilizando las medidas de tensión y corriente en la subestación. Adicionalmente, se utiliza la topología del sistema para determinar las redes y componentes de secuencia para cada tipo de falla y así obtener una ecuación para el cálculo de la distancia a la falla.

La técnica se define por medio de la Figura 2.1, donde se muestra una sección de línea bajo falla entre los nodos (x) y (y).

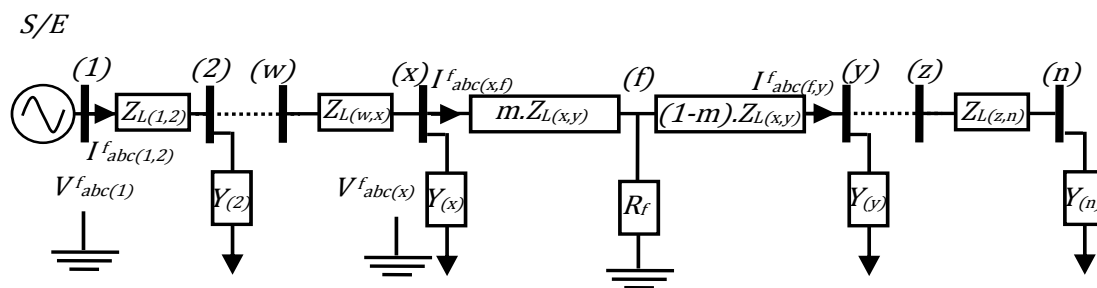


Figura 2.1. Diagrama unifilar de un sistema con falla entre los nodos (x) y (y).

Donde se utiliza la siguiente nomenclatura para el método:

$V_{s(x)}^f \forall s = 0,1,2 \forall a, b, c$ : Tensiones de secuencia o fase en estado de falla en el nodo (x).

$I_{s(x,f)}^f \forall s = 0,1,2 \forall a, b, c$ : Corriente de secuencia o fase en estado de falla que fluye desde el nodo (x) al nodo (f).

$V_{s(x)}^p \forall s = 0,1,2 \forall a, b, c$ : Tensiones de secuencia o fase en estado de pre-falla en el nodo (x).

$I_{s(x,y)}^p \forall s = 0,1,2 \forall a, b, c$ : Corriente de secuencia o fase en estado de pre-falla que fluye desde el nodo (x) al nodo (f).

$Z_{Ls(x,y)} \forall s = 0,1,2 \forall a, b, c$ : Impedancia de secuencia o fase para la sección de línea entre los nodos (x) y (y).

$I_{abc(Y_j)}^p$ : Corriente de fase en estado de pre-falla que fluye por la admitancia de carga  $Y_{(j)}$ .

$Y_{(x)}$ : Matriz de admitancia de carga en el nodo (x).

$Z_{C1}$ : Impedancia de carga de secuencia positiva.

$m$ : Distancia a la falla en por unidad de longitud.

$R_f$ : Resistencia de falla.

A continuación, se realiza un análisis detallado para cada tipo de falla:

### 2.1.1 Análisis para fallas monofásicas a tierra.

En caso de una falla monofásica a tierra, en la sección de línea entre los nodos (x) y (y) del alimentador mostrado en la figura 2.1, los circuitos equivalentes en redes de secuencia se conectan en serie, como se presenta en la figura 2.2.  $Z_c$  representa la carga aguas abajo del nodo (y) en estado estable, la cual se explicará en la sección 2.1.4.

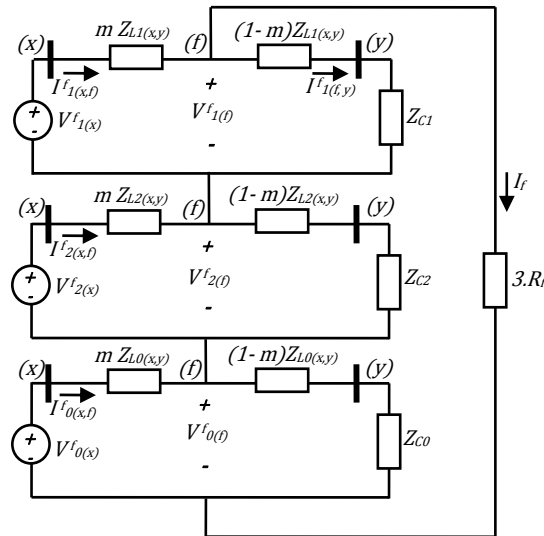


Figura 2.2. Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla monofásica a tierra.

Aplicando las leyes de Kirchoff al circuito de la figura 2.2, es posible obtener las ecuaciones (2.1) y (2.2).

$$V_{0(x)}^f + V_{1(x)}^f + V_{2(x)}^f - m (Z_{L0(x,y)} I_{0(x,f)}^f + Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f) = 3R_f I_f \quad (2.1)$$

$$I_f = \frac{Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{c1} I_{1(x,f)}^f - V_{1(x)}^f}{Z_{L1(x,y)} - mZ_{L1(x,y)} + Z_{c1}} \quad (2.2)$$

Reemplazando (2.2) en (2.1) y organizando la expresión como un polinomio de grado 2 en función de  $m$ , se obtiene la expresión (2.3), que corresponde a una ecuación cuadrática compleja con constantes conocidas  $A, B, C$  y  $D$  como se muestra en (2.4) y con incógnitas  $m$  y  $R_f$ .

$$B m^2 + C m + D = R_f A. \quad (2.3)$$

Donde,

$$\begin{aligned} A &= 3 \left( Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{C1} I_{1(x,f)}^f - V_{1(x)}^f \right), \\ B &= Z_{L0(x,y)} Z_{L1(x,y)} I_{0(x,f)}^f + Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f + Z_{L1(x,y)} Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f, \\ C &= -Z_{L0(x,y)} Z_{L1(x,y)} I_{0(x,f)}^f - Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f - Z_{L2(x,y)} Z_{L1(x,y)} I_{2(x,f)}^f \\ &\quad - Z_{L1(x,y)} V_{0(x)}^f - \dots \\ &\quad \dots - Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f - Z_{L1(x,y)} V_{2(x)}^f - Z_{L0(x,y)} I_{0(x,f)}^f Z_{C1} - Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f Z_{C1} \\ &\quad - Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f Z_{C1}, \\ D &= Z_{L1(x,y)} V_{0(x)}^f + Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f + Z_{L1(x,y)} V_{2(x)}^f + Z_{C1} V_{0(x)}^f + Z_{C1} V_{1(x)}^f \\ &\quad + Z_{C1} V_{2(x)}^f. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Para resolver la ecuación (2.3), ésta es separada en parte real e imaginaria y se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas como se muestra en (2.5).

$$\begin{aligned} B_r m^2 + C_r m + D_r &= R_f A_r, \\ B_i m^2 + C_i m + D_i &= R_f A_i, \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde los subíndices  $r$  e  $i$  denotan parte real e imaginaria respectivamente.

De la parte real se despeja la resistencia de falla ( $R_f$ ) y se reemplaza en la parte imaginaria obteniendo la expresión (2.6), que al ser resuelta permite obtener la distancia a la falla ( $m$ ). De la ecuación (2.6) se obtienen dos soluciones, se escoge la solución mas cercana al intervalo  $[0,1]$

$$m^2 \left( \frac{A_i B_r}{A_r} - B_i \right) + m \left( \frac{A_i C_r}{A_r} - C_i \right) + \left( \frac{A_i D_r}{A_r} - D_i \right) = 0. \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Análisis para fallas bifásicas.

En caso de fallas bifásicas, en la sección de línea entre los nodos (x) y (y) del circuito presentado en la figura 2.1, las redes de secuencia se conectan en paralelo, y se obtiene el circuito de la figura 2.3.



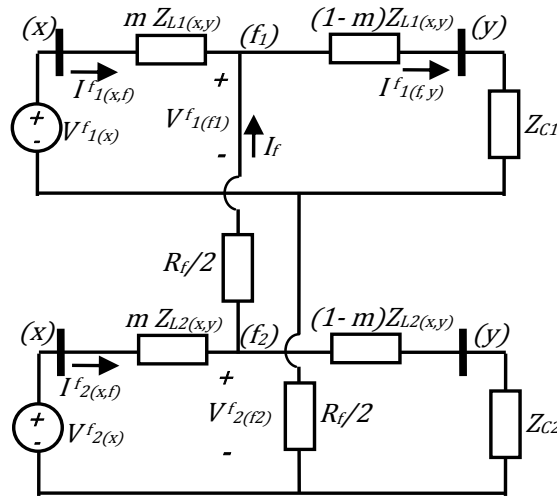


Figura 2.3. Circuito equivalente en redes de secuencia, en caso de una falla bifásica.

Aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito de la figura 2.3, es posible obtener las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$V_{1(x)}^f - m Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f = (I_f + I_{1(x,f)}^f) \left( (1-m) Z_{L1(x,y)} + Z_{C1} \right), \quad (2.7)$$

$$I_f = \frac{\left( V_{2(x)}^f - m Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f \right) - \left( V_{1(x)}^f - m Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f \right)}{R_f}. \quad (2.8)$$

Reemplazando (2.8) en (2.7) y realizando las operaciones respectivas, se obtiene (2.9)

$$F m^2 + G m + H = R_f E, \quad (2.9)$$

Donde,

$$\begin{aligned} E &= V_{1(x)}^f - Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f - Z_{C1} I_{1(x,f)}^f, \\ F &= Z_{L1(x,y)} Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f - Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f, \\ G &= Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f - Z_{L1(x,y)} V_{2(x)}^f - Z_{L2(x,y)} Z_{L1(x,y)} I_{2(x,f)}^f \\ &\quad + Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f Z_{C1} - Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f Z_{C1} + Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f, \\ H &= Z_{L1(x,y)} V_{2(x)}^f + Z_{C1} V_{2(x)}^f - Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f - Z_{C1} V_{1(x)}^f. \end{aligned} \quad (2.10)$$

La ecuación (2.9) corresponde a una ecuación cuadrática compleja, que se puede resolver fácilmente debido a que las incógnitas son valores reales. Esto se hace separando la parte real y la parte imaginaria, obteniendo dos ecuaciones muy similares a las presentadas en (2.5) con dos incógnitas reales  $R_f$  y  $m$ . Posteriormente, se resuelve el sistema de ecuaciones y se obtiene una expresión cuadrática para distancia a la falla similar a (2.5).

### 2.1.3 Análisis para fallas trifásicas.

Para la falla trifásica, se realiza el análisis únicamente con el circuito de secuencia positiva, que se presenta en la figura 2.4.

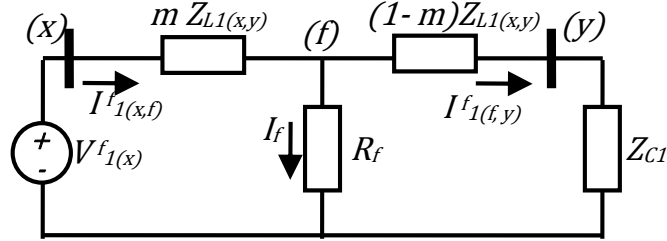


Figura 2.4. Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla trifásica.

A partir del circuito de la figura 2.4, es posible obtener una expresión cuadrática para la distancia a la falla como se muestra en (2.11)

$$J m^2 + K m + L = R_f I, \quad (2.11)$$

Donde,

$$\begin{aligned} I &= Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{C1} I_{1(x,f)}^f - V_{1(x)}^f, \\ J &= Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f, \\ K &= -Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f - Z_{L1(x,y)}^2 I_{1(x,f)}^f - Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f Z_{C1}, \\ L &= Z_{L1(x,y)} V_{1(x)}^f + Z_{C1} V_{1(x)}^f. \end{aligned} \quad (2.12)$$

La ecuación (2.11) es a una ecuación similar a (2.6), que se resuelve separando su parte real e imaginaria y obteniendo un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas como se presentó en los casos anteriores.

### 2.1.4 Cálculo de la impedancia de carga $Z_c$

En las ecuaciones cuadráticas de estimación de la distancia para cada tipo de falla, solo se requiere la impedancia de carga de secuencia positiva ( $Z_{C1}$ ), la cual se calcula por medio de (2.13), y relaciona la tensión de pre-falla de secuencia positiva ( $V_{1(x)}^p$ ) estimada en el nodo (x) con la corriente de secuencia positiva ( $I_{1(x,y)}^p$ ) que fluye desde el nodo (x) al nodo (y) en condición de pre-falla, y a esta relación se le sustrae la impedancia de secuencia positiva ( $Z_{L1(x,y)}$ ) de la sección de línea entre los nodos (x) y (y).

$$Z_{C1} = \frac{V_{1(x)}^p}{I_{1(x,y)}^p} - Z_{L1(x,y)} \quad (2.13)$$

## 2.2 Método de localización de fallas para sistemas de distribución con generación distribuida.

La técnica de localización de fallas propuesta, se basa en el método desarrollado en [15]. Esta metodología considera dos casos: fallas en la zona con flujo de potencia unidireccional, la cual comprende el sistema aguas abajo del generador distribuido más alejado de la subestación principal (GD conectado al nodo  $w$ , figura 2.5), y fallas en la zona con posibilidad de flujo bidireccional, que comprende el sistema aguas arriba de éste GD.

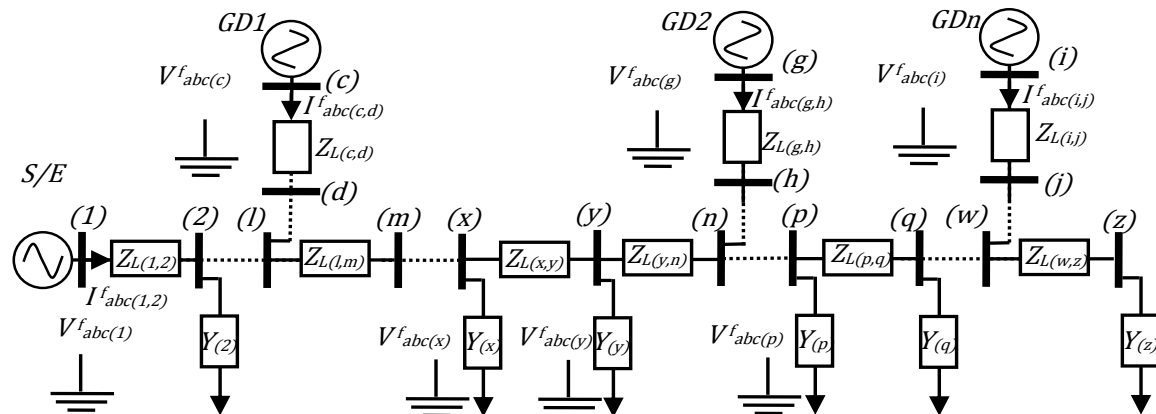


Figura 2.5. Diagrama unifilar simplificado de un sistema de distribución con generación distribuida.

Para las fallas ocurridas en la zona con flujo de potencia unidireccional, el planteamiento de las ecuaciones para estimar la distancia al punto de falla es similar al mostrado en la sección 2.1., donde la falla es alimentada únicamente por el nodo de envío, mientras que el planteamiento para estimar la distancia al punto de falla aguas arriba del nodo  $w$  cambia, debido a que es alimentada por el nodo de envío y por el nodo de recibo.

Teniendo en cuenta que el análisis para la zona con flujo de potencia unidireccional es igual al mostrado en la sección 2.1, se presentará únicamente el estudio para las fallas ocurridas en la zona con posibilidad de flujo bidireccional.

### 2.2.1 Fallas en la zona con posibilidad de flujo bidireccional.

Para plantear las ecuaciones de estimación de la distancia al punto de falla, se asume una falla entre los nodos  $(x)$  y  $(y)$  como se muestra en la figura 2.6. Esta sección se encuentra en la zona con posibilidad de flujo bidireccional del sistema de la figura 2.6.

