



Universidad  
Tecnológica  
de Pereira

**MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS MONOFÁSICAS A  
TIERRA DE ALTA IMPEDANCIA EN SISTEMAS RADIALES DE  
DISTRIBUCIÓN**

**Cristian Camilo Ortiz Quintero**

**Universidad Tecnológica de Pereira  
Facultad de ingenierías  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Pereira  
2013**

**MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS MONOFÁSICAS A  
TIERRA DE ALTA IMPEDANCIA EN SISTEMAS RADIALES DE  
DISTRIBUCIÓN**

**Cristian Camilo Ortiz Quintero**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniero electricista**

**Director:**

**PhD. Juan José Mora Flórez**

**Universidad Tecnológica de Pereira  
Facultad de ingenierías: Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación  
Programa de Ingeniería Eléctrica  
Pereira  
2013**

**MÉTODO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS MONOFÁSICAS A  
TIERRA DE ALTA IMPEDANCIA EN SISTEMAS RADIALES DE  
DISTRIBUCIÓN**

**Calificación**

---

---

**PhD. Juan José Mora**

**Director**

---

**Jurado**

---

---

**Msc. Alberto Ocampo**

**Director del programa de maestría  
en ingeniería eléctrica**

## *Agradecimientos*

*Agradezco primero que todo a Dios. Él ha traído tantas cosas hermosas a mi vida, que una simple dedicatoria, sería poco. Me dio una familia que todos los días me ha apoyado, han estado conmigo en los momentos difíciles y alegres, unos compañeros que han estado ahí cuando he necesitado una frase de apoyo, unos profesores que me han guiado por el camino del conocimiento, en fin, son tantas personas que han estado en esos momentos de dificultad y de alegría, que una simple hoja no alcanzaría para nombrarlos, pero pueden estar seguros, que aunque sus nombres falten sobre este papel, no faltan en mi corazón y en mi mente, y por siempre estaré agradecido.*

*Hay dos nombres, que por su incondicional compañía y su apoyo moral, son de resaltar. Mis padres Jorge Eliécer Ortiz y Yormegnery Quintero Londoño, que han estado en cada día de mi vida, y merecen un reconocimiento especial en todo este trayecto.*

## Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	9
CAPÍTULO 1 .....	7
1.    Introducción.....	7
1.1. Definición del problema .....	7
1.2. Propuesta de solución.....	8
1.3. Aportes del proyecto .....	9
1.4. Publicaciones relevantes .....	10
1.5. Motivación.....	10
1.6. Objetivos .....	12
1.6.1. Objetivo general .....	12
1.6.2. Objetivos específicos.....	12
1.7. Estructura del documento.....	12
CAPÍTULO 2 .....	14
2.    Aspectos teóricos.....	14
2.1. Introducción.....	14
2.2. Programas utilizados.....	14
2.3. Metodología propuesta por Salim considerando los efectos capacitivos [SALI, 2008].	15
2.3.1. Cálculo de los parámetros de un segmento de línea trifásica. ....	15
2.3.2 Fallas a tierra. ....	17
2.3.3. Solución físicamente correcta .....	20
CAPÍTULO 3 .....	21
3.    Desarrollo de la metodología propuesta .....	21
3.1.    Introducción .....	21
3.2. Fundamentación de la metodología.....	22
3.2.1. Modelo de la línea larga en un sistema de distribución.....	23
3.2.2 Determinación de la solución físicamente correcta.....	25
3.2.3. Acumulación de la carga. ....	26
3.2.4. Actualización de la tensión y de la corriente.....	28

3.2.5. Algoritmo propuesto para localización de fallas a tierra de alta impedancia.....	31
CAPÍTULO 4 .....	35
4. Aplicación de la metodología propuesta. ....	35
4.1. Introducción .....	35
4.2. Sistema de distribución de prueba IEEE de 34 nodos.....	35
4.3. Descripción de las pruebas e indicador del desempeño .....	36
4.3.1. Escenarios de prueba.....	37
4.4. Visualización de resultados y Análisis del rendimiento.....	38
4.4.1. Escenario 1: Circuito IEEE de 34 nodos a condiciones nominales.....	38
4.4.2. Escenario 2: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 30% y 60% de su valor nominal.....	40
4.4.3. Escenario 3: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 60% y 120% de su valor nominal.....	42
4.4.4. Escenario 4: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 100% y 150% de su valor nominal.....	44
CAPÍTULO 5 .....	47
5. Conclusiones.....	47
CAPÍTULO 6 .....	49
6.1. Recomendaciones.....	49
6.2 Trabajos futuros .....	50
CAPÍTULO 7 .....	51
7. Anexos.....	51
8. BIBLIOGRAFIA.....	57

# CAPÍTULO 1

## 1. Introducción

### 1.1. Definición del problema

Los sistemas eléctricos de potencia permanecen expuestos constantemente a fallas que afectan la confiabilidad y provocan la interrupción del suministro eléctrico a los usuarios. Con ello se origina un deterioro en la calidad de la energía. Diferentes eventos que ocasionan problemas en la confiabilidad del sistema pueden ocurrir, tales como descargas atmosféricas, caída de árboles sobre líneas, ruptura del conductor, entre otros. Cada tipo de falla debe ser ubicada y despejada de manera rápida y despejada eficaz para así conseguir que hasta los usuarios más alejados reciban una energía de calidad (a niveles de tensión adecuados, con formas de onda correcta y continuidad en el servicio). En los últimos años se ha avanzado de manera considerable en las investigaciones, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías para corregir tales situaciones en las que se puede presentar un deterioro en la calidad de la energía. Sin embargo, aún hoy en día algunas empresas presentan métodos poco eficientes para la localización de una falla, uno de estos métodos es la inspección visual, lo cual genera una considerable inversión en la disponibilidad de cuadrillas para realizar esta labor. Esto no es conveniente debido a las nuevas políticas en cuanto a la continuidad de la energía y a los perjuicios económicos que conlleva el no cumplir con estos requisitos.

El problema de localización de fallas ha tomado una mayor importancia en los últimos años, lo anterior debido a las nuevas políticas referentes a la continuidad de la energía eléctrica [CREG, 2008]. En el año 2008 con la resolución 097, la comisión reguladora de energía y gas (CREG) establece que los cargos del sistema de distribución local, variarán según el índice de calidad del servicio prestado, esto es, el índice de referencia agrupado de la discontinuidad (IRAD) y el índice trimestral agrupado de la discontinuidad (ITAD), que cuantifican el periodo en el cual no existe continuidad en el servicio proporcionado por la empresa de energía. Al cumplir con estos índices, se permitirá un aumento en los cargos por uso o si por el contrario existe un deterioro en la calidad del servicio, se podrá penalizar a las empresas obligando a éstas a bajar los cargos por uso a los usuarios. Debido a esto, la localización rápida de fallas en el sistema de distribución de energía se ha convertido en una necesidad para las empresas, ya que de esa manera se puede evitar el pago de penalizaciones.

La localización de fallas de alta impedancia se ha convertido en un problema de difícil análisis, debido a que ésta puede ser fácilmente confundida con un incremento normal en

la carga y el aumento en la magnitud de la corriente de falla es tan pequeño que no puede ser detectado por los dispositivos de sobrecorriente convencionales. Las causas más comunes de este tipo de fallos en los sistemas de potencia son la generación de arcos eléctricos por el desgaste de los aislamientos de la línea y el contacto de objetos cercanos tales como árboles, cercas u otro tipo de superficies cercana al conductor. Estos elementos ya mencionados pueden generar un peligro evidente para la población debido al riesgo de una posible exposición a la corriente eléctrica, así como el daño de algunos elementos del sistema de distribución.

## **1.2. Propuesta de solución**

Para la realización de este proyecto, se planea comenzar con un amplio estudio de publicaciones recientes (publicaciones hechas hace 5 años o menos) en el tema de localización de fallas de alta impedancia en sistemas de distribución. Estos documentos se encuentran en la base de datos de la página de la Universidad Tecnológica de Pereira, y están disponibles para estudiantes de esta institución. También se estudiarán otro tipo de artículos en la búsqueda de material teórico que pueda ayudar en el desarrollo del método de localización, así como los libros usados para la realización de éstos, ya que en muchos casos no es suficiente con entender lo publicado en el documento, se necesita comprender a profundidad muchas de las deducciones encontradas. Una vez realizada una exhaustiva investigación en los respectivos documentos, se seleccionará un método, el cual cumpla con las necesidades del proyecto a tratar, como por ejemplo, que sea eficaz, y que los resultados obtenidos posean errores bajos. Esto se discutirá con el director y asesor de esta investigación para obtener su aprobación.

Posteriormente se programará el método seleccionado con ayuda de la herramienta computacional MATLAB®. Una vez se haya realizado la programación del algoritmo, se pasará a realizar las respectivas pruebas mediante simulaciones, con el fin de encontrar las deficiencias y fortalezas del método.

Con el objetivo de analizar qué tan eficaz es el método, se deben estimar los errores, y si se requiere, se tendrá que hacer las mejoras necesarias para que el método tenga un desempeño adecuado.

Una vez se consiga que el programa sea eficaz y se pueda comparar con los resultados obtenidos en otros desarrollos referentes a proyectos de este tipo en que los errores alcanzados hayan sido bajos, éste será presentado al director y asesor del proyecto.

Se utilizará el programa para simulación de fenómenos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia ATP/EMTP, y con la herramienta desarrollada por el grupo de calidad de la energía y estabilidad-ICE<sup>3</sup> [MORA,2012], se obtendrá la reducción de un



circuito radial ramificado a circuitos radiales equivalentes, y así extender un algoritmo desarrollado para circuitos con cargas intermedias a uno que posea cargas laterales. Por medio del software *ATPeXchange*, se obtienen los parámetros del circuito de manera organizada y lista para utilizar en MATLAB®.

Finalmente, en muy pocos algoritmos propuestos para la localización de fallas se han considerado los efectos capacitivos de las líneas, debido a sus valores tan pequeños. De lo anterior, surge la propuesta de una nueva estrategia con el fin de solucionar el problema de localización de fallas monofásicas a tierra de alta impedancia incorporando estos efectos.

### **1.3. Aportes del proyecto**

Este proyecto de grado contiene los siguientes aportes para la localización de fallas en sistemas de distribución:

Una estrategia que permite incluir los efectos capacitivos de todo el sistema de distribución. Además, al utilizar esta metodología se consiguen muy buenos resultados en la localización de fallas. Incluso cuando se realizan simulaciones en las que se presentan resistencias de falla de muy altos valores, los errores alcanzados fueron considerablemente bajos.

Para el desarrollo de la metodología de localización de fallas, es necesario utilizar una ecuación de segundo orden que se analizará en otros capítulos. En la metodología propuesta se tiene en cuenta todos los posibles resultados para esta ecuación, que como se sabe, tiene dos soluciones. Por lo tanto, se presenta la necesidad de encontrar una que sea la físicamente correcta. Una vez se consideran todas las posibilidades para la solución a esta expresión, se consigue un mejor desempeño en la metodología. Al establecer que la solución sería compleja y dar como resultado la magnitud, la metodología consigue resultados incoherentes.

Un método de localización de fallas en el que se tienen en cuenta escenarios donde la carga no está a condición nominal, algo que se acerca aún más a lo que se tiene en un sistema de distribución real. Las pruebas se realizan con resistencias de falla de hasta 200  $\Omega$  y los resultados alcanzados fueron buenos. De esta manera se puede analizar el desarrollo propuesto de manera más completa.

La propuesta realizada permite el análisis del comportamiento de la metodología en sistemas desbalanceados, ya que se realizan simulaciones de fallas en las tres fases que involucran tierra.

#### **1.4. Publicaciones relevantes**

En el recorrido por diferentes artículos y documentos, se han encontrado diferentes estrategias, que según las pruebas han resultado ser eficientes. En [MORA, 2011] se muestran tres métodos de localización de fallas, los cuales se estudiarán como primer paso para determinar la manera de relacionar lo allí expuesto con el desarrollo a proponer. En [SEPP, 2001] se encuentra una tesis doctoral en donde se discuten dos eficientes métodos para la localización de fallas de alta impedancia. Por otro lado, en [BARR, 2009] se encuentra un método que utiliza la impedancia aparente para analizar diferentes tipos de falla, a distintas distancias y con altos valores de resistencias de falla. En [BRET, 2010] se presenta un método donde se propone incluir los efectos capacitivos de la línea en los cálculos, lo cual no se había realizado en anteriores investigaciones. Esto puede mejorar considerablemente la metodología y se tiene la oportunidad de localizar fallas de alta impedancia. [SALI, 2008], es una tesis donde se encuentra todo el desarrollo teórico del método explicado en [BRET, 2010], además, en [KERS, 2002] y en [ANDE, 1995], se puede profundizar acerca de las deducciones desarrolladas en el documento. En [MORA, 2012], se presenta la forma de llevar un circuito radial ramificado a circuitos radiales equivalentes. En [BRET, 2006] se encuentra otro método que puede ser útil en el estudio a implementar. Este tiene poca información referente a lo que se desea realizar, pero se puede encontrar una buena fundamentación teórica en el proceso de localización de fallas. En [RICH, 2011] se realizan una serie de pruebas en redes de baja tensión, que permite identificar una falla de alta impedancia y encontrar el lugar donde ocurre. Y para finalizar en [CREG, 2008] se encuentra la reglamentación existente en Colombia según la comisión reguladora de energía y gas (CREG), en ella están las normas para penalizar a las empresas en el momento que exista un incumplimiento de los índices de continuidad del servicio. Este muestra la importancia de realizar la localización de fallas de manera eficiente, para que así ésta pueda ser despejada de manera rápida.

#### **1.5. Motivación**

Muchas metodologías han sido estudiadas para estimar la localización de fallas a tierra de alta impedancia, se han conseguido realizar algoritmos en los cuales se obtiene una estimación aproximada de la ubicación exacta en donde ésta se presentó. Una vez que se conoce la ubicación de la falla y dependiendo la característica de ésta, se podrán tomar acciones correctivas para restaurar el servicio.

En caso de presentarse fallas permanentes de alta impedancia, y estas al ser detectadas por el sistema de protección, se pueden realizar dos acciones correctivas:

- 1) Efectuar una reconexión inmediata del ramal bajo falla, lo cual puede ocasionar un riesgo a las personas o al equipo en caso de que la falla permanezca.
- 2) Enviar personal calificado a buscar la falla y verificar el estado de las líneas con el fin de realizar la reconexión. Esto tarda mucho tiempo e impacta negativamente el ITAD y el IRAD.

En ambas acciones correctivas, se observa la necesidad de desarrollar una herramienta eficiente para la localización de este tipo de fallas.

Pueden existir también fallas transitorias como el contacto de líneas con árboles o arcos debido al desgaste de los aislamientos, que a diferencia de las permanentes no pueden ser localizadas realizando una simple inspección. Ante estas fallas un localizador puede detectar puntos débiles en el sistema de energía y realizar acciones correctivas. Para tales tareas se utilizan dispositivos que son muy costosos y no funcionan eficientemente debido a que la corriente de falla no presenta mayores incrementos y se tiene un cambio de tensión uniforme en toda la red.

Varios métodos de detección incluyendo indicadores luminosos y relés a tierra están disponibles comercialmente, sin embargo, la falta de una corriente significativa de falla hace complicada la búsqueda de la misma. Además, estos dispositivos presentan un alto costo.

Los algoritmos para localización de fallas basados en la reactancia aparente utilizados comúnmente en relés digitales pueden obtener errores significativos en la estimación del punto donde ocurrió la falla de alta impedancia como se muestra en [EBER, 2000]. Los modernos relés numéricos tienen mejoras en protección de redes por estimación de fasores de tensión y corriente y el procesamiento digital de señales. Éstos mejoran el desempeño para la detección, identificación y localización de fallas. Otros métodos utilizan señales de alta frecuencia y ondas viajeras que requieren una búsqueda exhaustiva utilizando medidores portátiles para rastrear la señal de registro inyectada desde la fuente, con el fin de localizar la falla.

Todos estos métodos mencionados, en general requieren la inserción de equipos de alta tecnología con un alto grado de complejidad que son representados en un alto costo para los sistemas de protección, razón por la cual se buscan nuevas metodologías de bajo costo de implementación para la localización de fallas.

Con el fin de mejorar la calidad en el servicio eléctrico, y de corregir algunas de las deficiencias anteriormente descritas, se realiza una propuesta para la localización de fallas a tierra de alta impedancia en sistemas de distribución. Esta propuesta consiste en un algoritmo que se analizará y comparará con los ya realizados en otros estudios, para así

revisar su eficiencia y confrontar los resultados obtenidos. Para validar el método desarrollado, se utiliza el sistema IEEE de 34 nodos.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo general**

Desarrollar un algoritmo eficiente con el cual se pueda localizar fallas monofásicas a tierra de alta impedancia en un sistema de distribución radial.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- Revisar y discutir las referencias disponibles en las que se ha estudiado la localización de fallas de alta impedancia en sistemas de distribución radiales.
- Seleccionar el mejor método para el desarrollo del algoritmo según las recomendaciones del tutor, y considerando la bibliografía analizada.
- Desarrollar la metodología que integre y mejore la técnica escogida para conseguir la solución al problema propuesto.
- Implementar la metodología propuesta en el lenguaje computacional MATLAB®.
- Calcular el desempeño del método para los propósitos de localización de fallas monofásicas de alta impedancia.
- Reportar los resultados obtenidos de la investigación, y posteriormente confrontar estos con los de otros trabajos realizados.
- Plasmar en un documento la investigación realizada.

## **1.7. Estructura del documento**

Este documento está conformado por siete capítulos, en los cuales se explica de manera detallada los pasos seguidos para su realización.

El capítulo uno describe el problema de localización de fallas sobre el cual se va a profundizar, allí se comentan algunas metodologías antes tratadas y se da una propuesta para llegar a la solución del problema. También se encuentra una motivación para su realización y los beneficios que trae el encontrar una solución adecuada.

En el segundo capítulo se presenta la fundamentación teórica asociada al método de localización propuesto.

El capítulo tres explica detalladamente la metodología utilizada para resolver el problema de localización de fallas monofásicas a tierra de alta impedancia. También se describen algunas consideraciones realizadas para estimar mucho mejor la distancia a la que ocurrió el tipo de contingencia analizado.

En el capítulo cuatro, a partir de simulaciones de fallas en el circuito IEEE34, se valida la metodología propuesta. El desempeño del método propuesto se analiza por medio de un indicador de error que se obtiene para diferentes escenarios y resistencias de falla.

El capítulo cinco contiene las conclusiones más relevantes a las que se llega después de probar la metodología y analizar los resultados obtenidos.

El capítulo seis muestra que a pesar de que se logran buenos resultados, el método presenta temas de análisis y en los que se debe tener cuidado. Además, quedan temas sobre los cuales profundizar, lo cual podrá ser estudiado en investigaciones futuras.

El capítulo siete corresponde a un anexo donde se muestran los gráficos de pruebas realizadas, que no fueron incluidas en el capítulo 4.

## CAPÍTULO 2

### 2. Aspectos teóricos

#### 2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos más importantes en el desarrollo de la estrategia propuesta para dar una solución al problema de localización de fallas monofásicas a tierra de alta impedancia, este capítulo se divide en dos secciones.

