

# **ANÁLISIS DE LOCALIZADORES DE FALLAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON MODELO DINÁMICO DE CARGA**

**DANIEL FERNANDO PATIÑO IPUS**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y  
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2015**

**ANÁLISIS DE LOCALIZADORES DE FALLAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
CON MODELO DINÁMICO DE CARGA**

**DANIEL FERNANDO PATIÑO IPUS**

**DIRECTOR:**

**Ph. D. JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ**

**CO-DIRECTOR:**

**Ing. HAROLD ANDRÉS CIFUENTES CHAVES**

**ANTEPROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y CIENCIAS DE  
LA COMPUTACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2015**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

*Ingeniero Electricista  
Ph. D. Juan José Mora Flórez  
Director*

---

*Ingeniero Electricista  
Harold Andrés Cifuentes Chaves  
Co-Director*

---

*Firma del jurado*

## Tabla de contenido

Lista de figuras .....	5
Lista de tablas .....	6
Agradecimientos .....	7
<u>Capítulo I: Introducción</u> .....	8
<u>Definición del problema</u> .....	8
<u>Objetivos</u> .....	9
<u>Objetivo general</u> .....	9
<u>Objetivos específicos</u> .....	9
<u>Propuesta de solución</u> .....	10
<u>Aportes del proyecto</u> .....	11
<u>Contenido del documento</u> .....	11
<u>Capítulo II: Aspectos teóricos</u> .....	12
<u>Introducción</u> .....	12
<u>Antecedentes</u> .....	12
<u>Métodos de localización</u> .....	14
<u>Método de localización basado en componentes de secuencia</u> .....	14
<u>Método de localización basado en componentes de fase</u> .....	18
<u>Modelos de carga</u> .....	20
<u>Introducción</u> .....	20
<u>Modelos estáticos de carga</u> .....	21
<u>Modelos dinámicos de carga</u> .....	22
<u>Modelo dinámico de carga de recuperación exponencial</u> .....	22
<u>Modelo compuesto de carga</u> .....	23
<u>Capítulo III: Metodología propuesta</u> .....	26
<u>Selección del modelo</u> .....	26
<u>Selección de parámetros</u> .....	26
<u>Comportamiento del modelo ante perturbaciones</u> .....	28
<u>Implementación del modelo en ATP</u> .....	31
<u>Respuesta del modelo dinámico de carga implementado en ATP</u> .....	34
<u>Implementación del modelo en los localizadores de fallas</u> .....	38
<u>Seudocódigo y diagrama de flujo</u> .....	40
<u>Capítulo IV: Aplicación de la metodología propuesta</u> .....	44
<u>Sistema de pruebas IEEE de 34 nodos</u> .....	44
<u>Consideraciones previas</u> .....	44
<u>Medida del desempeño</u> .....	45
<u>Escenarios de prueba</u> .....	46
<u>Pruebas en el sistema prototipo</u> .....	47
<u>Capítulo V: Conclusiones y trabajos a futuro</u> .....	53
<u>Conclusiones</u> .....	53
<u>Trabajos a futuro</u> .....	54
<u>Capítulo VI: Bibliografía</u> .....	55
<u>Anexo A.1:</u> .....	57
<u>Anexo A.2:</u> .....	61
<u>Anexo A.3:</u> .....	68
<u>Anexo A.4:</u> .....	70
<u>Anexo A.5:</u> .....	74

### Listado de figuras

Figura 2.1: Diagrama unifilar de un sistema con falla entre los nodos ( $x$ ) y ( $y$ ).....	14
Figura 2.2: Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla monofásica a tierra.....	15
Figura 2.3: Segmento equivalente de circuito para la estimación de la distancia al punto de falla.....	15
Figura 2.4: Circuito equivalente en redes de secuencia, en caso de una falla bifásica.....	17
Figura 2.5: Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla trifásica.....	18
Figura 2.6: Circuito simplificado en pre-falla de la red de distribución.....	19
Figura 2.7: Circuito simplificado de falla en el punto $m$ de la red de distribución.....	19
Figura 2.8: Circuito equivalente del modelo compuesto de carga.....	24
Figura 3.1: Ecuaciones en Matlab para el modelo de recuperación exponencial.....	28
Figura 3.2: Respuesta modelo de recuperación exponencial ante variaciones en la tensión.....	29
Figura 3.3: Ecuaciones en Matlab para el modelo compuesto.....	30
Figura 3.4: Respuesta modelo compuesto.....	30
Figura 3.5: Respuesta para el modelo compuesto ante variaciones en la tensión.....	31
Figura 3.6: Ventana y bloque modelo de recuperación exponencial en ATP.....	32
Figura 3.7: Ventana y bloque modelo compuesto en ATP.....	33
Figura 3.8: Respuesta de la potencia en la carga ante perturbaciones en la tensión.....	34
Figura 3.9: Respuesta de la potencia activa en la carga al momento de la energización, y una posterior perturbaciones en la tensión.....	35
Figura 3.10: Diagrama de flujo que sigue la programación del bloque de modelo dinámico de recuperación exponencial por medio de la herramienta <i>Models</i> de ATP.....	36
Figura 3.11: Diagrama de flujo que sigue la programación del bloque de modelo dinámico de carga compuesto por medio de la herramienta <i>Models</i> de ATP.....	37
Figura 3.12: Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla por el método de componentes de secuencia.....	41
Figura 3.13: Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla por el método de la reactancia mínima de falla.....	42
Figura 3.14: Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla, por el método de la reactancia mínima de falla modificado.....	43
Figura 4.1. Sistema de pruebas IEEE de 34 nodos.....	44
Figura 4.2. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla monofásica en A.....	48
Figura 4.3. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla bifásica en AB.....	48
Figura 4.4. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla trifásica en ABC.....	49

### *Listado de tablas*

Tabla 2.1: Datos característicos para algunas cargas individuales .....	22
Tabla 3.1: Valores constantes de tiempo para algunas de las cargas más comunes .....	27
Tabla 3.2: Valores medios mensuales de los parámetros estimados y su desviación .....	27
Tabla 3.3: Rango de los parámetros para el modelo de recuperación exponencial .....	27
Tabla 3.4: Datos típicos del motor de inducción .....	27
Tabla 3.5: Tipos de motores en la tabla de datos típicos .....	28

## **Agradecimientos**

Agradezco al gran creador del universo que ha permitido mi estancia en esta tierra. A mis padres y mis hermanos, que han impulsado siempre con fe a lo largo de todos los proyectos en los que he incursionado. A mi hijo, quien me ha dado el motivo más grande para salir a triunfar en esta vida. Y no creas que de ti me he olvidado, te agradezco por tu apoyo incondicional en los momentos más complicados y por todo el tiempo que juntos hemos pasado.

Le agradezco también al Ph. D. Juan José Mora Flórez y al Ing. Harold Andrés Cifuentes Chávez, por su confianza, además de la gran colaboración con el desarrollo de este proyecto.

También le agradezco a todos los compañeros que han viajado conmigo por este mar de tiempo y espacio, y que de alguna manera sus acciones indirectas han replicado en una contribución con el desarrollo de este proyecto.

# CONTENIDO

## Capítulo 1

### INTRODUCCION

La calidad, en términos de la energía eléctrica se define como el estándar en servicio de energía que propende por la ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje RMS suministrado al usuario, entre otros. La calidad de la energía incluye, la calidad del suministro de energía que llega al usuario final y la calidad de la atención al cliente referente al asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación del servicio. La calidad del suministro se relaciona con las perturbaciones y variaciones de la tensión y corriente suministrada por el operador de red. Ésta se divide en dos, la forma de onda y la continuidad del suministro de energía [CREG08]. La continuidad del suministro es uno de los indicadores de calidad de la energía y está ligado a la duración de la interrupción, y al número de interrupciones en un periodo de tiempo.

La investigación y desarrollo de localizadores de fallas en sistemas de distribución, permite a los distribuidores de energía eléctrica, mejorar los índices de calidad del servicio [MORA06]. Para el caso de Colombia, en 1998 mediante la resolución 070 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se presentan estos índices de calidad como Duración Equivalente de las interrupciones del Servicio (DES) y Frecuencia Equivalente de las interrupciones del Servicio (FES). Actualmente, se han modificado estos índices mediante la resolución 097 de la CREG en 2008, y se definen como el Índice de Referencia Agrupado de la Discontinuidad (IRAD) y el Índice Trimestral Agrupado de la Discontinuidad (ITAD). Tales índices definen la calidad del servicio suministrado por las empresas distribuidoras de energía, para así modificar los cargos por el uso de la red eléctrica [CREG08].

#### 1.1. Definición del problema

En los sistemas eléctricos de potencia, la calidad de la energía es un tema de gran importancia, y para el caso de Colombia las entidades reguladoras de energía obligan a tener buenos índices de calidad y pautas de remuneración [CREG08]. La continuidad del suministro es uno de los indicadores de la calidad de la energía y está ligado a la duración de la interrupción y al número de interrupciones en un periodo de tiempo.

La continuidad del suministro se afecta por fallas en el sistema, las cuales pueden ser causadas por descargas atmosféricas, crecimiento de vegetación, desastres naturales, así como también se puede ocasionar por aspectos técnicos como desgaste en los materiales aislantes o falta de mantenimiento, entre otros [DASR98]. Las fallas pueden ser permanentes o transitorias.

Estas fallas se pueden clasificar en dos tipos, las de tipo serie cuando se tiene ruptura en un conductor pero no tiene contacto con tierra u otra fase, y las de tipo paralelo que están asociadas con cortocircuitos a tierra o entre fases. Estas fallas paralelas se sub-dividen en 5 grupos: monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra, trifásicas y trifásicas a tierra, en donde el 70% de la incidencia se presenta en las monofásicas [ANDE95]. Hay investigaciones que muestran que el 80% de las fallas ocurren en los sistemas de distribución [CROZ99]. Cuando las fallas se presentan en los sistemas de distribución, los métodos de localización se realizan, por razones económicas, solo con medidas de tensión y corriente en la subestación. Existen muchos métodos de localización de fallas basados en el modelo (MBM) con los cuales a partir de las mediciones en la subestación y el modelo de la red existente se puede determinar la distancia de la falla a la subestación [MORA06]. En términos generales, la resistencia de falla se supone entre valores de 0 y  $40\Omega$  como se presenta en [DAGE00].

De otra parte, en cuanto a la representación del sistema eléctrico, los modelos para los elementos del sistema presentan un buen comportamiento ante análisis de perturbaciones y estabilidad, aunque para la carga sigue siendo un área no muy explorada y con muchas incertidumbres, lo que permite un espacio de amplia



investigación [ATIA00]. Se han desarrollado estudios para el modelado de elementos individuales como motores, hornos, lámparas, entre otros, pero desarrollar un modelo que contenga todos los elementos del sistema de potencia no es simple, puesto que el comportamiento de la carga es dinámico y no determinístico [CONC82]. Lo anterior se debe a que las características de la carga varían durante las diferentes horas del día, los días de la semana, las estaciones del año o por un evento característico. Para un correcto estudio se requiere el conocimiento del efecto combinado de todos los elementos que se encuentren conectados a un nodo de análisis, lo cual es complejo debido a la gran diversidad de elementos conectados a la red [STOJ07].

El comportamiento de la carga es dinámico y no determinístico, lo cual afecta el análisis del sistema y los métodos de localización de fallas. Por esto, surgen preguntas como: ¿Existe un modelo dinámico de carga con una respuesta más cercana al sistema de potencia en campo? Esta pregunta lleva a pensar: ¿Qué implica obtener una respuesta más cercana al sistema en campo?, además se plantea si ¿Será posible implementar este modelo en métodos de localización de fallas? y ¿Qué problemas podrían surgir al implementar este localizador? y finalmente, ¿Tendrá mejores resultados frente a los modelos de carga tradicionales?

Estas preguntas son las que se pretende resolver con el desarrollo de esta investigación.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Implementar un modelo de carga dinámico para métodos de localización de fallas y analizar el efecto del desempeño en los localizadores.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Alcanzar el estado del arte en modelado de sistemas de distribución para análisis de fallas.
- Seleccionar un modelo de carga dinámico con buen desempeño en problemas de naturaleza similar.
- Implementar el modelo de carga dinámico en sistemas de distribución modelados en ATP.
- Implementar un método de localización basado en componentes de secuencia y un método de localización basado en componentes de fase, para el análisis circuital del sistema de potencia que incluyan el modelo de carga dinámico.
- Probar y evidenciar los problemas para los métodos desarrollados en sistemas de prueba prototipo, como el IEEE de 34 nodos.
- Reportar los resultados de la investigación.

### 1.3. Propuesta de solución

Este proyecto se desarrolla en seis etapas. Estas etapas están orientadas a realizar un análisis del desempeño de localizadores de fallas que contengan modelos dinámicos de carga, para lo cual se debe implementar un bloque de ATP que contenga los modelos seleccionados.

En la primera etapa se realiza un análisis bibliográfico para el modelado de sistemas de distribución, con énfasis en el modelado dinámico de la carga ante perturbaciones y fallas en el sistema. Además, se analizan métodos de localización de fallas en sistemas de distribución basados en el modelo de la red existente. En la segunda etapa se seleccionan dos modelos dinámicos de carga de parámetros constantes, además se analiza, discute y selecciona los parámetros para este modelo según el tipo de carga. Estos modelos se encuentran en numerosos estudios para el análisis del comportamiento de la carga y presentan buen desempeño ante perturbaciones en la tensión. Luego, en la tercera etapa se desarrolla e implementa un nuevo bloque que contiene un modelo de carga de Recuperación Exponencial, y uno que contiene el modelo de carga compuesto de orden tres. Estos dos modelos de carga se implementan en el software ATP mediante el bloque programable *Models* (Type-94). En la cuarta etapa se implementan dos métodos de localización de fallas en sistemas de distribución, uno basado en componentes de secuencia y otro basado en componentes de fase, desarrollados en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>. Ambos métodos presentan un buen desempeño con modelos estáticos de carga. Estos métodos se implementan mediante el software MATLAB, el cual sirve como la herramienta de trabajo para ejecutar los algoritmos de localización de fallas. En estos métodos se incluye el modelo dinámico de carga, para considerar sus efectos en la localización asociadas al comportamiento dinámico de carga. Luego, en la quinta etapa se realizan las pruebas a los métodos desarrollados bajo distintos escenarios, y se evidencian los problemas encontrados para el estudio de localización de fallas en sistemas de distribución con modelo dinámico de carga. En la etapa final se reportan los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta para diferentes escenarios de prueba, además de las conclusiones y el trabajo futuro.

### 1.4. Principales aportes del proyecto

En este proyecto se desarrollan e implementan dos nuevos bloques, uno que contiene un modelo de carga de recuperación exponencial (Anexo1), y el otro contiene un modelo compuesto de carga de orden tres (Anexo2). Los bloques se crean en el software ATP mediante el bloque programable *Models* (Type-94), en modo Norton non-transmission con lenguaje de programación basado en Fortran. Estos modelos no habían sido incluidos en estudios previos de localización de fallas.

También se presenta el modelo dinámico de carga en función de transferencia, este modelo se encuentra reportado en el software Simulink. Además se plantea una propuesta de solución para el modelo al aplicarle la transformada Z y representarla en diferencias hacia atrás (Anexo3).