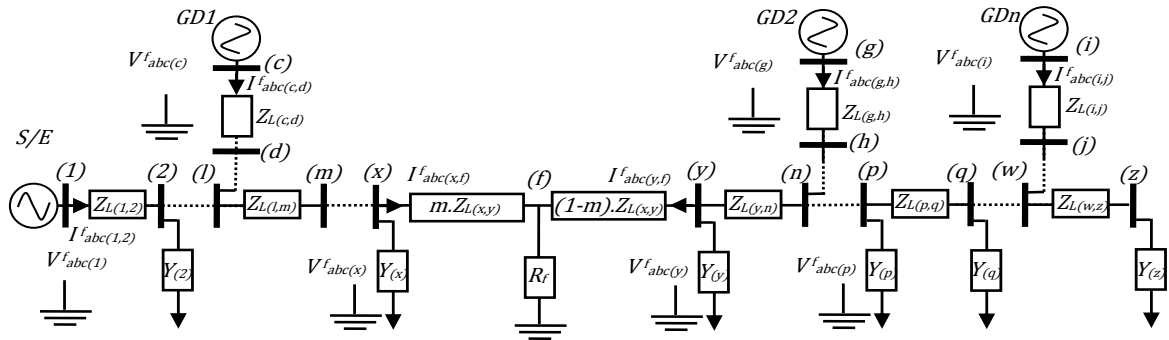


Figura 2.6. Diagrama unifilar de un Sistema de distribución con generación distribuida con falla entre los nodos (x) y (y).

**a) Análisis para fallas monofásicas a tierra**

En caso de fallas monofásicas a tierra en el nodo (f), como se muestra en la figura 2.6, las redes de secuencia se conectan en serie como se muestra en la figura 2.7. Donde la corriente en el nodo de recibo, ahora fluye desde el nodo (y) hasta el nodo (f), debido a la generación distribuida conectada aguas abajo del nodo (y).

Las corriente de fase  $I_{abc}^{f(y,f)}$  representadas en la figura 2.6. son transformadas en componentes de secuencia para obtener las corrientes  $I_{0(y,f)}^f$ ,  $I_{1(y,f)}^f$ ,  $I_{2(y,f)}^f$

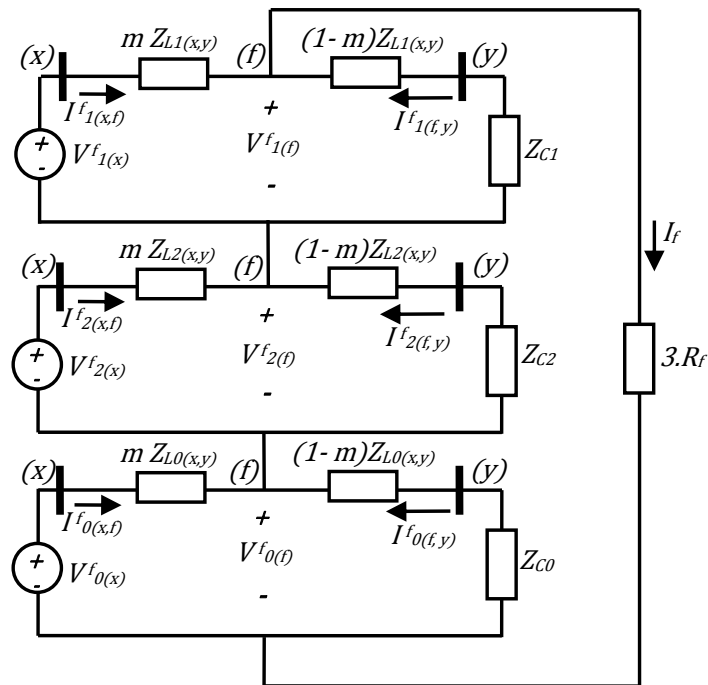


Figura 2.7. Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla monofásica a tierra para un sistema con generación distribuida.

Del circuito de la figura 2.7, es posible obtener (2.14) y (2.15)

$$V_{0(x)}^f + V_{1(x)}^f + V_{2(x)}^f - m(Z_{L0(x,y)} I_{0(x,f)}^f + \dots \quad (2.14)$$

$$\dots + Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f) = 3R_f I_f,$$

$$I_f = I_{1(x,f)}^f + I_{1(y,f)}^f. \quad (2.15)$$

Reemplazando (2.15) en (2.14), se obtiene la expresión (2.16)

$$M - m N = R_f O, \quad (2.16)$$

Donde,

$$M = V_{0(x)}^f + V_{1(x)}^f + V_{2(x)}^f,$$

$$N = Z_{L0(x,y)} I_{0(x,f)}^f + Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f + Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f, \quad (2.17)$$

$$O = 3 \left( I_{1(x,f)}^f + I_{1(y,f)}^f \right).$$

La expresión (2.16) es una ecuación lineal compleja con dos incógnitas reales, la cual es separada en parte real e imaginaria para obtener la distancia a la falla  $m$  como se muestra en (2.18)

$$m = \frac{(MO^* - M^*O)}{(NO^* - N^*O)}. \quad (2.18)$$

En donde (\*) es el conjugado

### b) Análisis para fallas bifásicas

En caso de fallas bifásicas en la sección de línea entre los nodos (x) y (y), del alimentador de la figura 2.6, las redes de secuencia se conectan en paralelo como se muestra en la figura 2.8. Donde la corriente en el nodo de recibo, ahora fluye desde el nodo (y) hasta el nodo (f), debido a la generación distribuida conectada aguas abajo del nodo (y).

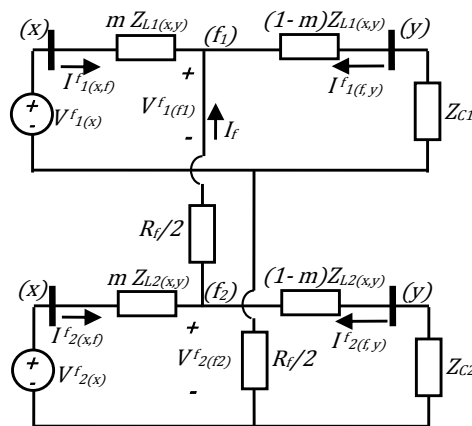


Figura 2.8. Circuito equivalente en redes de secuencia, en caso de una falla bifásica para un sistema con generación distribuida.

Como se presentó anteriormente para fallas monofásicas. Del circuito de la figura 2.8 y considerando el procedimiento para el caso anterior, se obtiene la ecuación para la distancia a la falla como se muestra en (2.19)

$$P - mQ = R_f R, \quad (2.19)$$

Donde,

$$\begin{aligned} P &= V_{1(f_1)}^f - V_{2(f_2)}^f, \\ Q &= Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f - Z_{L2(x,y)} I_{2(x,f)}^f, \\ R &= I_{1(x,f)}^f + I_{1(y,f)}^f \end{aligned} \quad (2.20)$$

La expresión (2.19) corresponde a una ecuación lineal con constantes complejas, similar a la expresión presentada en (2.16), la cual se resuelve como se presenta en el caso de fallas monofásicas.

### c) Análisis para fallas trifásicas

En caso de fallas trifásicas en la sección de línea entre los nodos (x) y (y), del alimentador de la figura 2.6, las redes de secuencia se conectan como se muestra en la figura 2.9. Donde la corriente en el nodo de recibo, ahora fluye desde el nodo (y) hasta el nodo (f), debido a la generación distribuida conectada aguas abajo del nodo (y).

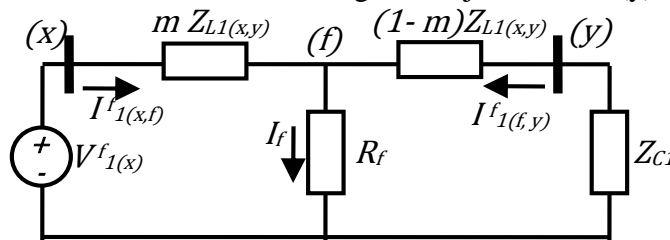


Figura 2.9. Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla trifásica para un sistema con generación distribuida.

Como se presentó anteriormente para fallas monofásicas. Del circuito de la figura 2.9, se obtiene la ecuación para la distancia a la falla como se muestra en (2.21)

$$S - m T = R_f U, \quad (2.21)$$

Donde,

$$\begin{aligned} S &= V_{1(x)}^f, \\ T &= Z_{L1(x,y)} I_{1(x,f)}^f, \\ U &= I_{1(x,f)}^f + I_{1(y,f)}^f. \end{aligned}$$

La expresión en (2.21) se resuelve para  $m$  como se explicó previamente.

### 2.3 Modelado de carga en sistemas eléctricos de potencia.

Un modelo de carga es una representación matemática de la potencia activa y reactiva consumida por elementos de carga, en función de la tensión y frecuencia del barraje al cual se encuentra conectada. Estos modelos de carga, generalmente representan de manera agregada, los elementos conectados a un barraje, dada la imposibilidad de conocer la composición exacta de los elementos conectados a este (motores, hornos, lámparas, entre otros). Incluso si se conociera su composición exacta, no sería práctico representar cada elemento de forma individual. Por lo tanto, se requieren modelos que representen el efecto combinado de las cargas en el sistema eléctrico [19].

De acuerdo a las características de la carga, existen dos tipos de modelos de carga: los modelos estáticos de carga y los modelos dinámicos de carga [19].

#### 2.3.1 Modelos estáticos de carga

Un modelo estático de carga representa la potencia activa y reactiva como una función algebraica de la tensión nodal y/o la frecuencia del sistema, en el mismo instante de tiempo. Generalmente, las componentes activa y reactiva se consideran en forma separada. De acuerdo con [20], típicamente se usan dos estructuras:

##### A. Modelo exponencial

En este modelo, la potencia activa y reactiva consumida por la carga se representa como se muestra en (2.22) y (2.23) respectivamente

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.22)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2.23)$$

Donde  $P_0$  y  $Q_0$  son las potencias activa y reactiva nominales,  $V_0$  es la tensión nominal del barraje. Finalmente,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la carga exponencial. Estos parámetros dependen de los elementos conectados al barraje. Algunos casos particulares se obtienen cuando  $\alpha, \beta = 0, 1, 2$ , que corresponden a cargas de tipo: potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente. Adicionalmente, se puede incluir el efecto de la frecuencia en el modelo de carga como se muestra en (2.24) y (2.25).

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (2.24)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (2.25)$$

En este caso, la potencia activa y reactiva se ve afectada por variaciones en la frecuencia del sistema. La tabla 2.1 muestra los valores característicos de los parámetros del modelo para varias cargas comunes en sistemas eléctricos.

Tabla 2.1. Valores de los parámetros del modelo para algunas cargas típicas [28].

Tipo de carga	$\alpha$	$\beta$	$K_{pf}$	$K_{qf}$
Lámpara incandescente	1.6	0	0	0
Lámpara fluorescente	1	3	1	-2.8
Lámpara de mercurio	2.5	2.2	-	-
Aire acondicionado	0.3	1.8	0.1	-1.6
Refrigerador	0.8	2.5	0.5	-1.4
TV	2	3.3	0	-2.6
Calentador resistivo	2	0	0	0

### B. Modelo polinomial

Este modelo representa la carga como una combinación de carga de potencia constante, corriente constante e impedancia constante, como se muestra en (2.26) y (2.27).

$$P = P_0 \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

$$Q = Q_0 \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2.27)$$

Donde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia constante, para P y Q respectivamente. Similar al modelo exponencial, el efecto de la frecuencia se puede incluir en este modelo.

Los coeficientes del modelo polinomial deben satisfacer la siguiente condición para



asegurar que a tensión nominal se obtenga potencia nominal:

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 \quad (2.28)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 \quad (2.29)$$

Los parámetros de carga cambian de acuerdo a la composición de la misma.

### 2.3.2 Modelos dinámicos de carga

Un modelo dinámico de carga representa la potencia activa y reactiva a través de ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencia, en función de la tensión nodal y la frecuencia del sistema en cada instante de tiempo. Las ecuaciones (2.30) y (2.31) muestran una representación general de los modelos dinámicos.

$$f\left(\frac{\partial^n P}{\partial t^n}, \dots, \frac{\partial P}{\partial t}, P, \frac{\partial^m V}{\partial t^m}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (2.30)$$

$$f\left(\frac{\partial^r Q}{\partial t^r}, \dots, \frac{\partial Q}{\partial t}, Q, \frac{\partial^s V}{\partial t^s}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (2.31)$$

Algunos de los modelos dinámicos más usados en la literatura [20], se muestran a continuación:

#### A. Modelo de carga de recuperación exponencial

Este modelo dinámico de carga fue descubierto experimentalmente del análisis del comportamiento de la carga en subestaciones bajo perturbaciones en tensión [22]. Este autor descubrió que ante una variación del tipo escalón unitario en la tensión, la potencia activa y reactiva consumida por la carga tiene una respuesta de tipo exponencial. Este comportamiento se modela a partir de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden como se muestra en (2.32) y (2.33).

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = -x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{ps}} - P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}}$$

$$P_d = x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \quad (2.32)$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}}$$

$$Q_d = x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \quad (2.33)$$

Donde,

$x_p, x_q$ : Variables de estado para la potencia activa y reactiva, respectivamente.

$T_p, T_q$ : Tiempo de recuperacion exponencial para la potencia activa y reactiva, respectivamente.

$N_{ps}, N_{qs}$ : Exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga.

$N_{pt}, N_{qt}$ : Exponentes asociados a la respuesta transitoria de la carga.

$P_0, Q_0$ : Potencias activa y reactiva nominales, respectivamente.

$P_d, Q_d$ : Potencia activa y reactiva demandada por la carga.

$V$ : Tensión en la carga.

$V_0$ : Tensión en la carga en el estado de pre-falla.

### B. Modelo compuesto de carga

En este modelo, la carga se representa como una combinación de un modelo estático de carga polinomial (presentado anteriormente) y un modelo de motor de inducción. Este modelo representa el comportamiento estático y dinámico de la carga. La motivación para usar el modelo del motor de inducción para la representación dinámica, es el gran número de cargas de este tipo [19]. Este modelo fue propuesto inicialmente por [21], y su estructura se muestra en la figura 2.10.

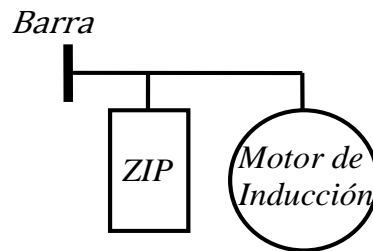


Figura 2.10. Estructura del modelo compuesto de carga

La representación del modelo de carga se lleva a cabo por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales como se muestra en (2.34) y (2.35), en este caso, se utiliza el modelo de motor de inducción de tercer orden.

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (w - 1)E'_q$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (w - 1)E'_d$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{2H} [(Aw^2 + Bw + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)]$$

$$I_d = \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \quad (2.34)$$

$$I_q = \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)]$$

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}$$

$$X = X_s + X_m$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \quad (2.35)$$

$$A + B + C = 1$$

Donde  $E'_d$  es la tensión interna en el eje directo,  $E'_q$  es la tensión interna en el eje de cuadratura,  $\omega$  es la velocidad mecánica,  $I_d$  e  $I_q$  son las corrientes en el estator en el eje directo y cuadratura, respectivamente.  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $X_m$ ,  $R_r$  y  $X_r$  son la resistencia del estator, reactancia del estator, reactancia de magnetización, resistencia del rotor y reactancia del rotor, respectivamente.  $T_0$  es el torque de carga en estado estable,  $H$  es el coeficiente de inercia, y A, B, C son coeficientes del torque de carga. Con el objetivo de acoplar el modelo estático y dinámico, se introducen los parámetros  $K_{pm}$ ,  $K_{qm}$  como se muestra en (2.36).

$$K_{pm} = \frac{P_m}{P_0} \quad (2.36)$$

$$K_{qm} = \frac{Q_m}{Q_0}$$

Estos parámetros relacionan la potencia consumida por el motor de inducción con la potencia total consumida por el modelo compuesto. Por lo tanto, tienen que satisfacer la relación dada en (2.37), (2.38)

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 - K_{pm} \quad (2.37)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 - K_{qm} \quad (2.38)$$

## 2.4 Métodos numéricos para resolver modelos dinámicos de carga

En esta sección se presentan brevemente algunos de los métodos más populares para resolver las ecuaciones diferenciales de los modelos de carga.