En la sección 2.2, se describen los programas utilizados para el desarrollo de este proyecto de grado. Estas herramientas son de vital importancia para la solución del problema propuesto, ya que simplifica considerablemente muchos de los cálculos que se requieren. Lo cual es útil al momento de realizar el análisis de cualquier circuito, así como para otras tareas importantes en esta investigación. La sección 2.3 explica la metodología base que se utilizó para obtener buenos resultados, este documento fue de gran importancia para el desarrollo del método propuesto.

#### 2.2. Programas utilizados.

Las metodologías de localización de fallas que se fundamentan en la estimación de la impedancia requieren medidas de tensión y de corriente en estado de prefalla y durante la falla en la subestación (S/E). Para esto se utilizó una de las herramientas desarrolladas en el grupo de investigación de calidad de energía y estabilidad-ICE<sup>3</sup> en MATLAB®, denominada *simulacionRf*. Este software se encarga de simular fallas de diferentes tipos con distintos valores de resistencias de falla y en diferentes nodos de un circuito simulado en ATP. *simulacionRf* Entrega esta información en un archivo llamado descriptores.

Por ser un software gratuito y de fácil uso, Todos los circuitos de prueba analizados en el grupo de investigación están modelados en el software ATP. Al ejecutar un circuito simulado en *ATPDraw*, se genera un archivo de texto con la información del circuito. Este archivo, es llevado a la herramienta *ATPeXchange* desarrollada en MATLAB® por el mismo grupo ya antes mencionado, este programa extrae, procesa, organiza la información del sistema y la almacena en un formato estándar [BEDO, 2013].

Con el fin de tener en cuenta la incertidumbre que se presenta en la carga, se utiliza la herramienta *Hvaprincipal*, desarrollada en MATLAB por el mismo grupo. Dicha herramienta es de bastante utilidad, ya que permite considerar escenarios para la localización de fallas en los que se varía la carga del sistema, tal como se presenta en un sistema de distribución real [MARI, 2012].

### 2.3. Metodología propuesta por Salim considerando los efectos capacitivos [SALI, 2008].

#### 2.3.1. Cálculo de los parámetros de un segmento de línea trifásica.

La figura 2.1 muestra un segmento de línea entre los nodos  $K$  y  $K+1$ .

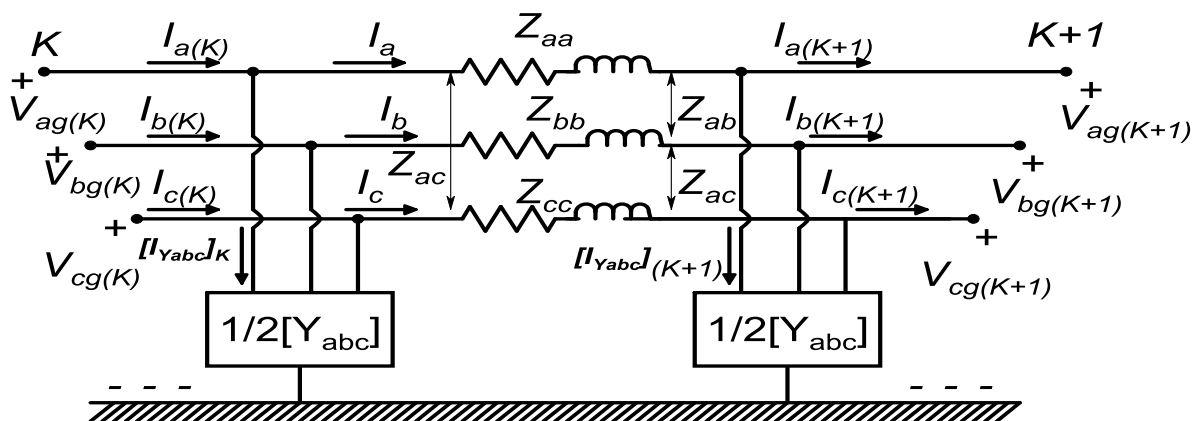


Figura 2.1. Modelo trifásico de línea larga.

Aplicando la teoría de circuitos en el modelo de línea presentado en la figura 2.1, es posible obtener la ecuación (2.1) [KERS, 2002].

$$[V_{abc}]_K = \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [V_{abc}]_{K+1} + \{ [Z_{abc}] \} [I_{abc}]_{K+1} \quad (2.1)$$

Donde:

$[U]$ : Matriz identidad de  $3 \times 3$ .

$[V_{abc}]_{K+1}$ : Voltaje trifásico en el nodo  $K+1$ .

$[I_{abc}]_{K+1}$ : Corriente trifásica en el nodo  $K+1$ .

$[V_{abc}]_K$ : Voltaje trifásico en el nodo  $K$ .

$[Z_{abc}]$ : Matriz de impedancia serie de línea en  $[\Omega/\text{km}]$ .

$[Y_{abc}]$ : Matriz de admitancia shunt en  $[\text{S}/\text{km}]$ .

La expresión (2.1) se puede reescribir como se muestra en (2.2).

$$[V_{abc}]_K = a * [V_{abc}]_{K+1} + b * [I_{abc}]_{K+1} \quad (2.2)$$

Donde,

$$a = \left\{ [U] + \frac{1}{2} * l^2 [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} \quad (2.3)$$

$$b = \{ l * [Z_{abc}] \} \quad (2.4)$$

$l$  : Longitud total del segmento de línea analizado.

Siguiendo el análisis presentado en [KERS, 2002], es posible obtener (2.5).

$$[I_{abc}]_K = \left\{ [Y_{abc}] + \frac{1}{4} [Y_{abc}] [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [V_{abc}]_{K+1} + \dots + \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} [I_{abc}]_{K+1} \quad (2.5)$$

Donde,

$[I_{abc}]_K$ : Corriente trifásica en el nodo  $K$ .

La expresión (2.5) se puede reescribir como se presenta en (2.6).

$$[I_{abc}]_K = c * [V_{abc}]_{K+1} + d * [I_{abc}]_{K+1} \quad (2.6)$$

Donde,

$$c = \left\{ l * [Y_{abc}] + \frac{1}{4} * l^3 [Y_{abc}] [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} \quad (2.7)$$

$$d = \left\{ [U] + \frac{1}{2} * l^2 [Z_{abc}] [Y_{abc}] \right\} \quad (2.8)$$

Las expresiones (2.2) y (2.6) pueden ser reescritas de forma matricial como se muestra en (2.9).

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_K \\ [I_{abc}]_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_{K+1} \\ [I_{abc}]_{K+1} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A partir de (2.9) se desea encontrar los voltajes en el nodo  $K+1$ . La inversa de la matriz de parámetros de la línea de la ecuación (2.9) es simple, ya que el determinante es la matriz identidad, con lo que se llega a (2.10).

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_{K+1} \\ [I_{abc}]_{K+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [d] & -[b] \\ -[c] & [a] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_K \\ [I_{abc}]_K \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Se debe tener en cuenta, que las impedancias y admitancias de las líneas, están multiplicadas por unidad de longitud [km]. Los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  fueron definidos en (2.3), (2.4), (2.7) y (2.8) respectivamente.

Al resolver el arreglo matricial y considerando que  $a$  y  $b$  son iguales, se llega a las expresiones (2.11) y (2.12).



$$[V_{abc}]_{k+1} = [a] * [V_{abc}]_k - [b] * [I_{abc}]_k \quad (2.11)$$

$$[I_{abc}]_{k+1} = -[c] * [V_{abc}]_k + [d] * [I_{abc}]_k \quad (2.12)$$

### 2.3.2 Fallas a tierra.

En la figura 2.2 se presenta un modelo generalizado para fallas que involucran tierra. La expresión que relaciona el voltaje y la corriente en el punto de falla, está dada por la expresión (2.13) [ANDE, 1995].

$$\begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{fa} + Z_{fg} & Z_{fg} & Z_{fg} \\ Z_{fg} & Z_{fb} + Z_{fg} & Z_{fg} \\ Z_{fg} & Z_{fg} & Z_{fc} + Z_{fg} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Donde:

$V_{jf}$ : Tensión en el punto en falla de la fase  $j$ .

$I_{jf}$ : Corrientes de falla en la fase  $j$ .

$Z_{fjg} \forall j = a, b, c$ : Impedancias de falla de la fase  $j$  a tierra dada en  $[\Omega/\text{km}]$

En la ecuación (2.13), las únicas corrientes que tienen un valor diferente de cero, son aquellas donde la fase se encuentra bajo falla. Tal como se presenta en la figura 2.2.

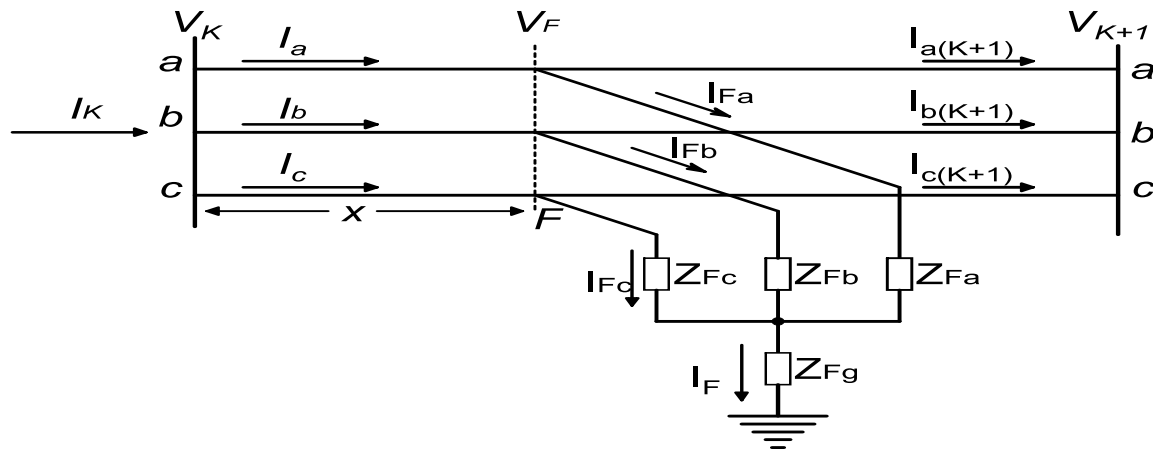


Figura 2.2. Esquema general de una línea de distribución sometida a un fallo a tierra.

Para una falla localizada a una distancia  $x$ , donde  $x$ , es un valor normalizado entre 0 y 1, la ecuación (2.11) puede ser reescrita como se muestra en (2.14) y obtener una expresión para el voltaje en el punto de fallo.

$$[V_f] = [a] * [V_K] - [b] * [I_K] \quad (2.14)$$

Al reemplazar (2.13) en (2.14), y realizar algunas operaciones matemáticas, se obtiene una expresión para cada fase en falla (2.15).

$$[Z_{fj}] * [I_{fj}] + [Z_{fg}] * [I_f] = [V_{sj}] + \frac{1}{2} * x^2 * [M_j] - x * [N_j] \quad (2.15)$$

En la expresión (2.15),  $j$  representa en número de fases en falla. Al realizar el análisis en el punto de fallo,  $x$  toma el valor de la longitud total del segmento de línea analizado  $l$ . En la misma expresión,  $I_f$  representa la suma de corrientes de todas las fases en falla. Además, se introducen dos nuevos términos ( $M_j$  y  $N_j$ ), que son definidos en las ecuaciones (2.16) y (2.17) respectivamente.

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ka} \\ V_{Kb} \\ V_{Kc} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} N_a \\ N_b \\ N_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Ka} \\ I_{Kb} \\ I_{Kc} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La expresión (2.18) corresponde a un sistema de  $n$  ecuaciones, donde  $n$  representa el número de fases en falla. Esta ecuación se divide en parte real e imaginaria. Los subíndices  $r$  e  $i$  representan la parte real e imaginaria respectivamente. Para realizar este análisis, las impedancias de falla se consideran puramente resistivas.

$$R_{fj} * I_{fr} + R_{fg} * I_{fr} - X_{fg} * I_{fi} = V_{Kjr} + x^2 * 0.5 * M_{jr} - x * N_{jr} = T_{jr} \quad (2.18)$$

$$R_{fj} * I_{ji} + R_{fg} * I_{fi} + X_{fg} * I_{fr} = V_{Kji} + x^2 * 0.5 * M_{ji} - x * N_{ji} = T_{ji} \quad (2.19)$$

El anterior sistema resulta de  $2n$  ecuaciones con  $2n$  incógnitas. Esto, si se considera la impedancia de falla junto con la distancia  $x$ , como variables desconocidas. El término  $T_j$ , se incluye en la expresión con el objetivo de simplificar la escritura.

En las ecuaciones (2.18) y (2.19), se consideran las resistencias de cada fase en falla conocidas, y al despejar este valor, se obtiene un conjunto de  $n$  ecuaciones que son independientes de  $R_{fj}$  y dependientes de  $x$ ,  $R_{fg}$  y  $X_{fg}$ .

$$R_{fj} = \frac{1}{I_{fjr}} [T_{kr} - R_{fg} * I_{fr} + X_{fg} * I_{fi}] = \frac{1}{I_{fji}} [T_{ki} - R_{fg} * I_{fi} - X_{fg} * I_{fr}] \quad (2.20)$$

Reescribiendo (2.20), se obtiene para cada fase en falla, la siguiente expresión:

$$R_{fg} * \left[ -\frac{I_{fr}}{I_{fjr}} + \frac{I_{fi}}{I_{fji}} \right] + X_{fg} * \left[ \frac{I_{fi}}{I_{fjr}} + \frac{I_{fr}}{I_{fji}} \right] + \left[ \frac{T_{jr}}{I_{fjr}} - \frac{T_{ji}}{I_{fji}} \right] = 0 \quad (2.21)$$

Al multiplicar (2.21) por  $(I_{fjr} * I_{fji})$ , y después de un desarrollo algebraico de números complejos, se obtiene (2.22).

$$R_{fg} * Imag\{I_{fj} * I_f^*\} - X_{fg} * Real\{I_{fj} * I_f^*\} + [T_{jr} * I_{fji} - T_{ji} * I_{fjr}] = 0 \quad (2.22)$$

Donde las expresiones  $Real\{\}$  e  $Imag\{\}$  representan la parte real e imaginaria de los números complejos respectivamente. El superíndice  $*$  hace referencia a un complejo conjugado.

Es posible escribir una sola ecuación dada por la sumatoria del número de fases en falla.

$$R_{fg} * Imag\{I_f * I_f^*\} - X_{fg} * Real\{I_f * I_f^*\} + \sum_{j \in \Omega_j} [T_{jr} * I_{fji} - T_{ji} * I_{fjr}] = 0 \quad (2.23)$$

Se sabe que:

$$Imag\{I_f * I_f^*\} = Imag\{|I_f|^2\} = 0 \quad (2.24)$$

Además, si se considera que la falla tiene una impedancia puramente resistiva ( $X_{fg} = 0$ ), y se puede llegar a la expresión (2.25).

$$\sum_{j \in \Omega_j} [T_{jr} * I_{fji} - T_{ji} * I_{fjr}] = 0 \quad (2.25)$$

Finalmente, se reemplazan las ecuaciones (2.21) y (2.22) en (2.25), y después de un manejo algebraico, se obtiene una expresión generalizada para la localización de fallas a tierra (GFLE) [BRET, 2010].

$$x^2 * \left[ 0.5 * \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{M_j * I_{fj}^*\} \right] - x * \left[ \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{N_j * I_{fj}^*\} \right] + \dots \quad (2.26)$$

$$\dots + \left[ \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{V_{sj} * I_{fj}^*\} \right] = 0$$

Cabe resaltar, que con esta ecuación se puede estimar la localización de la falla conociendo los valores de tensiones y corrientes medidos en la subestación, los parámetros de la línea que en este caso son la impedancia serie y la admitancia en derivación también son necesarios. Para propósitos de esta investigación,  $x$  se define como un valor normalizado de la distancia desde el nodo de envío de la sección en análisis, hasta el punto en que ocurre la falla en el mismo segmento.

Ya que las corrientes de falla también son variables desconocidas, una formulación para considerar esta variable debe ser usada.

### 2.3.3. Solución físicamente correcta

La expresión (2.26) denominada (GFLE), es un polinomio cuadrático de segundo orden, que tiene como incógnita el valor de  $x$  que es la distancia a la falla y éste al ser un valor normalizado, se encuentra entre 0 y 1. La solución de esta expresión matemática, corresponde a dos respuestas de las cuales sólo existe una físicamente posible, la otra respuesta es sólo un razonamiento matemático. A continuación se muestran las posibles soluciones.

$$\beta_2 * x^2 + \beta_1 * x + \beta_0 = 0 \quad (2.27)$$

$$x = \begin{cases} \frac{-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 - 4 * \beta_2 * \beta_0}}{2 * \beta_2}, & \text{si } \beta_1 > 0 \\ \frac{-\beta_1 - \sqrt{\beta_1^2 - 4 * \beta_2 * \beta_0}}{2 * \beta_2}, & \text{si } \beta_1 < 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

Se dice que las soluciones complejas podrían surgir debido a modelado o medidas. Por otra parte, siempre y cuando esos errores se mantengan dentro de un límite aceptable, la solución será sólo compleja para un pequeño rango de valores de resistencia de falla. Bajo esas circunstancias, la distancia a la falla determinada es el valor absoluto de ambas soluciones [SALI, 2008].

## CAPÍTULO 3

### 3. Desarrollo de la metodología propuesta

#### 3.1. Introducción

Este capítulo trata de forma detallada la metodología propuesta e implementada para la localización de fallas a tierra de alta impedancia en sistemas de distribución radiales.

Con el objetivo de obtener buenos resultados, que posean errores bajos en fallas simuladas, donde la resistencia de falla tenga un valor considerablemente alto, se realiza esta propuesta. Que toma como base el método propuesto en [SALI, 2008], en el que se consideran los efectos capacitivos de un segmento de línea de distribución. Este método ya ha sido descrito en la sección 2.3, y en esta sección se realizan algunos complementos para conseguir un mejor desempeño.

Para la solución del problema propuesto se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La metodología a desarrollar, tiene como entradas los valores de impedancia serie de la línea y valores de admitancia en derivación. También se deben conocer los valores de tensión y corriente de prefalla y durante la falla medidos en la subestación. Además de ello, se conoce el valor de la resistencia de falla.
- Se conoce la existencia de una falla en el sistema de distribución radial y el punto exacto donde ésta ocurrió. Con el desarrollo del método, se pretende localizar la falla y confrontar la distancia encontrada con la distancia real, para así tener un referente y evaluar el desempeño del método propuesto.
- Se conoce el tipo de falla que se presenta. Para el desarrollo propuesto se requiere analizar las fallas monofásicas a tierra, en las que se incluye un valor de resistencia de falla considerablemente alto.
- Las fallas anteriormente descritas, son simuladas en el circuito IEEE34, desarrollado en el entorno del ATPDraw, el cual posee las características de un sistema de distribución radial típico.

### 3.2. Fundamentación de la metodología.

Para el desarrollo de la metodología de localización, es necesario obtener la información de los parámetros de cualquier circuito de distribución. Esta información es proporcionada por la herramienta de reducción de sistemas de distribución *ATPeXchange* descrita en [BEDO, 2013]. Posteriormente, se analiza un circuito radial equivalente. Se debe tener en cuenta que los ramales que se desprenden de algún nodo que pertenezca al radial en análisis, son almacenados como una carga asociada a los nodos de los que parten, y es denominado *EquivalenteSubCc*.