Adicionalmente se modificó la programación de las herramientas ATPeXchange y simulacionRF (Anexo4), estas herramientas son creadas en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>, para que reconozcan modelos dinámicos de carga. Estas herramientas proporcionan los datos necesarios del sistema en falla y pre-falla para ingresar a los métodos de localización.

## **1.5. Contenido del documento**

Este proyecto está dividido en seis capítulos. El capítulo inicial contiene la introducción del proyecto, los objetivos, la propuesta de solución y los aportes del proyecto. En el segundo capítulo se encuentran los aspectos teóricos del proyecto, como, antecedentes referentes al modelado de cargas en localizadores de fallas, métodos de localización seleccionados y modelos de carga. El tercer capítulo corresponde a la metodología propuesta, aquí se presenta la selección del modelo dinámico de carga, implementación del modelo seleccionado en ATP, implementación del modelo en localizadores de fallas y el pseudocódigo para los métodos de localización. En el cuarto capítulo se encuentra la aplicación de la metodología propuesta, se presentan los sistemas de pruebas, consideraciones previas y pruebas en los sistemas prototipo. El capítulo quinto contiene las conclusiones y las indicaciones de trabajo futuro. El capítulo final contiene la bibliografía utilizada en el proyecto.

## Capítulo 2

### ASPECTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Introducción

En los sistemas eléctricos de potencia, se requieren modelos de carga apropiados para desarrollar estudios del comportamiento del sistema cada vez más precisos. Estos modelos son complejos ya que el comportamiento de la carga es dinámico y no determinístico, lo cual afecta el análisis del sistema eléctrico. También, se necesita el conocimiento del efecto combinado de todos los elementos que se encuentren conectados a un nodo de análisis. La gran cantidad de elementos conectados a la red y la diversidad entre ellos, conduce a imprecisiones acerca de la composición de la carga. Además, se tiene incertidumbre en la característica de muchos componentes de la carga, particularmente ante variaciones grandes de tensión y frecuencia [ATIA00], [CHIA96].

Existen diferentes modelos de carga, los cuales se pueden dividir en dos grandes grupos: los modelos estáticos y los modelos dinámicos. Los localizadores de fallas en su mayoría se han desarrollado utilizando modelos de carga estáticos de parámetros constantes, como el de impedancia constante o el modelo ZIP/Exponencial. Estos modelos, tienen un correcto desempeño para el estudio de localización de fallas fuera de línea. Sin embargo, para el estudio de localización de fallas en línea, se debe tener en cuenta el comportamiento dinámico de la carga frente a variaciones de tensión con respecto al tiempo. Este comportamiento se puede dividir en tres fases. La primera es una fase transitoria que depende de las perturbaciones electromagnéticas y electromecánicas del sistema, que se caracteriza por una caída brusca en la potencia respecto a su posición antes de la perturbación. La segunda fase comprende la recuperación de los niveles de la potencia generalmente dirigidos por los controles propios del sistema o por acción de los cambiadores de tap bajo carga OLTC (On Load Tap Changer). En la fase final se alcanza el régimen permanente, y se utilizan generalmente modelos exponenciales respecto al voltaje [CHIL05].

#### 2.2. Antecedentes

Alrededor de los años 60, comienza a tomar importancia el tema de seguridad en los sistemas eléctricos de potencia, debido a un incidente que dejó sin suministro de energía eléctrica al Noreste de Estados Unidos [CSEP14]. Una dificultad asociada se encuentra en las herramientas de análisis de esa época, debido a que eran métodos fuera de línea, y no se podía tener una descripción de la red en tiempo real. Así fueron surgiendo tecnologías como SCADA para la supervisión, control, y adquisición de datos. Estos datos pueden ser almacenados, para después implementar los algoritmos existentes. Sin embargo, en redes de distribución es muy costoso implementar los elementos de medición debido a la gran cantidad de nodos existentes y el costo que representan los medidores, lo cual provoca que en los sistemas de distribución, el análisis de contingencias se convierta en un espacio de amplia investigación [MORA06], [CSEP14].

Los métodos más antiguos y rudimentarios para localizar y despejar fallas, consisten en la inspección visual, el seccionamiento, la reparación y la posterior energización de los circuitos en falla reportados por los clientes; sin embargo, este método es poco eficiente debido a que se invierte mucho tiempo en la inspección visual de la línea, además de presentarse riesgos para personas o daños en los equipos cuando se energiza mientras se tiene la red en falla [MORA06].

A continuación se presentan algunas referencias relacionadas al desarrollo de localizadores de fallas con distintos modelos de carga.

En [MORA06] se presenta un análisis y prueba comparativa entre varios Métodos Basados en el Modelo (MBM) y Métodos Basados en el Conocimiento (MBC). Como conclusiones relevantes de este proyecto se tienen que la exactitud de los métodos basados en el modelo está estrechamente relacionada con el conocimiento

de la red. Además se presentan problemas de múltiple estimación de la falla y solucionarlos representa un costo económico debido a que se requieren medidores en puntos estratégicos de la red. Por último, la incertidumbre en la carga representa posibles errores en la estimación de la falla.

En [GERM07] se propone determinar gráficamente la reactancia de falla en función de una distancia variable a partir de las medidas de tensión y corriente en pre-falla y falla, además el conocimiento de la red existente. Para lograr la estimación se utilizan componentes de fase y se describe la impedancia de falla dependiendo de la distancia variable, el punto en falla se encuentra cuando la reactancia de falla es cercana a cero. Este es un método nuevo y fue desarrollado en el grupo de investigación *ICE*<sup>3</sup>. Como conclusiones relevantes para este proyecto se tienen que, el método presenta una alta precisión sin importar la resistencia de falla y a diferentes distancias de falla. También considera la incertidumbre en la carga en pre-falla y falla.

En [BEDO13] se define y valida una estrategia generalizada para la aplicación de métodos de localización de fallas basados en el modelo del sistema eléctrico (MBM), además de proponer una estrategia que permite mejorar el desempeño de los MBM. Entre los principales aportes de esta tesis se tiene, el desarrollo y validación de una herramienta que permite el intercambio de información entre programas de simulación de circuitos eléctricos (ATP) y algoritmos que localizan fallas en sistemas eléctricos de distribución en MATLAB. Además se propone un método de localización de fallas basado en componentes de secuencia que permite estimar el punto de falla al resolver una ecuación cuadrática que depende de la distancia. Como conclusiones relevantes para este proyecto se tienen, que disponer de una herramienta que reduce los circuitos ramificados a radiales equivalentes, facilita en gran manera la programación de métodos de localización de fallas. Esta herramienta entrega los datos necesarios para el método de forma organizada y sencilla, lo cual facilita el trabajo del programador. Se tiene un buen desempeño del método propuesto, a pesar de que la transformación a componentes de secuencia causa errores cuando se tiene una red desbalanceada.

En [RICA13] se adaptan, desarrollan e implementan distintos circuitos de distribución, además se determina la influencia de parámetros de la línea, de la carga y de la fuente en algunos métodos de localización de fallas. Entre los principales aportes de la investigación se tiene el desarrollo e implementación de un nuevo bloque que contiene un modelo de carga ZIP/Exponencial en el software ATP mediante el bloque programable Models (Type-94), en modo Norton non-transmission con lenguaje de programación basado en Fortran. Estos modelos no habían sido incluidos en estudios previos de localización de fallas. Como conclusiones, en los localizadores de fallas analizados, se tiene un comportamiento adecuado frente a distintos tipos de fallas haciendo uso del modelo de carga ZIP/Exponencial. Además este bloque que contiene el modelo de carga, se incorpora fácilmente a las herramientas desarrolladas por el grupo de investigación *ICE*<sup>3</sup> y se valida frente a distintos ambientes de simulación probados por el grupo.

En [CRIS14] se plantea una metodología de localización de fallas con generación distribuida bajo entornos de variación en los parámetros del modelo del sistema eléctrico de distribución. Como conclusión se presenta que el método de localización de componentes de secuencia tiene un buen desempeño frente a diferentes condiciones operativas de variación de carga.

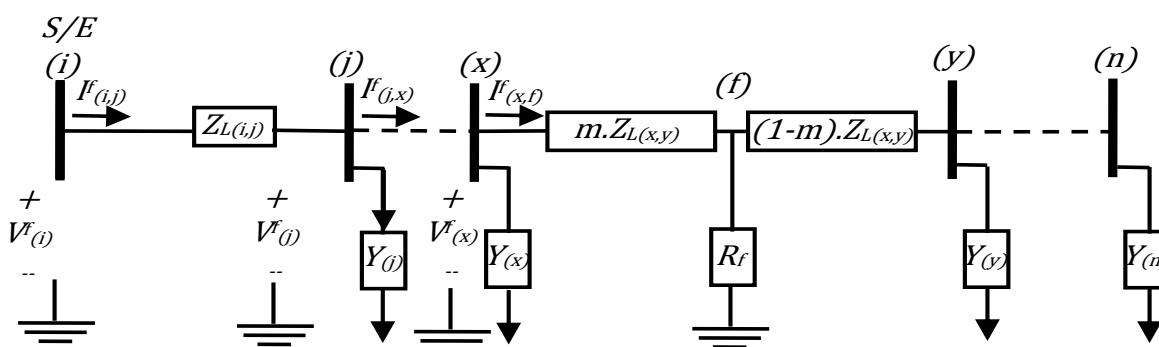
En [LAUR14] se plantea una metodología de localización de fallas con generación distribuida considerando el efecto de la carga, con un modelo estático de carga de impedancia, corriente o potencia constante, el cual permite mejorar el desempeño del método seleccionado. Como conclusión se tiene que el método desarrollado en esta tesis permite incluir el efecto de la carga en cualquier localizador de fallas.

## 2.3. Métodos de localización de fallas

### 2.3.1. Método de localización basado en componentes de secuencia

A continuación se presenta la metodología propuesta en [BEDO13]. Esta metodología, a partir de las medidas de pre-falla y falla en la subestación, además del conocimiento de la red existente, utiliza las componentes de secuencia y la interconexión de las redes de secuencia para estimar el segmento bajo falla.

El circuito de la figura 2.1, muestra la sección de línea entre los nodos ( $x$ ) y ( $y$ ) de un alimentador de distribución bajo falla, donde  $m$  es la distancia desde el nodo ( $x$ ) hasta la falla ( $f$ ), y está normalizada entre 0 y 1. Es necesario saber el tipo de falla en la línea para realizar la interconexión de las redes de secuencia, ya que de esta forma se obtiene un conjunto de ecuaciones diferente para cada tipo de falla.



**Figura 2.1.** Diagrama unifilar de un sistema con falla entre los nodos ( $x$ ) y ( $y$ ) [BEDO13].

Donde,

$V_{(i)}^f$ : Tensiones de fase en condición de falla, medidas en la subestación (nodo ( $i$ )).

$V_{(x)}^f$ : Tensiones de fase, calculadas en el nodo ( $x$ ) en condición de falla.

$I_{(i,j)}^f$ : Corrientes de fase en condición de falla, medidas en la subestación.

$I_{(x,f)}^f$ : Corrientes de fase, calculadas entre el nodo ( $x$ ) y ( $f$ ) en condición de falla.

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

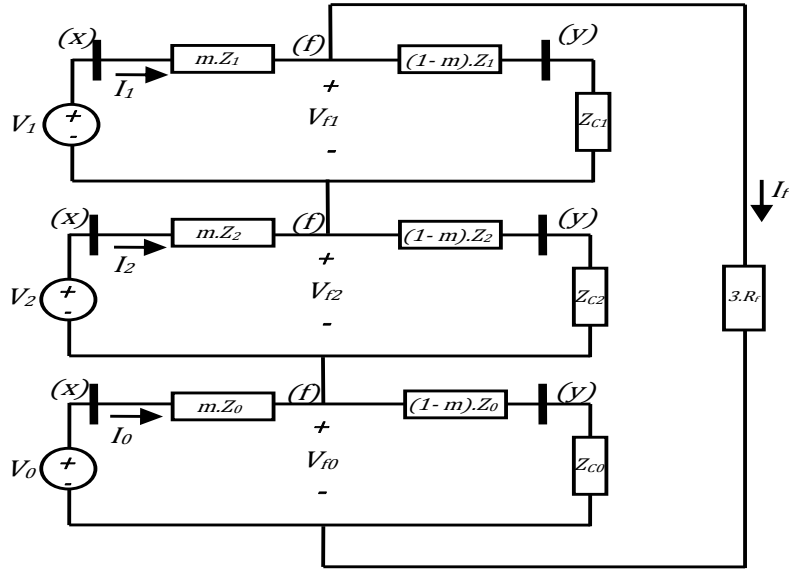
$Z_{L(x,y)}$ : Matriz impedancia de fase en  $\Omega$ , de la sección de línea entre los nodos ( $x$ ) y ( $y$ ).

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

$R_f$ : Resistencia de falla.

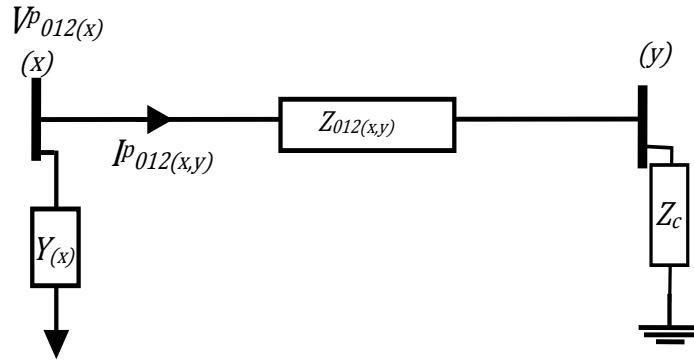
#### a) Análisis para fallas monofásicas a tierra

Cuando se tiene una falla monofásica a tierra, entre la sección de línea de los nodos ( $x$ ) y ( $y$ ) del alimentador mostrado en la figura 2.1, los circuitos equivalentes en redes de secuencia se deben conectar en serie, como se presenta en la figura 2.2.



**Figura 2.2** Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla monofásica a tierra [BEDO13].

Para la estimación de la distancia al punto de falla se debe conocer la impedancia del circuito aguas abajo del nodo  $(k+1)$  de la falla. En el circuito equivalente mostrado en la figura 2.3,  $Z_c$  representa la impedancia aguas abajo, ésta se puede hallar mediante la ecuación (2.1).



**Figura 2.3** Segmento equivalente de circuito utilizado para la estimación de la distancia al punto de falla [CRIS14].

$$Z_c = \frac{V_{012(x)}^p}{I_{012(x,y)}^p} - Z_{012(x,y)} \quad (2.1)$$

Donde,

$V_{012(x)}^p$ : Voltaje en el nodo de envío en prefalla.

$I_{012(x,y)}^p$ : Corriente de prefalla que sale del nodo de envío.