### 2.4.1 Método de Euler

Este método usa la derivada de una función  $y(x)$ , evaluada en un punto  $x_0$ , como la pendiente de la recta tangente en este punto. Por lo tanto, si se recorre una distancia pequeña a lo largo de esta recta tangente, entonces se puede obtener una aproximación a la solución real [23]. Las ecuaciones para este método se presentan en (2.39).

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \\ y_{n+1} &= y_n + f(x_n, y_n) * h, \quad h = x_1 - x_0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Donde  $h$  es el tamaño del paso,  $x_0, y_0$  son las condiciones iniciales,  $x_n, y_n$  son los estados actuales y  $x_{n+1}, y_{n+1}$  son los estados siguientes. El método de Euler puede presentar problemas de estabilidad numérica debido a la dependencia con el paso.

### 2.4.2 Método de Heun

Este método calcula una pendiente promedio entre el estado actual y el siguiente. Este método proporciona una mayor aproximación que el método anterior debido a que calcula una pendiente promedio, lo que hace una corrección en la estimación mejorando la estabilidad numérica [23]. Las ecuaciones para este método se presentan en (2.40).

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + h \frac{f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1}^*)}{2} \\ \dot{y} &= f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \\ y_{n+1}^* &= y_n + f(x_n, y_n) * h, \quad h = x_1 - x_0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Donde  $*$  es la derivada.

### 2.4.3 Método de Runge-Kutta

Este método es ampliamente usado debido a su alta precisión, el cual se desarrolla a través de las series de Taylor [23]. Las ecuaciones generales para el método de cuarto orden se presentan en (2.41).

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 &= hf(x_n, y_n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_2 &= hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}K_1\right) \\K_3 &= hf\left(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}K_2\right) \\K_4 &= hf(x_n + h, y_n + K_3)\end{aligned}\tag{2.41}$$

Donde  $K_1, K_2, K_3$  y  $K_4$  son constantes del método.

Es importante mencionar que también existen los métodos numéricos de paso fijo y paso variable. En esta investigación se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden de paso fijo debido a que presenta buena exactitud y es estable numéricamente, lo cual es suficiente para la aplicación.

## Capítulo 3

### 3. Metodología propuesta

Este capítulo presenta la metodología propuesta para considerar la dinámica de la carga en el localizador de fallas basado en la estimación de la impedancia. La metodología es aplicable a cualquier modelo dinámico de carga y también a modelos estáticos de carga. Adicionalmente, se presenta una metodología para considerar la generación distribuida en el sistema de distribución con modelos estáticos y dinámicos de carga

#### **3.1 Algoritmo dinámico de localización de fallas para sistemas de distribución con modelos dinámicos de carga**

En esta sección, se desarrolla un algoritmo robusto para la localización de fallas paralelas, que funciona para sistemas de distribución con cualquier nivel de tensión. Este algoritmo realiza un análisis de fallas en el dominio del tiempo, para considerar el comportamiento dinámico de la carga en el estado transitorio. El algoritmo es dinámico, debido a que utiliza datos de carga en cada instante de tiempo. Por otro lado, se realiza un análisis en el dominio fasorial para aplicar el método de localización de fallas.

El algoritmo propuesto se basa en el método de localización de fallas en componentes de secuencia descrito en la sección 2.1. Adicionalmente, se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden presentado anteriormente, para resolver los modelos dinámicos de carga. La metodología es aplicable a cualquier modelo dinámico de carga. Sin embargo, por límites de extensión del documento, se presentará la metodología con el modelo dinámico de recuperación exponencial, el mismo algoritmo se aplica para el modelo compuesto de carga en los resultados mostrados en la sección 4.5.

##### **3.1.1 Diagrama de flujo de la técnica.**

En la figura 3.1, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo propuesto para obtener la distancia a la falla por medio de un análisis en el dominio del tiempo y un análisis fasorial. Además, se tiene en cuenta el modelo dinámico en el localizador de fallas y el sistema de potencia.

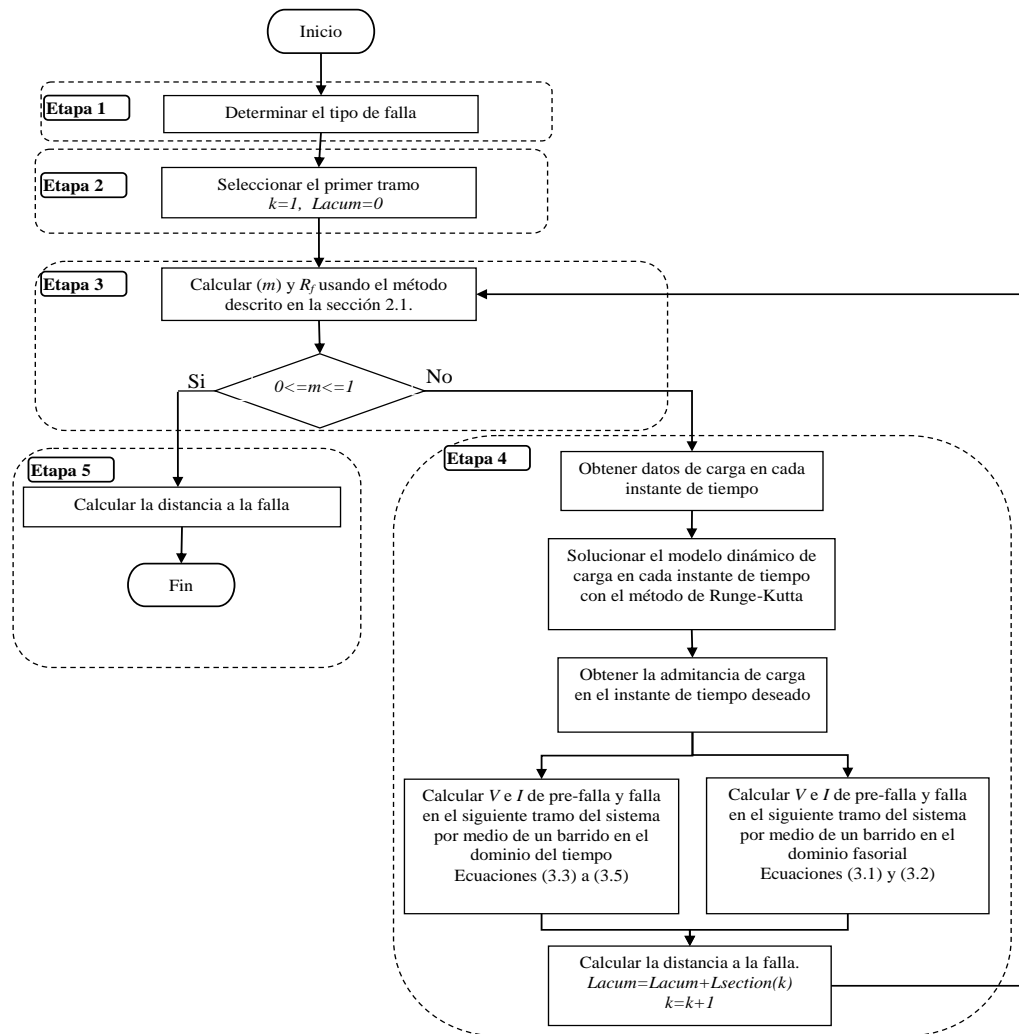


Figura 3.1. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

### 3.1.2 Etapa 1: Determinar el tipo de falla.

El tipo de falla se determina usando el algoritmo propuesto por [5]. Este tipo de falla se define usando la magnitud de la denominada corriente de referencia y las corrientes de fase medidas. En el caso de una corriente de referencia más alta que las corrientes de fase medidas, entonces no existe ningún tipo de falla. En el caso de una corriente de referencia más baja en una de las corrientes de fase, significa que existe una falla monofásica en esta fase. En el caso de fallas bifásicas, dos corrientes de fase son más grandes que la corriente de referencia. Adicionalmente, para determinar dos o tres fases a tierra, la corriente de secuencia cero medida es más grande que la corriente de referencia predefinida de secuencia cero.

### 3.1.3 Etapa 2: Seleccionar el primer tramo del sistema.

La técnica descrita en la sección 2.1, propone un proceso iterativo, el cual comienza suponiendo una falla en el primer tramo del sistema. Esta sección de línea se evalúa inicialmente para determinar la localización de falla como se describe en la siguiente etapa

### 3.1.4 Etapa 3: Aplicar el método de localización de fallas.

En esta etapa, se aplica la técnica de localización de fallas descrita en la sección 2.1 para obtener la distancia a la falla ( $m$ ). El valor de  $m$  corresponde a una distancia en por unidad de longitud en la sección de línea analizada. Si el valor de  $m$  está entre 0 y 1, entonces la sección actual es la sección bajo falla. De lo contrario, se analiza el siguiente tramo del sistema como se presenta en la siguiente etapa. Finalmente, el método de localización de fallas obtiene la distancia desde la subestación hasta la falla.

### 3.1.5 Etapa 4: Actualizar la tensión y corriente en cada sección del sistema.

Normalmente, las únicas medidas disponibles en un sistema de distribución están asociadas con la subestación principal. Estas medidas son muestras en cada instante de tiempo, las cuales se van a utilizar inicialmente para resolver el modelo dinámico de carga. Posteriormente, se desarrolla un barrido iterativo sección por sección para actualizar la tensión y corriente en condiciones de falla en los otros tramos del sistema.

### 3.1.6 Análisis en el dominio fasorial.

Este análisis se desarrolla con el objetivo de calcular las constantes del método de localización de fallas descrito en la sección 2.1. Entonces, para calcular la tensión y corriente en el nodo ( $j$ ), que se muestra en la figura 3.2, de la tensión y corriente medida en la subestación principal, se utilizan las ecuaciones (3.1) y (3.2), respectivamente.

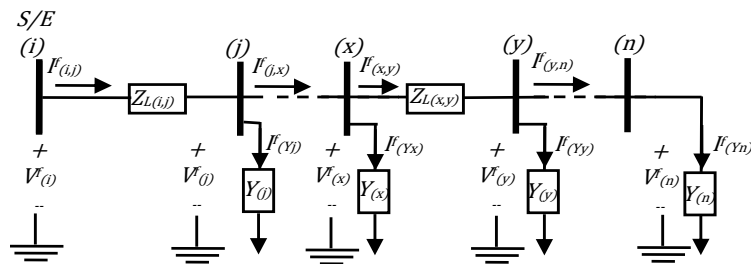


Figura 3.2. Sistema de distribución bajo falla. [15].

$$\left[ V_{abc(j)}^f \right] = \left[ V_{abc(i)}^f \right] - \left[ Z_{L(i,j)} \right] \left[ I_{abc(i,j)}^f \right] \quad (3.1)$$

$$\left[ I_{abc(j,x)}^f \right] = \left[ I_{abc(i,j)}^f \right] - \left[ Y_{load(j)}(t) \right] \left[ V_{abc(j)}^f \right] \quad (3.2)$$

En la ecuación (3.2) se puede observar el efecto de la carga en la variable  $\left[ Y_{load(j)}(t) \right]$ . Este efecto comprende ya sean cargas individuales o circuitos equivalentes. La integración del modelo de carga en la técnica de localización de fallas se expone en las siguientes secciones por medio de esta ecuación.



### 3.1.7 Análisis en el dominio del tiempo.

Este análisis se desarrolla con el objetivo de resolver el modelo dinámico de carga en cada instante de tiempo. De esta manera, es posible analizar el comportamiento del sistema en el estado estable y transitorio. Toda la señal de tensión y corriente es actualizada en cada sección del sistema, por medio de un barrido muestra por muestra. Por lo tanto, se tiene en cuenta la relación tensión-corriente en función del tiempo. La figura 3.3, muestra una sección de línea con el modelo  $\pi$  [24]. Las ecuaciones (3.3) a (3.5) se usan para calcular la tensión y corriente en el nodo (j) a partir de las medidas en el nodo (i).

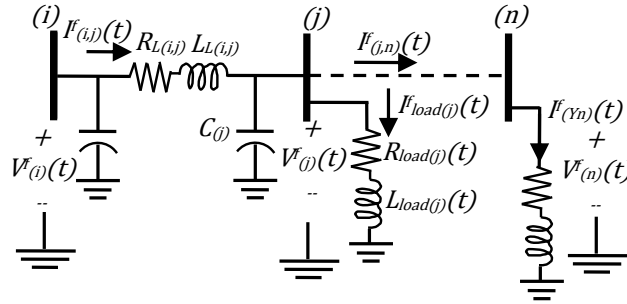


Figura 3.3. Sección de línea de un sistema de distribución bajo falla con los elementos circuitales RLC.

$$\begin{aligned} [V_{abc(j)}^f(t)] &= [V_{abc(i)}^f(t)] - [R_{Labc(i,j)}] [I_{abc(i,j)}^f(t)] \\ &\quad - [L_{Labc(i,j)}] \left[ \frac{d}{dt} I_{abc(i,j)}^f(t) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$[I_{abc(j,n)}^f(t)] = [I_{abc(i,j)}^f(t)] - [C_{abc(j)}] \left[ \frac{d}{dt} V_{abc(j)}^f(t) \right] - [I_{abcLoad(j)}^f(t)] \quad (3.4)$$

El vector  $[I_{abcLoad(j)}^f(t)]$  se obtiene usando el metodo de Runge-Kutta para resolver la ecuación diferencial mostrada en (3.5).

$$\begin{aligned} \left[ \frac{d}{dt} I_{abcLoad(j)}^f(t) \right] + \frac{[R_{abcLoad(j)}^f(t)]}{[L_{abcLoad(j)}^f(t)]} [I_{abcLoad(j)}^f(t)] \\ = \frac{1}{[L_{abcLoad(j)}^f(t)]} [V_{abc(j)}^f(t)] \end{aligned} \quad (3.5)$$

$[V_{abc(i)}^f(t)]$ : Tensiones de fase en condición de falla en el dominio del tiempo en el nodo (i).

$[I_{abc(i,j)}^f(t)]$ : Corrientes de fase en condición de falla en el dominio del tiempo que fluye desde el nodo (i) al nodo (j)

$[R_{Labc(i,j)}]$ : Matriz de resistencias de fase de la sección de línea entre los nodos (i) y (j).

$[L_{Labc(i,j)}]$ : Matriz de inductancias de fase de la sección de línea entre los nodos (i) y (j).

$[C_{Labc(i,j)}]$ : Matriz de capacitancias de fase de la sección de línea entre los nodos (i) y (j).

$[I_{abcLoad(j)}^f(t)]$ : Corriente de carga en el dominio del tiempo, en condición de falla en el nodo (j).

$[R_{abcLoad(j)}(t)]$ : Representación de la carga en el nodo (j) como una matriz de resistencias de fase.

$[L_{abcLoad(j)}(t)]$ : Representación de la carga en el nodo (j) como una matriz de inductancias de fase.

Con el objetivo de resolver las ecuaciones (3.3) a (3.5), y específicamente la derivada de las señales de tensión y corriente en cada instante de tiempo, se utiliza el método de diferenciación numérica por diferencias hacia atrás que se muestra en (3.6). Por otro lado, con el propósito de resolver la integral de las señales de tensión y corriente en cada instante de tiempo, se utiliza el método de integración numérica de la regla trapezoidal, el cual se muestra en la ecuación (3.7). Estos métodos de integración y diferenciación numérica se utilizan en esta investigación debido a su simplicidad en la implementación y a que entregan resultados con buena exactitud, lo cual es suficiente para la aplicación.

$$\frac{d}{dt}f(t_0) \cong \frac{f(t_0 + h) - f(t_0)}{h} \quad (3.6)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+h} f(t)dt \cong h \frac{f(t_0) + f(t_0 + h)}{2} \quad (3.7)$$

### 3.1.8 Factor de corrección de la carga.

Para mitigar las incertidumbres en la magnitud de la carga, se propone el factor de corrección de la carga por medio de las ecuaciones (3.8) y (3.9). Este factor es una matriz 3x3, donde los elementos fuera de la diagonal se establecen en “1”, porque este factor no afecta el acoplamiento entre fases. De esta manera, la corrección de la carga se hace mediante los elementos de la diagonal, como se muestra a continuación.

$$CLF = \begin{bmatrix} \beta_a & 1 & 1 \\ 1 & \beta_b & 1 \\ 1 & 1 & \beta_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\beta_a = \frac{I_a^p}{I_{nominal}}; \beta_b = \frac{I_b^p}{I_{nominal}}; \beta_c = \frac{I_c^p}{I_{nominal}} \quad (3.9)$$

Donde,

*CLF*: Factor de corrección de la carga

$\beta_{a,b,c}$ : Son los factores de carga para las fases a, b y c respectivamente.