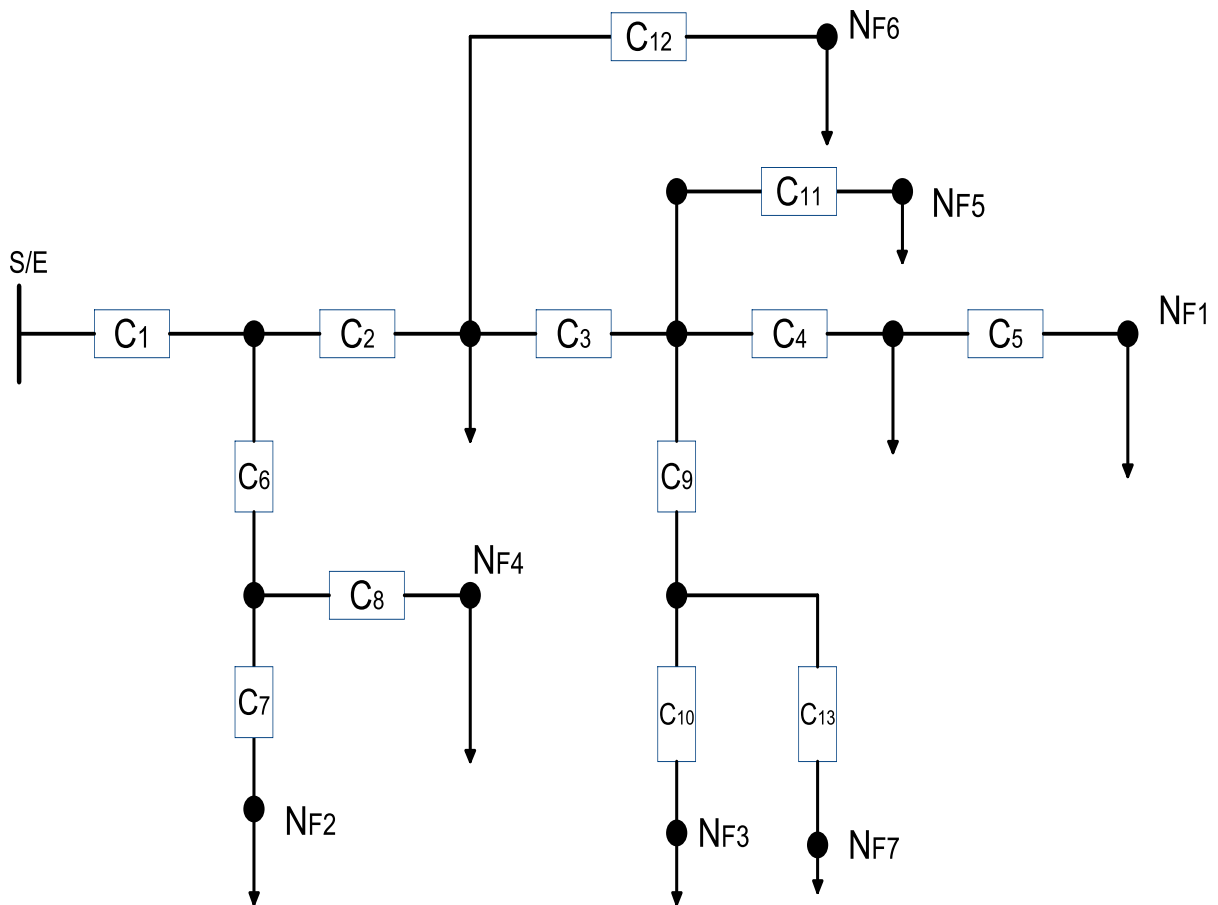


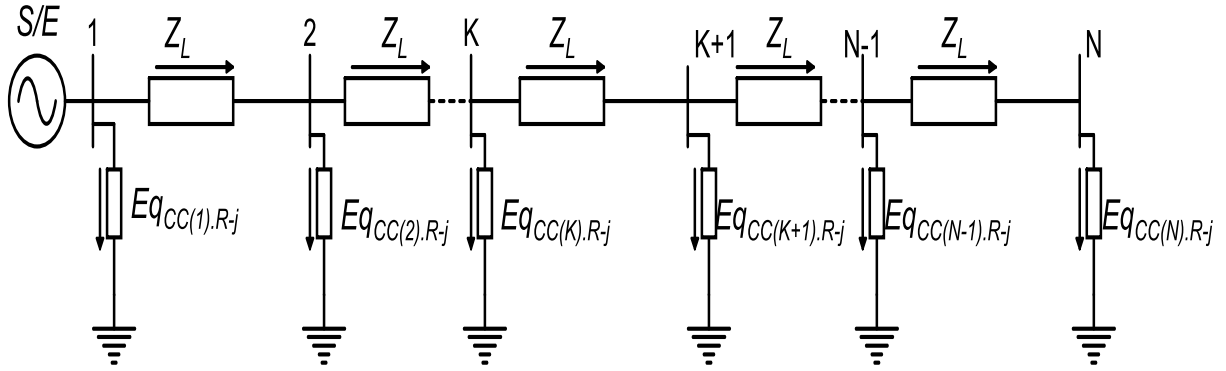
Figura 3.1. Sistema IEEE 34 modelado en ATPDraw

Donde:

$N_{F(i)}$  = Nodo final  $i$ .

$C(i)$  = Carga  $i$ .

La figura 3.2 muestra un esquema de un circuito radial equivalente asociado al circuito radial ramificado de la figura 3.1.



**Figura 3.2. Esquema de un circuito radial equivalente del sistema IEEE34**

Donde:

$E_{q_{CC(i).Rj}}$ : hace referencia a un *EquivalenteSubCc* conectado al nodo  $i$  que se desprende del circuito radial  $j$ .

### 3.2.1. Modelo de la línea larga en un sistema de distribución

Como se mencionó anteriormente, el método propuesto tiene como principal característica, el de modelar las secciones de líneas como líneas largas, es decir, el análisis incluye la admitancia en derivación de cada sección de línea.

Aunque los efectos capacitivos de la línea, han sido pocas veces considerados en anteriores investigaciones para localización de fallas en sistemas de distribución, en esta investigación se tienen en cuenta y se analizan los efectos que tiene el incluirlos en los cálculos.

Después de un riguroso análisis y de aplicar la teoría de circuitos al modelo de línea de la figura 3.3, se obtienen las expresiones (3.1), (3.2) y (3.3), en las que se definen los parámetros de la línea [KERS, 2002].

$$a = d = [I] + \frac{1}{2} * l^2 * [Z_{abc}] * [Y_{abc}] \quad (3.1)$$

$$b = l * [Y_{abc}] \quad (3.2)$$

$$c = l * [Y_{abc}] + \frac{1}{4} * l^3 * [Y_{abc}] * [Z_{abc}] * [Y_{abc}] \quad (3.3)$$

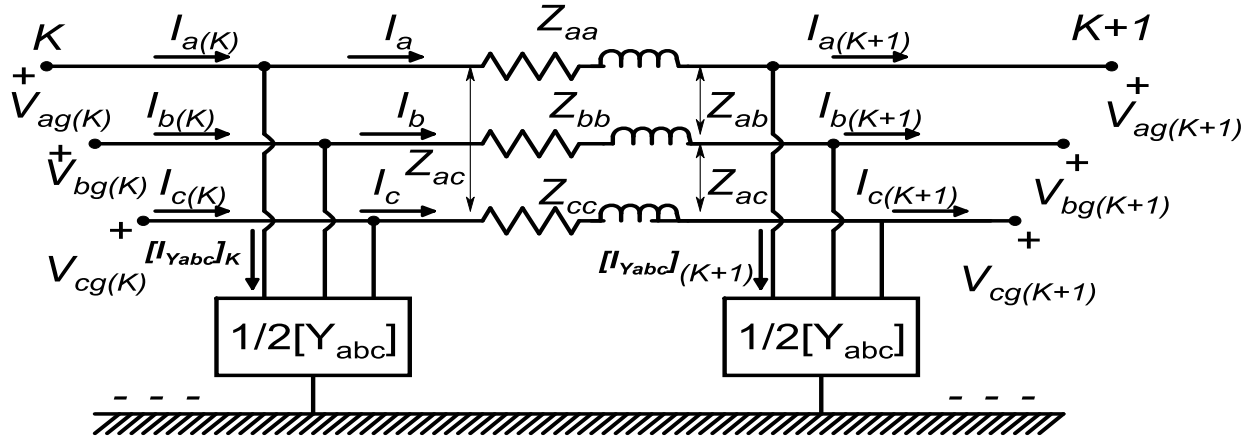


Figura 3.3. Modelo trifásico de línea larga.

Las expresiones (3.4) y (3.5) relacionan la tensión y corriente en el nodo  $K+1$  con la del nodo  $K$ .

$$[V_{abc}]_{k+1} = [a] * [V_{abc}]_k - [b] * [I_{abc}]_k \quad (3.4)$$

$$[I_{abc}]_{k+1} = -[c] * [V_{abc}]_k + [d] * [I_{abc}]_k \quad (3.5)$$

Las expresiones (3.4) y (3.5), son útiles al momento de actualizar los valores de tensión y de corriente en la sección bajo análisis. La manera de encontrar  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$ , se presentó anteriormente en la sección 2.3.1.

El propósito del método, es localizar el punto en que se presentan las fallas monofásicas que involucran tierra en un sistema de distribución radial, ya que en este tipo de fallas es donde se encuentran impedancias de falla con un alto valor.

Para conseguir buenos resultados, se implementa la estrategia descrita en la sección 2.3. Otras consideraciones son realizadas y mostradas en este capítulo. Posteriormente se analiza el comportamiento de la metodología al tener en cuenta estos aspectos.

En el método descrito [BRET, 2010], se realiza un análisis al modelo de línea larga en un sistema de distribución, y se llega a la expresión (GFLE) (2.26). Esta expresión es un polinomio cuadrático, que posee dos soluciones, de las cuales se debe escoger una solución que sea físicamente correcta. En [BRET, 2010] se propone que el valor absoluto del resultado sería el seleccionado como solución. Es decir, se da por establecido que la solución sería compleja, por lo tanto, no se considera el caso en el que se tienen dos soluciones reales que están dentro del rango permitido. En [SALI, 2008] se puede profundizar en cuanto a las soluciones que se presentan para esta ecuación. .



### 3.2.2 Determinación de la solución físicamente correcta

La expresión (2.26) es tomada como referencia para realizar el análisis y se presenta de nuevo en la ecuación (3.6). Los términos  $M$  y  $N$  se definieron en las ecuaciones (2.16) y (2.17) respectivamente.

$$x^2 * \left[ 0.5 * \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{M_j * I_{fj}^*\} \right] - x * \left[ \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{N_j * I_{fj}^*\} \right] + \dots \quad (3.6)$$

$$\dots + \left[ \sum_{j \in \Omega_j} \text{Imag}\{V_{sj} * I_{fj}^*\} \right] = 0$$

El valor de  $x$  se define en por unidad de longitud, para obtener la distancia a la falla en [km], se multiplica este valor por la longitud del tramo en análisis

La ecuación generalizada para localización de fallas a tierra (3.6) tiene la forma presentada en (3.7).

$$\beta_2 * x^2 + \beta_1 * x + \beta_0 = 0 \quad (3.7)$$

La fórmula general para este tipo de ecuaciones es la que se muestra en (3.8)

$$x = \begin{cases} \frac{-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 - 4 * \beta_2 * \beta_0}}{2 * \beta_2} \\ \frac{-\beta_1 - \sqrt{\beta_1^2 - 4 * \beta_2 * \beta_0}}{2 * \beta_2} \end{cases} \quad (3.8)$$

Determinar cuál es solución físicamente correcta fue motivo de mucho análisis en el desarrollo del método de localización de fallas. Debido a que no se logra obtener un criterio general para dar solución a la ecuación (3.6), lo que se plantea a continuación son conclusiones obtenidas al realizar muchas pruebas al método y al encontrar un comportamiento adecuado para la localización de los tipos de falla simulados.

- En el caso en que el discriminante obtenga un valor negativo, se tendrán dos valores complejos con igual magnitud pero distinto ángulo. En ese caso la respuesta será la magnitud de las soluciones.
- En el caso que el discriminante tome un valor de cero,  $\beta_1^2 = 4*\beta_2*\beta_0$ . se tiene una única solución real y el resultado para la localización de la falla corresponde valor absoluto de dicha solución.
- En el caso en que el discriminante sea un valor positivo. y se obtengan dos valores reales y que ambos estén dentro del rango establecido. Debido a que las dos respuestas pueden ser posibles, para dar solución a ello se propone usar el promedio entre ambas soluciones, y el resultado será el valor absoluto de éste.
- Finalmente, en el caso en que el discriminante tome un valor positivo, pero de las dos respuestas encontradas, solo una esté dentro del rango establecido, se da como solución el valor absoluto de aquella solución.

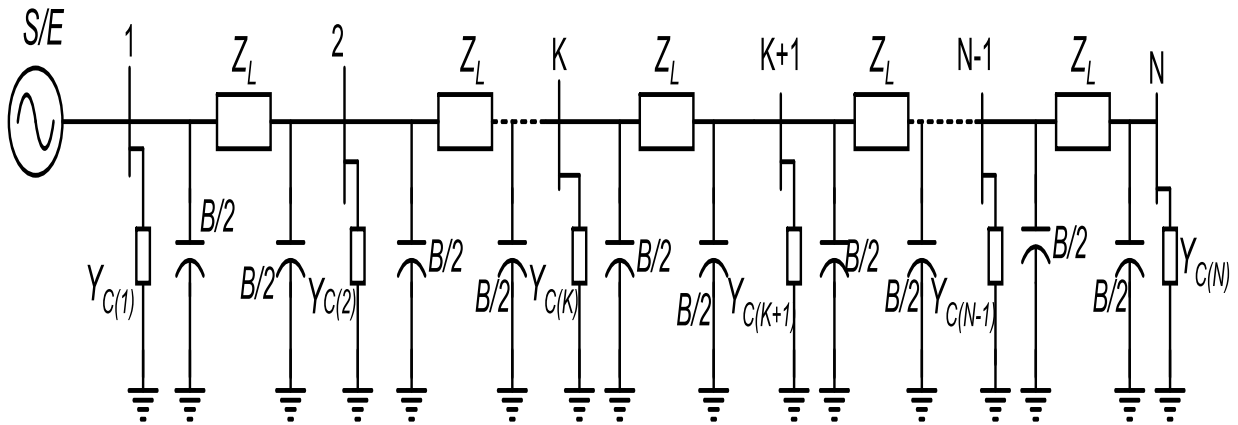
El método se programó teniendo en cuenta todos los casos anteriormente descritos.

### 3.2.3. Acumulación de la carga.

Con el fin de obtener un mejor desempeño del método de localización, se propone incluir los efectos capacitivos de todo el sistema de distribución en los cálculos realizados. En muy pocos de los métodos realizados, se han considerado estos efectos en todo el sistema, debido a que son despreciados por su pequeño valor, o simplemente se incluyen en un segmento de línea del sistema. Un ejemplo de ello, es el método propuesto por Salim en [BRET, 2010], y donde se consideraron los efectos en derivación de un tramo de línea del radial en análisis, pero estos no se tienen en cuenta para otros cálculos.

En esta sección se explica la forma de acumular la carga en el nodo de recibo del segmento de línea en análisis, y las operaciones realizadas para incluir los efectos capacitivos.

En la figura 3.4 se muestra un esquema de un radial equivalente, en el que se incluyen los efectos capacitivos. Por conveniencia de escritura, se denomina  $Eq_{cc(i).R1}$  como  $Y_{C(i)}$ , que hace referencia a una carga que se conecta en el nodo  $i$  (este valor puede ser cero).

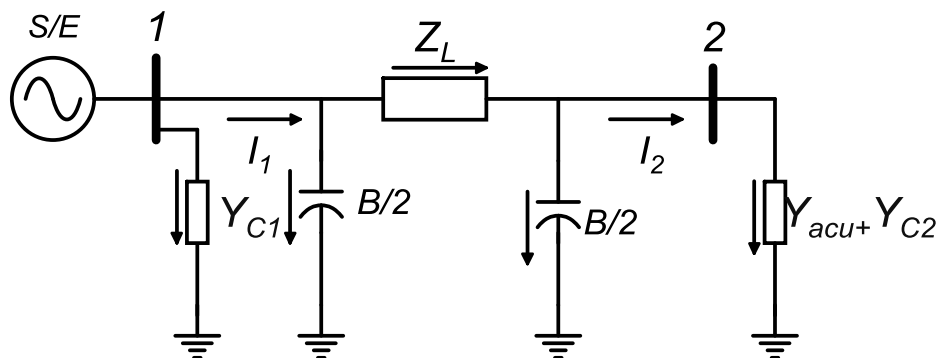


**Figura 3.4. Circuito radial equivalente considerando efectos capacitivos.**

El método inicia con el análisis en la primera sección justo después de la S/E, y continúa repitiendo el mismo proceso sección a sección, por lo tanto, la carga debe ser acumulada en el nodo de recibo del segmento analizado.

Para dar una explicación más clara, se toma como ejemplo el esquema de la figura 3.4, y se realiza el análisis en el segmento 1-2 del radial equivalente. La carga se suma tramo por tramo, comenzando en el nodo  $N$  hasta el nodo 2, incluyendo  $B/2$  que representa los efectos capacitivos de la línea, así como las cargas que se desprenden de los nodos de bifurcación, que en la figura 3.4 se denominan  $Y_{C(i)}$ . Una vez se llega al nodo 2, la carga se deja de acumular, ya que para este análisis se ha considerado el modelo de línea larga al trabajar con la ecuación generalizada para localización de fallas a tierra (GFLE).

La figura 3.5 representa el radial equivalente de la figura 3.4 con la carga acumulada en el nodo 2.



**Figura 3.5. Sección de línea entre los nodos 1 y 2 con la carga acumulada en el nodo 2**

La carga es acumulada utilizando la expresión (3.9) [MORA, 2012].

$$Y_{ACU} = Y_{N-1} + [Z_i + [Y]^{-1}]^{-1} \quad (3.9)$$

$$Y = Y_{C(N)} + B/2 \quad (3.10)$$

$$Y_{N-1} = Y_{C_{N-1}} + B/2 \quad (3.11)$$

Donde:

$Y_{ACU}$ : Admitancia acumulada en el nodo de recibo.

$Y$ : Suma entre la admitancia conectada al nodo  $N$  y  $B/2$  asociado al mismo nodo.

$Y_{N-1}$ : Suma de la carga conectada al nodo  $N-1$  y  $B/2$  asociado al nodo.

$Z_i$ : Impedancia de la línea  $i$ .