Luego, se calculan las tensiones de secuencia positiva ( $V_1$ ), negativa ( $V_2$ ) y cero ( $V_0$ ) en el nodo  $(x)$ , las corrientes de secuencia positiva ( $I_1$ ), negativa ( $I_2$ ) y cero ( $I_0$ ) que fluyen desde el nodo  $(x)$  al punto de falla  $(f)$  y las impedancia de secuencia positiva ( $Z_1$ ), negativa ( $Z_2$ ) y cero ( $Z_0$ ) de la sección de línea entre los nodos  $(x)$  y  $(y)$ , mediante las matrices de transformación descritas en las ecuaciones (2.2 – 2.4).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} Z_{abc} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Donde  $a$  es un operador que se fija de acuerdo al número de fases del sistema y está definido para sistemas trifásicos de la siguiente manera:

$$a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$$

La figura 2.2, muestra tres impedancias ( $Z_{C1}$ ,  $Z_{C2}$  y  $Z_{C0}$ ) que permiten considerar la carga que alimenta el circuito en condición de falla, las cuales se calculan haciendo uso de las ecuaciones (2.1) y (2.4) [CRIS14].

Del análisis del circuito de la figura 2.2, se obtienen las ecuaciones (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8).

$$V_{f1} = V_1 - mZ_1I_1 \quad (2.5)$$

$$V_{f1} = ((1 - m)Z_1 + Z_{C1})I_{L1} \quad (2.6)$$

$$I_{L1} = I_1 - I_f \quad (2.7)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 - m(Z_0I_0 + Z_1I_1 + Z_2I_2) = 3R_fI_f \quad (2.8)$$

De las ecuaciones (2.5), (2.6), y (2.7) se obtiene la ecuación (2.9).

$$I_f = \frac{Z_1I_1 + Z_{C1}I_1 - V_1}{Z_1 - mZ_1 + Z_{C1}} \quad (2.9)$$

Reemplazando la ecuación (2.9) en (2.8) y realizando las operaciones respectivas se obtiene la ecuación (2.10).

$$KB m^2 + KC m + KD = R_f KA \quad (2.10)$$

Donde,

$$\begin{aligned} KA &= 3(Z_1I_1 + Z_{C1}I_1 - V_1) \\ KB &= Z_0Z_1I_0 + Z_1^2I_1 + Z_1Z_2I_2 \\ KC &= -Z_0Z_1I_0 - Z_1^2I_1 - Z_2Z_1I_2 - Z_1V_0 + \\ &\quad - Z_1V_1 - Z_1V_2 - Z_0I_0Z_{C1} - Z_1I_1Z_{C1} - Z_2I_2Z_{C1} \\ KD &= Z_1V_0 + Z_1V_1 + Z_1V_2 + Z_{C1}V_0 + Z_{C1}V_1 + Z_{C1}V_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.10) es un polinomio de segundo orden con constantes complejas y dos incógnitas ( $R_f$  y  $m$ ). Para resolver este polinomio, se separa en parte real y parte imaginaria a la expresión (2.10), y se obtienen dos ecuaciones con dos incógnitas, tal como lo muestra (2.12), en donde los subíndices  $r$  e  $i$  hacen referencia a la parte real e imaginaria de cada constante.

$$\begin{aligned} KB_r m^2 + KC_r m + KD_r &= R_f KA_r \\ KB_i m^2 + KC_i m + KD_i &= R_f KA_i \end{aligned} \quad (2.12)$$

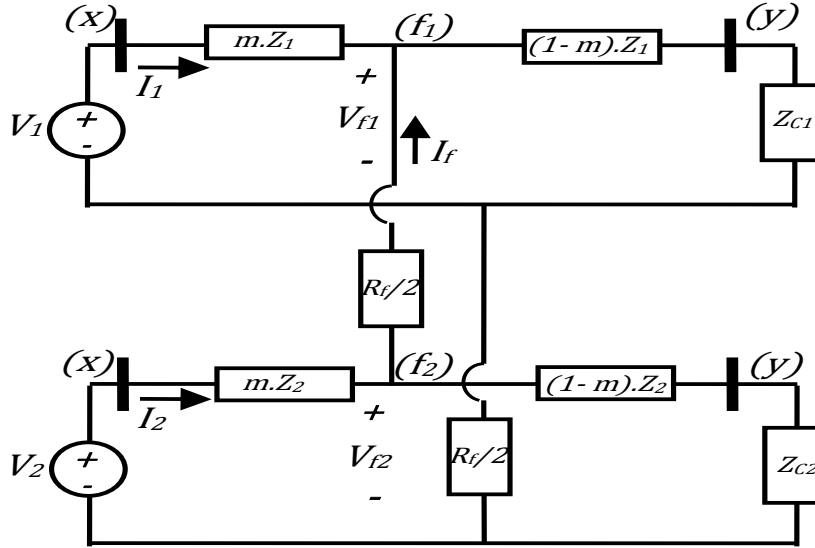
De la parte real se despeja la resistencia de falla ( $R_f$ ) y se reemplaza en la parte imaginaria obteniendo la expresión (2.13), que al ser resuelta permite obtener la distancia a la falla ( $m$ ).

$$m^2 \left( \frac{KA_i KB_r}{KA_r} - KB_i \right) + m \left( \frac{KA_i KC_r}{KA_r} - KC_i \right) + \left( \frac{KA_i KD_r}{KA_r} - KD_i \right) = 0 \quad (2.13)$$



## b) Análisis para fallas bifásicas

Para una falla bifásica, en la sección de línea entre los nodos (x) y (y), del circuito presentado en la figura 2.1, se obtienen de igual manera que para la falla monofásica. Las transformaciones de secuencia y la impedancia aguas abajo descritas en la ecuaciones (2.2 – 2.4). Las redes de secuencia se conectan en paralelo, y se obtiene el circuito de la figura 2.4.



**Figura 2.4.** Circuito equivalente en redes de secuencia, en caso de una falla bifásica [BEDO13].

Del circuito de la figura 2.4, se obtienen (2.14 – 2.17).

$$V_{f1} = V_1 - mZ_1 I_1 \quad (2.14)$$

$$V_{f2} = V_2 - mZ_2 I_2 \quad (2.15)$$

$$V_{f2} - V_{f1} = R_f I_f \quad (2.16)$$

$$V_{f1} = (I_f + I_1)((1 - m)Z_1 + Z_{C1}) \quad (2.17)$$

Igualando (2.14) y (2.17) se obtiene (2.18) y de (2.15) y (2.16) se obtiene (2.19).

$$V_1 - mZ_1 I_1 = (I_f + I_1)((1 - m)Z_1 + Z_{C1}) \quad (2.18)$$

$$I_f = \frac{(V_2 - mZ_2 I_2) - (V_1 - mZ_1 I_1)}{R_f} \quad (2.19)$$

Reemplazando la ecuación (2.19) en (2.18) y realizando las operaciones respectivas se obtiene (2.20).

$$KF m^2 + KG m + KH = R_f KE \quad (2.20)$$

Donde,

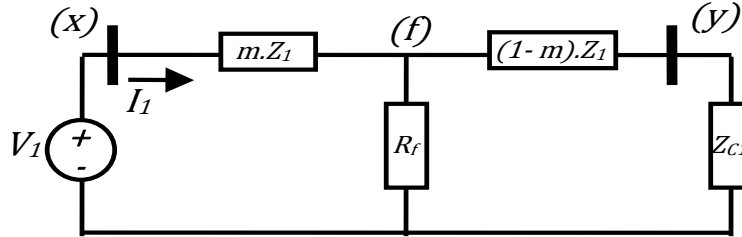
$$\begin{aligned} KE &= V_1 - Z_1 I_1 - Z_{C1} I_1 \\ KF &= Z_1 Z_2 I_2 - Z_1^2 I_1 \\ KG &= Z_1 V_1 - Z_1 V_2 - Z_2 Z_1 I_2 + \\ &\quad + Z_1 I_1 Z_{C1} - Z_2 I_2 Z_{C1} + Z_1^2 I_1 \\ KH &= Z_1 V_2 + Z_{C1} V_2 - Z_1 V_1 - Z_{C1} V_1 \end{aligned} \quad (2.21)$$

La expresión (2.20) corresponde a una ecuación cuadrática compleja, que se puede resolver separando (2.20) en parte real y parte imaginaria, obteniendo dos ecuaciones muy similares a las presentadas en (2.12) con dos incógnitas ( $R_f$  y  $m$ ).

### c) Análisis para fallas trifásicas

Para la falla trifásica, se obtienen de igual manera que para la falla monofásica las transformaciones de secuencia y la impedancia aguas abajo descritas en las ecuaciones (2.2 – 2.4). El sistema es balanceado ante fallas trifásicas. Por eso se realiza el análisis únicamente con la red de secuencia positiva, que se presenta en la figura 2.5.

Del circuito de la figura 2.5, se obtiene la ecuación (2.22).



**Figura 2.5.** Circuito equivalente en redes de secuencia en caso de falla trifásica [BEDO13].

$$\frac{V_1}{I_1} = m Z_1 + \frac{R_f((1-m)Z_1 + Z_{c1})}{R_f + (1-m)Z_1 + Z_{c1}} \quad (2.22)$$

Realizando las operaciones indicadas en (2.22), es posible llegar a la ecuación (2.23).

$$KJ m^2 + KK m + KL = R_f KI \quad (2.23)$$

Donde,

$$\begin{aligned} KI &= Z_1 I_1 + Z_{c1} I_1 - V_1 \\ KJ &= Z_1^2 I_1 \\ KK &= -Z_1 V_1 - Z_1^2 I_1 - Z_1 I_1 Z_{c1} \\ KL &= Z_1 V_1 + Z_{c1} V_1 \end{aligned} \quad (2.24)$$

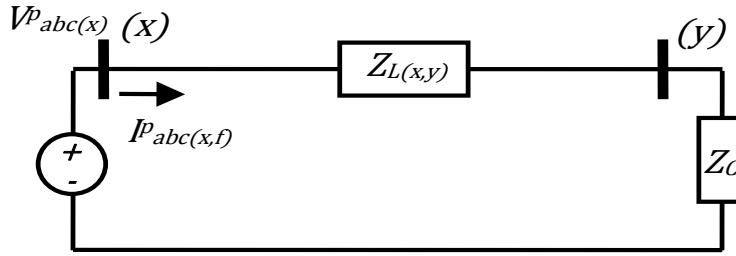
La ecuación (2.23) es cuadrática compleja, y se resuelve separando su parte real e imaginaria y obteniendo dos ecuaciones muy similares a las presentadas en (2.12), con dos incógnitas ( $R_f$  y  $m$ ).

#### 2.3.2. Método de localización basado en componentes de fase

Se plantea un método de localización de fallas basado en componentes de fase desarrollado en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>. En este método se asume que la impedancia de falla debe ser netamente resistiva, es decir, la reactancia de falla en el tramo en que existe una falla debe ser lo más cercana a cero.

A continuación, se presenta el método de la mínima reactancia de falla propuesta en [GERM07]. Este método, a partir de las medidas de pre-falla y falla en la subestación, y el conocimiento de la red existente, determina gráficamente la reactancia de falla. El punto de falla se asume cuando la reactancia de la fase fallada alcance un valor mínimo.

En la figura 2.6 se muestra el circuito simplificado en pre-falla que considera el efecto de la variación de la carga, esta se conecta al final del circuito.



**Figura 2.6.** Circuito simplificado en pre-falla de la sección bajo falla [GERM07].

Donde,

$V^p_{abc(x)}, I^p_{abc(x,y)}$ : Vectores que contienen los fasores de tensión y corriente en pre-falla.

$Z_{L(x,y)}$ : Matriz de impedancia serie de la línea.

$Z_C$ : Matriz de impedancia de la carga vista aguas abajo de la falla.

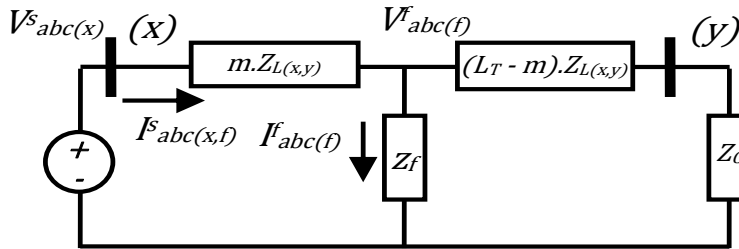
La impedancia de carga se calcula a partir de (2.25) que se obtiene del circuito en la figura 2.6. Al despejar  $Z_C$  de la ecuación (2.25) se obtienen las ecuaciones (2.26) y (2.27).

$$(Z_L + Z_C) \times I_p = V_p \quad (2.25)$$

$$Z_C \times I_p = V_p - Z_L \times I_p \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} Z_{C_a} &= \frac{V_{p_a}}{I_{p_a}} - \frac{Z_{L_{aa}} * I_{p_a} + Z_{L_{ab}} * I_{p_b} + Z_{L_{ac}} * I_{p_c}}{I_{p_a}} \\ Z_{C_b} &= \frac{V_{p_b}}{I_{p_b}} - \frac{Z_{L_{ba}} * I_{p_a} + Z_{L_{bb}} * I_{p_b} + Z_{L_{bc}} * I_{p_c}}{I_{p_b}} \\ Z_{C_c} &= \frac{V_{p_c}}{I_{p_c}} - \frac{Z_{L_{ca}} * I_{p_a} + Z_{L_{cb}} * I_{p_b} + Z_{L_{cc}} * I_{p_c}}{I_{p_c}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Luego a partir del circuito de la figura 2.7 se calcula la impedancia de falla para cada tramo de línea.



**Figura 2.7.** Circuito simplificado de falla en el punto  $m$  de la red de distribución [GERM07].

Donde,

$V^s_{abc(x)}, I^s_{abc(x,y)}$ : Vectores que contienen los fasores de tensión y corriente en falla por la línea.

$V^f_{abc(f)}, I^f_{abc(f)}$ : Vectores que contienen los fasores de tensión y corriente en el punto de falla.

$Z_F$ : Matriz de impedancia de falla.

$L_T$ : Longitud total del circuito. (Se propone hacer la estimación por tramos se manera que  $L_T$  sea igual a 1).

Para encontrar la impedancia de falla, se hace uso de las ecuaciones (2.28), (2.29) y (2.30) que se obtienen de resolver el circuito de la figura 2.7.

$$\mathbf{V}_F(m) = \mathbf{V}_S - m * \mathbf{Z}_L * \mathbf{I}_S \quad (2.28)$$

$$\mathbf{I}_F(m) = \mathbf{I}_S - ((L_T - m) * \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_C)^{-1} * \mathbf{V}_F(m) \quad (2.29)$$

$$\mathbf{Z}_F(m) = \frac{\mathbf{V}_F(m)}{\mathbf{I}_F(m)} \quad (2.30)$$

Debido a que  $\mathbf{V}_F(m)$  e  $\mathbf{I}_F(m)$  son vectores, no es posible hallar  $\mathbf{Z}_F(m)$  simplemente al resolver la ecuación (2.30). Esta se debe resolver con la pseudo-inversa de Moure – Penrose, de modo que la ecuación para hallar  $\mathbf{Z}_F(m)$  se convierte en (2.31).

$$\mathbf{Z}_F(m) = \mathbf{V}_F(m) * inv(\mathbf{I}_F(m)^T * \mathbf{I}_F(m)) * \mathbf{I}_F(m)^T \quad (2.31)$$

La magnitud de la reactancia de falla se obtiene al extraer la componente imaginaria de la  $\mathbf{Z}_F(m)$ , presentada en (2.32).

$$X_F(m) = |imag(\mathbf{Z}_F(m))| \quad (2.32)$$

Para hallar el punto de falla se varía  $m$  de modo sistemático entre los rangos de cero a uno hasta encontrar la reactancia en la fase fallada lo más cercana a cero, puesto que se asume la falla netamente resistiva.