$I_a^p, I_b^p, I_c^p$ : Son las corrientes fasoriales en estado de prefalla para cada fase

Este factor de corrección de la carga se incluye en la ecuación (3.2) multiplicando la matriz de admitancia de carga como se muestra en la ecuación (3.10)

$$\left[ I_{abc(j,x)}^f \right] = \left[ I_{abc(i,j)}^f \right] - CLF \cdot \left[ Y_{load(j)}(t) \right] \left[ V_{abc(j)}^f \right] \quad (3.10)$$

### 3.1.9 Inclusión del modelo de carga dentro del localizador de fallas.

Los modelos dinámicos de carga descritos en la sección 2.3.2, son incluidos dentro del método de localización de fallas por medio de dos fases:

#### Fase I: Solución del modelo de carga con el método de Runge-Kutta de cuarto orden.

En esta fase se utiliza un método numérico para ecuaciones diferenciales, con el objetivo de resolver el modelo. Inicialmente, se declaran las variables de estado como se muestra en (3.11) y (3.12) (el mismo proceso se realiza para el modelo compuesto de carga).

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= \frac{1}{T_p} \left[ -x_p + P_0 \left( \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\ P_d &= x_p + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= \frac{1}{T_q} \left[ -x_q + Q_0 \left( \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \right) \right] \\ Q_d &= x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Luego se aplica el método numérico como se muestra en (3.13) y (3.14):

$$\dot{x}_p = f(t, x_p, x_q, V)$$

$$\begin{aligned}
 K_1 &= hf(t_n, x_{pn}, x_{qn}, V_n) = \frac{h}{T_p} \left[ -x_{pn} + P_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\
 K_2 &= hf \left( t_n + \frac{1}{2}h, x_{pn} + \frac{1}{2}K_1, x_{qn} + \frac{1}{2}M_1, V_n \right) \\
 &= \frac{h}{T_p} \left[ - \left( x_{pn} + \frac{1}{2}K_1 \right) + P_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\
 K_3 &= hf \left( t_n + \frac{1}{2}h, x_{pn} + \frac{1}{2}K_2, x_{qn} + \frac{1}{2}M_2, V_n \right) \\
 &= \frac{h}{T_p} \left[ - \left( x_{pn} + \frac{1}{2}K_2 \right) + P_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \quad (3.13) \\
 K_4 &= hf(t_n + h, x_{pn} + K_3, x_{qn} + M_3, V_n) \\
 &= \frac{h}{T_p} \left[ - (x_{pn} + K_3) + P_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\
 x_{pn+1} &= x_{pn} + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)
 \end{aligned}$$

$$\dot{x}_q = g(t, x_p, x_q, V)$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= hg(t_n, x_{pn}, x_{qn}, V_n) = \frac{h}{T_q} \left[ -x_{qn} + Q_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\
 M_2 &= hg \left( t_n + \frac{1}{2}h, x_{pn} + \frac{1}{2}K_1, x_{qn} + \frac{1}{2}M_1, V_n \right) \\
 &= \frac{h}{T_q} \left[ - \left( x_{qn} + \frac{1}{2}M_1 \right) + Q_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \\
 M_3 &= hg \left( t_n + \frac{1}{2}h, x_{pn} + \frac{1}{2}K_2, x_{qn} + \frac{1}{2}M_2, V_n \right) \\
 &= \frac{h}{T_q} \left[ - \left( x_{qn} + \frac{1}{2}M_2 \right) + Q_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right] \quad (3.14) \\
 M_4 &= hg(t_n + h, x_{pn} + K_3, x_{qn} + M_3, V_n) \\
 &= \frac{h}{T_q} \left[ - (x_{qn} + M_3) + Q_0 \left( \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$x_{qn+1} = x_{qn} + \frac{1}{6}(M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4)$$

Donde,  $V_n$  es el valor eficaz de la tensión obtenida por medio del barrido en el dominio del tiempo. Este valor de tensión se calcula con la ecuación (3.15), con una ventana de tiempo de un periodo de la señal, de tal manera que la ventana corre a lo largo de la simulación, lo cual permite considerar el comportamiento de la carga en cada instante de tiempo.

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt} \quad (3.15)$$

### Fase II: Obtención de la admitancia de carga.

En esta fase, se obtiene las matrices de conductancia  $G_d$  y susceptancia  $B_d$  para cada nodo con carga. De tal manera, que la matriz de admitancias de carga, queda en función de las potencias  $P_d$  y  $Q_d$  de (3.11) y (3.12), las cuales contienen el comportamiento dinámico de la carga. La expresión para la admitancia es el resultado de dividir las potencias  $P_d$  y  $Q_d$  entre el cuadrado de la tensión de la carga, como se muestra en (3.16).

$$G_d(t) = \frac{P_d(t)}{V^2(t)}$$

$$B_d(t) = \frac{Q_d(t)}{V^2(t)} \quad (3.16)$$

$$[Y_{load(j)}(t)] = [G_d(t)] + j[B_d(t)]$$

Donde,  $G_d(t)$  y  $B_d(t)$  son la conductancia y susceptancia de carga respectivamente.

Finalmente, la expresión dada en (3.16) es reemplazada en la ecuación (3.2) que corresponde al barrido de corriente en el dominio fasorial.

#### 3.1.10 Etapa 5: Calcular la distancia a la falla.

La distancia total a la falla se calcula con la adición de la longitud de los tramos anteriores a la sección en falla, y el porcentaje del tramo bajo falla relacionado con  $m$ . Esta distancia se calcula con la expresión (3.17).

$$L_{total} = \sum_{i=1}^{nt-1} (L_{section_i}) + m * L_{section_{nt}} \quad (3.17)$$

Donde,

$L_{total}$ : Distancia total estimada desde la subestación hasta el punto en falla.

$nt$ : Numero de la sección de línea estudiada.

$L_{section_{nt}}$ : Longitud de la última sección de línea analizada.

### **3.2 Algoritmo robusto de localización de fallas considerando generación distribuida en sistemas de distribución de energía**

En esta sección, se desarrolla un algoritmo robusto para la localización de fallas paralelas, que funciona para sistemas de distribución con cualquier nivel de tensión. Este algoritmo considera múltiples unidades de generación distribuida a lo largo del sistema. Adicionalmente, considera diferentes modelos estáticos de carga de impedancia constante, corriente constante, potencia constante y modelos híbridos.

En esta sección se muestra la técnica para incluir la generación distribuida y los modelos estáticos de carga, los cuales no se habían mencionado. Posterior a este capítulo, se aplica la técnica propuesta en la sección anterior para considerar los modelos dinámicos y la técnica mostrada en esta sección para incluir la generación distribuida y los modelos dinámicos de carga y se obtiene una técnica robusta que considera modelos estáticos y dinámicos de carga en sistemas de distribución con generación distribuida.

El algoritmo propuesto se basa en el método de localización de fallas en componentes de secuencia descrito en la sección 2.2.

#### **3.2.1 Diagrama de flujo de la técnica.**

El diagrama de flujo del algoritmo propuesto para obtener el modelo de carga específico e incluirlo dentro del localizador de fallas, se muestra en la figura 3.4. Este diagrama resume la metodología propuesta, la cual está compuesta de cinco etapas bien definidas que se describen a continuación.

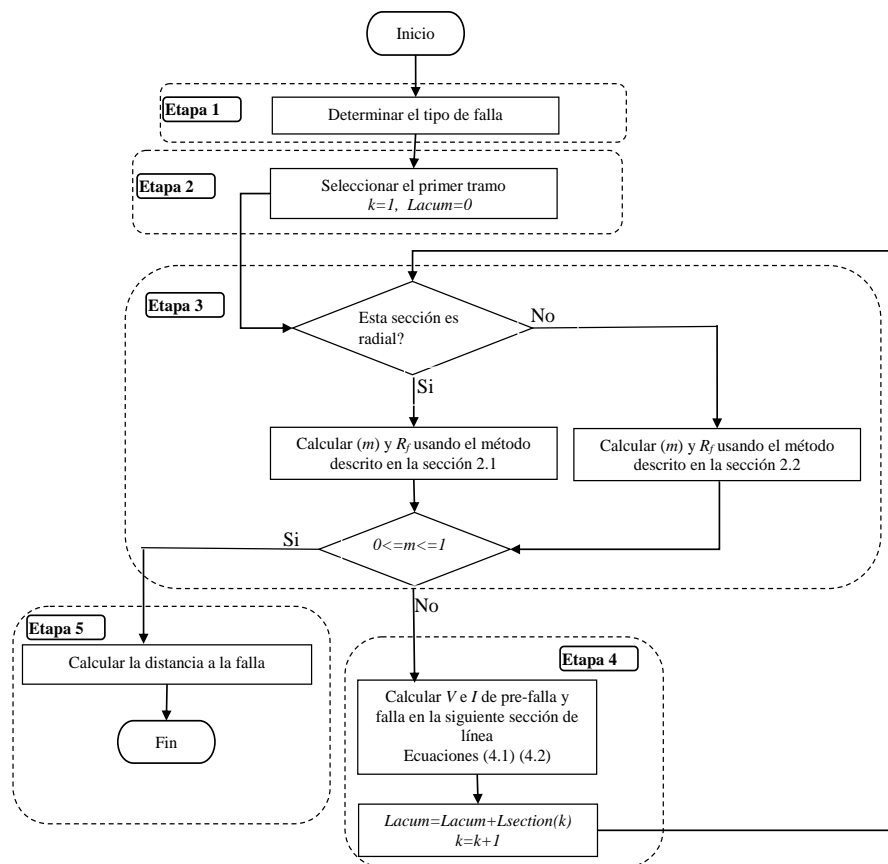


Figura 3.4. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Las etapas 1, 2 y 5 de la metodología se realizan como se mencionó en la sección anterior

### 3.2.2 Etapa 3: Análisis de la sección de línea.

En esta etapa, se aplica la técnica de localización de fallas descrita en la sección 2.2, la cual considera dos situaciones: cuando la sección está aguas abajo del generador distribuido más alejado de la subestación, se encuentra en la zona con flujo de potencia unidireccional, de lo contrario la sección se encuentra en la zona con posibilidad de flujo bidireccional (aguas arriba de este GD). Para la zona con flujo de potencia unidireccional, se utilizan las ecuaciones descritas en la sección 2.1, de lo contrario se utilizan las ecuaciones de la sección 2.2.

La técnica de localización de fallas se aplica para obtener la distancia a la falla ( $m$ ). El valor de  $m$  corresponde a una distancia en por unidad de longitud en la sección de línea analizada. Si el valor de  $m$  está entre 0 y 1, entonces la sección actual es la sección bajo falla. De lo contrario, se analiza el siguiente tramo del sistema como se presenta en la siguiente etapa. Finalmente, el método de localización de fallas obtiene la distancia desde la subestación hasta la falla.

### 3.2.3 Etapa 4: Actualización de la tensión y corriente en cada sección del sistema.

Normalmente, las únicas medidas disponibles en un sistema de distribución están asociadas con la subestación principal y las fuentes de generación distribuida. Por lo tanto, se desarrolla un barrido iterativo para actualizar la tensión y corriente durante la condición de falla en todas las secciones de línea del sistema de potencia bajo análisis. Existen dos casos para este proceso: el primero es que el tramo bajo estudio se encuentre en la zona con flujo de potencia unidireccional y el segundo, que el tramo se encuentre en la zona con posibilidad de flujo bidireccional. Esta metodología se explica para cada uno de los casos:

#### 3.2.4 Caso 1: Actualización de la tensión y corriente en la zona con flujo de potencia unidireccional.

Para calcular la tensión y corriente en el nodo (j), que se muestra en la figura 3.5, de la tensión y corriente medida en la subestación principal, se utilizan las ecuaciones (3.18) y (3.19), respectivamente.

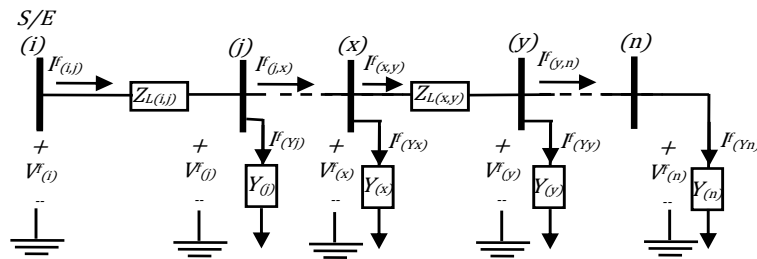


Figura 3.5. Sistema de distribución bajo falla.

$$\left[ V_{abc(j)}^f \right] = \left[ V_{abc(i)}^f \right] - \left[ Z_{L(i,j)} \right] \left[ I_{abc(i,j)}^f \right] \quad (3.18)$$

$$\left[ I_{abc(j,x)}^f \right] = \left[ I_{abc(i,j)}^f \right] - \left[ Y_{load(j)} \right] \left[ V_{abc(j)}^f \right] \quad (3.19)$$

#### 3.2.5 Caso 2: Actualización de la tensión y corriente en la zona con posibilidad de flujo bidireccional.

Este proceso se desarrolla a través de dos barridos: Inicialmente, un barrido aguas abajo desde la subestación hasta la sección bajo análisis, luego, un barrido aguas arriba desde el generador distribuido más alejado de la subestación hasta la misma sección bajo análisis. Para calcular la tensión y corriente en el nodo (x) de la figura 3.6, se utilizan las ecuaciones (3.18) y (3.19).



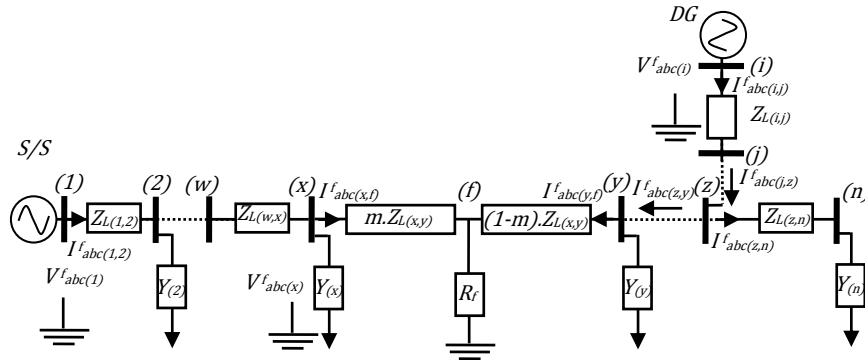


Figura 3.6. Diagrama unifilar de un Sistema de distribución con generación distribuida con falla entre los nodos (x) y (y).

Por otro lado, para calcular la tensión y corriente en el nodo (y) de la figura 3.6. Primero se parte de las medidas en el generador distribuido más alejado de la subestación, luego se realiza un barrido aguas arriba de este generador. Para calcular la corriente  $I_{abc(z,n)}^f$  se utilizan las medidas en el GD y los parámetros del sistema radial aguas abajo. Luego la corriente  $I_{abc(z,y)}^f$  se calcula aplicando las leyes de Kirchoff como se muestra en (3.20). Finalmente se obtiene la corriente  $I_{abc(y,f)}^f$  usando la ecuación (3.19) y (3.20).

$$I_{abc(z,y)}^f = I_{abc(j,z)}^f - I_{abc(z,n)}^f \quad (3.20)$$

En caso de más de un generador distribuido, los valores de tensión del barrido iterativo tanto aguas arriba como, aguas abajo, en estas unidades de GD son reemplazados por la medida de tensión en el correspondiente GD.

En la siguiente fase, se realiza la integración de los modelos de carga dentro de la técnica de localización de fallas obteniendo una expresión para la admitancia de carga, la cual incluye el comportamiento del modelo de carga. Luego esta expresión se usa en la ecuación (3.19).