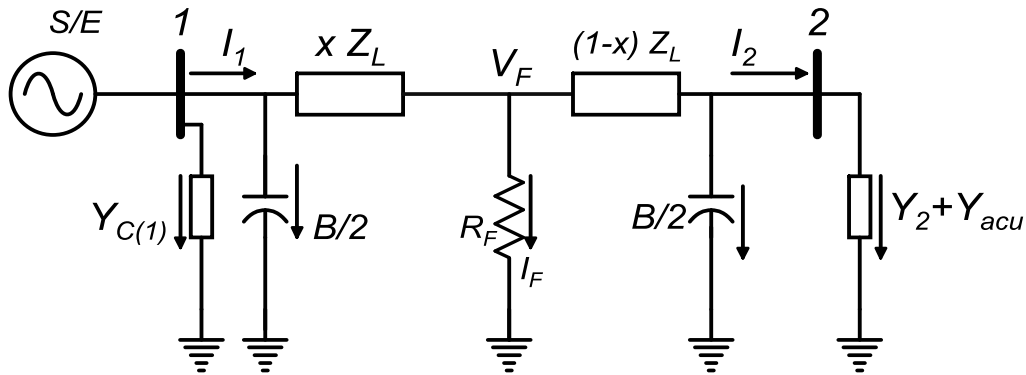
Para obtener la carga acumulada en el nodo de recibo de una sección de línea, la carga conectada al nodo de recibo de la sección en análisis, se suma con la  $Y_{ACU}$ .

Es de resaltar las herramientas proporcionadas por el grupo de investigación en calidad de la energía y estabilidad ICE<sup>3</sup>, ya que gracias a éstas, se logró avanzar rápidamente en el desempeño del método propuesto. Por medio de la herramienta computacional *ATPeXchange*, se obtienen fácilmente los parámetros del sistema de distribución, incluyendo los efectos en derivación de la línea.

### 3.2.4. Actualización de la tensión y de la corriente.

El método de localización se implementa sección a sección del circuito radial equivalente, comenzando en el nodo ubicado inmediatamente después de la S/E, y se repite para los siguientes segmentos del radial hasta llegar al nodo bajo falla. El método propone analizar cada sección, determinando que la falla se encuentra en ese tramo, al no encontrar una respuesta que indique tal situación, los cálculos continúan para la siguiente sección. La corriente por el elemento fallador es diferente para cada análisis al igual que las tensiones calculadas en el punto de fallo. Por esta razón, el método propone actualizar esos valores a medida que se avanza en el radial equivalente. Esta sección del capítulo 3 se dedica a explicar la forma de actualizar los valores de tensión y corriente en cada sección del radial equivalente.

La figura 3.6 muestra una falla en el segmento de la línea entre los nodos 1 y 2.



**Figura 3.6. Sección 1-2 de un circuito radial equivalente sometido a una falla.**

Como se mencionó anteriormente, la corriente de falla es una variable desconocida, y se requiere un proceso iterativo para realizar el cálculo de ese valor.

El valor inicial para la corriente de carga ( $I_C$ ) es estimado como la corriente de prefalla medida en la S/E, como se muestra en la expresión (3.12)

$$I_C = I_{Pf\_S/E} \quad (3.12)$$

De acuerdo con lo expresado en la ecuación (3.12), se calcula la corriente en el punto de fallo como se muestra en la ecuación (3.13).

$$I_f = I_{S/E} - I_{Pf\_S/E} \quad (3.13)$$

Donde,

$I_f$ : Corriente en el punto de fallo.

$I_{S/E}$ : Corriente medida en la subestación durante la falla.

$I_{Pf\_S/E}$  : Corriente medida en la subestación antes de ocurrida la falla (prefalla).

Después de conocida la corriente de falla, se estima la localización de la falla, utilizando la ecuación (GFLE) descrita en la sección 2.3.1 y mencionada en la sección 3.2.2. El programa es desarrollado para que en la primera iteración no obtenga convergencia y de esa manera se complete el proceso.

La expresión (GFLE) se encuentra en función de los parámetros de la línea, del voltaje medido en la subestación y de la corriente de falla. En este documento se ha profundizado bastante en cuanto a esta ecuación, por lo tanto, en este capítulo simplemente se estudiará la forma de utilizarla para la tarea a realizar. Cabe resaltar que por medio de esta ecuación, se incluyen los efectos capacitivos en el segmento de línea analizado.

Después de obtener un valor estimado de la distancia a la falla, se pasa a analizar si la falla se localiza en esa sección o si por el contrario se encuentra más adelante. Se dice que si el valor de  $x$  estimado se encuentra por encima de 1, la falla se localiza en un segmento de línea más adelante, pero si éste valor está entre 0 y 1, la falla se encuentra en esa sección.

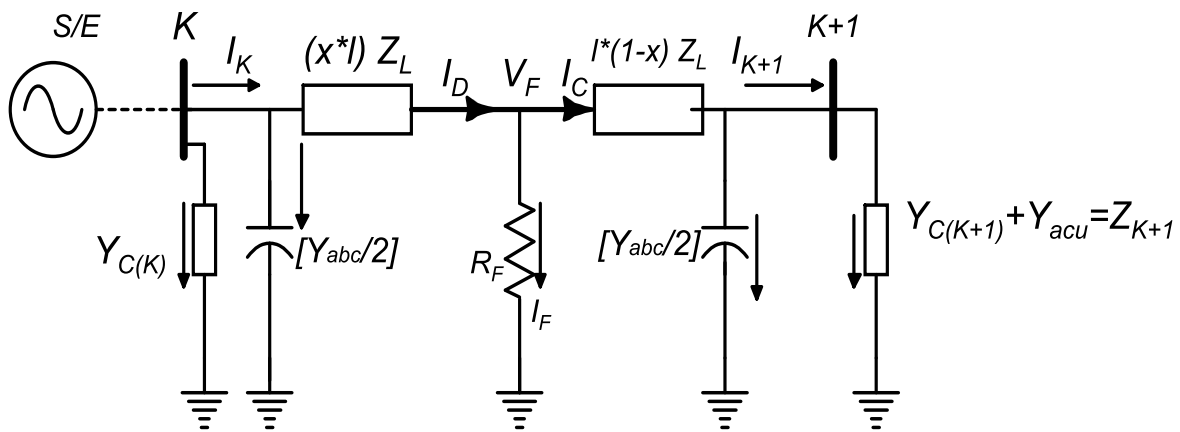
Si la falla se encuentra más allá de la sección analizada, se debe actualizar los valores de tensión y corriente en el nodo de envío de la siguiente sección de línea, que para este caso es el nodo 2. Para esta tarea se utilizan las ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$[V_{abc}]_2 = [a] * [V_{abc}]_1 - [b] * [I_{abc}]_1 \quad (3.14)$$

$$[I_{abc}]_2 = -[c] * [V_{abc}]_1 + [d] * [I_{abc}]_1 \quad (3.15)$$

A continuación se realiza el mismo análisis para cualquier sección de un circuito radial equivalente.

La figura 3.7 muestra una falla en el segmento de línea entre los nodos  $K$  y  $K+1$ .



**Figura 3.7. Sección de un circuito radial equivalente sometido a una falla**

Para calcular la tensión y la corriente en el siguiente nodo aguas abajo de la sección analizada, se utilizan las ecuaciones (3.16) y (3.17).

$$[V_{abc}]_{k+1} = [a] * [V_{abc}]_k - [b] * [I_{abc}]_k \quad (3.16)$$

$$[I_{abc}]_{k+1} = -[c] * [V_{abc}]_k + [d] * [I_{abc}]_k \quad (3.17)$$

### 3.2.5. Algoritmo propuesto para localización de fallas a tierra de alta impedancia

En esta sección, se describe el algoritmo propuesto para localizar fallas a tierra de alta impedancia.

Inicialmente, se debe obtener toda la información requerida que fue descrita en la introducción de este capítulo. La reducción del sistema de distribución se obtiene por medio de la herramienta computacional *ATPeXchange* y después de tener el circuito ramificado separado en circuitos radiales equivalentes, se selecciona uno y se utiliza para realizar las respectivas pruebas.

Por medio del software *simulaciónRf*, se simulan fallas en cada nodo y se almacenan los datos en arreglos matriciales en formato de MATLAB® denominados descriptores, que contienen los fasores asociados a las tensiones y corrientes de prefalla y falla medidos en la subestación. Una vez adquirida toda esta información se procede a ejecutar el algoritmo del método propuesto, El cual consta de los siguientes pasos:

- 1) Seleccionar segmento de línea inicial del radial equivalente  $i$ .

$i$ : número de radiales equivalentes de un circuito radial ramificado.

- 2) Asumir un valor inicial para la corriente que va hacia la carga  $I_c$  de acuerdo a la expresión (3.18).

$$I_c = I_{Pf\_S/E} \quad (3.18)$$

- 3) Determinar una corriente de falla inicial estimada, usando la expresión (3.19).

$$I_f = I_{S/E} - I_{Pf\_S/E} \quad (3.19)$$

- 4) Estimar los valores de  $x$  por medio de la ecuación (3.6) (GFLE).
- 5) Determinar cuál de las soluciones obtenidas a partir de la ecuación (GFLE) es físicamente correcta de acuerdo con los criterios explicados en la sección 3.2.2.
- 6) Verificar si el valor estimado de  $x$  converge para la sección analizada de acuerdo al siguiente criterio de convergencia.

$$|x(n) - x(n - 1)| < \varphi \quad (3.20)$$

El término  $\varphi$  es una tolerancia definida previamente, y para propósitos de este proyecto se define como  $1 \cdot 10^{-3}$ .  $x(n)$ , es el valor de  $x$  en la iteración número  $n$ .

En este paso, se debe tener en cuenta que el número de iteraciones, es mayor que 1, ya que es necesario calcular el voltaje en el punto de fallo  $V_f$  para así realizar un análisis adecuado.

- 7) Si  $x$  converge para el segmento de línea en análisis, y además se encuentra entre 0 y 1, se ha determina la sección de línea bajo falla. Si  $x$  no converge para la sección de línea analizada, continuar al paso 8. Si  $x$  converge para el segmento de línea en análisis y no se encuentra entre 0 y 1, actualizar valores de tensión y corriente en el siguiente nodo como se define en la sección 3.2.4.
- 8) Actualizar el valor de corriente aguas abajo de la falla o de carga  $I_c$ , usando el valor del voltaje en el punto de fallo de acuerdo con la ecuación (3.21), utilizando (3.22) y (3.23).

$$I_c = [Z_{total}^{-1} + 0.5 * l * (1 - x) * Y_{abc}] * V_f \quad (3.21)$$

Donde:

$$[V_f] = [a] * [V_K] - [b] * [I_K] \quad (3.22)$$

$$Z_{total} = l * (1 - x) * Z_{abc} + [0.5 * l * (1 - x) * Y_{abc} + Z_{K+1}^{-1}]^{-1} \quad (3.23)$$

$K$ : Nodo de envío de la sección analizada.

$Z_{K+1}$ : Impedancia conectada al nodo  $K+1$ .

Los parámetros  $a$  y  $b$  fueron definidos en las ecuaciones (3.1) y (3.2) respectivamente, y donde se tienen en cuenta los efectos capacitivos del segmento de línea.

En la impedancia conectada al nodo  $K+1$  se acumula la carga que se tiene aguas abajo de ese nodo e igualmente se incluyen los efectos capacitivos.

- 9) actualizar la corriente en el punto de fallo de acuerdo a la expresión (3.24), utilizando (3.25) y (3.21).

$$I_f = I_D - I_c \quad (3.24)$$

Con:



$$I_D = -c * V_K + d * I_K \quad (3.25)$$

Los parámetros  $d$  y  $c$  se definieron en las ecuaciones (3.1) y (3.3) respectivamente, e igualmente se tienen en cuenta los efectos capacitivos del segmento de línea de distribución.

10) Regrese al paso 4.

La figura 3.8 muestra el diagrama de flujo asociado al algoritmo propuesto.

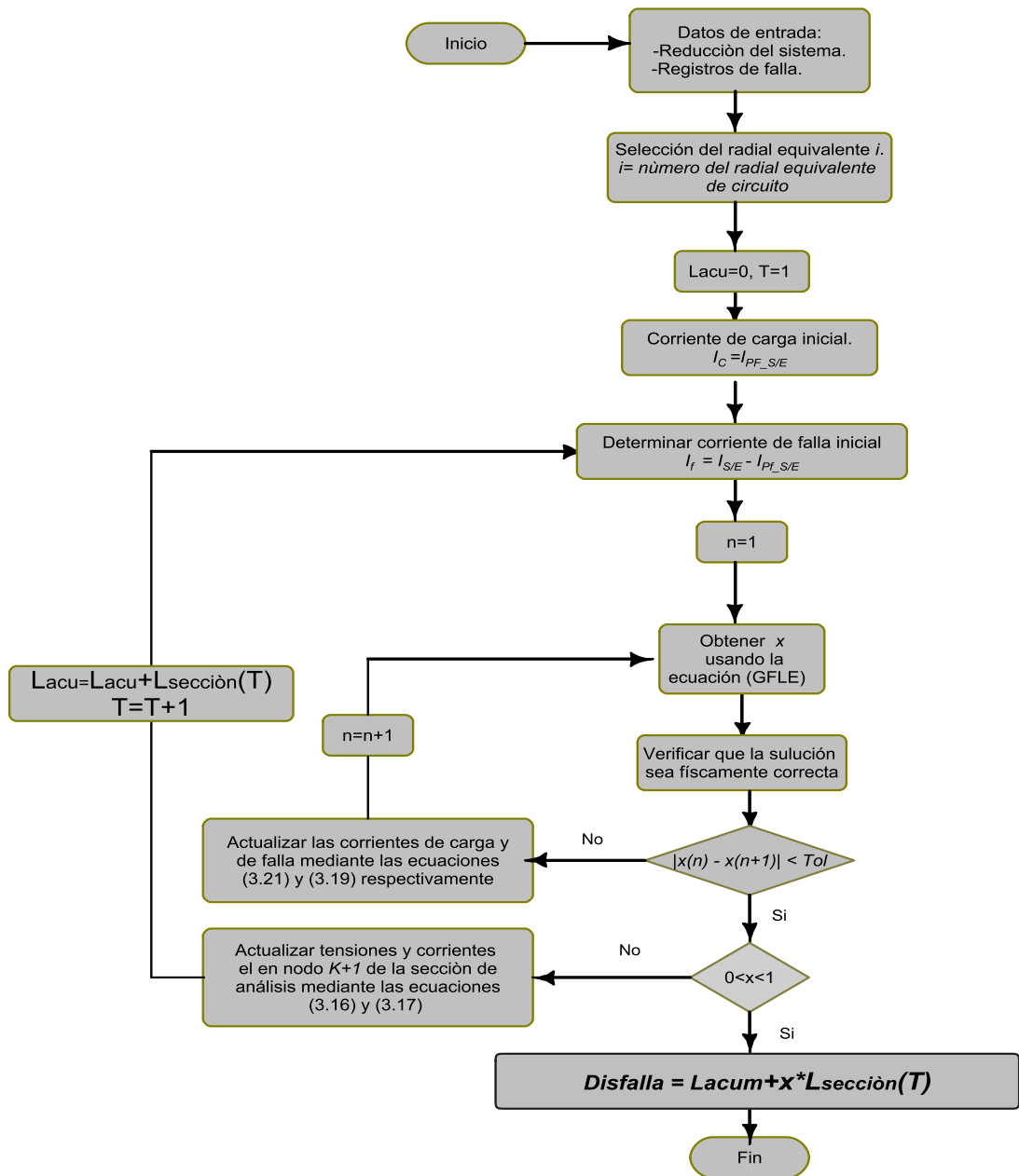


Figura 3.8. Algoritmo propuesto a modo de diagrama de flujo.

Donde:

*Lacu*: longitud acumulada desde la subestación hasta en nodo de envío de la sección de análisis.

*T*: tramo del segmento del sistema de distribución en análisis

*Disfalla*: distancia calculada a la falla.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. Aplicación de la metodología propuesta.**

#### **4.1. Introducción**

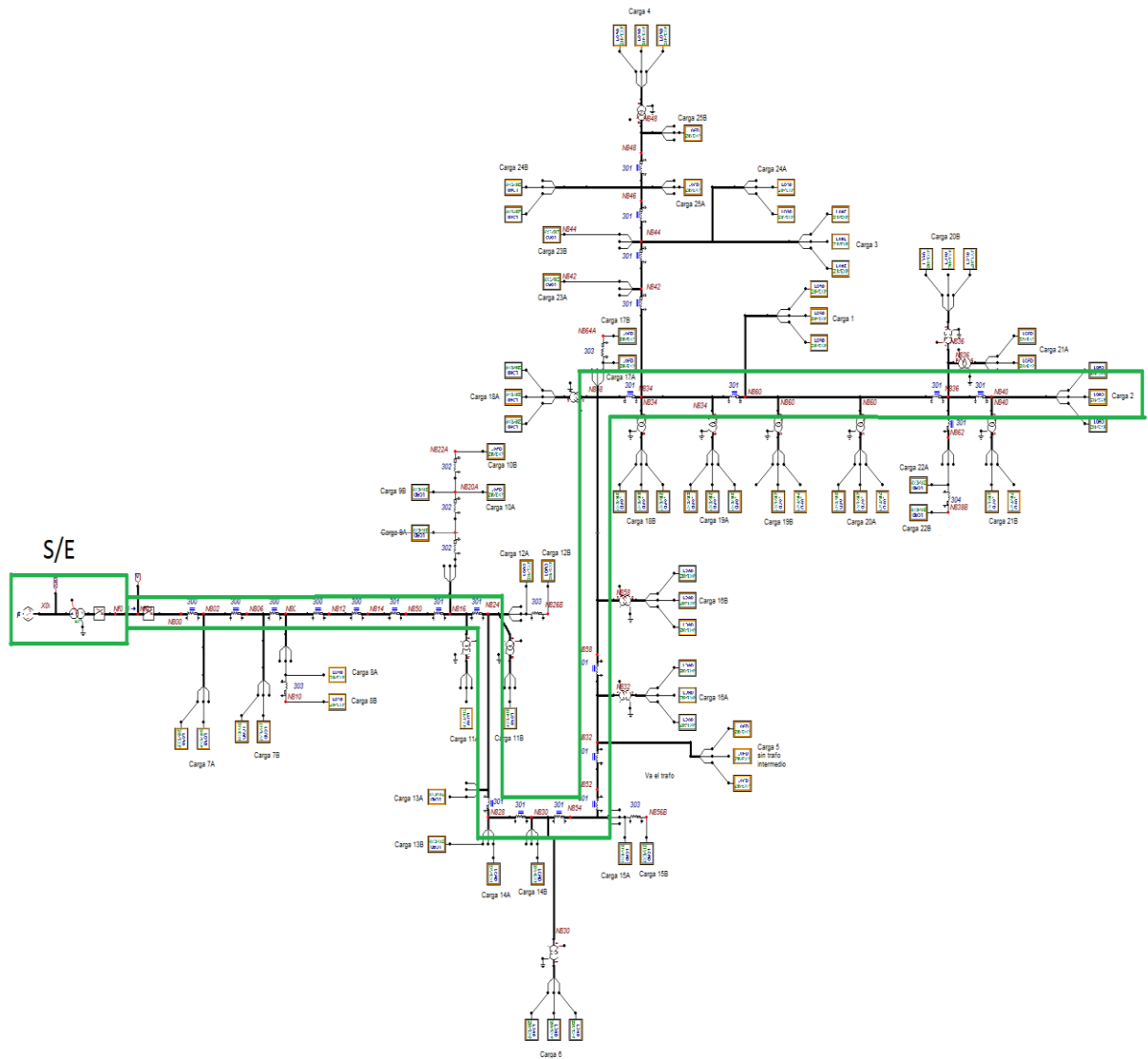
El método propuesto se prueba en el sistema de distribución IEEE de 34 nodos, el cual es bastante utilizado en el grupo de investigación en calidad de la energía y estabilidad ICE<sup>3</sup> para valorar el desempeño de la metodología propuesta. Al ser éste un sistema que presenta las cualidades de un circuito típico de distribución, se puede revisar qué tan factible es utilizar el método en aplicaciones reales que requieran el tipo de análisis estudiado en esta investigación.