## 2.4. Modelos de carga

### 2.4.1. Introducción

La carga se puede definir como aquel elemento o dispositivo conectado a la red que absorbe, genera o controla energía activa y reactiva, la cual se ve afectada por las variaciones de tensión y frecuencia de la red [RMR104]. Las características de la carga varían durante las diferentes horas del día, los días de la semana, las estaciones del año o por un evento característico. Para un correcto estudio se requiere el conocimiento del efecto combinado de todos los elementos que se encuentren conectados a un nodo de análisis, lo cual es complejo debido a la gran diversidad de elementos conectados a la red [STOJ07], [CHIA96].

Se han desarrollado estudios para el modelado de elementos individuales como motores, hornos, lámparas, entre otros, pero desarrollar un modelo que contenga todos los elementos del sistema es una tarea difícil, debido a que el comportamiento de la carga es dinámico y no determinístico [CONC82].

Para seleccionar un modelo correcto se requiere el conocimiento del sistema y la composición de la carga [DML02], [CHIA96]. Este modelo es difícil de obtener debido a:

- La gran cantidad de elementos conectados a la red y la diversidad entre ellos.
- Cambio en el tipo de carga durante las horas, según el día, el mes, es decir, cambio de la carga en el tiempo.
- Se tiene información imprecisa acerca de la composición de la carga.
- Incertidumbre en la característica de muchos componentes de la carga, particularmente ante variaciones grandes de frecuencia y tensión.

El modelo de carga exponencial o el modelo ZIP, es una buena aproximación como alternativa para predecir el comportamiento de la carga en flujos de potencia, tanto en estado estable como ante perturbaciones en el voltaje de alimentación [MORE07].

### 2.4.2. Modelos estáticos de carga

Éstos representan la potencia activa y reactiva para cualquier instante de tiempo como una función algebraica del voltaje en la barra y la frecuencia para el mismo instante de tiempo, suponiendo que no hay correlación entre la potencia activa y la potencia reactiva.

$$P = P(P_0, V_0, f_0, V, f) \quad (2.33)$$

$$Q = Q(Q_0, V_0, f_0, V, f) \quad (2.34)$$

En la literatura se encuentra que el modelo más común es el ZIP para el caso de modelos estáticos.

En el modelo ZIP se representa como un polinomio que contiene el efecto combinado de cargas de potencia constante, corriente constante e impedancia constante como se muestra en las ecuaciones (2.35) y (2.36).

$$P = P_0 \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2.35)$$

$$Q = Q_0 \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

Donde,

$P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga respectivamente.

$V$  : Tensión de la carga.

$V_0$  : Tensión de la carga en estado estable.

$a_0, a_1, a_2$  y  $b_0, b_1, b_2$  : Son los Coeficientes de potencia, corriente e impedancia constante para la potencia activa y reactiva respectivamente. Estos coeficientes deben cumplir con las ecuaciones (2.37) y (2.38).

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 \quad (2.37)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 \quad (2.38)$$

Un caso general de este modelo ZIP es el modelo exponencial que se tiene en las ecuaciones (2.39) y (2.40).

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.39)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2.40)$$

En donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de carga exponencial correspondientes al tipo de carga que se quiere representar, es decir, como ejemplo se tiene 0, 1 y 2 para potencia, corriente e impedancia constante respectivamente.

También es posible incluir el efecto de la frecuencia en el modelo ZIP y el modelo exponencial. En las ecuaciones (2.41) y (2.42) se muestra el modelo exponencial con el efecto de la frecuencia.

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (2.41)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.42)$$

En la tabla 2.1, se tienen algunas constantes características típicas encontradas para distintas cargas individuales.

**Tabla 2.1** Datos característicos para algunas cargas individuales [LRDA93].

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
Televisor	2	3.3	0	-2.6
Calentador resistivo	2	0	0	0

### 2.4.3. Modelos dinámicos de carga

Estos modelos mediante ecuaciones diferenciales o de diferencia relacionan la potencia activa y reactiva con la magnitud del voltaje y la frecuencia de la red.

$$f\left(\frac{\partial^n P}{\partial t^n}, \dots, \frac{\partial P}{\partial t}, P, \frac{\partial^m V}{\partial t^m}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (2.43)$$

$$f\left(\frac{\partial^r Q}{\partial t^r}, \dots, \frac{\partial Q}{\partial t}, Q, \frac{\partial^s V}{\partial t^s}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (2.44)$$

A continuación algunos de los modelos dinámicos más comunes.

#### a) Modelo dinámico de carga de recuperación exponencial

Este modelo se desarrolló de forma experimental, a partir del análisis del comportamiento en la carga para dos subestaciones ante variaciones controladas de la tensión [KARL94].

En las ecuaciones (2.45) y (2.46) se tiene la representación del modelo de recuperación exponencial.

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = -x_p + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{ps}} - P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{pt}} \quad (2.45)$$

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

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q + Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qs}} - Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_{qt}} \quad (2.46)$$

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

Donde,

$x_p$  y  $x_q$  : Variables de estado asociadas a la potencia activa y reactiva respectivamente.

$T_p$  y  $T_q$  : Tiempo de recuperación de la función exponencial activa y reactiva respectivamente.

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

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

$P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga respectivamente.

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

$V$  : Tensión de la carga.

$V_0$  : Tensión de la carga en estado estable.

Para resolver este modelo dinámico de carga con recuperación exponencial se utiliza el método numérico de Euler para ecuaciones diferenciales. A continuación en (2.47) se presentan las ecuaciones necesarias para la aplicación del método.

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \\ y_n &= y_{n-1} + f(x_{n-1}, y_{n-1}) * h, \quad h = x_1 - x_0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

Donde,

$h$  : Tamaño de paso.

$x_0, y_0$  : Estados iniciales.

$x_{n-1}, y_{n-1}$  : Estados anteriores.

$x_n, y_n$  : Estados actuales.

Con base en lo anterior, se presenta la ecuación (2.48) con la que se da solución a la ecuación (2.45) mediante el método de Euler para ecuaciones diferenciales. Similarmente se presenta para el caso de la potencia reactiva como se muestra en la ecuación (2.49).

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= -\frac{x_p}{T_p} + \frac{P_0}{T_p} \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right] \\ x_{pn} &= x_{pn-1} + \frac{h}{T_p} \left\{ -x_{pn-1} + P_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} P_d &= x_{pn} + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \\ \dot{x}_q &= -\frac{x_q}{T_q} + \frac{Q_0}{T_q} \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \right] \\ x_{qn} &= x_{qn-1} + \frac{h}{T_q} \left\{ -x_{qn-1} + Q_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \right] \right\} \\ Q_d &= x_{qn} + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt}} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Donde,

$h$  : Tamaño de paso.

$x_{pn-1}$  y  $x_{qn-1}$  : Estados anteriores de la potencia activa y reactiva respectivamente.

$x_{pn}$  y  $x_{qn}$  : Estados actuales de la potencia activa y reactiva respectivamente.

$x_p$  y  $x_q$  : Variables de estado asociadas a la potencia activa y reactiva respectivamente.

$T_p$  y  $T_q$  : Tiempo de recuperación de la función exponencial activa y reactiva.

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

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

$P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga respectivamente.

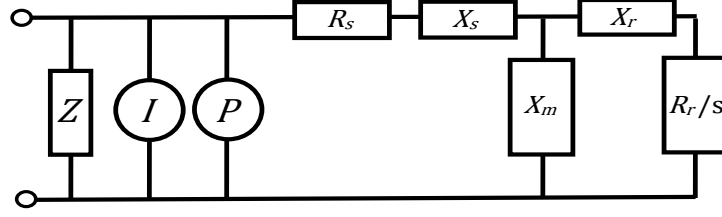
$P_d$  y  $Q_d$  : Potencia demandada activa y reactiva de la carga respectivamente.

$\frac{V}{V_0}$  : Tensión de la carga en por unidad.

## b) Modelo de carga compuesto

Este modelo compuesto contiene en sus ecuaciones la representación física de un motor de inducción, con el cual se obtiene el comportamiento ante perturbaciones para pequeñas, medianas y grandes industrias y además incluye un modelo de carga ZIP para representar los demás elementos del sistema. En la figura 2.8 se aprecia el circuito equivalente el modelo compuesto.

El conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales de orden tres que describen el comportamiento del modelo compuesto, se describen en las (2.35) y (2.36) para la carga ZIP, además (2.50), (2.51) para el motor de inducción [EPRE13].



**Figura 2.8.** Circuito equivalente del modelo compuesto de carga.

$$\begin{aligned} \frac{dE'_d}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (w - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (w - 1)E'_d \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{2H} [(Aw^2 + Bw + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\ I_q &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \\ T' &= \frac{X_r + X_m}{R_r} \\ X &= X_s + X_m \\ X' &= X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \\ A + B + C &= 1 \end{aligned} \quad (2.51)$$

En las ecuaciones (2.52), (2.53), (2.54) y (2.55) se muestra el acoplamiento de la carga ZIP con el modelo dinámico del motor de inducción.

$$K_m = \frac{P_m}{P_0} \quad (2.52)$$

$$a_0 + a_1 + a_2 = 1 - K_m \quad (2.53)$$

$$b_0 + b_1 + b_2 = 1 - \frac{Q_m}{Q_0} \quad (2.54)$$

$$T_0 = \frac{P_m}{w_0} \quad (2.55)$$

Las ecuaciones (2.56) y (2.57) representan la potencia activa y reactiva del modelo compuesto. Estas ecuaciones surgen de sumar las ecuaciones de potencia de la carga ZIP (2.35) y (2.36), con las ecuaciones del motor de inducción (2.50) y (2.51).

$$P_{Compuesta} = P_0 \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_d I_d + U_q I_q) \right] \quad (2.56)$$

$$Q_{Compuesta} = Q_0 \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_q I_d - U_d I_q) \right] \quad (2.57)$$



Donde,

$R_s$  : Resistencia del estator.  
 $X_s$  : Reactancia del estator.  
 $X'_s$  : Reactancia de magnetización.  
 $R_r$  : Resistencia del rotor.  
 $X_r$  : Reactancia del rotor.  
 $H$  : Coeficiente de inercia del rotor.  
 $E'_d$  : Tensión interna en eje directo.  
 $E'_q$  : Tensión interna en eje de cuadratura.  
 $w$  : Velocidad de la máquina.  
 $w_0$  : Velocidad nominal de la máquina.  
 $T_0$  : Torque de carga en estado estable.  
 $A, B, C$  : Coeficientes del torque de carga.  
 $K_m$  : Parámetro que relaciona la potencia del motor con la potencia nominal de la carga.  
 $P_m$  y  $Q_m$  : Potencia activa y reactiva consumida por el motor.  
 $P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva.  
 $a_0, a_1, a_2$  y  $b_0, b_1, b_2$  : Coeficientes del modelo ZIP de potencia, corriente e impedancia constante para la potencia activa y reactiva respectivamente.

Para resolver este modelo dinámico de carga compuesto se utiliza en esta tesis, el método numérico de Euler para ecuaciones diferenciales. Éste método se encuentra descrito en la ecuación (2.47).

El método numérico de Euler para ecuaciones diferenciales transforma un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales en ecuaciones algebraicas descritas en diferencias hacia atrás. En (2.58) se presenta la ecuación con la que se le da solución a la ecuación (2.50). Luego, con las ecuaciones (2.56) y (2.57) se entrega la potencia activa y reactiva del modelo de carga compuesto respectivamente.

$$\begin{aligned}
 E'_{dk} &= E'_{dk-1} - h \left\{ \frac{1}{T'} [E'_{dk-1} + (X - X')I_q] - (w_{k-1} - 1)E'_{q_{k-1}} \right\} \\
 E'_{qk} &= E'_{q_{k-1}} - h \left\{ \frac{1}{T'} [E'_{q_{k-1}} - (X - X')I_d] + (w_{k-1} - 1)E'_{d_{k-1}} \right\} \\
 w_k &= w_{k-1} - h \left\{ \frac{1}{2H} [(Aw_{k-1}^2 + Bw_{k-1}^2 + C)T_0 - (E'_{dk-1}I_d + E'_{q_{k-1}}I_q)] \right\} \\
 I_d &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_d - E'_{dk-1}) + X' (U_q - E'_{q_{k-1}})] \\
 I_q &= \frac{1}{R_s^2 + X_s'^2} [R_s(U_q - E'_{q_{k-1}}) - X' (U_d - E'_{dk-1})] \\
 P_m &= (U_d I_d + U_q I_q) \\
 Q_m &= (U_q I_d - U_d I_q)
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

Donde,

$h$  : Tamaño de paso.  
 $E'_{dk-1}$  y  $E'_{q_{k-1}}$  : Estados anteriores de la tensión interna en eje directo y cuadratura respectivamente.  
 $E'_{dk}$  y  $E'_{qk}$  : Estados actuales de la tensión interna en eje directo y cuadratura respectivamente.  
 $w_k$  y  $w_{k-1}$  : Estado actual y anterior de la velocidad respectivamente.

c) En el anexo 3 se presenta, de forma detallada, el modelo de carga en función de transferencia.

## Capítulo 3

### METODOLOGÍA PROPUESTA

#### 3.1. Selección del modelo

Debido a la gran cantidad de cargas en el sistema eléctrico y la diversidad entre ellas, es necesario seleccionar un modelo de carga apropiado que represente el conjunto de elementos conectados a un nodo de análisis de la red eléctrica. En este proyecto, se analiza el desempeño de localizadores de fallas con modelos dinámicos en el sistema, debido a la gran cantidad de cargas dinámicas en el campo como: motores, hornos, aire acondicionado, y demás dispositivos utilizados en las industrias, comercio, alumbrado público y cargas residenciales, entre otros. Además, se presenta una metodología para incluir los modelos dinámicos de carga en los localizadores de fallas.

El modelo de recuperación exponencial y el modelo de carga compuesto, son modelos ampliamente estudiados en la literatura del modelado dinámico de cargas, y representan de forma apropiada el comportamiento de la carga ante perturbaciones en la tensión. Sin embargo, estos modelos no presentan una respuesta apropiada si no se tienen parámetros adecuados que representen el comportamiento dinámico en la carga. Debido a lo anterior, existen diversos estudios enfocados a estimar los parámetros de diferentes modelos dinámicos de carga, basados en métodos de medición de la potencia para distintas cargas ante perturbaciones en la tensión [RMRI04], [CLMA06], [EPRE13], [DMLP02], [NDLM96], [KARL94].

Para el desarrollo de esta investigación, se selecciona el modelo de recuperación exponencial debido a que es un modelo sencillo creado de manera experimental, que representa la recuperación del sistema ante una caída en la tensión. Además, se selecciona el modelo de carga compuesto debido a que este representa un motor de inducción en paralelo con una carga constante, que es una representación consistente para la mayoría de las cargas industriales, comerciales y residenciales.

##### 3.1.1. Selección de parámetros

###### a) Modelo de Recuperación Exponencial

Para este modelo se utilizan los parámetros estimados en [DMLP02]. Estos parámetros se identificaron para una subestación en diferentes épocas del año y a diferentes horas del día, de esta manera se tienen diversos parámetros para la representación del modelo según el tipo de la carga. Estas medidas se toman en tres periodos del día como se muestra a continuación.