Los modelos estáticos de carga representados como una admitancia de carga se muestran en la expresión (3.21)

$$Y_{(x)} = \left( G_{(x)} \left| \frac{V_{(x)}^f}{V_{(x)}^p} \right|^{np-2} + jB_{(x)} \left| \frac{V_{(x)}^f}{V_{(x)}^p} \right|^{nq-2} \right) \quad (3.21)$$

Las variables np y nq representan los valores conocidos de tres tipos de carga:

$np = nq = 0$  Potencia constante

$np = nq = 1$  Corriente constante

$np = nq = 2$  Impedancia constante

La ecuación (3.21) representa la admitancia de carga en cualquier instante de tiempo en función de la tensión nodal. Esta ecuación se reemplaza en (3.19) para incluir el modelo de carga dentro del localizador de fallas.

## Capítulo 4

### 4. Aplicación de la metodología propuesta

En este capítulo se presenta la validación y análisis de resultados de la metodología propuesta. Inicialmente se describe el sistema de prueba, posteriormente se define una estrategia de prueba para evaluar de forma intensiva el desempeño del localizador. La prueba intensiva considera las variaciones en el modelo, factor de potencia y tamaño de la carga, longitud de los alimentadores, calibre de los conductores, variaciones en la configuración de la línea, variación en el nivel de tensión y la impedancia equivalente en la subestación, entre los más importantes. Adicionalmente, se presentan diferentes escenarios de prueba, con el objetivo de evaluar el desempeño de las técnicas. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad de los métodos desarrollados, considerando las variaciones propuestas en el sistema de distribución

#### 4.1 Descripción de los sistemas de prueba

Para evaluar el desempeño del algoritmo presentado en el capítulo 3, se seleccionó el sistema de prueba de la IEEE de 34 nodos con tensión de 24.9 kV, el cual se muestra en la figura 4.1, y se simula usando el software ATP, el cual es muy apropiado para analizar transitorios, fallas, contingencias, entre otros. Este sistema de potencia de distribución contiene laterales monofásicos, bifásicos y trifásicos, cargas desbalanceadas y diferentes longitudes y configuraciones de la secciones de línea. Dicho sistema se seleccionó debido a que representa un sistema típico de distribución de energía con niveles de tensión de 13.2, 35.5 y 44 kV. Además, está fuertemente validado en la literatura científica.

Adicionalmente, el sistema fue modificado para incluir los modelos estáticos y dinámicos de carga usando una herramienta de ATP denominada models type-94 en el modo Norton.

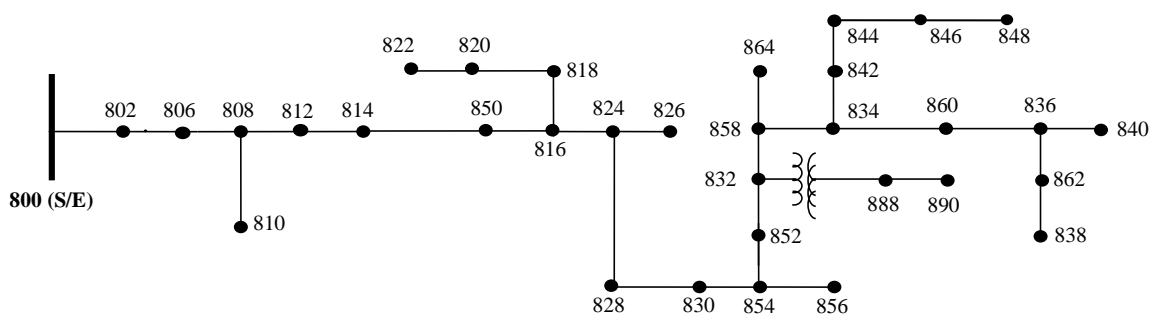


Figura 4.1. Sistema de prueba de la IEEE de 34 nodos simulado en el software ATP usando models para los modelos de carga

El segundo sistema de prueba es el mismo sistema de la IEEE de 34 nodos presentado anteriormente considerando un generador distribuido en el nodo 836, como se muestra en

la figura 4.2. Finalmente se plantea un sistema de prueba con dos generadores distribuidos en los nodos 836 y 824 como se muestra en la figura 4.3.

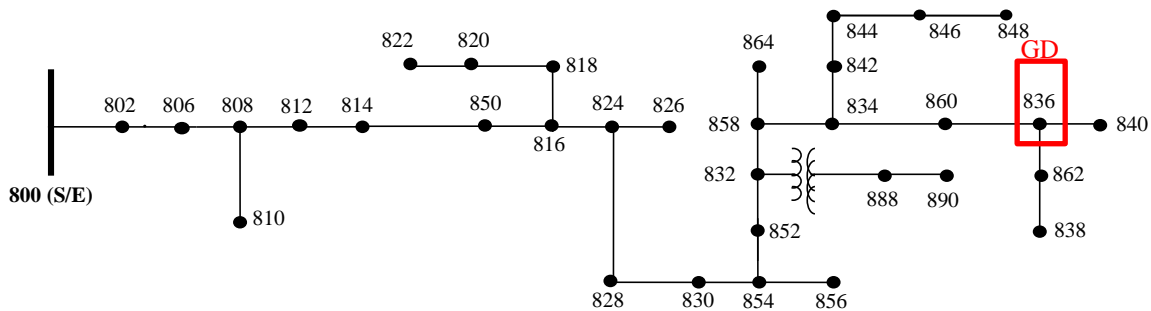


Figura 4.2. Sistema de prueba de la IEEE de 34 nodos simulado en el software ATP usando modelos para codificar los modelos de carga y con un GD en el nodo 836.

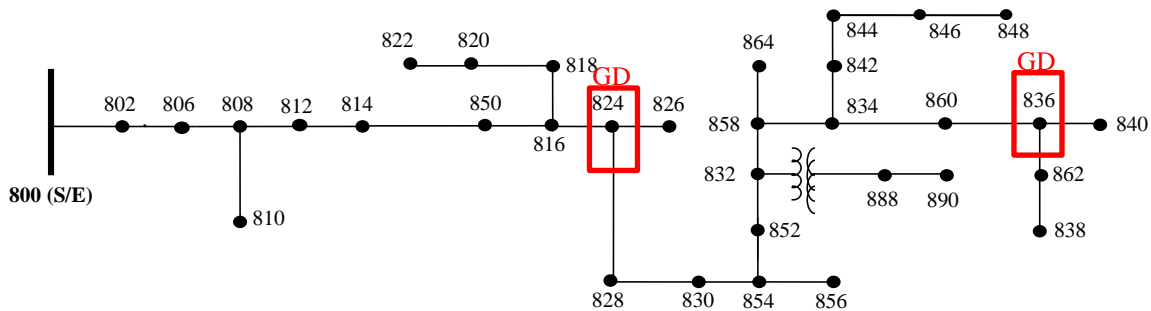


Figura 4.3. Sistema de prueba de la IEEE de 34 nodos simulado en el software ATP usando modelos para codificar los modelos de carga y con dos GDs en los nodos 836 y 824.

#### 4.2 Estrategia de prueba para evaluar de forma intensiva el desempeño de los localizadores.

Esta estrategia consiste en utilizar los algoritmos propuestos para localizar fallas en sistemas de distribución con variaciones en el modelo de carga, factor de potencia y tamaño de la carga, longitud de los alimentadores, calibre de los conductores, variaciones en la configuración de la línea, variación en el nivel de tensión y la impedancia equivalente en la subestación. Esto se realiza por medio de una herramienta creada en el grupo de investigación ICE3 que realiza estas variaciones de forma automática. Esta herramienta emplea el software ATP para el modelado de los sistemas de distribución y Matlab como software de automatización y manipulación de los datos.

Los rangos de variación de los parámetros se realizaron de acuerdo al estudio reportado por [14], [17], en donde se muestran rangos de variación típicos dados por la normativa nacional y la experiencia del operador. Dichos rangos se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Rangos de variación de los parámetros del sistema [17]

Tipo de variación	Rangos de variación	
	Valor mínimo	Valor máximo
Magnitud de tensión en la fuente	0.95 p.u.	1.10 p.u.
Desbalance de tensión en la fuente	-3.4°	3.4°
Magnitud de la carga	10%	150%
Factor de potencia	-0.02	0.02
Longitud de los alimentadores	95%	105%
Frecuencia del sistema	59.8 Hz	60.2 Hz

En [17], se describe la metodología utilizada para la variación de parámetros, la cual consiste en utilizar la técnica de muestreo Latin Hypercube que tiene como principal característica ser independiente del modelo que se está analizando. Esta técnica genera un conjunto reducido que representa completamente el espacio total. Posteriormente, para complementar esta técnica de muestreo se utiliza un algoritmo de búsqueda Tabú, el cual maximiza la distancia entre los puntos, para garantizar una distribución uniforme del espacio muestreado.

Posteriormente, se crea un número considerable de estados operativos con las variaciones mencionadas anteriormente y se obtiene una base de datos para evaluar de forma intensiva el desempeño de los localizadores. Para todas las pruebas de este estudio, se realizaron todos los tipos de fallas mencionados anteriormente con resistencias de falla entre 0 y 40  $\Omega$ .

El desempeño de los algoritmos de localización de fallas propuestos se mide a través del indicador conocido en la literatura como error absoluto, el cual permite cuantificar el error en la localización a través de la expresión (4.1).

$$Error_{abs}[\%] = \frac{D_{Real} - D_{calculated}}{L_{Total}} * 100\% \quad (4.1)$$

Donde  $D_{Real}$  es la distancia real desde la subestación hasta el nodo en falla,  $D_{calculated}$  corresponde a la distancia estimada por el localizador y  $L_{Total}$  es la longitud total del radial equivalente.

Por otro lado, se define el indicador de desempeño que se muestra en (4.2), con el objetivo de analizar el error en la localización en el estado transitorio. Además, este indicador es útil para conocer el error promedio de la localización de fallas.

$$Average\ error\ [\%] = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Error_{abs}[\%]_i)^2} \quad (4.2)$$

### **4.3 Escenarios de prueba para el algoritmo descrito la sección 3.1.**

#### **4.3.1 Primer escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.1, en condición de operación nominal, con modelos dinámicos de carga de recuperación exponencial en todos los nodos del sistema. Adicionalmente, el localizador de fallas también considera el modelo de recuperación exponencial y localiza la falla en cada instante de tiempo, con el objetivo de analizar el estado estable y transitorio de las señales del sistema. El tiempo en el que se realiza la falla es de  $t = 0.06 \text{ s}$ , por lo tanto, las gráficas se desarrollan desde este tiempo hasta alcanzar el estado estable.

#### **4.3.2 Segundo escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.1, con 10 condiciones operativas diferentes, variando los parámetros por medio de la herramienta de simulación automática de fallas que se expuso en la sección 4.2.

En este caso, el sistema de prueba considera el modelo dinámico de recuperación exponencial. Mientras que el localizador utiliza el modelo estático de impedancia constante. Esto se hace con el objetivo de tener una referencia para la evaluación del desempeño del localizador con el modelo dinámico.

#### **4.3.3 Tercer escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.1, con la misma base de datos del escenario anterior.

En este caso, tanto el sistema de prueba como el localizador consideran el modelo dinámico de recuperación exponencial. Esto se hace con el fin de evaluar el desempeño de la técnica propuesta.

#### **4.3.4 Cuarto escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.1, en donde se realizan variaciones individuales a los parámetros descritos en la sección 4.2. En este caso, solamente se realizan fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas a tierra con  $R_f = 20 \Omega$ , con el objetivo de analizar la influencia que tienen los parámetros en el desempeño del método de localización de fallas, y así realizar un análisis de sensibilidad de la técnica.

#### **4.3.5 Análisis de resultados para el algoritmo descrito en la sección 3.1.**

De acuerdo con las figuras 4.4 a), b) y c), el error en la localización de fallas depende del tiempo de adquisición de datos. Estos datos representan el comportamiento de la potencia consumida por la carga representada mediante un modelo dinámico. Los resultados muestran que el desempeño del localizador es mejor en el estado transitorio que en el estado estable. Los errores promedio de este escenario son de [0.2%, 0.1%], [0.25%, 0.7%] y [0.1%, 0.8%] para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, respectivamente. En general, el método presenta bajos errores de localización.

En el segundo escenario se presenta el caso en donde el localizador no considera la dinámica de la carga, pero el sistema de potencia tiene un comportamiento inherentemente dinámico. Los resultados para este escenario se presentan en la figura 4.5 a), b), c), el rango de error más grande está entre -8.0% a 6.0 % para fallas monofásicas. Esto indica que a pesar de que el localizador considera un modelo estático de impedancia constante, los errores en la localización están en un rango aceptable.

En el tercer escenario el localizador de fallas considera la dinámica de la carga. En este caso y de acuerdo con la figura 4.6, cuando el localizador considera la dinámica de la carga el error es menor que cuando considera un modelo estático. Considerando que el máximo rango de error obtenido en este escenario está entre -1.0% y 3.0%, se puede concluir que una buena representación del sistema de potencia mejora el desempeño del localizador de fallas.

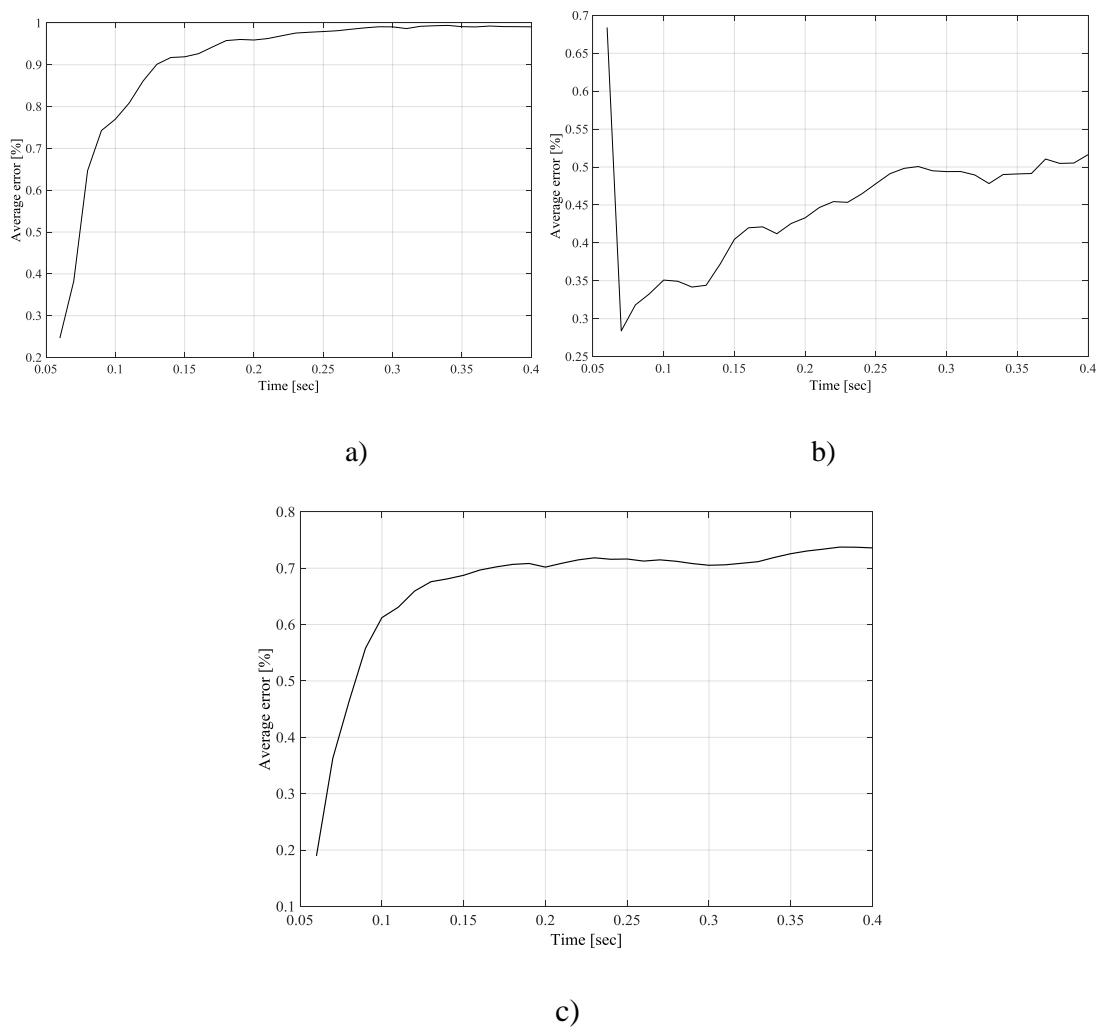


Figura 4.4. Error promedio en la localización de fallas para cada instante de tiempo en el caso de a) Fallas monofásicas, b) Fallas bifásicas, c) Fallas trifásicas. Sistema y localizador de fallas con carga nominal y el modelo dinámico de recuperación exponencial. Primer escenario.