El rendimiento de la metodología es evaluado bajo distintos escenarios de trabajo, y las fortalezas y falencias que ésta pueda tener son analizadas. Es muy importante conocer estos dos aspectos, ya que de allí, se tendrán referentes para la realización de trabajos futuros.

#### **4.2. Sistema de distribución de prueba IEEE de 34 nodos.**

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, el sistema de prueba propuesto corresponde al circuito IEEE de 34 nodos, éste es tomado de los alimentadores de prueba del “Distibution System Analysis Subcommittee” del “Institute Electrical and Electronics Enginieers” [IEEE, 2000]. Es un alimentador típico de distribución, está ubicado en el estado de Arizona (Estados Unidos) y opera a nivel de tensión de 24.9 kV. Algunas de las características de este circuito son la no homogeneidad de los conductores, los cuales presentan múltiples calibres, posee cargas desbalanceadas, ramales monofásicos, bifásicos y trifásicos. Además, se pueden encontrar cargas concentradas y distribuidas. Este sistema es modelado en el software de simulación ATPDraw.

En la figura 4.1 se muestra el sistema IEEE de 34 nodos en el entorno del ATPDraw, en la figura se señala el radial 1, el cual tiene una longitud de 57,67 Km.



**Figura 4.1. Sistema IEEE 34 modelado en ATPDraw.**

### 4.3. Descripción de las pruebas e indicador del desempeño

Las pruebas fueron realizadas sobre el radial equivalente 1, que parte de la subestación hasta el nodo 840 del circuito IEEE de 34 nodos, y que posee una longitud considerablemente extensa. El método fue probado para fallas monofásicas que involucran tierra ( $a-g$ ,  $b-g$ ,  $c-g$ ), con resistencias de falla que oscilaron entre los  $0 \Omega$  y los  $500 \Omega$ . En este último valor, se empieza a notar un deterioro de la metodología, ya que se alcanzan errores del 2,4%. La metodología fue probada, incluso con fallas simuladas en las que tuvo una resistencia de falla de hasta  $750 \Omega$ , con valores más altos, el método no converge. Las pruebas anteriores se realizaron en el sistema bajo condición nominal, pero esto es algo que

no se presenta en la realidad, ya que la carga en el sistema presenta variaciones. Sin embargo, estos efectos fueron analizados, y en este capítulo se muestran los resultados de pruebas realizadas al método de localización, en los que se tuvieron en cuenta estos escenarios de trabajo.

Para realizar el análisis de los resultados obtenidos, primero se estima la distancia a la falla, luego se confronta este resultado con la distancia real en donde ésta se presentó. Para observar el comportamiento del método, se emplea como indicador el error absoluto, el cual es calculado mediante la expresión (4.1).

$$error_{Absoluto}[\%] = \left( \frac{d_{real} - d_{calculada}}{L_{total}} \right) * 100\% \quad (4.1)$$

A través del indicador de error absoluto, se realizan curvas que indican la distancia real a la falla y la confrontan con el error obtenido. Mediante estas curvas se puede observar el rendimiento y el comportamiento del método de localización de fallas, y para este caso se presta especial interés en el valor de la resistencia de falla.

Por otro lado, se analiza el concepto asociado a la subestimación y a la sobreestimación de la falla. Cuando el error tiene un valor negativo, se dice que el método está sobreestimando la falla, esto es, se calcula el punto de fallo, más allá de donde éste ocurre. Se puede hacer un análisis similar cuando error es positivo, en ese caso, el método subestima la distancia a la falla.

En los gráficos de desempeño, en el eje horizontal se muestra la distancia medida desde la subestación hasta donde ocurre la falla, y en el eje vertical se muestra el error absoluto para cada una de las resistencias de fallo simuladas, que para esta investigación fueron motivo de amplio análisis.

#### **4.3.1. Escenarios de prueba**

Inicialmente, se define como escenario de prueba, el circuito IEEE de 34 nodos a condición nominal y con valores de resistencia de falla relativamente altos. Aunque esto no siempre es lo que se encuentra en la realidad, el método fue evaluado bajo esas condiciones. Luego, la metodología es probada bajo distintos escenarios, donde la carga del sistema es variable. Esto simula de manera más aproximada, lo que se presenta en un circuito real de distribución. Para todos los escenarios de prueba, se analizan las fallas monofásicas a tierra (*a-g, b-g, c-g*).

A continuación, se enuncian los escenarios en que se prueba la metodología propuesta.

- a) La metodología es probada en el sistema IEEE de 34 nodos a condición nominal.

- b) De manera aleatoria, se varía la carga en el sistema IEEE de 34 nodos entre el 30% y el 60% (baja-carga) de su valor nominal.
- c) De manera aleatoria, se varía la carga en el sistema IEEE de 34 nodos entre el 60% y 120% (media-alta carga) de su valor nominal.
- d) De manera aleatoria, se varía la carga en el sistema IEEE de 34 nodos entre el 100% y 150% (alta-carga) de su valor nominal.

La variación en la carga consiste en la variación de la magnitud de la potencia tanto activa como reactiva de cada una de las fases de todas las cargas del sistema. La variación se realiza en un porcentaje aleatorio en el rango establecido, teniendo en cuenta una variación aleatoria en el factor de potencia.

#### 4.4. Visualización de resultados y análisis del rendimiento

##### 4.4.1. Escenario 1: Circuito IEEE de 34 nodos a condiciones nominales.

Los resultados para el primer escenario de prueba se muestran en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 respectivamente.

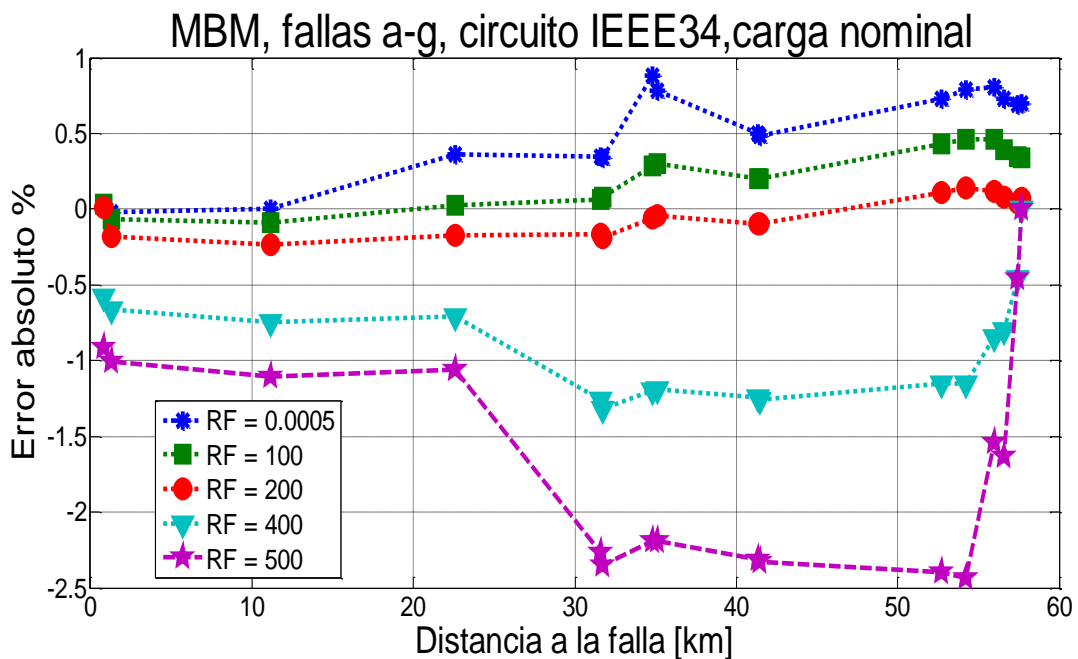


Figura 4.2. Rendimiento del método para fallas monofásicas (a-g) a condición nominal

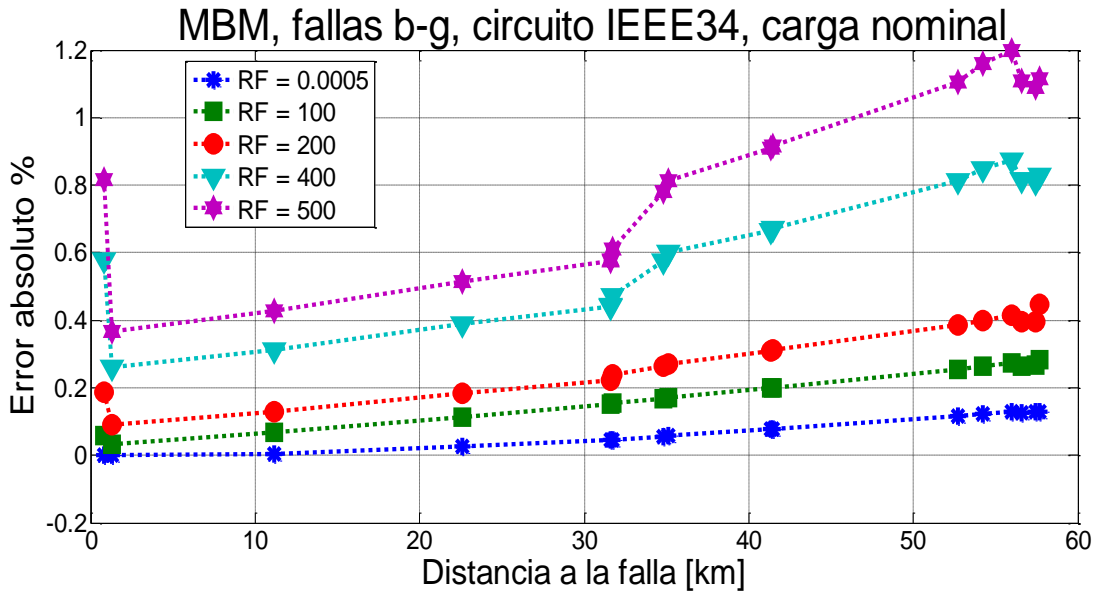


Figura 4.3. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*b-g*) a condición nominal

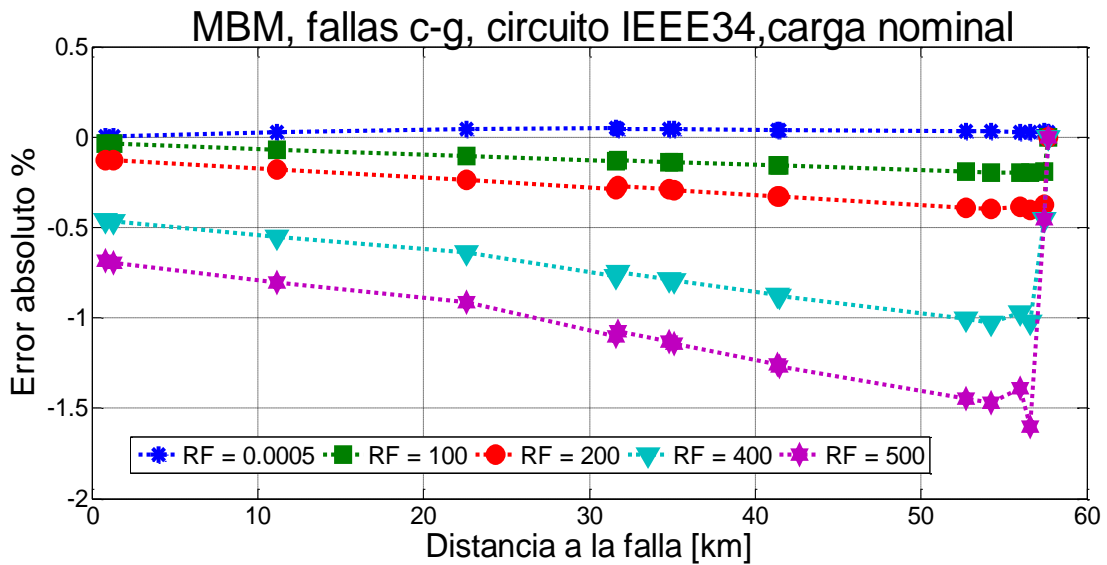


Figura 4.4. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) a condición nominal

Los resultados mostrados en las figuras anteriores, muestran un buen desempeño, inclusive para valores de resistencia de falla de 500 Ω, donde se presenta un error máximo del 2,4% en la falla monofásica *a-g*, lo cual representa pequeñas distancias en comparación con la longitud total del radial analizado. Sin embargo, debido al desbalance del sistema, se presenta un comportamiento variable entre las fases sometidas a una falla, pero teniendo

igualmente una buena eficiencia. El método de localización tiende a sobreestimar la falla en las fallas monofásicas que involucran las fases *a* y *c*.

#### 4.4.2. Escenario 2: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 30% y 60% de su valor nominal.

El método es desarrollado inicialmente para trabajar a condición nominal, y con el fin de llevar la investigación a un plano más real, en el que se consideren las variaciones en la carga, se utiliza una constante que ha sido desarrollada en el grupo de investigación ya antes mencionado. Esta constante multiplica toda las admitancias de carga  $Y_c$ , al igual que en todas las ecuaciones en las que ésta intervenga. Esta constante es el cociente entre el valor complejo de la corriente medida en la subestación en situación de prefalla y la corriente nominal del sistema. Esta relación es mostrada en la ecuación (4.2).

$$Constante = \begin{bmatrix} \left( \frac{I_{(s/e)a}^p}{I_{(s/e)a}} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \left( \frac{I_{(s/e)b}^p}{I_{(s/e)b}} \right) & 0 \\ 0 & 0 & \left( \frac{I_{(s/e)c}^p}{I_{(s/e)c}} \right) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Donde,

$I_{(s/e)i}^p$ : Corriente de pre-falla de la fase *i* registrada en la subestación.

$I_{(s/e)i}$ : Corriente nominal de la fase *i* registrada en la subestación.

Esta constante surge como propuesta en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>, después de realizar diferentes pruebas y analizar la eficiencia al utilizarla en los cálculos. Además de ello, se sabe que la potencia del sistema está directamente relacionada con la inyección de corriente. El uso de esta constante en el método, no es algo exacto, pero los estudios realizados hasta el momento, indican que los errores son menores al incluirla en problemas de este tipo.

Varias constantes han sido propuestas en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>, sin embargo, la ecuación (4.2) es la que proporciona un mejor desempeño para la metodología propuesta, y a la que se llega después de realizar múltiples pruebas.



Para los siguientes casos, se presenta la necesidad de disminuir el valor de resistencia de falla, aunque se mantiene la característica de alta impedancia.

Las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 muestran el desempeño de la metodología propuesta ante fallas monofásicas que involucran tierra (*a-g*, *b-g*, *c-g*) respectivamente, en el escenario de baja carga.

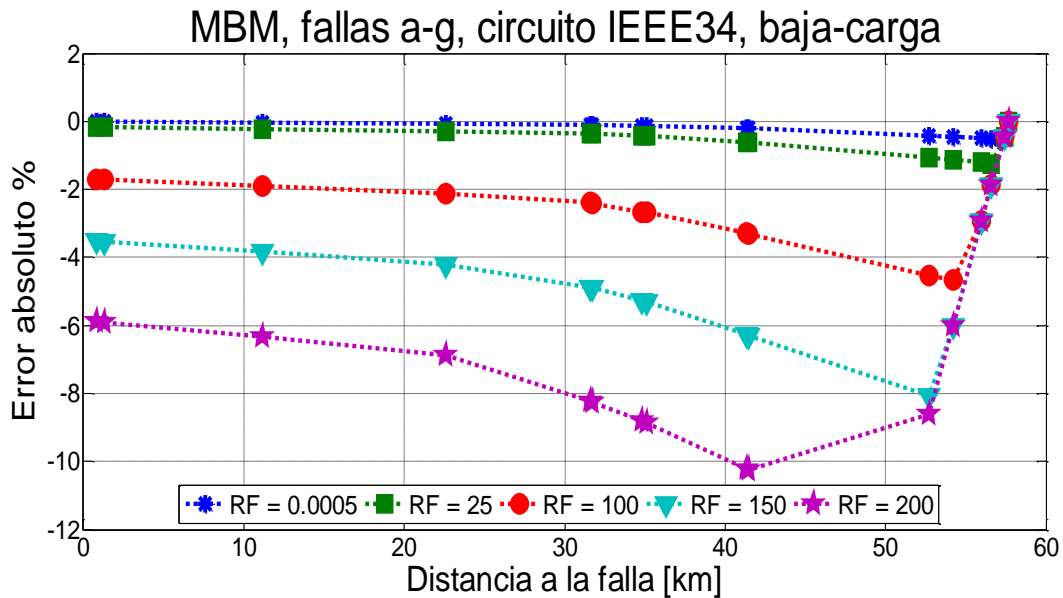


Figura 4.5. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*a-g*) y baja carga.

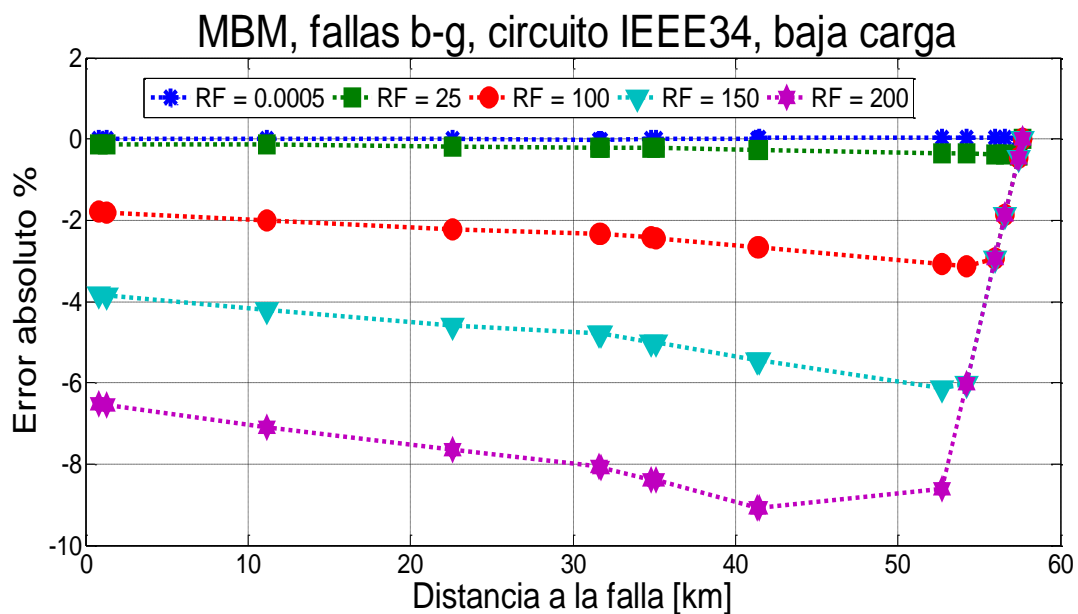


Figura 4.6. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*b-g*) y baja carga.