Periodo 1: Día, se presenta para el intervalo de 6:30-17:30. Este periodo de tiempo incluye las cargas comerciales e industriales.

Periodo 2: Tarde, para el intervalo de 17:30-22:00. Este periodo corresponde principalmente a las cargas residenciales y algunas de alumbrado público.

Periodo 3: Noche, en el intervalo de 22:00-6:30. Este periodo de tiempo puede contener alguna actividad industrial durante la noche, pero principalmente representa el alumbrado público.

Las mediciones en la subestación representan el conjunto de elementos conectados a la red en un momento determinado. El comportamiento ante perturbaciones de los elementos individuales es igual al de la carga concentrada, pero difiere en el tiempo que tarda en recuperar la potencia. En [EPRE13] se realiza una estimación de parámetros a un motor en el cual se tiene tiempos de recuperación menores a un segundo. El tiempo de recuperación es menor para cargas individuales al que se presenta en [DMLP02], ya que este último tiene en cuenta el efecto agregado de los elementos conectados a la red, además de la acción de los cambiadores de tap

bajo carga OLTC (On Load Tap Changer). La tabla 3.1 muestra las constantes de tiempo aproximadas para algunas de las cargas más comunes.

**Tabla 3.1** Valores constantes de tiempo para algunas de las cargas más comunes [DMLP02].

Tipo de carga	Tiempo de recuperación
Motores de inducción	Algunos segundos
Cambiadores de Tap y reguladores de tensión	10 segundos – varios minutos
Cargas resistivas de potencia constante	Varios minutos
Lámparas Fluorescentes	1-2 minutos

En la tabla 3.2 se encuentran los valores medios mensuales y sus desviaciones de los parámetros identificados de la carga. El rango de los parámetros estimados se presenta en la tabla 3.3, donde el valor máximo de  $\alpha_t$  se obtienen cuando la carga es resistiva, lo cual ocurre en el mes más frío ya que se incrementa la demanda de calefacción, con cargas de característica resistiva.

**Tabla 3.2** Valores medios mensuales de los parámetros estimados y su desviación [DMLP02].

DATO	$T_p$	$\alpha_t$	$\alpha_s$	$T_q$	$\beta_t$	$\beta_s$
Julio 01	145 (112)	1.58 (0.33)	1.20 (1.43)	196 (60)	0.87 (0.21)	0.61 (0.67)
Ago. 01	140 (79)	1.43 (0.37)	0.81 (1.21)	180 (76)	1.20 (0.35)	0.39 (0.94)
Sept. 01	168 (156)	1.52 (0.27)	0.65 (0.69)	155 (96)	1.31 (0.30)	0.51 (0.38)
Ene. 02	127 (52)	1.84 (0.50)	0.63 (1.00)	126 (48)	0.79 (0.22)	0.48 (0.59)
Feb. 02	161 (104)	2.08 (0.62)	0.60 (0.90)	151 (78)	0.87 (0.30)	0.30 (0.48)
Abr. 02	134 (55)	1.75 (0.51)	0.57 (1.23)	132 (55)	0.77 (0.22)	0.58 (0.66)
Mayo. 02	123 (51)	1.65 (0.63)	0.44 (1.24)	132 (52)	0.95 (0.32)	0.58 (0.78)
Jun. 02	123 (56)	1.38 (0.67)	0.34 (1.16)	126 (51)	1.11 (0.37)	0.75 (0.79)

**Tabla 3.3** Rango de los parámetros para el modelo de recuperación exponencial [DMLP02].

$\alpha_t$	$\beta_t$	$\alpha_s$	$\beta_s$	$T_p$ y $T_q$
[1.3 – 2.1]	[0.7 – 1.3]	[0.3 – 1.2]	[0.3 – 0.75]	[80 - 200]

#### b) Modelo Compuesto

Los parámetros para el modelo compuesto se obtienen del estudio presentado en [SLMP95], en el cual se muestran los datos típicos del motor de inducción. En la tabla 3.4 se muestran estos valores de acuerdo al tipo de motor que se quiere representar. En la tabla 3.5 se hace una relación del tipo de motores con respecto a los parámetros del modelo compuesto.

**Tabla 3.4** Datos típicos del motor de inducción [SLMP95].

TIPO	$R_s$	$X_{so}$	$X_m$	$R_r$	$X_{ro}$	$A$	$B$	$D$	$H$	$fp$
1	0.031	0.1	3.2	0.018	0.18	1	0	0	0.7	0.6
2	0.013	0.067	3.8	0.009	0.17	1	0	0	1.5	0.8
3	0.013	0.14	2.4	0.009	0.12	1	0	0	0.8	0.7
4	0.013	0.14	2.4	0.009	0.12	1	0	0	1.5	0.7
5	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098	1	0	0	0.74	0.46
6	0.035	0.094	2.8	0.048	0.163	1	0	0	0.93	0.6
7	0.064	0.091	2.23	0.059	0.071	0.2	0	0	0.34	0.8

**Tabla 3.5** Tipos de motores en la tabla de datos típicos [SLM95].

Tipo 1	Motor pequeña industria
Tipo 2	Motor grande industria
Tipo 3	Bomba de agua
Tipo 4	Plantas auxiliares
Tipo 5	Agregación ponderada de motores residenciales
Tipo 6	Agregación ponderada de motores residenciales e industriales
Tipo 7	Agregación ponderada de motores dominados por aire acondicionado

### 3.1.2. Comportamiento del modelo ante perturbaciones

#### a) Modelo de recuperación exponencial

Para validar el comportamiento del modelo ante perturbaciones, se implementan las ecuaciones (2.48) y (2.49) en el software Matlab y de esta manera se obtiene la respuesta del modelo ante perturbaciones en la tensión.

Primero se implementan las ecuaciones para la potencia activa, se simula una falla que representa una caída del 10% en la tensión de la carga en estado estable. En la figura 3.1 se presenta el código fuente utilizado.

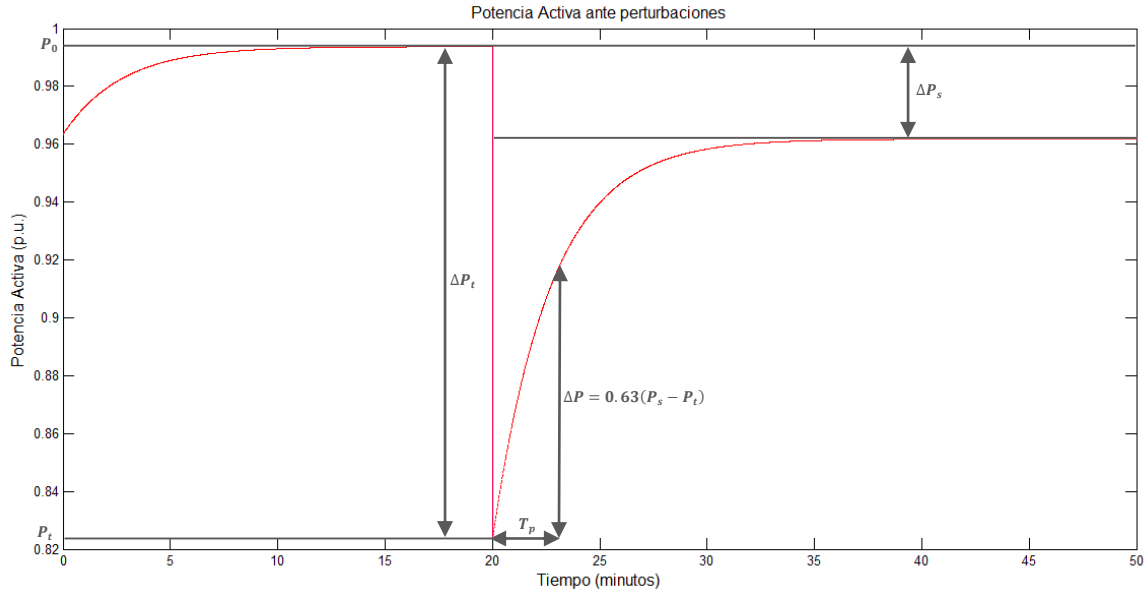
```

1 - clear all
2 - clc
3 - Pnom = 1;
4 - X = 0; %-- Variable de estado --%
5 - Vp_pu = 0.98; %-- Tensión en por unidad --%
6 - h = 0.01;
7 - Vpu = Vp_pu;
8 - Nps = 0.31; %-- Constante Estado Estacionario --%
9 - Npt = 1.85; %-- Constante Estado Transitorio --%
10 - Tp = 163.4/60; %-- Tiempo de Recuperación --%
11 - for j=0:0.01:50
12 -     G = (-X+real(Pnom)*(Vpu.^(Nps) - Vpu.^(Npt))); %-- Ganancia --%
13 -     X = X + (h/Tp)*G; %-- Corrección --%
14 -     Pd = (X + real(Pnom)*Vpu.^(Npt)); %-- Actualización --%
15 -     if j>=20 %-- Tiempo que ocurre la falla
16 -         Vpu = 0.90*Vp_pu;
17 -     end
18 -     plot(j,real(Pd), 'red')
19 -     title('Potencia Activa ante perturbaciones','fontsize', (12))
20 -     xlabel('Tiempo (minutos)', 'fontsize', (12))
21 -     ylabel('Potencia Activa (p.u.) ', 'fontsize', (12))
22 -     hold on
23 - end

```

**Figura 3.1** Ecuaciones en Matlab para el modelo de recuperación exponencial.

En la figura 3.2 se tiene la respuesta del modelo dinámico de recuperación exponencial ante una perturbación del 10% de la tensión nominal, donde  $T_p$  es el tiempo dado en segundos, que tarda en recuperar la potencia desde la perturbación hasta el 63% del valor final posterior a la perturbación.



**Figura 3.2** Respuesta para el modelo de recuperación exponencial ante variaciones en la tensión.

**b) Modelo de carga compuesto**

Para validar el comportamiento del modelo ante perturbaciones, se implementan las ecuaciones (2.56) en el software Matlab, de esta manera se obtiene la respuesta del modelo al energizarse, y luego ante una perturbación en la tensión.

Primero se implementan las ecuaciones y se muestra los resultados de la potencia activa, reactiva y la velocidad en el motor al momento de la energización; luego se simula una falla que representa una caída del 10% en la tensión de la carga en estado estable. En la figura 3.3 se muestran las ecuaciones implementadas en Matlab para el modelo de carga compuesto, se tomaron los parámetros de la tabla 3.4 con el modelo de motor tipo 1.

En la figura 3.4 se tiene la respuesta del modelo compuesto de carga al momento de la energización. Aquí solo se grafica la potencia activa (rojo) y reactiva (azul).

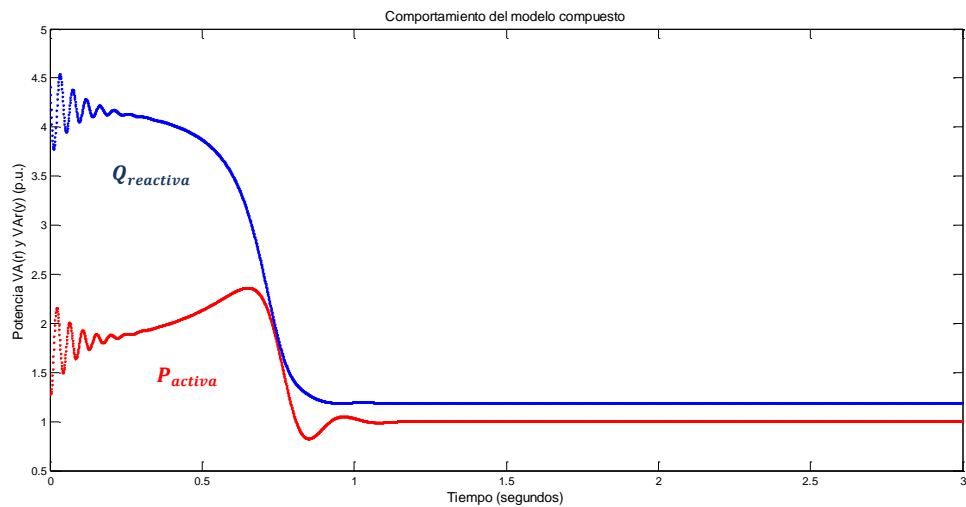
En la figura 3.5 se obtiene la respuesta del modelo ante una perturbación del 10% de la tensión nominal. Para este caso se toman los valores iniciales del motor en el punto de operación, es decir, se asume la máquina en estado estable.

```

1 - clear all
2 - clc
3 - %-- Ingresar Datos Motor Tipo 1
4 - Edk_1=0; %----- Estado Inicial eje Directo -----%
5 - Eqk_1=0; %--- Estado Inicial eje de cuadratura ---%
6 - Wk_1=0; %----- Estado Inicial Velocidad -----%
7 - V=0.98; %- Condiciones operativas-%
8 - Ud=V*cos(-5*pi/180);
9 - Uq=V*sin(-5*pi/180);
10 - h=0.001; %----- Tamaño de Paso -----%
11 - Tl=(Xr+Xm)/Rr;
12 - X2=Xs+Xm;
13 - X1=Xs+(Xm*Xr)/(Xm+Xr);
14 - for i=0:h:10
15 -     Id=(1/(Rs^2+X1^2))*(Rs*(Ud-Edk_1)+X1*(Uq-Eqk_1));
16 -     Iq=(1/(Rs^2+X1^2))*(Rs*(Uq-Eqk_1)-X1*(Ud-Edk_1));
17 -     Edk=Edk_1+((-h/Tl)*(Edk_1+(X2-X1)*Iq)-h*(Wk_1-1)*Eqk_1)*(2*pi*60);
18 -     Eqk=Eqk_1+((-h/Tl)*(Eqk_1-(X2-X1)*Id)+h*(Wk_1-1)*Edk_1)*(2*pi*60);
19 -     Wk=Wk_1-(h/(2*Hl))*((A*Wk_1^2+B*Wk_1+C)*Tl-(Edk_1*Id+Eqk_1*Iq));
20 -     Edk_1=Edk;
21 -     Eqk_1=Eqk;
22 -     Wk_1=Wk;
23 -     Pm= Ud*Id+Uq*Iq;
24 -     Qm=(Uq*Id-Ud*Iq);
25 -     plot(i,Pm,'r')
26 -     plot(i,Qm,'y')
27 -     plot(i,Wk,'g')
28 -     title('Comportamiento del modelo ante perturbaciones','fontsize',(12))
29 -     xlabel('Tiempo (segundos)','fontsize',(12))
30 -     ylabel('Potencia Activa(r) Reactiva(y) y Velocidad(g) del Motor (p.u.) ','fontsize',(12))
31 -     hold on
32 - end

```

**Figura 3.3** Ecuaciones en Matlab para la el modelo compuesto.



**Figura 3.4** Respuesta para el modelo compuesto a la energización.

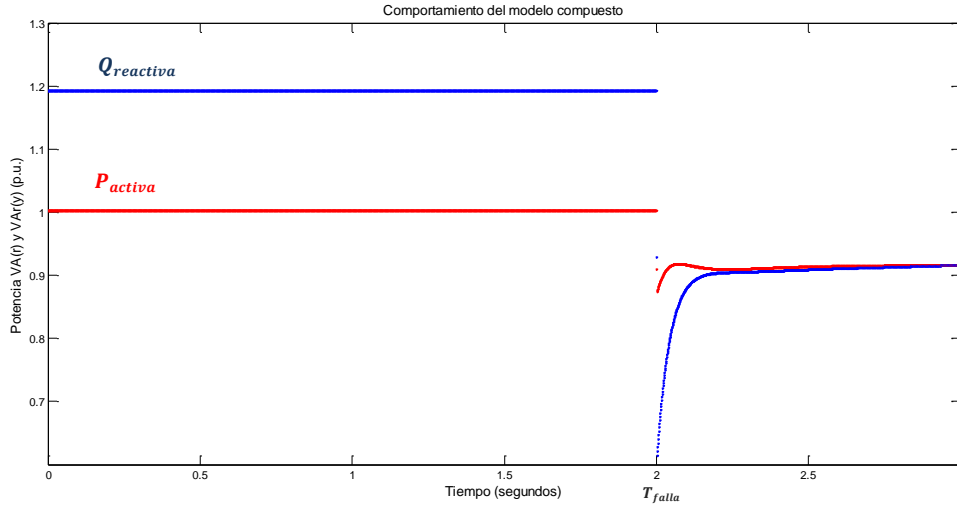


Figura 3.5 Respuesta para el modelo compuesto ante variaciones en la tensión.