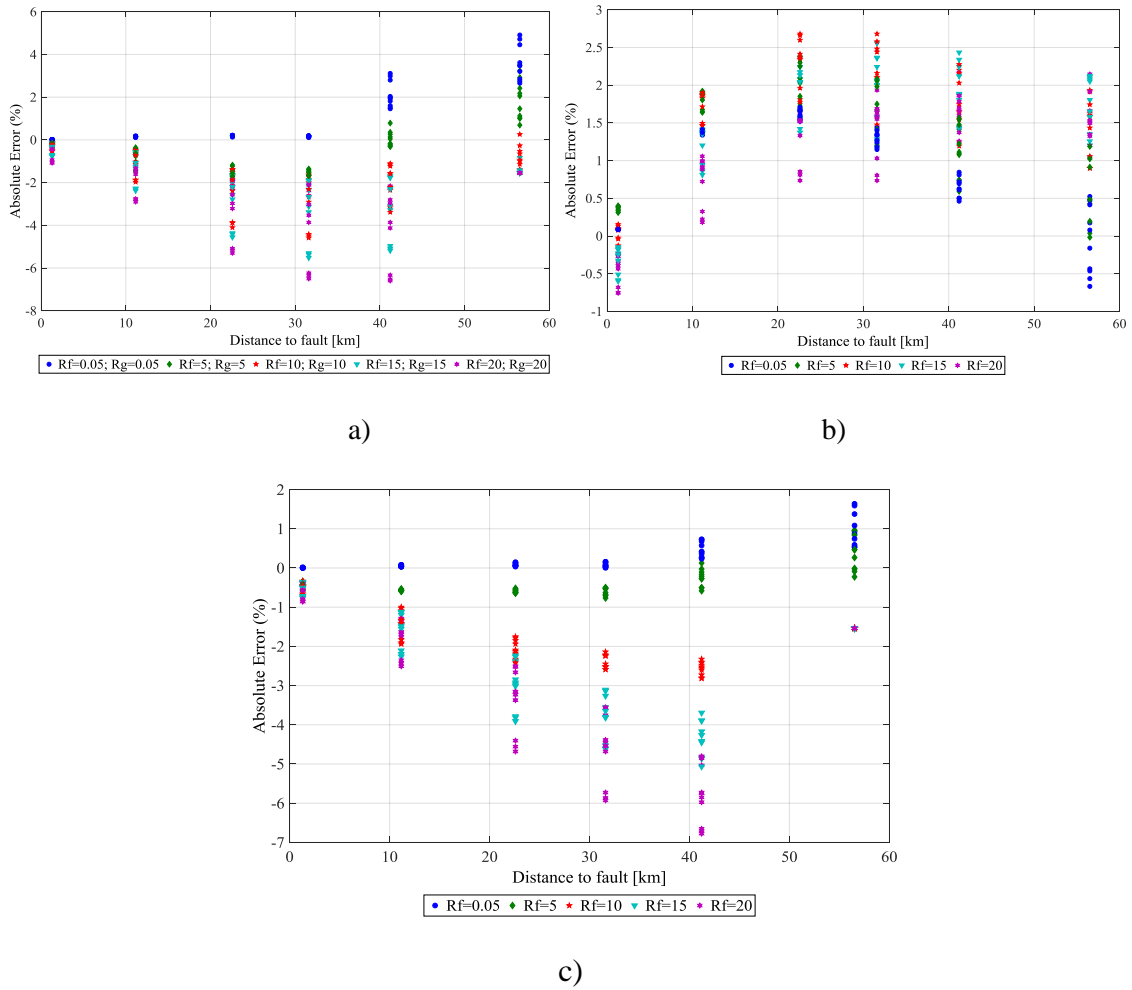
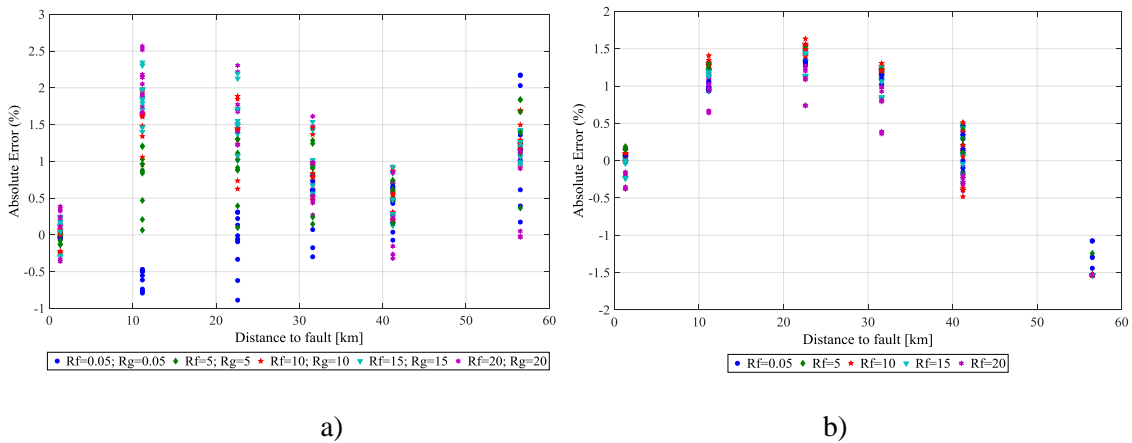
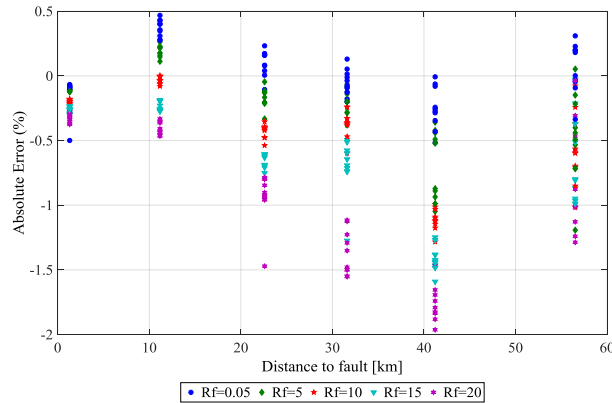


Figura 4.5. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla trifásica, y 10 condiciones operativas diferentes para el sistema con el modelo de carga de recuperación exponencial. Mientras que el localizador de fallas considera un modelo estático de carga. Segundo escenario.







c)

Figura 4.6. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla trifásica, y 10 condiciones operativas diferentes para el sistema con el modelo de carga de recuperación exponencial. El localizador de fallas también considera el modelo dinámico. Tercer escenario.

#### 4.3.6 Análisis de sensibilidad para el algoritmo descrito en la sección 3.1.

En este caso, se realizaron variaciones en cada uno de los parámetros del sistema y se obtuvieron los resultados para el cuarto escenario de prueba descrito en la sección 4.3.4. Los resultados se resumen en la tabla 4.2, en donde se observa que la variación de parámetros afecta el desempeño del localizador de fallas. Para el caso de la variación de carga, un incremento en la magnitud de la carga, produce un mayor error en la localización para las fallas monofásicas y bifásicas. Por otro lado, la variación en la configuración de la línea y la frecuencia del sistema, no afectan el desempeño de la técnica. Estos, fueron algunos de los casos más representativos en la variación de parámetros. Sin embargo, la tabla 4.2, permite observar fácilmente la sensibilidad del algoritmo ante todas las variaciones.

Tabla 4.2. Resultados de la variación de parámetros del Sistema de acuerdo a la tabla 4.1.

Type of test	[Minimum_Maximum] error (%)		
	Single phase fault	Double phase fault	Three phase fault
Load increase (120%)	[-0,35_0,1]	[-1,3_1,5]	[0_0,35]
Load decrease (80%)	[-0,2_0,15]	[-1,53_0,8]	[-0,5_0,2]
Power factor increase (0.02)	[-0,3_0,4]	[-1,3_1]	[-0,06_0,06]
Power factor decrease (-0.02)	[-0,3_0,1]	[-1,32_0,8]	[-0,2_0,05]
Voltage magnitude increase (1.1 p.u.)	[-0,6_0,1]	[-1,3_1]	[-0,04_0,03]
Voltage magnitude decrease (0.95 p.u.)	[-0,25_0,25]	[-1,3_1]	[-0,16_0,04]
Frequency increase (60.2 Hz)	[-0,35_0,05]	[-1,35_0,6]	[-0,12_0,06]
Frequency decrease (59.8 Hz)	[-0,35_0,05]	[-1,35_0,6]	[-0,12_0,06]
Positive voltage unbalance (3.4°)	[-0,3_0,2]	[-1,4_1,0]	[-0,12_0,04]

Negative voltage unbalance (-3.4°)	[-0,25_0,1]	[-1,4_1,0]	[-0,12_0,08]
Equilateral Configuration	[-0,25_0,15]	[-1,4_1,0]	[-0,12_0,06]
Horizontal Configuration	[-0,25_0,15]	[-1,4_1,0]	[-0,12_0,06]
Vertical Configuration	[-0,25_0,15]	[-1,4_1,0]	[-0,12_0,06]

#### **4.4 Escenarios de prueba para el algoritmo descrito en la sección 3.2.**

##### **4.4.1 Primer escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.2, con un generador distribuido en el nodo 836 y con 10 condiciones operativas diferentes, variando los parámetros por medio de la herramienta de simulación automática de fallas que se expuso en la sección 4.2.

En este caso, el sistema de prueba considera el modelo estático híbrido descrito anteriormente. Mientras que el localizador utiliza el modelo estático de impedancia constante.

##### **4.4.2 Segundo escenario.**

En este caso, se utiliza la misma base de datos del escenario anterior, pero tanto el sistema de prueba como el localizador de fallas consideran el modelo estático híbrido.

##### **4.4.3 Tercer escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.2, con generadores distribuidos en los nodos 824 y 836 y con 10 condiciones operativas diferentes, variando los parámetros por medio de la herramienta de simulación automática de fallas que se expuso en la sección 4.2.

En este caso, tanto el sistema de prueba como el localizador de fallas consideran el modelo híbrido.

##### **4.4.4 Cuarto escenario.**

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.2, en donde se realizan variaciones individuales a los parámetros descritos en la sección 4.2. En este caso, solamente se realizan fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas a tierra con  $R_f=20 \Omega$ , con el objetivo de analizar la influencia que tienen los parámetros en el desempeño del método de localización de fallas, y así realizar un análisis de sensibilidad de la técnica.

##### **4.4.5 Análisis de resultados para el algoritmo descrito en la sección 3.2.**

En el primer escenario todos los tipos de fallas presentan errores en un intervalo menor de [-10%, 10%]. Este intervalo es mayor que si solo se considerara la condición nominal del sistema de potencia, debido a que las incertidumbres en los parámetros afectan el desempeño del localizador. Sin embargo, la técnica presenta un desempeño adecuado debido a que se consideran fuertes variaciones en los parámetros del sistema.

En el segundo escenario, para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, se presentan errores menores que en el escenario anterior, debido a que el localizador tiene una representación más realista del sistema de potencia, considerando el modelo híbrido en la técnica de localización de fallas. Los resultados muestran la robustez de la técnica propuesta en el caso de altas incertidumbres asociadas al tamaño de carga, resistencia de falla, desbalance en la fuente, factor de potencia y frecuencia fundamental.

En el tercer escenario, todos los tipos de fallas presentan menores errores que los dos escenarios previos, debido a que se cuenta con la presencia de dos generadores distribuidos que cuentan con mediciones de tensión y corriente. De esta manera, es posible obtener una mejor estimación de las señales de tensión y corriente en todas las secciones del sistema.

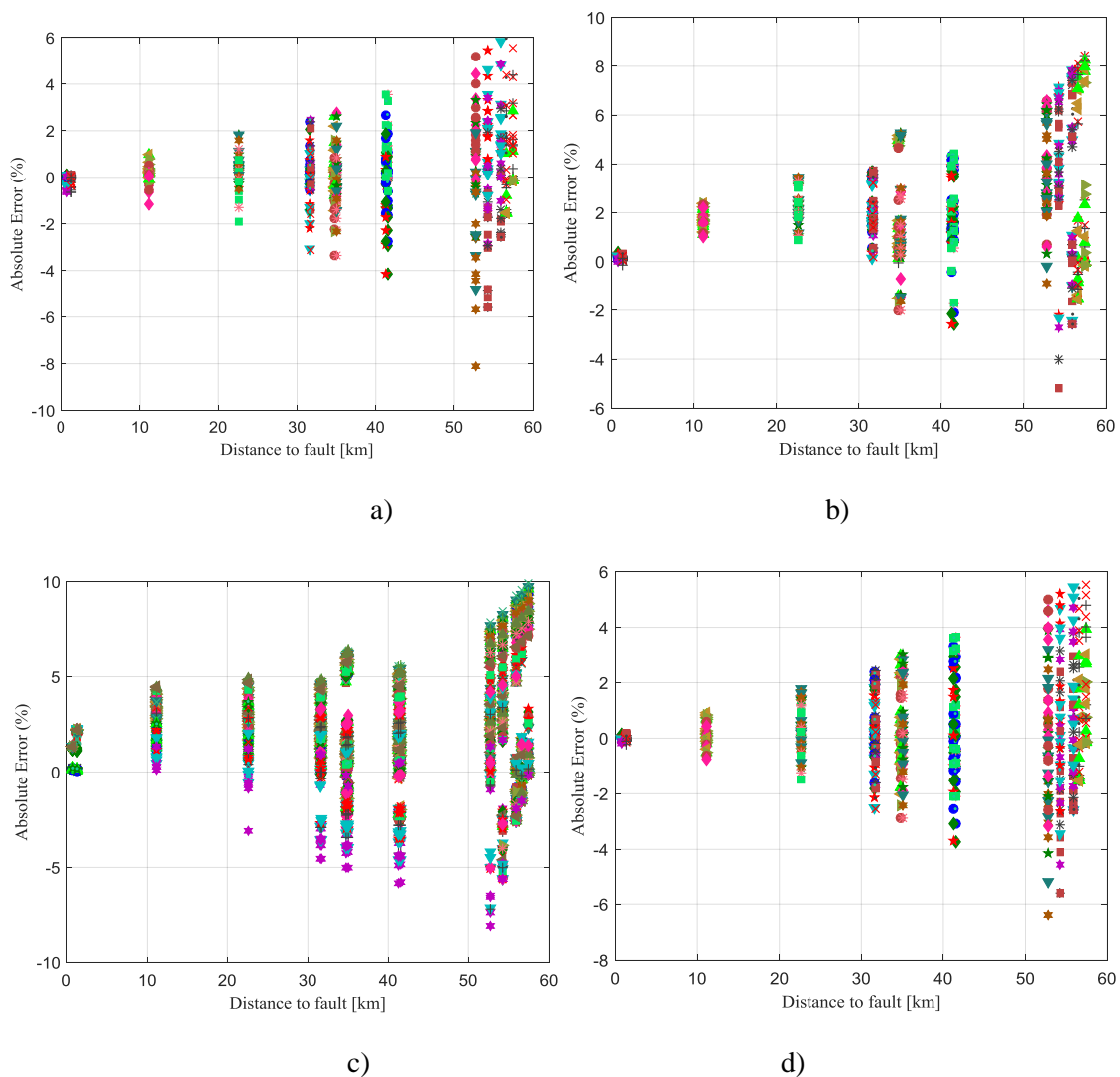


Figura 4.7. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla bifásica a tierra, d) falla trifásica. Primer escenario.