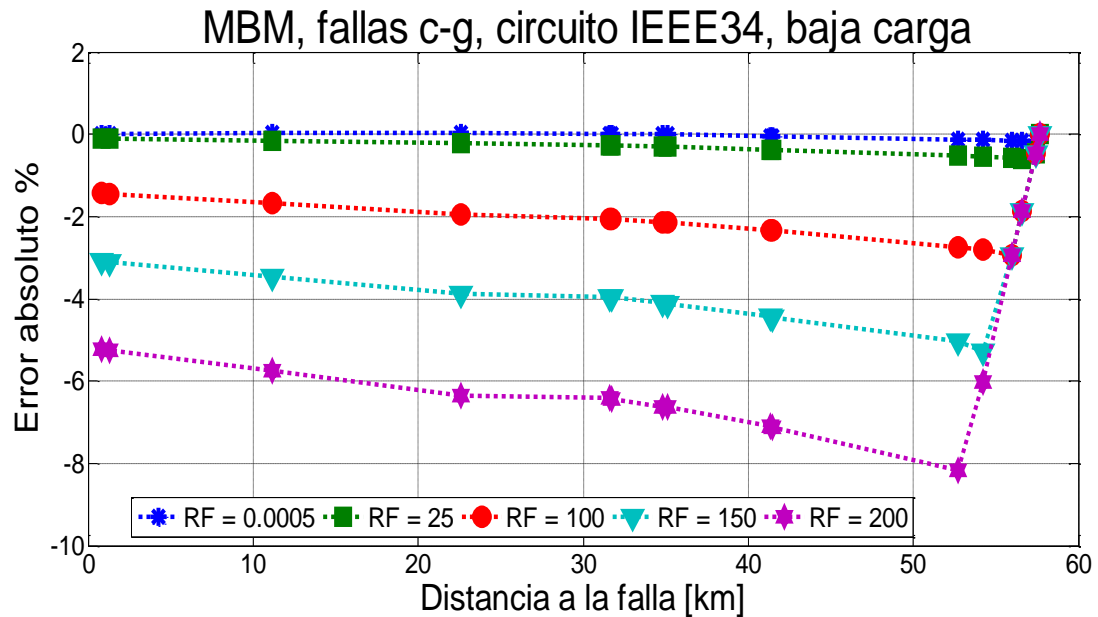


Figura 4.7. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) y baja carga.

Para los tipos de falla simulados se presenta un rendimiento más crítico bajo estas condiciones. El método baja considerablemente su desempeño, ya que no sólo se disminuye el valor de la resistencia de falla, también se presentan errores considerablemente altos. Sin embargo, al analizar los resultados se puede destacar que ante una resistencia de falla de  $200 \Omega$ , el error máximo fue del 10% para el caso más crítico, donde nuevamente está involucrada la fase *a*, aunque para los tres tipos de falla, el método presenta un comportamiento muy similar. Los resultados anteriores son aceptables, si se compara con los resultados de otros estudios realizados de este tipo.

#### 4.4.3. Escenario 3: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 60% y 120% de su valor nominal.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran los resultados para las fallas monofásicas que involucran tierra (*a-g*, *b-g*, *c-g*) respectivamente ante media-alta carga en el sistema de distribución.

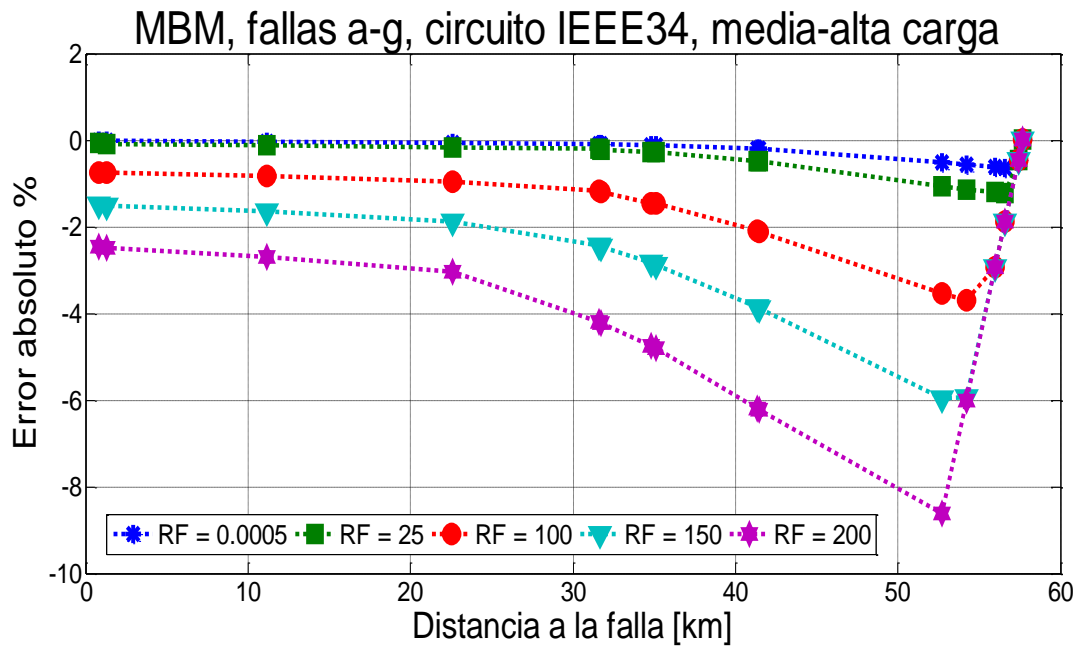


Figura 4.8. Rendimiento del método para fallas monofásicas (a-g) y media-alta carga.

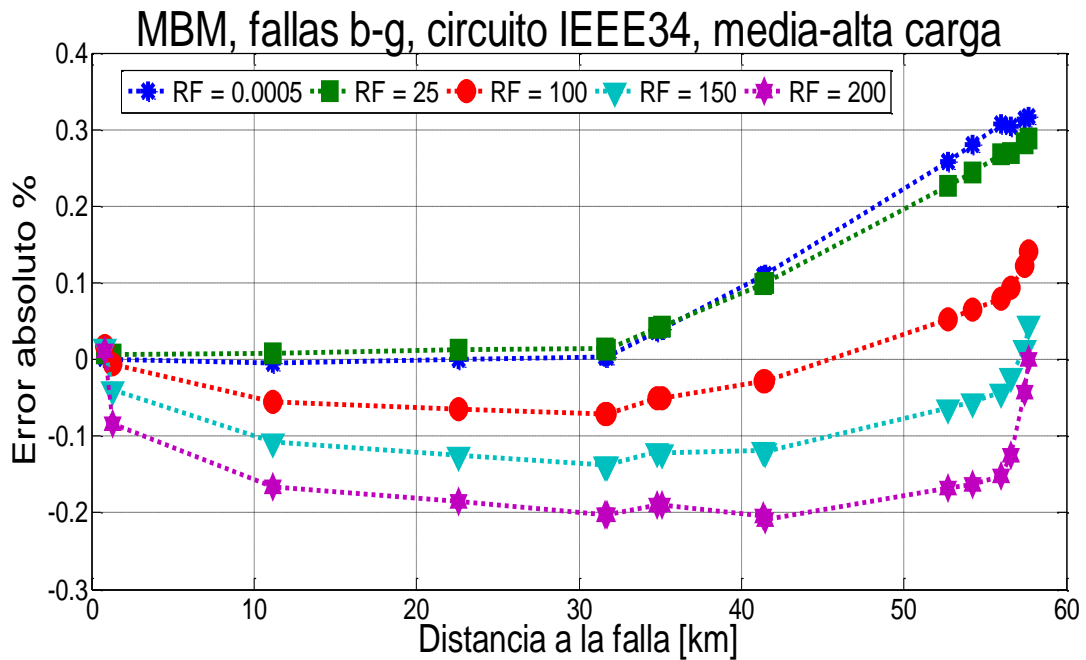
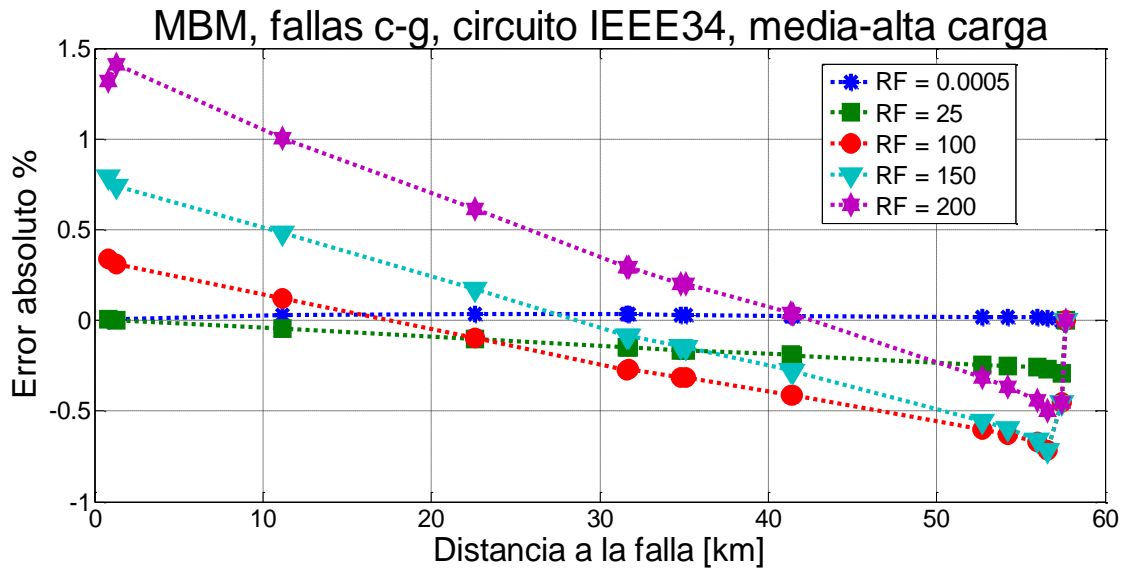


Figura 4.9. Rendimiento del método para fallas monofásicas (b-g) y media-alta carga.



**Figura 4.10. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) y media-alta carga.**

El escenario anterior, presenta el rendimiento más crítico nuevamente en la falla que involucra la fase *a*. En particular, para este circuito de prueba, la fase *a* es la que presenta una mayor carga en estado de prefalla.

Para este escenario de prueba, las fases *b* y *c* presentan un comportamiento completamente diferente al de la fase *a* y entre ellas en condiciones de falla. Sin embargo, presentan una mayor eficiencia. El comportamiento de la localización de fallas depende de la ubicación de las cargas laterales y de la carga de las líneas, además, debido a que la naturaleza de las cargas del sistema, proporciona un desbalance notable en sus fases, no se puede esperar que el comportamiento de localización de fallas, presente un comportamiento similar para las tres fases del sistema de distribución.

#### **4.4.4. Escenario 4: Circuito IEEE de 34 nodos con variación de la carga entre el 100% y 150% de su valor nominal.**

Las figuras 4.11, 4.12 y 4.13, muestran los resultados del rendimiento de la metodología, ante la presencia de fallas monofásicas a tierra (*a-g*, *b-g*, *c-g*) respectivamente, en el sistema de distribución, y con el sistema sometido a alta carga.

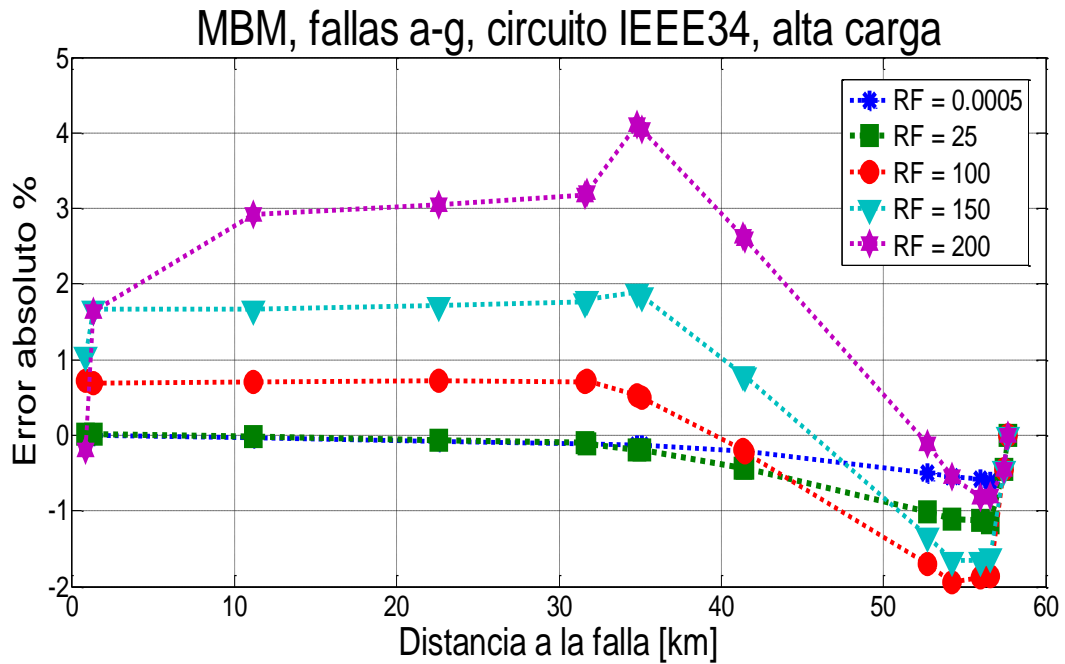


Figura 4.11. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*a-g*) y alta carga.

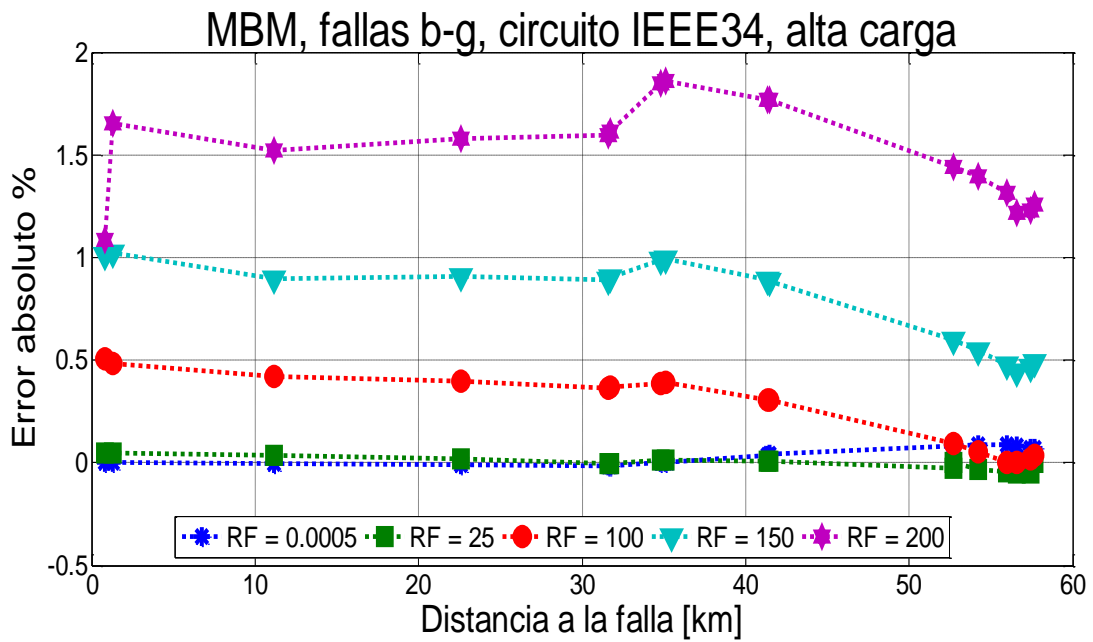
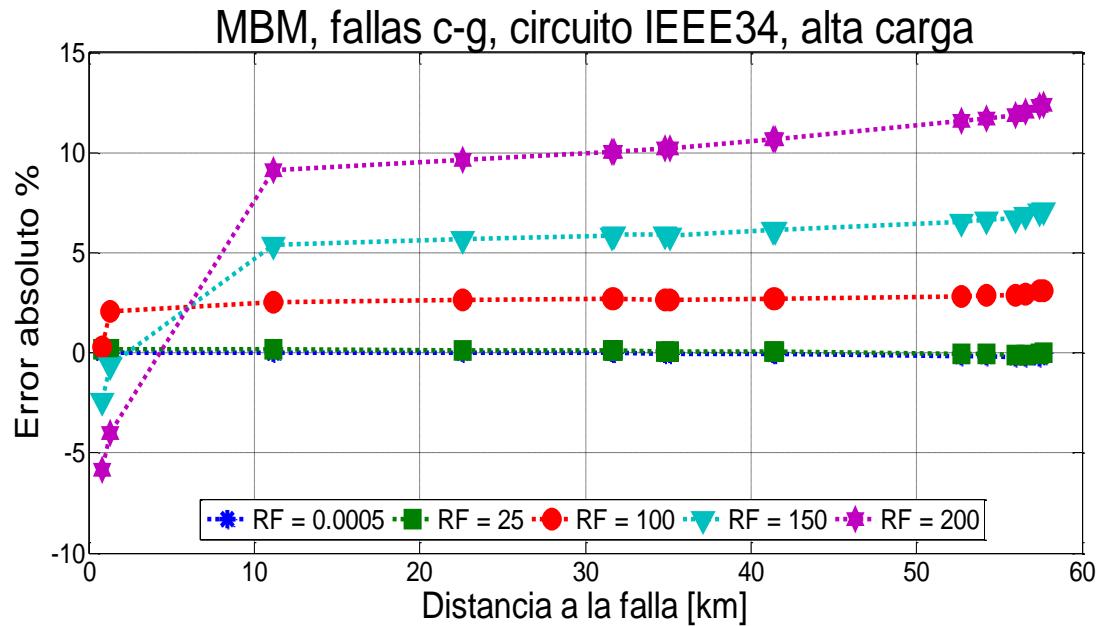


Figura 4.12. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*b-g*) y alta carga.



**Figura 4.13. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) y alta carga.**

De acuerdo a los resultados presentados en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13, se nota como los gráficos de evaluación del rendimiento de localización de fallas, presentan un comportamiento inconsistente entre los tres tipos de fallas simuladas, y la alta carga en el sistema provoca que las mayores deficiencias en la localización, se presenten en la fase *c*, alcanzando unos errores del 12% al implementar la metodología con una resistencia de falla de 200 Ω.

En los gráficos de rendimiento, se puede apreciar como la variación de la carga afecta de manera considerable el método propuesto, principalmente, cuando se presenta alta carga en el sistema y al tener una resistencia de falla de alto valor.

## CAPÍTULO 5

### 5. Conclusiones

El desarrollo de nuevas metodologías para la localización de fallas en sistemas de distribución, ha recibido bastante atención en los últimos años debido a las nuevas políticas con respecto a la continuidad de la energía y a la necesidad creciente de llevar un servicio de calidad a los usuarios finales. Diversas metodologías han sido utilizadas, algunas requieren equipos de alta tecnología, como lo son aquellas que usan ondas viajeras, que requieren complejos dispositivos de medición. También se tienen las metodologías que utilizan medidas en más de un terminal del sistema eléctrico, y para ello se requieren canales de comunicación entre los elementos localizadores de fallas. Por lo general, estas metodologías funcionan con costosos equipos. Todas las metodologías desarrolladas, presentan ventajas y desventajas principalmente asociadas a la precisión en la localización y al costo de funcionamiento.