### 3.2. Implementación del modelo en ATP

El ATP/EMTP es un programa en el que se pueden simular sistemas complejos en el dominio del tiempo y permite analizar el comportamiento de las señales en régimen transitorio, lo cual es ideal para el estudio de localización de fallas y el análisis de estabilidad. Además, con programas adicionales como el ATPDraw se facilita la interacción con el usuario mediante una pantalla gráfica. También se tiene la herramienta *Models* en la cual se permiten desarrollar modelos para las cargas con distintas variables en un lenguaje de instrucciones y sentencias parecido al lenguaje Fortran [RICA13]. Otra gran ventaja es que se posibilita una fácil interacción con programas como Matlab, en el cual se corre el algoritmo para la localización de fallas.

El modelo Type-94, es un componente no lineal que puede representar cualquier elemento del circuito. La operación es definida completamente por el usuario y se puede usar de tres formas diferentes: Thevenin, Iterado y Norton. El Type-94 en modo Norton non-transmission, tiene como salida el equivalente de Norton, en forma de una fuente de corriente en paralelo con la admitancia equivalente. ATP/EMTP utiliza la regla trapezoidal para resolver las ecuaciones diferenciales de los elementos del sistema en el dominio del tiempo. En [RICA13] se aplica la discretización de la carga empleando la regla trapezoidal y se describe las ecuaciones para el equivalente de Norton. Es necesario amortiguar las oscilaciones numéricas que se presentan en el modelo inicial, mediante una resistencia de amortiguamiento en paralelo con el elemento, en este caso la carga RL. Luego se obtienen las ecuaciones (3.1) y (3.2) que representan la rama RL, con una resistencia de amortiguamiento en paralelo, la cual elimina las oscilaciones numéricas que se presentan a causa de la solución por la regla trapezoidal.

$$i_{(t)} = \left[ \frac{\left( \frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right)}{1 + R * \left( \frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right)} \right] v_{(t)} + \left[ \frac{1 + R * \left( \frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L} \right)}{1 + R * \left( \frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right)} \right] i_{(t-\Delta t)} - \left[ \frac{\left( \frac{1}{R_{am}} - \frac{\Delta t}{2L} \right)}{1 + R * \left( \frac{1}{R_{am}} + \frac{\Delta t}{2L} \right)} \right] v_{(t-\Delta t)} \quad (3.1)$$

Donde,

$$\frac{L}{R_{am}} \geq \Delta t \quad (3.2)$$

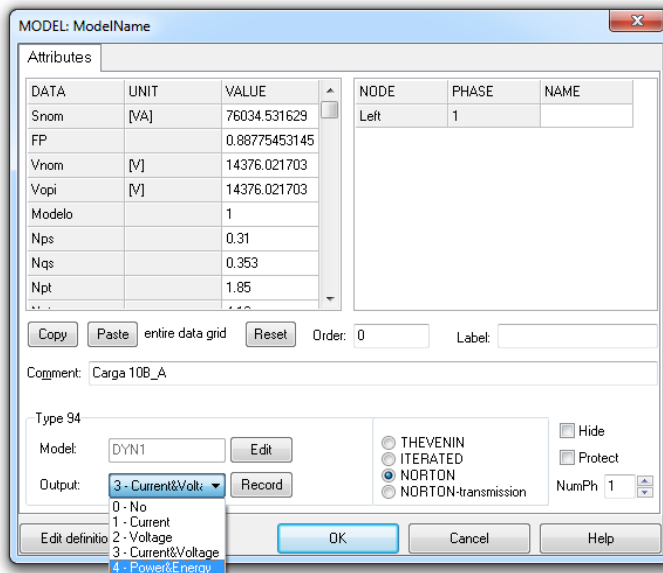
### 3.2.1. Modelo de recuperación exponencial

Para realizar la configuración del bloque programable *Models* Type-94 en modo Norton non-transmission, se utilizaron los datos que se describen en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Parámetros de entrada para el modelo de recuperación exponencial.

Parámetros de entrada	Descripción
$S_{nom}$ [VA]	Potencia Aparente Nominal
$F_p$	Factor de potencia de la carga
$V_{nom}$ [V]	Tensión nominal
$V_{op}$ [V]	Tensión de operación
<i>Modelo</i>	Selección del modelo, esta posición indica que el modelo de carga es de recuperación exponencial, y su valor debe ser 1 por defecto
$N_{ps}$ , $N_{qs}$ , $N_{pt}$ y $N_{qt}$	Valores constantes de los exponentes que describen el comportamiento dinámico en la carga para la potencia activa y reactiva, en estado estable y transitorio
$T_p$ y $T_q$ [s]	Constantes características de tiempo para la potencia activa y reactiva
$h$ [s]	Tiempo de discretización en el método de Euler para ecuaciones diferenciales
<i>Vista</i>	Sirve para solicitar la visualización de la escritura de los valores necesarios para realizar la reducción, 1 activa la visualización y 0 la desactiva
$pr$ y $px$	Porcentajes de variación de la carga para los valores de R y X respectivamente, 1 significa el 100%.
<i>Nodo</i>	Nodo al cual se encuentra conectada la carga
<i>Fase</i>	Fase de la carga, siendo 1 para la fase A, 2 para la fase B ó 3 para la fase C

En la figura 3.6a se presenta la ventana de datos del modelo de carga haciendo uso de la herramienta *Models* Type-94 en modo non-transmission. Aquí se introducen los datos anteriormente descritos. La figura 3.6b muestra el bloque del modelo implementado en ATP.



**Figura 3.6a** Ventana de datos para el modelo dinámico de carga.



**Figura 3.6b** Bloque del modelo en ATP.

Al seleccionar Power&Energy en Output de la ventana de datos, se obtienen las gráficas de potencia y energía de la carga. También se puede multiplicar corriente por tensión para obtener el comportamiento de la potencia activa. Se debe tener en cuenta la ecuación (3.3) para comparar los datos de la potencia rms activa en la ventana de datos con respecto a la gráfica en la figura 3.4.



$$P_{rms} = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi \quad (3.3)$$

### 3.2.2. Modelo de carga compuesto

Para realizar la configuración del bloque programable *Models* Type-94 en modo Norton non-transmission, se utilizaron los siguientes datos que se describen en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Parámetros de entrada para el modelo de compuesto de carga.

Parámetros de entrada	Descripción
$S_{nom}$ [VA]	Potencia Aparente Nominal
$F_p$	Factor de potencia de la carga
$V_{nom}$ [V]	Tensión nominal
$V_{op}$ [V]	Tensión de operación
<i>Modelo</i>	Selección del modelo, esta posición indica que el modelo de carga es compuesto, y su valor debe ser 5 por defecto
$bp$ y $bq$	Valores constantes de los exponentes que describen el comportamiento estático en la carga para la potencia activa y reactiva en el modelo ZIP
$V_{break}$	Tensión de ruptura en la carga en p.u
$ap0$ , $ap1$ y $ap2$	Constantes que indican el porcentaje de carga con potencia, corriente e impedancia constante para el modelo ZIP para la potencia activa
$aq0$ , $aq1$ y $aq2$	Constantes que indican el porcentaje de carga con potencia, corriente e impedancia constante para el modelo ZIP para la potencia reactiva
$R_s$ [ $\Omega$ ]	Resistencia del estator
$X_s$ [ $\Omega$ ]	Reactancia del estator
$X_m$ [ $\Omega$ ]	Reactancia de magnetización
$R_r$ [ $\Omega$ ]	Resistencia del rotor
$X_r$ [ $\Omega$ ]	Reactancia del rotor
$AA$ , $BB$ y $CC$	Constantes del torque de carga
$H_I$	Constante de inercia del rotor
$T_0$	Torque en estado estable
$h$ [s]	Tiempo de discretización en el método de Euler para ecuaciones diferenciales
$pr$ y $px$	Porcentajes de variación de la carga para los valores de R y X respectivamente, 1 significa el 100%.
<i>Nodo</i>	Nodo al cual se encuentra conectada la carga
<i>Fase</i>	Fase de la carga, siendo 1 para la fase A, 2 para la fase B ó 3 para la fase C
<i>Vista</i>	Sirve para solicitar la visualización de la escritura de los valores necesarios para realizar la reducción, 1 activa la visualización y 0 la desactiva

En la figura 3.7a se presenta la ventana de datos del modelo de carga que utiliza la herramienta *Models* Type-94 en modo non-transmission. Aquí se introducen los datos anteriormente descritos. La figura 3.7b muestra el bloque del modelo implementado en ATP.

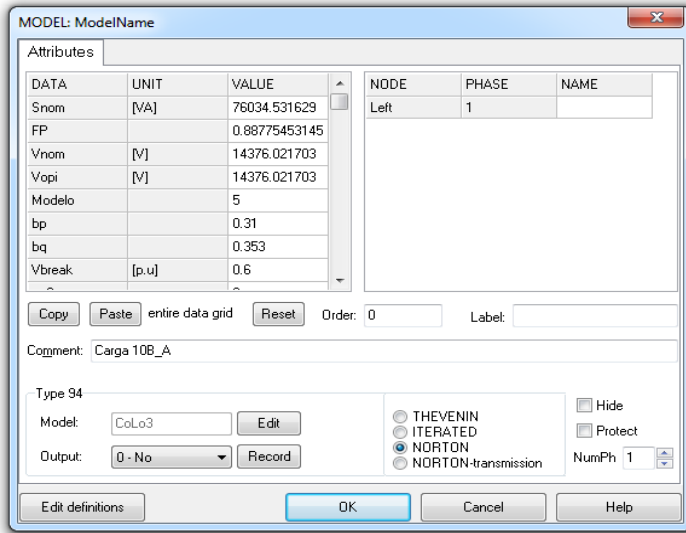


Figura 3.7a Ventana de datos para el modelo dinámico de carga.



Figura 3.7b Bloque del modelo en ATP.

### 3.2.3. Respuesta del modelo dinámico de carga implementado en ATP ante una perturbación en la tensión

#### a) Recuperación exponencial

En la figura 3.8 se obtiene la respuesta de la potencia para la carga de la figura 3.6, ante una perturbación simulada en ATP, para el sistema de pruebas prototipo IEEE de 34 nodos. De la gráfica se puede notar que al energizar el sistema, se tiene un aumento en el consumo de la potencia debido a la corriente de arranque en los elementos que componen el sistema. Luego de que el sistema se estabilice, se simula la falla obteniendo el comportamiento para la potencia activa descrito en la figura 3.2. El software ATP permite simular sistemas complejos en el dominio del tiempo, pero sus medidores son limitados y no pueden entregar valores rms. Por ello se tiene en función del tiempo la gráfica de la potencia activa simulada en ATP.

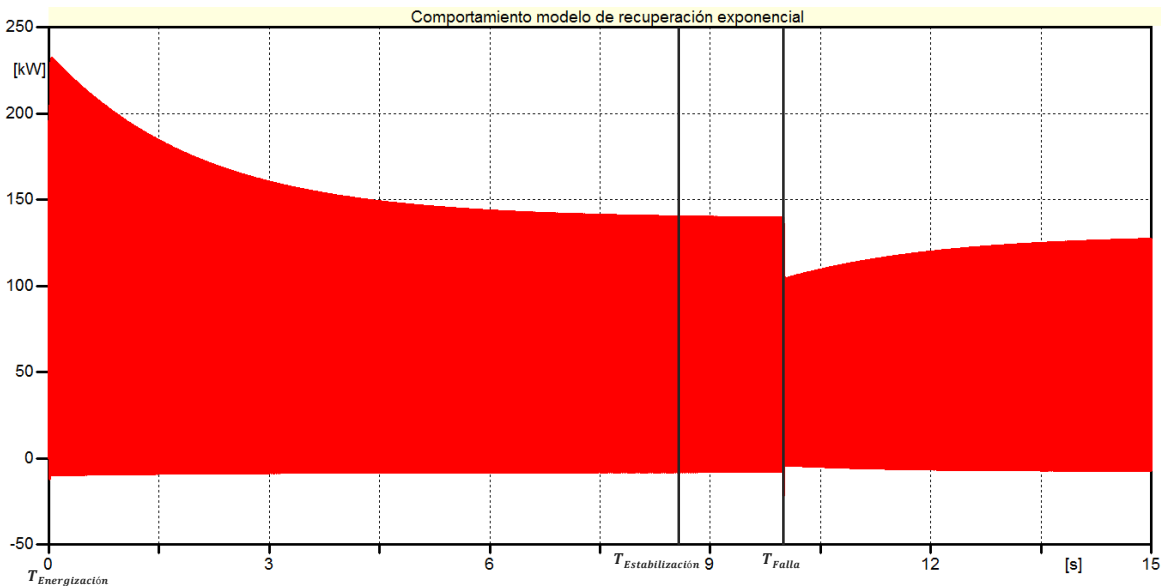
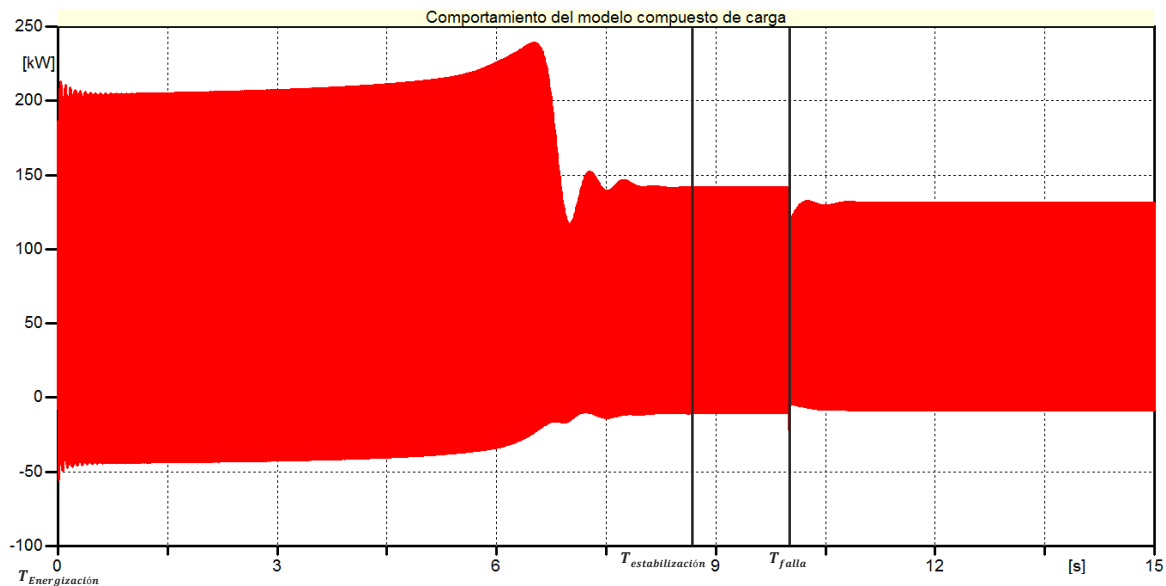


Figura 3.8 Respuesta de la potencia en la carga ante perturbaciones en la tensión.