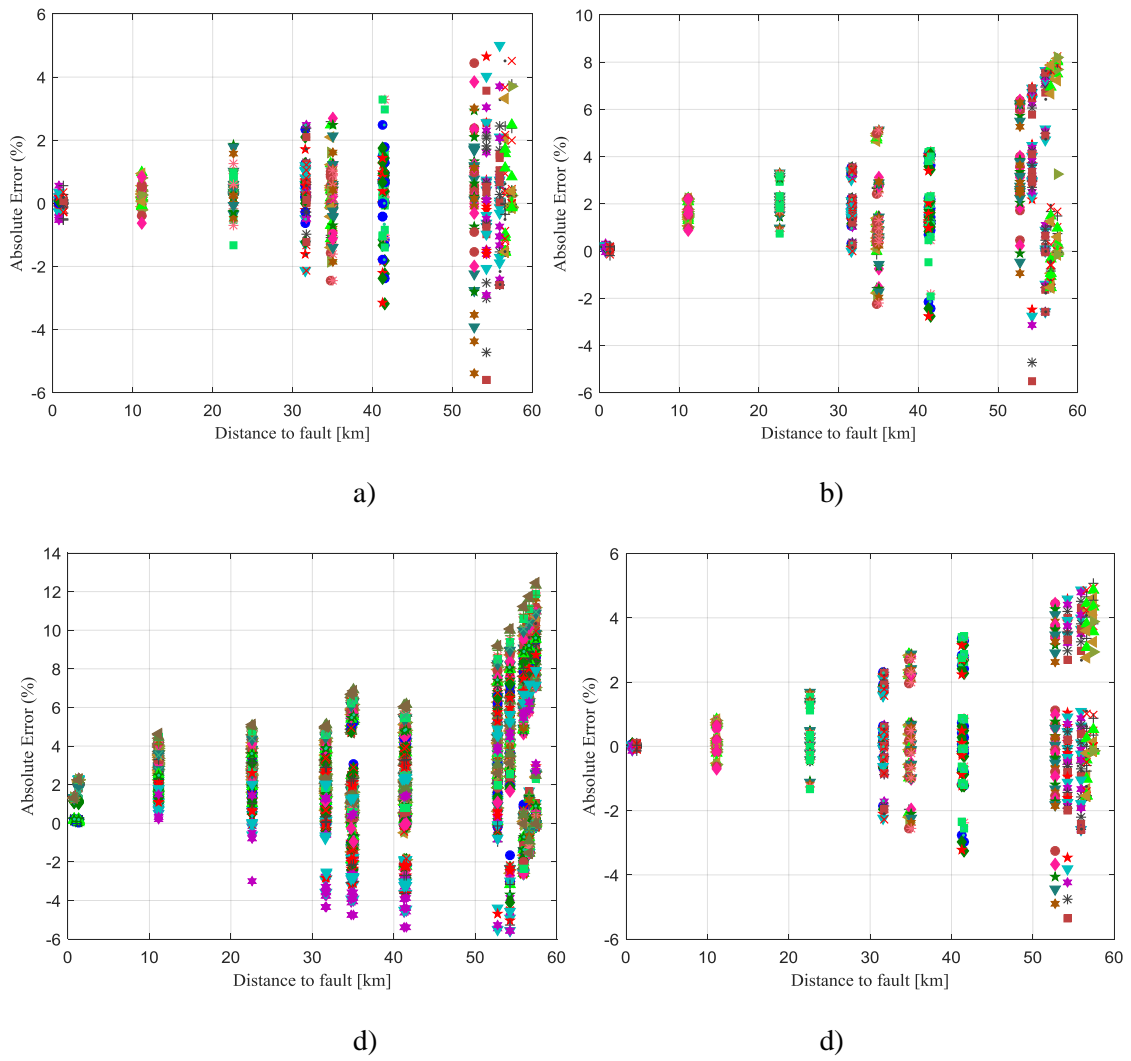
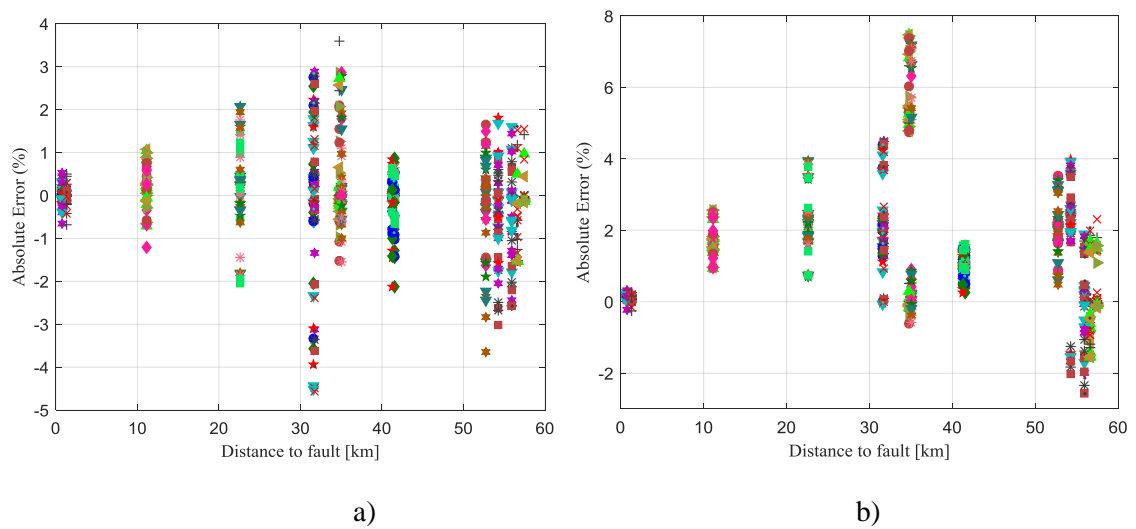


Figura 4.8. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla bifásica a tierra, d) falla trifásica. Segundo escenario



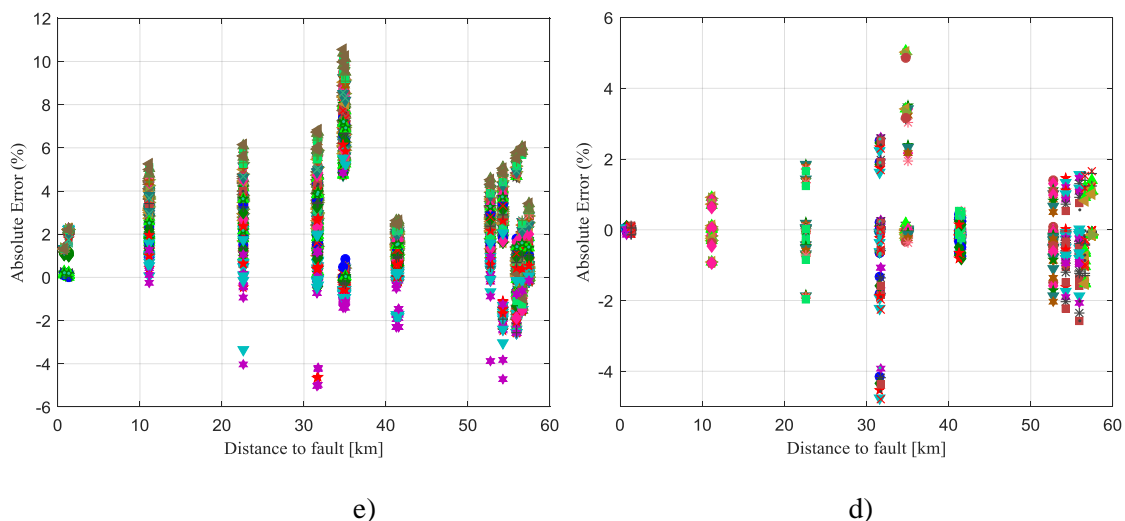


Figura 4.9. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla bifásica a tierra, d) falla trifásica. Tercer escenario

#### 4.4.6 Análisis de sensibilidad para el algoritmo descrito en la sección 3.2.

En este caso, se realizaron variaciones en cada uno de los parámetros del sistema y se obtuvieron los resultados para el cuarto escenario de prueba descrito en la sección 4.4.4. Los resultados se resumen en la tabla 4.3, en donde se observa que la variación de parámetros afecta el desempeño del localizador de fallas. Para este algoritmo, a diferencia del anterior, un incremento del 150% de la carga, produce un menor error que una magnitud de la carga al 10%. Por otro lado, al igual que en el caso anterior, la configuración de las líneas no afectan el desempeño de la técnica. Estos, fueron algunos de los casos más representativos en la variación de parámetros. Sin embargo, la tabla 4.3, permite observar fácilmente la sensibilidad del algoritmo ante todas las variaciones.

Finalmente, la consideración de incertidumbre en los parámetros del sistema permite desarrollar técnicas de localización de fallas más robustas que respondan ante condiciones más realistas del sistema.

Tabla 4.3. Resultados de la variación de parámetros del Sistema de acuerdo a la tabla 4.1.

Type of test	[Minimum-Maximum] error (%)			Average error (%)		
	Single phase fault	Phase to phase fault	Three phase fault	Single phase fault	Phase to phase fault	Three phase fault
Load increase	[-3_0]	[0_3]	[0_0,35]	-1,5	1,5	0,175
Load decrease	[0_5]	[0_5]	[0_1]	2,5	2,5	0,5
Power factor increase	[0_4]	[0_5]	[0_0,8]	2	2,5	0,4
Power factor decrease	[-1,8_0]	[0_3,5]	[-0,05_0,35]	-0,9	1,75	0,15
Voltage magnitude increase	[0,2_1,8]	[0_3,5]	[0_0,35]	1	1,75	0,175
Voltage magnitude decrease	[0,2_1,8]	[0_3,5]	[0_0,35]	1	1,75	0,175

Frequency increase	[-0,1_0,9]	[0_3,5]	[0_0,7]	0,4	1,75	0,35
Frequency decrease	[-0,2_1,2]	[0_3]	[0_0,7]	0,5	1,5	0,35
Equilateral Configuration	[0_1,4]	[0_3,5]	[0_0,7]	0,7	1,75	0,35
Horizontal Configuration	[0_1,4]	[0_3,5]	[0_0,7]	0,7	1,75	0,35
Vertical Configuration	[0_1,4]	[0_3,5]	[0_0,7]	0,7	1,75	0,35
Positive voltage unbalance	[0_1,4]	[0_3,5]	[0_0,5]	0,7	1,75	0,25
Negative voltage unbalance	[0_1,4]	[0_3,5]	[0_0,7]	0,7	1,75	0,35

#### 4.5 Escenarios de prueba para el algoritmo robusto de localización de fallas

En esta sección se muestran los resultados del método de localización de fallas considerando modelos estáticos y dinámicos de carga en el sistema de distribución con generación distribuida de la figura 4.3.

##### 4.5.1 Primer escenario.

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.3, en condición de operación nominal, con modelos dinámicos de carga de recuperación exponencial y modelo compuesto de carga, además se consideran modelos estáticos de impedancia constante, corriente constante, potencia constante y modelo híbrido en el sistema. El sistema de prueba tiene presencia de generación distribuida en los nodos 824 y 836. Adicionalmente, el localizador de fallas también considera los modelos estáticos y dinámicos de carga y localiza la falla en cada instante de tiempo, con el objetivo de analizar el estado estable y transitorio de las señales del sistema.

##### 4.5.2 Segundo escenario.

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.3, con 10 condiciones operativas diferentes, variando los parámetros por medio de la herramienta de simulación automática de fallas que se expuso en la sección 4.2.

En este caso, el sistema de prueba considera los modelos dinámicos y estáticos de carga. Mientras que el localizador utiliza el modelo estático de impedancia constante. Esto se hace con el objetivo de tener una referencia para la evaluación del desempeño del localizador con el modelo dinámico.

##### 4.5.3 Tercer escenario.

En este escenario se utiliza el sistema de prueba de la figura 4.3, con la misma base de datos del escenario anterior.

En este caso, tanto el sistema de prueba como el localizador consideran los modelos estáticos y dinámicos de carga. Esto se hace con el fin de evaluar el desempeño de la técnica propuesta.

##### 4.5.4 Análisis de resultados para el algoritmo robusto de localización de fallas.

De acuerdo con las figuras 4.10 a), b) y c), el error en la localización de fallas también depende del tiempo de adquisición de datos como se vio en la sección 4.3. Los errores promedio de este escenario son de [0.5%, 5.5%], [0.4%, 1.4%] y [0%, 3%] para fallas

monofásicas, bifásicas y trifásicas, respectivamente. En general, el método presenta bajos errores de localización.

En el segundo escenario se presenta el caso en donde el localizador no considera la dinámica de la carga, pero el sistema de potencia contiene diferentes modelos de carga estáticos de impedancia constante, corriente constante, potencia constante, modelo híbrido, modelos dinámicos de recuperación exponencial y el modelo compuesto de carga. Los resultados para este escenario se presentan en la figura 4.11 a), b), c), el rango de error más grande está entre -4.0% a 5.0 % para fallas monofásicas. Esto indica que a pesar de que el localizador considera un modelo estático de impedancia constante, los errores en la localización están en un rango aceptable.

En el tercer escenario el localizador de fallas considera todos los modelos de carga presentes en el sistema de potencia. En este caso y de acuerdo con la figura 4.12, cuando el localizador considera la dinámica de la carga el error es menor que cuando considera solamente el modelo estático de impedancia constante. Considerando que el máximo rango de error obtenido en este escenario está entre 0% y 4.0%, se puede concluir que una buena representación del sistema de potencia mejora el desempeño del localizador de fallas así como se mencionó en la sección 4.3.

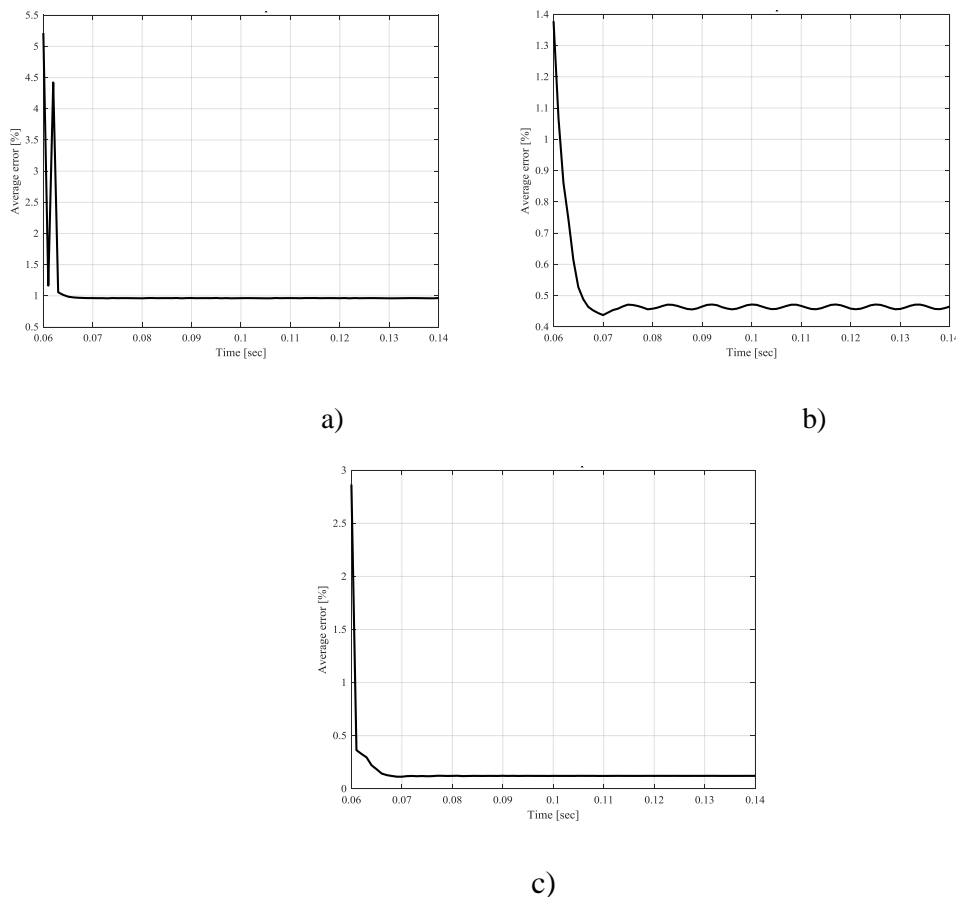


Figura 4.10. Error promedio en la localización de fallas para cada instante de tiempo en el caso de a) Fallas monofásicas, b) Fallas bifásicas, c) Fallas trifásicas. Sistema y localizador de fallas con carga nominal y el modelo dinámico de recuperación exponencial, modelo compuesto, modelos ZIP. Primer escenario.