La calidad de la energía, está directamente relacionada con los índices de continuidad, por lo tanto, se encuentra estrechamente asociada a la localización de fallas en los sistemas de distribución. La localización eficiente de fallas, permite disminuir considerablemente el tiempo de restauración y permite reducir los índices de frecuencia y duración de las interrupciones del servicio.

La metodología propuesta en este proyecto de grado, permite una estimación aproximada de la distancia medida desde la subestación, hasta el sitio donde se presenta la falla. Se requiere el uso de la información que entregan las medidas del fundamental de tensión y de corriente registradas en la subestación, así como los parámetros serie y en derivación de los tramos de línea del sistema eléctrico a analizar. La estrategia desarrollada, es implementada en un sistema radial ramificado, con cargas laterales e intermedias, presencia de múltiples calibres de conductores, desbalance tanto en el sistema como en la carga y principalmente con valores muy elevados de resistencia de falla. El funcionamiento del método depende en gran parte de un buen modelo del sistema de distribución, así como del conocimiento de todos sus parámetros.

Para implementar la metodología propuesta, es necesario un simulador de circuitos eléctricos que permita modelar el sistema de distribución, y que permita el intercambio de información de manera eficiente y simple con el lenguaje computacional en que se realiza la programación.

La propuesta desarrollada, tiene como objetivo principal, proporcionar una metodología aplicable a localización de fallas en sistemas de distribución, en la que se permita incluir la capacitancia de las líneas. Estos efectos han sido pocas veces considerados en metodologías

basadas en la estimación de la impedancia, y en este documento se muestra la manera de incluir los efectos capacitivos de la línea mediante la expresión (GFLE). Este es un polinomio cuadrático de segundo orden que presenta dos soluciones, de las cuales se debe escoger una solución físicamente correcta como se explica en la sección 3.2.2. También se presenta una manera de incluir estos efectos en la acumulación de la carga en el nodo de interés, como se explica en la sección 3.2.3. Al realizar estas consideraciones, se logra disminuir los errores de localización, así como conseguir implementar la metodología para fallas monofásicas que involucren tierra, con valores de resistencia de falla considerablemente altos. Este elemento es muy importante, ya que en los sistemas de distribución, una resistencia de falla de  $40 \Omega$ , no se puede considerar pequeña con respecto a la carga y de hecho, es muy importante incluirla en los estudios de localización de fallas.

Con el fin de representar mejor los sistemas de distribución reales, se consideraron diferentes escenarios al realizar pruebas a la metodología. Para esto, fue necesario la incorporación de nuevos datos de entrada, que simplemente realizan una variación aleatoria en la carga y con lo cual se consigue analizar el método propuesto en un sistema más aproximado a lo que se presenta en la realidad, ya que las cargas en un sistema presenta variaciones que son difíciles de predecir. La metodología se probó bajo estas condiciones, y como se esperaba, disminuyó su desempeño, aunque se logra mantener un rendimiento aceptable.

Se consigue validar la metodología para fallas monofásicas en las tres fases que involucran tierra. Un factor que influye considerablemente en lo inconsistente del desempeño, es el desbalance del circuito de prueba. Debido a que se tienen fases que presentan mayor carga que otras, no se puede esperar que el método tenga un comportamiento similar en todas las fases. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron aceptables para casi todos los casos.

Debido a que en el circuito IEEE de 34 nodos, la fase *a*, es la que se encuentra más cargada, se debe prestar principal interés en cuanto a los tipos de fallo a tierra que involucran esta fase. Como se nota en los resultados, el tipo de fallo en que se presenta mayor dificultad de localización es en el tipo monofásico *a-g*, producto del gran desbalance que se presenta en el circuito.

Finalmente, el método brinda la posibilidad de ser implementado en sistemas reales de distribución que presenten topología radial. Lo que se busca es obtener que hasta los usuarios más alejados reciban un muy buen servicio. Con la localización de fallas de forma eficaz, se puede conseguir la restauración del sistema más rápidamente por parte del personal de mantenimiento de la empresa, y de esa manera conseguir una mayor continuidad en el servicio, lo cual está directamente relacionado con la calidad de la energía.



## CAPÍTULO 6

### 6.1. Recomendaciones

Los métodos para localización de fallas, ante variaciones en la carga, disminuyen considerablemente su desempeño. Varias constantes han sido desarrolladas, así como la ecuación (4.2) utilizada en esta investigación, en la que se utiliza el número complejo asociado al cociente obtenido a partir de las corrientes en condición de prefalla y a condición nominal para multiplicar las cargas del sistema. Se recomienda buscar la mejor estrategia entre las desarrolladas para conseguir mejores resultados que dependen del método a utilizar. Se ha implementado la misma fracción, pero esta vez se realiza entre en cociente de las magnitudes, como se muestra en la expresión (6.1).

$$Constante1 = \begin{bmatrix} abs\left(\frac{I_{(s/e)a}^p}{I_{(s/e)a}}\right) & 0 & 0 \\ 0 & abs\left(\frac{I_{(s/e)b}^p}{I_{(s/e)b}}\right) & 0 \\ 0 & 0 & abs\left(\frac{I_{(s/e)c}^p}{I_{(s/e)c}}\right) \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Para propósitos de la metodología mostrada en este documento, la constante que se presenta en la ecuación (4.2) es la que influye de mejor manera en el desempeño del método de localización. A modo de anexo se muestran los resultados del rendimiento que presenta la metodología al implementar la constante mostrada en la ecuación (6.1). Se debe tener en cuenta que ésta no es la mejor manera de desarrollar la metodología, y como se dijo en ocasiones anteriores, es una simple aproximación, como consecuencia se tendrá un deterioro en la eficiencia del método propuesto.

Se debe tener en cuenta que para la implementación del método propuesto, es necesario conocer las medidas fundamentales de tensión y corriente en la subestación principal, esta información es proporcionada por los descriptores del circuito. Los parámetros serie y en derivación de las líneas también son necesarios. Se recomienda introducir todos los efectos que puedan afectar al sistema de distribución y que intervengan en la localización de fallas, y de esa manera conseguir análisis más completos y resultados cada vez más exactos.

## 6.2 Trabajos futuros

Ya que los sistemas de distribución son una parte importante del sistema de potencia y están directamente relacionados con el usuario final, por lo que se requiere mantener altos niveles en la calidad de la energía, es importante seguir realizando y renovando esta clase de estudios, para mejorar los índices de continuidad en el suministro del sistema. Se propone como trabajos futuros, mejorar el desempeño del método de localización de fallas en sistemas de distribución propuesto.

Ya que la metodología propuesta sólo es validada en el circuito IEEE de 34 nodos, con modelo de impedancia constante, es necesario la implementación de la estrategia desarrollada en sistemas de distribución más robustos y en las que se consideren otros modelos de carga,. Se propone como trabajo futuro, implementar la estrategia en otros sistemas de distribución en los que se pueda realizar un análisis más completo de la metodología.

Los métodos de localización de fallas basados en el modelo (MBM), dependen claramente del modelo, y como se presentó anteriormente, la forma de predecir la magnitud de la carga aún no es clara y no es posible mostrar un valor correcto para cada una de ellas. Por lo tanto, es muy importante desarrollar una investigación al respecto, ya sea a partir de la curva de demanda o de medidas, que permita predecir con mejor precisión la magnitud de la carga y así aprovechar de una mejor manera los diferentes modelamientos de la carga en ATP desarrollados en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>.

El incremento de la demanda está obligando a la creación de nuevas formas de generar electricidad que funcionan en conjunto con las fuentes existentes, a esto se denomina generación distribuida, y su incursión genera que los flujos de corriente sean bidireccionales. Con ello se presenta la necesidad de proporcionar nuevas metodologías de localización de fallas. Como trabajo futuro se propone la localización de fallas de alta impedancia en sistemas de distribución con generación distribuida.

# CAPÍTULO 7

## 7. Anexos

En este capítulo se presentan algunos de los gráficos más importantes, que evalúan la eficiencia del método bajo otras condiciones, y que no se mencionaron en el capítulo 4,

En las figuras 7.1, 7.2 y 7.3, se muestran las pruebas realizadas a la metodología con el sistema a condición nominal y aumentando el valor de resistencia de falla hasta 750  $\Omega$ .

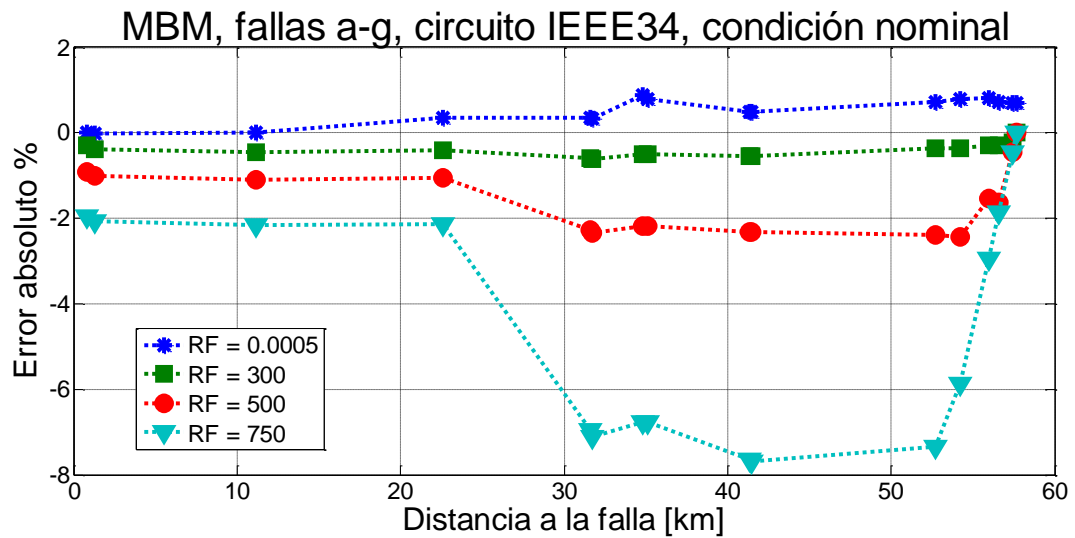


Figura 7.1. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*a-g*) a condición nominal

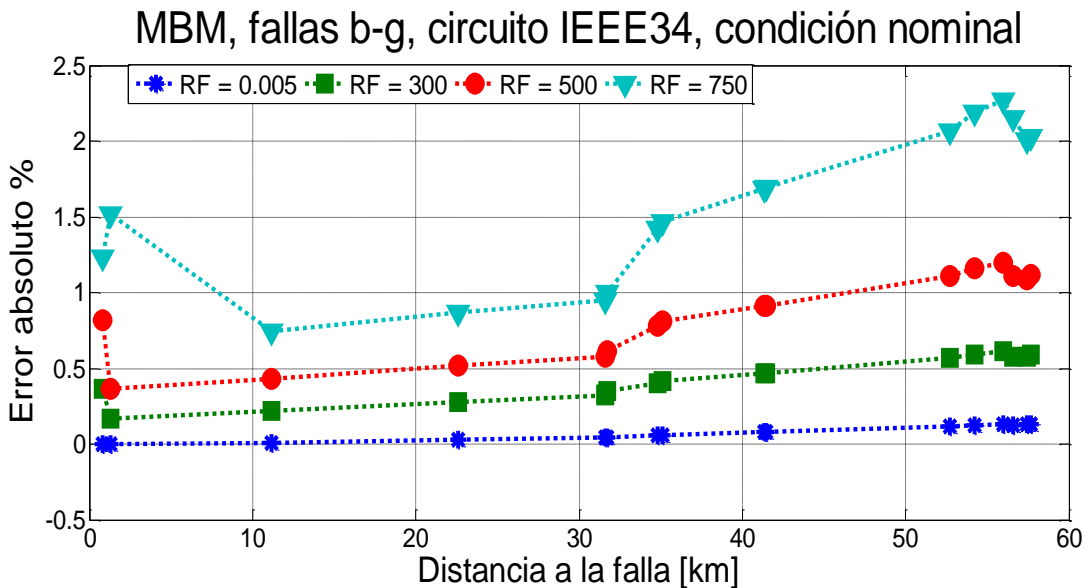
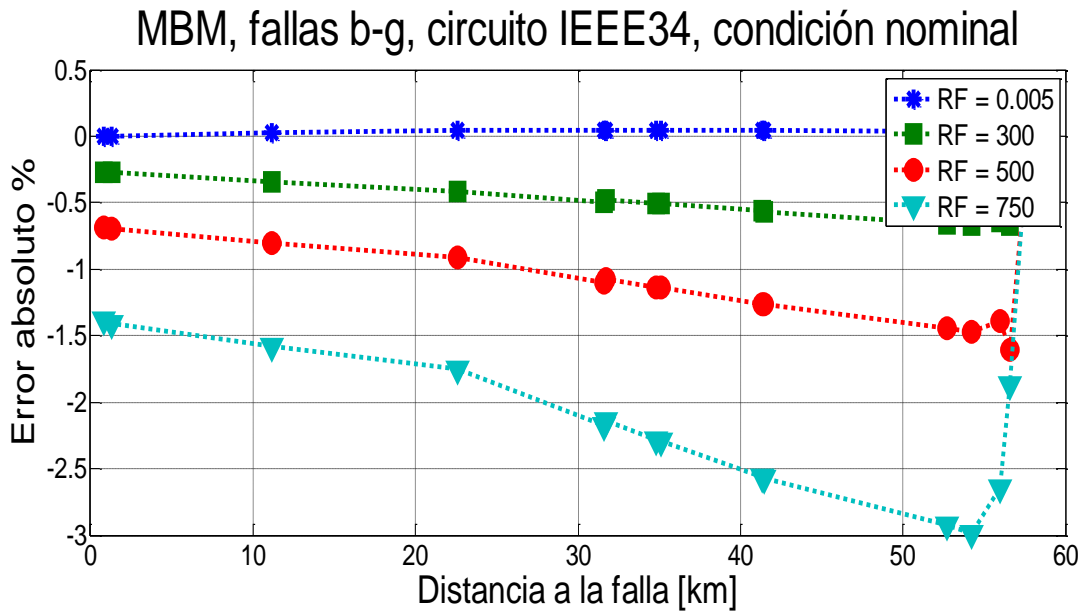
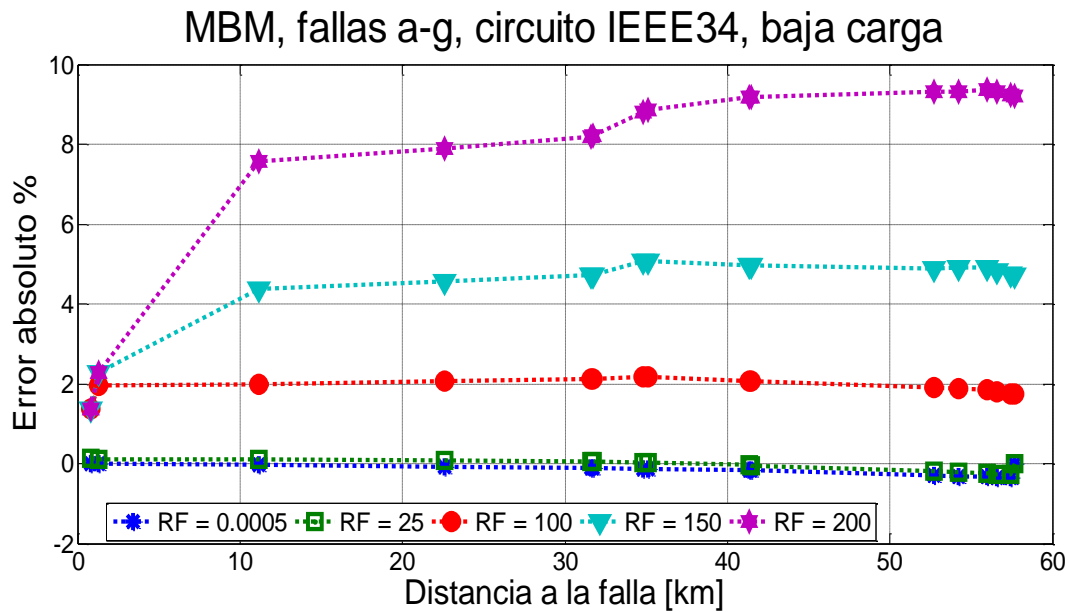


Figura 7.2. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*b-g*) a condición nominal



**Figura 7.3. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) a condición nominal**

En las figuras 7.4, 7.5 y 7.6 se muestran los resultados de las pruebas realizadas al método de localización de fallas para el escenario de variación en la carga entre el 30% y 60% (baja carga), en las que se utiliza la constante mostrada en la ecuación (6.1).



**Figura 7.4. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*a-g*) y baja carga.**

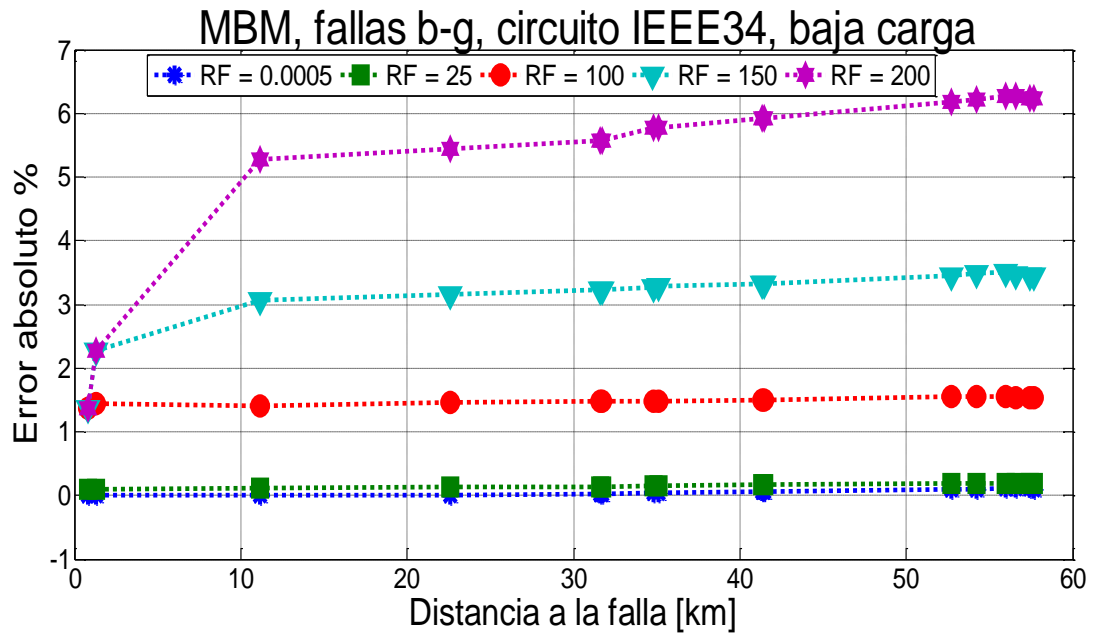


Figura 7.5. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*b-g*) y baja carga.