### b) Modelo de carga compuesto

En la figura 3.9 se obtiene la respuesta de la potencia para la carga de la figura 3.7. Lo primero que se observa es el comportamiento de la carga al momento de la energización hasta el momento en que se estabiliza, se nota la misma característica de curva que en la figura 3.4. Se puede notar que al momento de energizar el sistema, se tiene un aumento en el consumo de la potencia debido a la corriente de arranque en los elementos que lo componen. Luego de que el sistema se estabilice, se simula la falla obteniendo el comportamiento para la potencia activa descrito en la figura 3.5.

El software ATP permite simular sistemas complejos en el dominio del tiempo, pero sus medidores son limitados y no pueden entregar valores rms. Por ello se tiene en función del tiempo la gráfica de la potencia activa simulada en ATP.

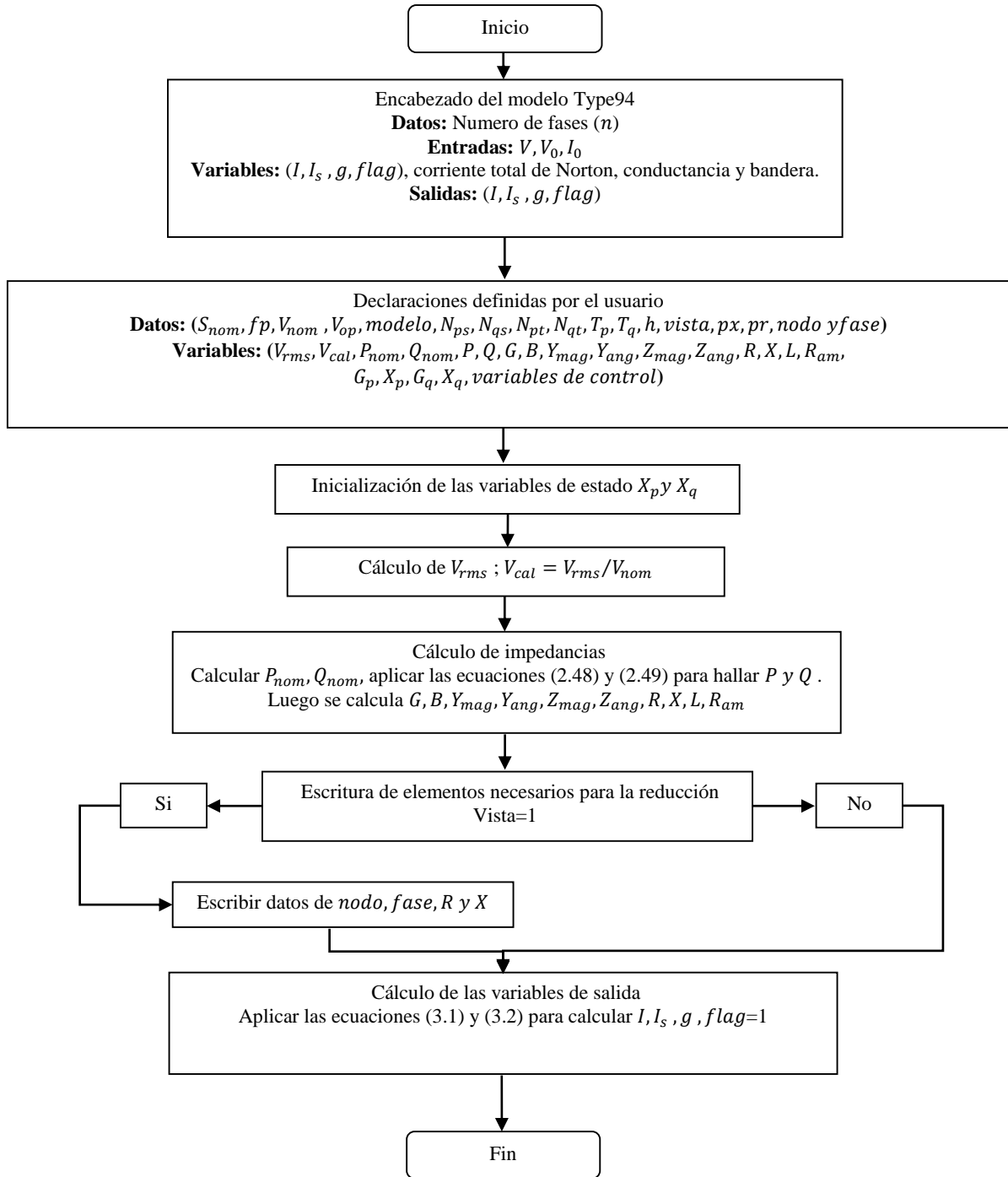


**Figura 3.9** Respuesta de la potencia activa en la carga al momento de la energización, y una posterior perturbación en la tensión.

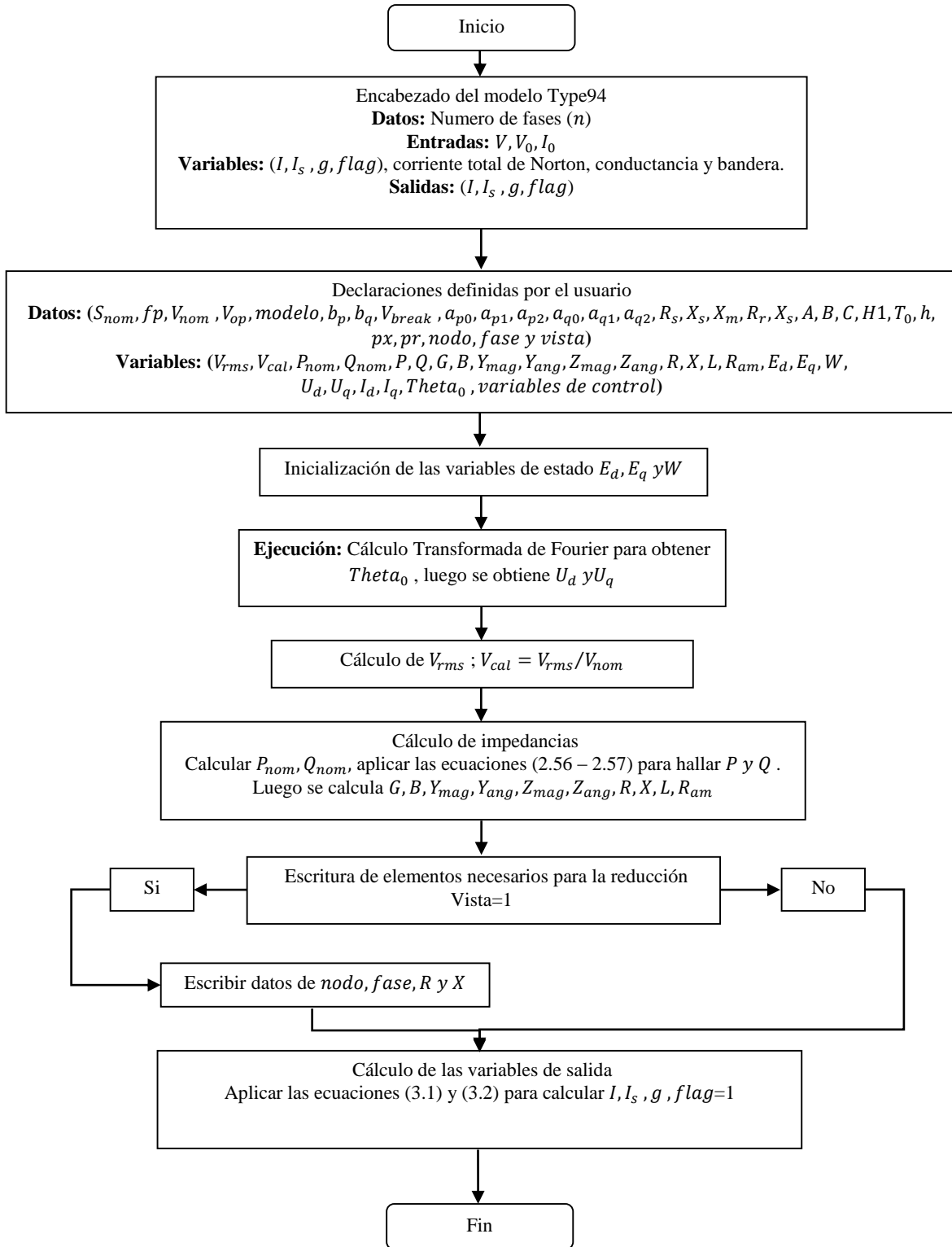
#### 3.2.4. Diagrama de flujo del modelo implementado en la herramienta *Models* de ATP

En la figura 3.10 y 3.11 se muestra el diagrama de flujo para la programación del modelo dinámico de carga de recuperación exponencial y el de carga compuesta mediante la herramienta *Models* de ATP. Esta herramienta utiliza lenguaje de programación basado en Fortran, completamente estructurado, lo cual permite un diseño modular que facilita la aplicación.

En los Anexos 1 y 2 se muestran los códigos fuentes escritos en lenguaje Fortran con *Models* Type-94 en modo non-transmission para el modelo de recuperación exponencial y el modelo compuesto de carga, respectivamente.



**Figura 3.10** Diagrama de flujo que sigue la programación del bloque de modelo dinámico de recuperación exponencial por medio de la herramienta *Models* de ATP.



**Figura 3.11** Diagrama de flujo que sigue la programación del bloque de modelo dinámico de carga compuesto por medio de la herramienta *Models* de ATP.

### 3.3. Implementación del modelo en los localizadores de fallas

Los métodos de localización basados en el modelo, en su mayoría analizan los sistemas eléctricos por tramos. Estos tramos constituyen las líneas entre nodos como se muestra en la figura 2.1. Para analizar cada tramo se debe actualizar la tensión y corriente en el nodo de envío del tramo bajo estudio. Las actualizaciones de tensión y corriente se describen en las ecuaciones (3.4) y (3.5). El efecto de la carga se observa en la ecuación (3.5), la cual muestra una dependencia de la admitancia equivalente de la carga que se encuentra conectada directamente a la red eléctrica y/o las cargas laterales equivalentes presentes en los circuitos radiales ramificados.

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{V}_{n-1} - \mathbf{Z}_{línea} \mathbf{I}_{n-1} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_{n-1} - \mathbf{Y}_{carga} * \mathbf{V}_n + \mathbf{I}_{shunt} \quad (3.5)$$

Las herramientas ATPeXchange y simulacionRF desarrolladas en el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>, proporcionan los datos necesarios de falla y pre-falla para ejecutar los programas de localización [BEDO13]. Estas herramientas se modifican para que reciban los nuevos modelos dinámicos de carga. En ATPeXchange se debe guardar el tipo de carga, datos nominales, radiales equivalentes y todo lo relacionado con la reducción del sistema eléctrico. La modificación consiste en proporcionar un nombre al modelo dinámico de carga, guardar los datos nominales y los datos que describen el comportamiento del modelo. Por otra parte, en simulacionRF, se toman los datos de tensión y corriente en pre-falla y pos-falla, y todo lo relacionado con los descriptores de las fallas. Aquí se debe aumentar el tiempo de simulación y modificar los tiempos en que se toman los datos de tensión y corriente en pre-falla y pos-falla. Esta modificación se presenta de manera detallada en el anexo 4.

El propósito de esta sección, es incluir el comportamiento dinámico de la carga en los localizadores de fallas mediante las actualizaciones de tensión y corriente para cada tramo estudiado. Se propone modificar las ecuaciones que describen el comportamiento de la potencia activa y reactiva, respectivamente. Se modifican de manera que describan el comportamiento de la admitancia activa y reactiva en la carga dependiente de las variaciones de tensión. Luego, estos valores de admitancia ingresan en las ecuaciones (3.4) y (3.5) para actualizar los tramos de línea a medida que se ejecuta el programa de localización de fallas.

#### a) Modelo de recuperación exponencial en función de la admitancia

Se requiere una expresión para la admitancia que dependa de las variaciones de tensión y tenga una respuesta dinámica ante cualquier perturbación. La demostración se hace para la componente activa solamente. Sin embargo, se procede de la misma manera para la componente reactiva. Este modelo resulta de dividir la ecuación (2.45) por la tensión de la carga al cuadrado, así:

$$T_p \frac{dx_G}{dt} = -x_G + V^{-2} * P_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right] \quad (3.6)$$

$$G_d = x_G + V^{-2} * P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}}$$

Con

$$x_G = \frac{x_p}{V^2}$$

$$G_d = \frac{P_d}{V^2}$$

Luego en la ecuación (3.6) se multiplica y se divide los últimos términos por la tensión nominal al cuadrado.

$$T_p \frac{dx_G}{dt} = -x_G + \frac{V_0^2}{V^2} * V^{-2} * P_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps}} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}} \right] \quad (3.7)$$

$$G_d = x_G + \frac{V_0^2}{V^2} * V^{-2} * P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt}}$$

Se reorganiza la ecuación (3.7) y queda una ecuación de la admitancia dependiente del modelo de recuperación exponencial. De igual manera, se presenta para la componente reactiva, así:

$$T_p \frac{dx_G}{dt} = -x_G + G_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{ps} - 2} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt} - 2} \right]$$

$$G_d = x_G + G_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{pt} - 2}$$
(3.8)

Con

$$G_0 = \frac{P_0}{V_0^2}$$

$$T_q \frac{dx_B}{dt} = -x_B + B_0 \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qs} - 2} - \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt} - 2} \right]$$

$$B_d = x_B + B_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_{qt} - 2}$$
(3.9)

Con

$$B_0 = \frac{Q_0}{V_0^2}$$

Donde,

$x_G, x_B$  : Variables de estado asociadas a la admitancia activa y reactiva.

$T_p, T_q$  : Tiempos de recuperación de la función exponencial activa y reactiva.

$N_{ps}, N_{qs}$  : Exponente asociado a la respuesta activa y reactiva estacionaria de la carga.

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

$P_0, Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga.

$G_0, B_0$  : Admitancia nominal activa y reactiva de la carga.

$G_d, B_d$  : Admitancia demandada activa y reactiva de la carga.