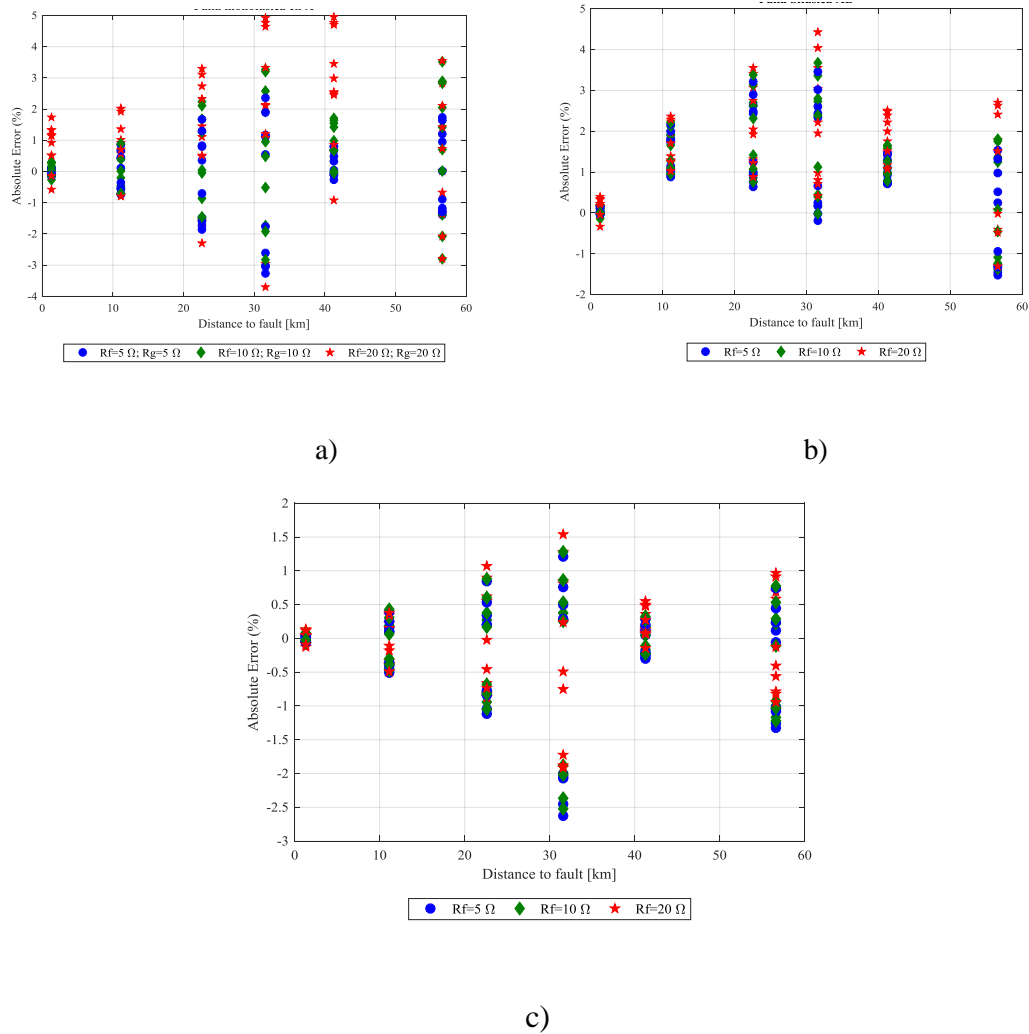
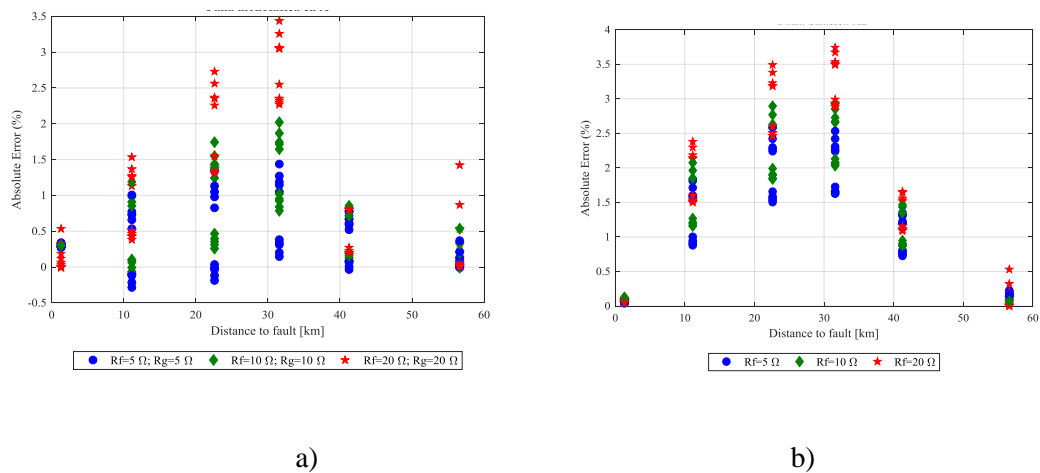
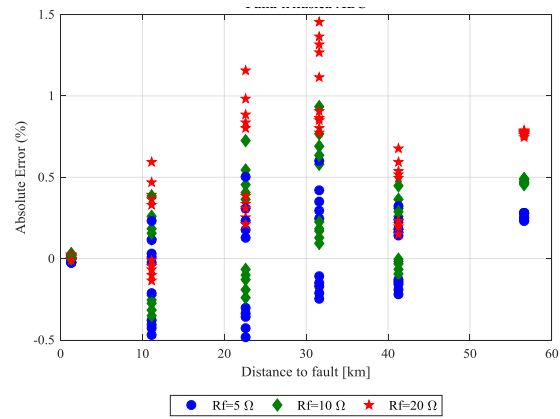


Figura 4.11. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica, b) falla bifásica, c) falla trifásica, y 10 condiciones operativas diferentes para el sistema con el modelo de carga de recuperación exponencial, modelo compuesto, modelos ZIP. Mientras que el localizador de fallas considera un modelo estático de carga. Segundo escenario.







c)

Figura 4.12. Curva de desempeño en el caso de: a) falla monofásica a tierra, b) falla bifásica a tierra, c) falla trifásica a tierra, y 10 condiciones operativas diferentes para el sistema con el modelo de carga de recuperación exponencial, modelo compuesto, modelos ZIP. El localizador de fallas también considera los modelos dinámicos y estáticos de carga. Tercer escenario.

## Capítulo 5

### 5. Conclusiones

Respecto al análisis de los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas a lo largo de esta investigación, se presentan las principales conclusiones y trabajos futuros

#### 5.1 Conclusiones generales

La localización de fallas en sistemas de distribución de energía permite mejorar la calidad del suministro, y por ende, mejorar los índices de calidad por parte de los operadores de la red. Los métodos propuestos en este trabajo fueron probados en sistemas con características similares a las de los circuitos reales, con incertidumbres como: variaciones en el modelo, factor de potencia, tamaño y desbalance de la carga, longitud de los alimentadores, calibre de los conductores, variaciones en la configuración de la línea, variación en el nivel de tensión, impedancia equivalente en la subestación, efecto capacitivo, cargas monofásicas y trifásicas, conexiones de carga en delta y en estrella y diferentes condiciones operativas que representan las variaciones aleatorias en el sistema. Adicionalmente, en esta tesis se considera la inclusión de fuentes renovables de energía en los sistemas de distribución.

La metodología propuesta, permite realizar un análisis de localización de fallas en el dominio del tiempo que considera modelos dinámicos de carga. Esta técnica utiliza dos barridos diferentes: un barrido en el dominio del tiempo y uno en el dominio fasorial, con el objetivo de incluir el comportamiento dinámico de la carga dentro del localizador de fallas. Además, se consideran variaciones en los parámetros del sistema para representar escenarios de prueba más realistas y validar la robustez de la técnica. Los resultados muestran que el desempeño del localizador de fallas mejora cuando se tiene en cuenta el comportamiento dinámico del sistema, debido a que se cuenta con una representación más real del sistema. Por otra parte, la prueba intensiva valida la robustez del algoritmo, con errores en la localización de las fallas dentro de un rango aceptable, ante las fuertes perturbaciones simuladas en el sistema.

La propuesta incluye adicionalmente los modelos estáticos de carga y la generación distribuida dentro del localizador de fallas. Este algoritmo funciona para múltiples unidades de generación distribuida por medio de un barrido de medidas aguas abajo y otro aguas arriba. Además, se consideran diferentes modelos de carga dentro del sistema y el localizador de fallas, lo cual mejora el desempeño del localizador al contar con una representación más realista del sistema. La técnica fue probada con las variaciones de parámetros mencionadas anteriormente. De acuerdo con los resultados, el desempeño obtenido por el método es aceptable, considerando que se localizan fallas en un sistema con radiales de hasta 57 km de longitud. Adicionalmente, estos resultados y el análisis de la técnica, permiten concluir que el incremento de unidades de generación distribuida a lo largo del sistema, mejora el desempeño del localizador de fallas, debido a que se cuenta con medidas adicionales en el sistema. Por lo tanto, se obtienen resultados más precisos de los barridos iterativos.

Finalmente, el análisis de sensibilidad de los algoritmos propuestos, permite concluir que algunos parámetros del sistema como la configuración de la línea, la frecuencia del sistema, principalmente, no afectan el desempeño del localizador de fallas. De otra parte, la incertidumbre en otros parámetros como el tamaño de la carga, el error en la longitud de la línea y el desbalance de la tensión en la fuente, entre otros, pueden aumentar el error en la localización de las fallas. Por lo tanto, es necesario considerar los rangos de variación asociados con las incertidumbres que se tienen en los parámetros de los sistemas reales. La metodología propuesta, permite realizar un análisis más adecuado y preciso de la localización de fallas en sistemas de distribución de energía.

## **5.2 Trabajos futuros**

Teniendo en cuenta el trabajo desarrollado y los logros alcanzados, se proponen como trabajos futuros de investigación:

- a) Incluir modelos de carga que estén calibrados con mediciones de los sistemas de potencia reales, con el objetivo de tener un sistema de prueba con todas las características de uno real, para realizar el análisis de localización de fallas
- b) Realizar un estudio detallado de las nuevas fuentes de energía, con todas sus características para desarrollar una mejor representación en el sistema y en el localizador.
- c) Incluir los modelos de cargas modernas en el sistema de potencia y el localizador de fallas.

## Bibliografía

- [1] J. J. Mora, "Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos Basados en el Conocimiento," Tesis Doctoral, Universidad de Girona, España. 2006.
- [2] P. M. Anderson. "Analysis of faulted power systems". Wiley-IEEE press. 1995.
- [3] C. Crozier, W. Wisdom, "A power quality and reliability index based on customer interruptions costs" Power Engineering Review, IEEE. Vol 19, Issue 4, April 1999. Pages 59-61.
- [4] IEEE Std 37.114, IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines, Power System Relaying Committee 2004.
- [5] Das, R. "Determining the locations of Faults in distribution systems" Doctoral Thesis University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, spring 1998.
- [6] A. Bedoya.; J. Mora, S. Pérez. "Extended application of a sequence impedance based fault location technique applied to power distribution systems" Dyna rev.fac.nac.minas vol.80 no.179 Medellín May/June 2013.
- [7] German Morales E., J. Mora, H. Vargas. "Método de Localización de Fallas en Sistemas de Distribución Basado en Gráficas de la Reactancia". Scientia et Technica XIII, no.33, pp.49-54, Mayo, 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [8] Panesso-Hernández, Andres Felipe, Juan Mora-Flórez, and Sandra Pérez-Londoño. "Complete power distribution system representation and state determination for fault location." Dyna 82.192 (2015): 141-149.
- [9] Orozco-Henao, Cesar, Mora-Flórez Juan José, and Pérez-Londoño Sandra, "estrategia iterativa de ajuste de carga aplicada a localización de fallas en sistemas de distribución de energía (iterative strategy to adjust the system load applied for locating faults in power distribution)." (2013).
- [10] Mehrdad, T.; Mousa, H.; Sanaz, A., "A novel phase to phase fault location algorithm for distribution network with distributed generation," CIRED Workshop – Lisbon, 2012.
- [11] Herrera-Orozco, A.; Perez-Londoño, S.; Mora-Florez, J., "Load modeling for fault location in distribution systems with distributed generation," in Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES , vol., no., pp.1-8, 3-5 Sept. 2012.
- [12] Cristian Grajales E., "Método Robusto de Localización de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución con Generación Distribuida", Tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2014.
- [13] Laura Román M., "Método de Localización de Fallas Considerando el Efecto de la Carga, para Sistemas de Distribución de Energía con Generación Distribuida", Tesis de pregrado Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2014.
- [14] Mora, J.,J.; Bedoya, J.,C.; Melendez, J., "Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power Distribution Systems." Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES , vol., no., 15-18, Aug. 2006, pp.1-6.
- [15] Mora-Flórez, J.J.; Herrera-Orozco, R.A.; Bedoya-Cadena, A.F. "Fault location considering load uncertainty and distributed generation in power distribution systems," Generation, Transmission & Distribution, IET. vol. 9, no 3, pp. 287 - 295, February 2015.
- [16] Murcia, Laura Melissa Román, Juan José Mora Florez, and Sandra Pérez Londoño. "Método de localización de fallas considerando el efecto de la carga, para sistemas de distribución de energía con Generación Distribuida." Energética 45 (2015): 117-122.
- [17] González, Natalia Alzate, Sandra Pérez Londoño, and Juan José Mora Florez. "Sensitivity analysis of fault locators in power distribution systems considering distributed generation." Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica-SICEL. Vol. 8.

- [18] Cadena, Andrés Bedoya, Juan Mora Flórez, and Sandra Pérez Londoño. "Aplicación extendida de una técnica de impedancia de secuencia a la localización de fallas en sistemas de distribución." *Dyna* 80.179 (2013): 157-164.
- [19] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [20] García, Luis Fernando Rodríguez, Sandra Milena Pérez Londoño, and Juan José Mora Flórez. "Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas." *Scientia et Technica* 18.3 (2013): 453-462.
- [21] J. Shi and R.-M. He, "Measurement-based load modelling model structure," in *Proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf.*, p. 5 pp.
- [22] Karlsson, Danlel, and David J. Hill. "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems." *Power Systems, IEEE Transactions on* 9.1 (1994): 157-166.
- [23] Zill D., G., (1997). "Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado". Book. Sixth edition.
- [24] Gonen, Turan. *Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design*. CRC Press, 2011.
- [25] Herrera Orozco, Andrés Ricardo. "Análisis de los efectos de la variación de los parámetros del modelo de línea, de carga y de fuente, en la localización de fallas en sistemas de distribución." (2013).
- [26] Romero I., N., (2002). *Dynamic Load Models for Power Systems, Estimation of Tyme-Varying Parameters During Normal Operation*. Doctoral thesis. Departament of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden.
- [27] Dagenhart, J. (2000). "The 40ohms ground-fault phenomenon", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), p 30-32
- [28] Load representation for dynamic performance analysis [of power systems]," in *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.8, no.2, pp.472-482, May 1993
- [29] Brahma, S.M. "Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation" *Power Delivery, IEEE Transactions on*. vol. 26, no 3, pp. 1545 - 1553, February 2011.
- [30] Salim, R.; Salim, K.; Bretas, A., "Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems," *IET Gener. Transm. Distrib*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 467–478, 2011.
- [31] Salim, R.; Resener, M.; Darós, A.; Rezende, K.; Bretas, A., "Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 24, No. 2, 2009.