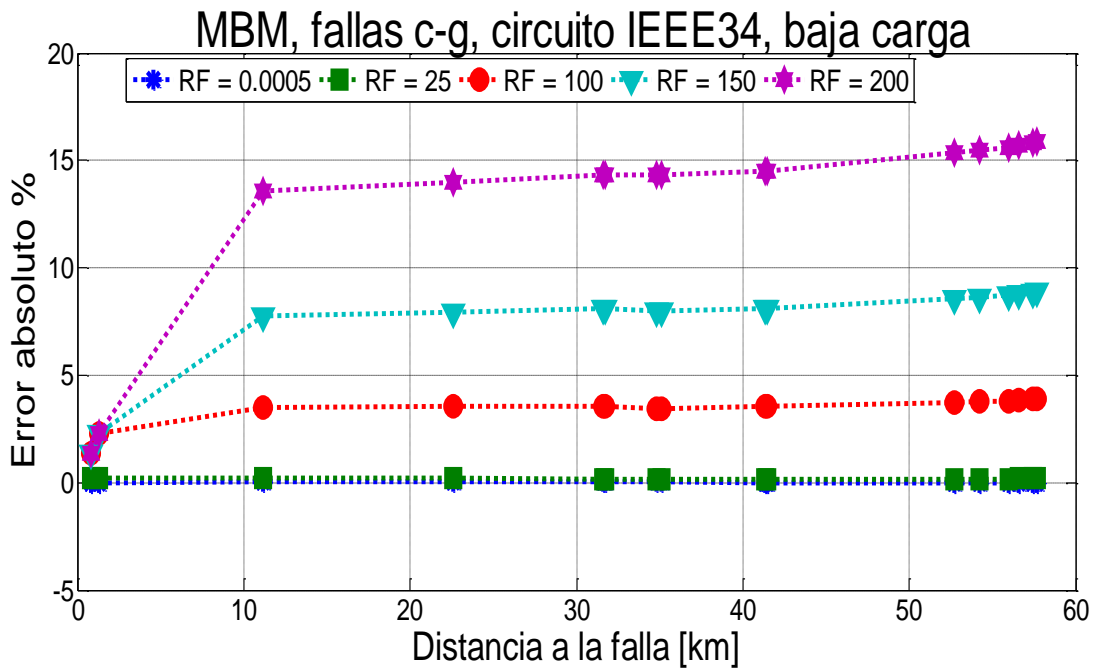


Figura 7.6. Rendimiento del método para fallas monofásicas (*c-g*) y baja carga.

En las figuras 7.7, 7.8 y 7.9 se muestran los resultados de las pruebas realizadas al método de localización de fallas para el escenario de variación en la carga entre el 60% y 120% (media-alta carga), en las que se utiliza la constante mostrada en la ecuación (6.1).

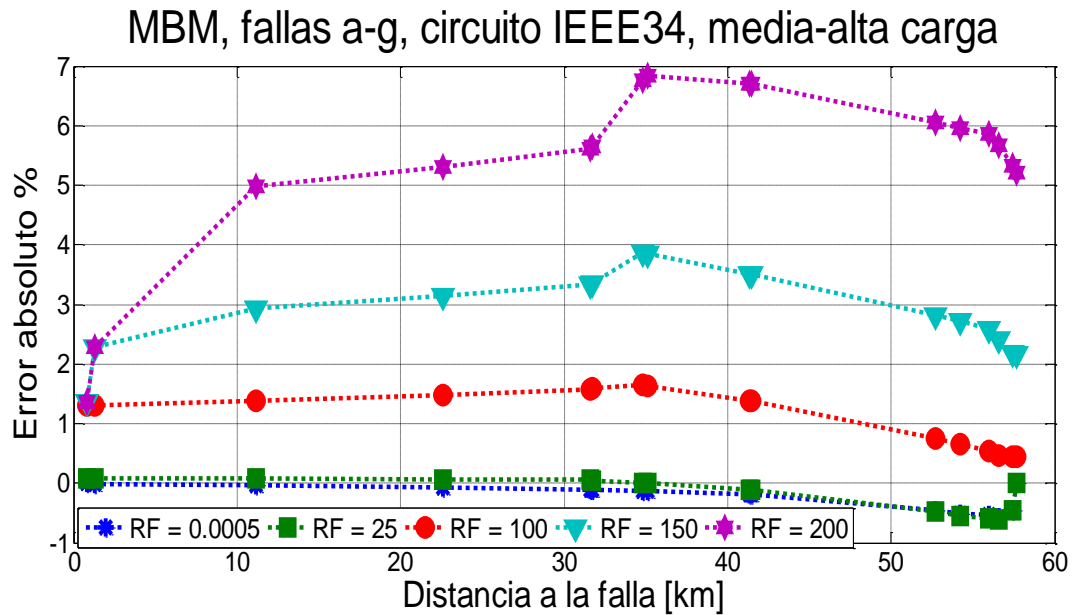


Figura 7.7. Rendimiento del método para fallas monofásicas (a-g) y media-alta carga.

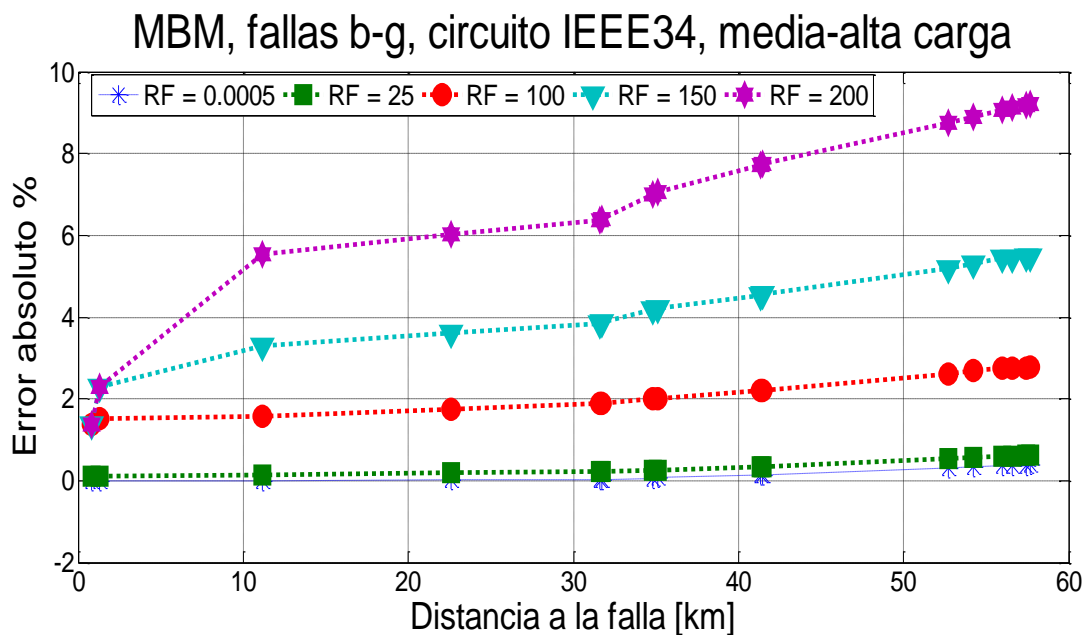
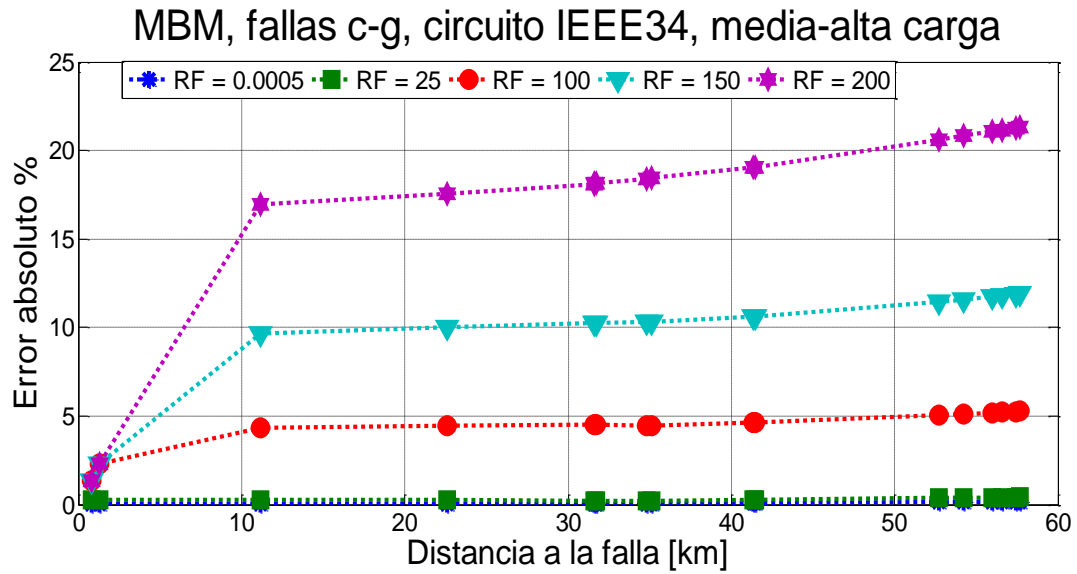
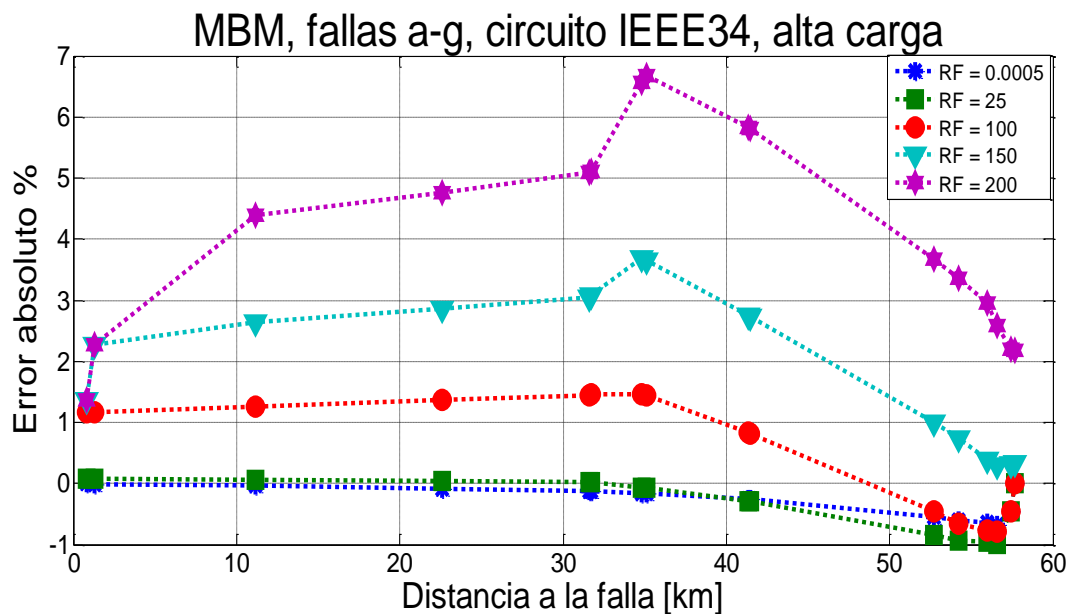


Figura 7.8. Rendimiento del método para fallas monofásicas (b-g) y media-alta carga.



**Figura 7.9. Rendimiento del método para fallas monofásicas (c-g) y media-alta carga.**

En las figuras 7.10, 7.11 y 7.12 se muestran los resultados de las pruebas realizadas al método de localización de fallas para el escenario de variación en la carga entre el 100% y 150% (alta carga), en las que se utiliza la constante mostrada en la ecuación (6.1).



**Figura 7.10. Rendimiento del método para fallas monofásicas (a-g) y alta carga**

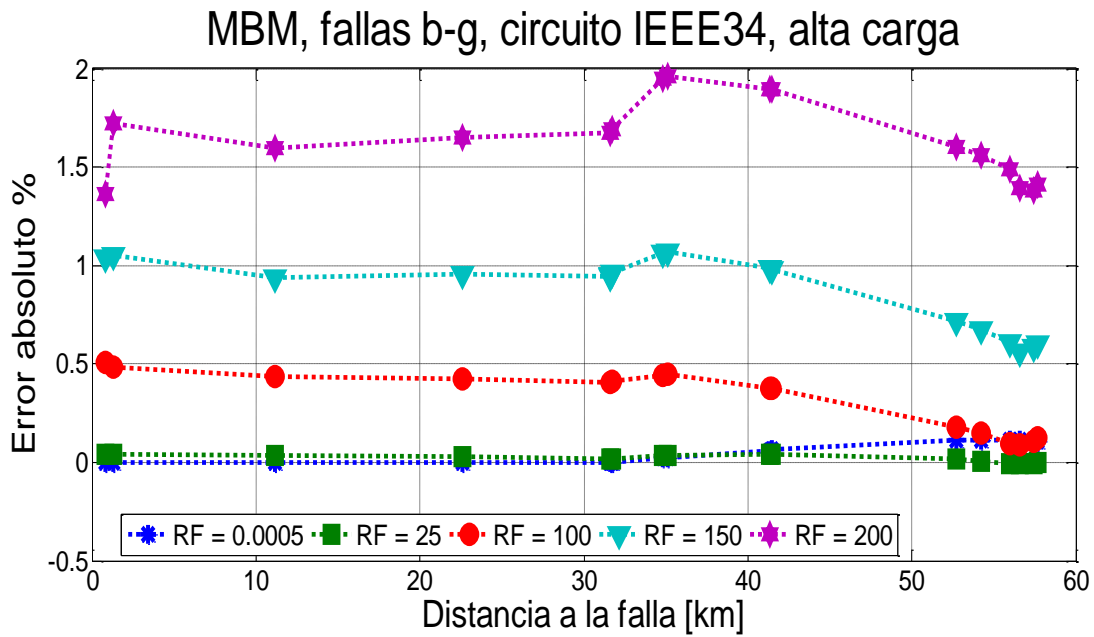


Figura 7.11. Rendimiento del método para fallas monofásicas (b-g) y alta carga

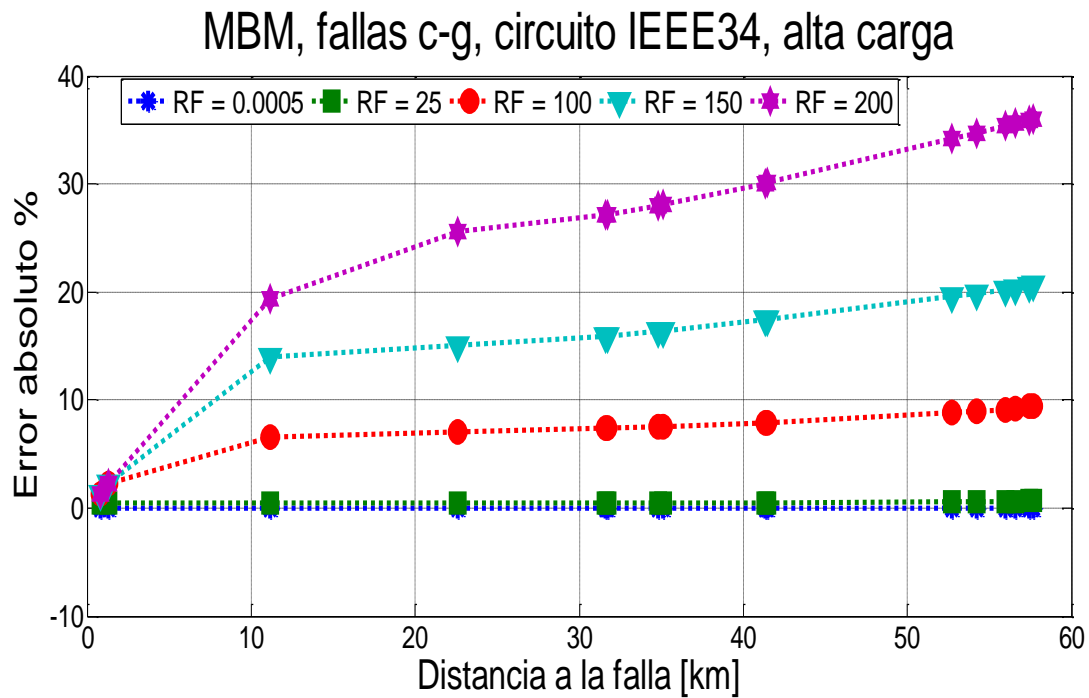


Figura 7.12. Rendimiento del método para fallas monofásicas (c-g) y alta carga



## 8. BIBLIOGRAFIA

[ANDE, 1995] Anderson, P.M, “Analysis of faulted power systems”, (IEEE Press, New York, NY, USA, 1995).

[BARR, 2009] Moralez Germán Andrés, René Alexander Barrera, Ordóñez Gabriel, “Análisis en el plano R-X para localizar fallas de alta impedancia”, revista chilena de ingeniería, volumen 17 N°2. 2009.

[BEDO, 2010] Bedoya Andrés Fernando. “Desarrollo de un modelo para intercambio de datos entre ATP y Matlab aplicado al problema de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución”. 2010, Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[BEDO, 2013] Bedoya Andrés Fernando. “Estrategia generalizada para la aplicación de métodos de localización de fallas basados en la estimación de la impedancia o MBM”. 2013, tesis presentada como requisito para optar el título de Magister en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[BRET, 2010] R.H. Salim, K.C.O. Salim, A.S. Bretas, “Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems”, IET Generation, Transmission & Distribution, September 2010.

[BRET, 2011] Nunes J.U.N., Bretas A.S. , “ A Impedance-Based Fault Location Technique for Unbalanced Distributed Generation Systems”, IEEE Trondheim PowerTech 2011.

[CREG, 2008]. Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, Resoluciones CREG 070 de 1998, CREG 096 de 2000, CREG 084 de 2002, CREG 097 de 2008.

[EBER, 2000] G. Eberl, S. Hnninen, M. Lehtonen and P. Schegner, “Comparison of artificial neutral networks and conventional algorithms in ground fout distance computation”. Proceedings IEEEPower Engineering Society Winter Meeting. Vol.3 N°23-27, pp. 1991-1996. January 2000.

[IEEE, 2000] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee “Radial Test Feeders”. 2000. <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/sacom/testfeeders.html>.

[KERS, 2002]. Kersting, W.H, “Distribution system modeling and analysis”, CRC press, boca ratón, Estados Unidos, 2002.

[MARI, 2012] Marin J. “Análisis del efecto de la variación de parámetros de modelo de un sistema de distribución sobre las metodologías de localización de fallas paralelas”. 2012, Tesis presentada como requisito para optar el título de: Magister en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[MORA, 2006] Mora J, “Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento”, Tesis Doctoral Universitat de Girona, ISBN 978-84-690-4513-8.

[MORA, 2011]. Juan J. Mora F. “Determinación de fallas paralelas de baja impedancia, como estrategia base para reducir la frecuencia y el tiempo de interrupción del suministro de energía eléctrica a los usuarios de las redes de distribución de EPM (LFEPM10)”, Documento base de transferencia del conocimiento, 2011.

[MORA, 2012] A. Bedoya Cadena, J.J. Mora Flórez, S. Pérez Londoño, “Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica”, Revista EIA, ISSN 1794-1237, número 17, p. 21-37. Julio de 2012.

[RICH, 2011] D. C Richard and Z. Hamed, “High Impedance Fault Detection in Low Voltage Networks” IEEE, 2011.

[SALI, 2008] Salim, R.H.: "Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de energia eléctrica fundamentada na impedancia" (in portuguese), Mater thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, 2008, Porto Alegre, Brazil.

[SEPP, 2001]. Seppo J. Hänninen D.Sc. (Tech.), “Single phase earth fault in high impedance grounded networks, characteristics, indication and location”, Tesis doctoral University of Technology (Espoo, Finland).