$V$  : Tensión en la carga.

$V_0$  : Tensión nominal en la carga.

### b) Modelo compuesto de carga en función de la admitancia

El modelo compuesto contiene una carga ZIP en paralelo con un motor de inducción como se muestra en la figura 2.8. A partir de las ecuaciones que describen el comportamiento del motor de inducción, ecuación (2.56), se obtiene la potencia activa y reactiva del motor. Además, con las ecuaciones (2.35) y (2.36) se obtiene la potencia activa y reactiva para el modelo ZIP. El propósito de esta sección es encontrar una expresión para la admitancia del modelo compuesto de carga. En la ecuación (3.10) se muestra la potencia activa del modelo compuesto, la cual se convertirá en la admitancia activa del modelo, para la componente reactiva se procese de forma similar.

$$P_{Compuesta} = P_{ZIP} + P_{Motor}$$
(3.10)

Luego se reemplazan las ecuaciones (2.35) y (2.56) en la ecuación (3.10), así:

$$P_{Compuesta} = P_0 \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_d I_d + U_q I_q) \right]$$
(3.11)

Para encontrar la ecuación de la admitancia activa se deben dividir la ecuación (3.11) por la tensión de la carga al cuadrado, así:

$$G_{Compuesta} = P_0 * V^{-2} \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_d I_d + U_q I_q) \right]$$
(3.12)

Con:

$$G_{Compuesta} = P_{Compuesta} / V^2$$

Luego en la ecuación (3.6) se multiplica y se divide por la tensión nominal al cuadrado.

$$G_{Compuesta} = P_0 * \frac{V_0^2}{V_0^2} * V^{-2} \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_d I_d + U_q I_q) \right] \quad (3.13)$$

Al reescribir la ecuación (3.13) se obtiene (3.14).

$$G_{Compuesta} = G_0 * \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-2} \left[ a_0 + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + (U_d I_d + U_q I_q) \right] \quad (3.14)$$

Con:

$$G_0 = P_0 / V_0^2$$

Finalmente se llega a la ecuación (3.15) para la admitancia activa del modelo compuesto de carga, de manera similar se obtiene la ecuación (3.16) para la admitancia reactiva.

$$G_{Compuesta} = G_0 \left[ a_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-2} + a_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-1} + a_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + (U_d I_d + U_q I_q) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-2} \right] \quad (3.15)$$

$$B_{Compuesta} = B_0 \left[ b_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-2} + b_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-1} + b_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + (U_q I_d - U_d I_q) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-2} \right] \quad (3.16)$$

### 3.4. Seudocódigo y diagrama de flujo para los localizadores

A continuación, se presentan los algoritmos simplificados que se utilizaron para la estimación de la distancia al punto de falla y el error absoluto en la estimación. En el primero se muestra el algoritmo simplificado para el método de localización basado en componentes de secuencia descrito en la sección 2.3.1. El segundo presenta el algoritmo simplificado para el método de localización basado en la mínima reactancia de falla descrita en la sección 2.3.2. El último es una propuesta de modificación para el criterio de parada en el método de la reactancia mínima de falla, que permite obtener una mejor estimación de la distancia al punto de falla, además de proporcionar un error absoluto menor ante fallas monofásicas que los localizadores de las secciones 2.3.1 y 2.3.2.

#### 3.4.1. Algoritmo simplificado para el cálculo de la distancia mínima de falla por el método de componentes de secuencia

El pseudocódigo básico se presenta a continuación:

Lee descriptores, reducción

Encuentra el tipo de falla

Para tramo estudiado

    Actualiza los valores de tensión y corriente en pre-falla y falla

    Obtiene los valores de líneas y cargas

    Aplica transformación a componentes de secuencia

    Estimación de la distancia al punto de falla

    Si  $0 \leq m \leq 1$

        Calcula distancia equivalente al punto de falla

        Calcular el error absoluto

    Si no

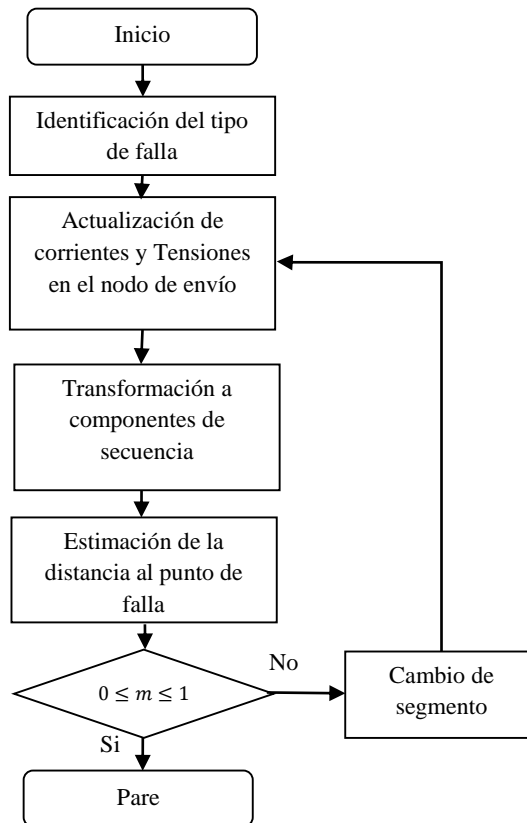
        Cambia de tramo

    Fin si

Fin para



El diagrama de flujo se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12.** Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla por el método de componentes de secuencia

### 3.4.2. Algoritmo simplificado para el cálculo de la distancia mínima de falla por el método de la reactancia mínima de falla

El algoritmo del método de reactancia mínima de presenta a continuación:

Lee descriptores, reducción

Encuentra el tipo de falla

Para tramo estudiado

Si último tramo

Calcula la reactancia mínima de falla en todo el tramo

Calcula la distancia equivalente al punto de falla

Calcular el error absoluto

Si no

Actualiza los valores de tensión y corriente en pre-falla y falla

Obtiene los valores de líneas y cargas

Varia  $m$  entre valores de 0 a 1

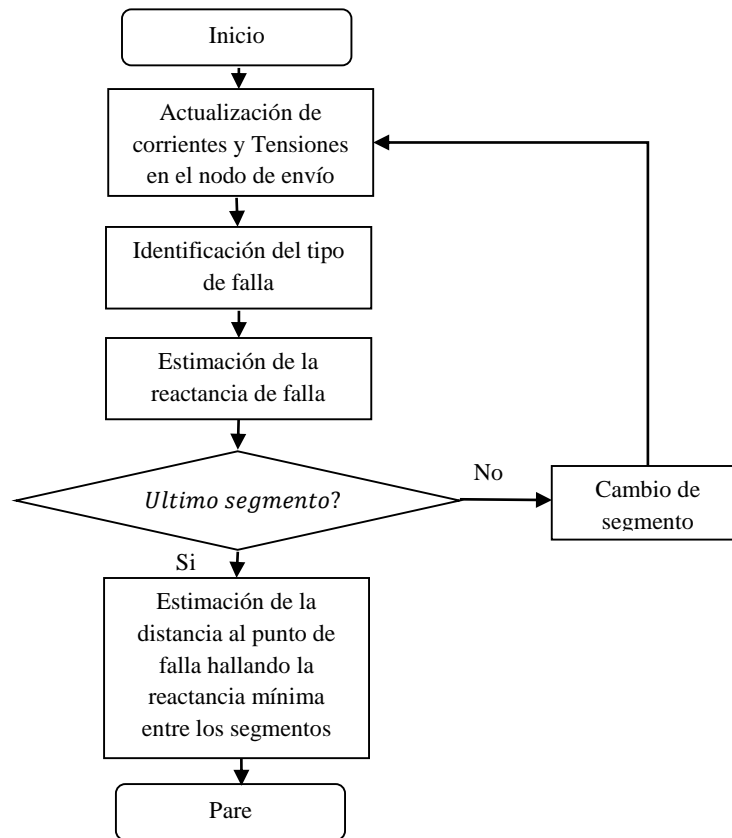
Calcula la reactancia de falla a lo largo del tramo

Cambia de tramo

Fin si

Fin para

Para el método de localización, el diagrama de flujo se presenta en 3.13.



**Figura 3.13.** Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla por el método de la reactancia mínima de falla

### 3.4.3. Algoritmo simplificado para el cálculo de la distancia mínima de falla por el método de la reactancia mínima de falla modificado

En esta sección se propone un nuevo criterio de parada para el método de la reactancia mínima de falla. Este criterio de parada consisten en estimar la distancia al punto de falla cuando el valor de la reactancia de falla se encuentra por debajo de un valor mínimo de reactancia. Este valor mínimo se estima cuando en la gráfica de la mínima reactancia de falla se tiene una pendiente negativa.

El algoritmo del método de reactancia mínima se presenta a continuación:

Lee descriptores, reducción

Encuentra el tipo de falla

Para tramo estudiado

    Actualiza los valores de tensión y corriente en pre-falla y pos-falla

    Obtiene los valores de líneas y cargas

    Varia  $m$  entre valores de 0 a 1

    Calcula la reactancia de falla a lo largo del tramo

    Si reactancia de falla menor a reactancia de falla mínima

        Calcula la distancia equivalente al punto de falla

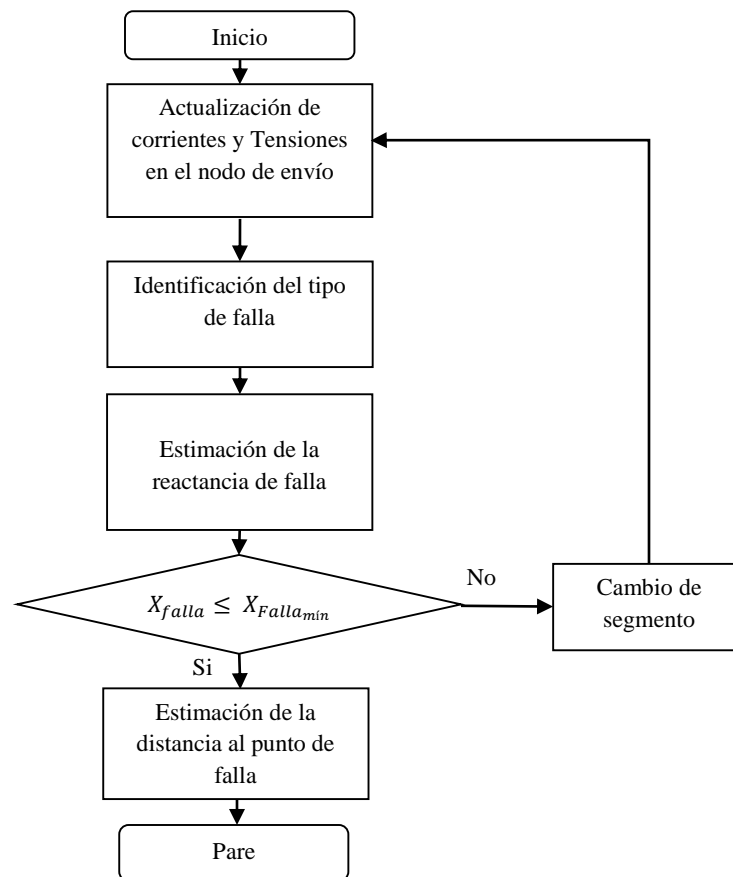
        Calcular el error absoluto

    Fin si

    Cambia de tramo

Fin para

Para el método de localización, el diagrama de flujo se presenta en 3.14.



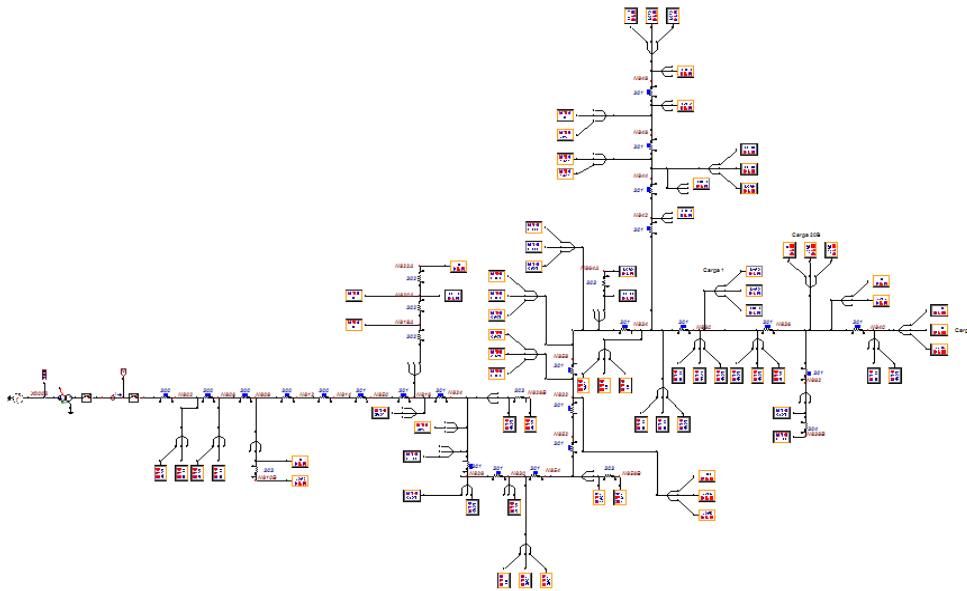
**Figura 3.14.** Diagrama de flujo simplificado para la estimación de la distancia al punto de falla, por el método de la reactancia mínima de falla modificado

## Capítulo 4

### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

#### 4.1. Sistemas de pruebas IEEE de 34 nodos

El sistema de pruebas prototipo seleccionado para la investigación es la red de distribución IEEE de 34 Nodos. Los datos se obtienen del “test feeders” del “Distribution System Analysis Subcommittee” del “Institute Electrical and Electronics Engineers” [IEEE00]. Este sistema es citado frecuentemente y usado por otros investigadores del área de localización de fallas. El sistema de prueba está ubicado en Arizona y se encuentra alimentado a 24.9 kV. Este sistema presenta tramos de línea con distintos calibres y longitudes, cargas monofásicas, bifásicas, trifásicas balanceadas y desbalanceadas, además de cargas concentradas y distribuidas conectadas en delta y estrella.



**Figura 4.1.** Sistema de pruebas IEEE de 34 nodos y nivel de tensión de 24,9 kV, simulado en el software ATPDraw.

#### 4.2. Consideraciones previas

##### 4.2.1. Medida del desempeño

Para medir el desempeño de la metodología propuesta se utiliza el error absoluto como indicador. Éste se calcula por medio de la ecuación (4.1).

$$Error_{absoluto} [\%] = \frac{Distancia_{real} - Distancia_{calculada}}{L_{Total}} * 100\% \quad (4.1)$$

Donde,

$Distancia_{real}$  : Distancia real al punto de falla

$Distancia_{calculada}$  : Distancia estimada al punto de falla

$L_{Total}$  : Longitud total del radial más largo

#### 4.2.2. Escenarios de prueba

Para validar la metodología propuesta en este proyecto, se proponen siete escenarios de prueba.

##### a) Primer escenario

Se realizan pruebas en condición nominal de operación del sistema de potencia, con modelos estáticos de carga ZIP en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta primera prueba no se tiene en cuenta el modelo de carga ZIP en el localizador ya que éste considera un modelo de carga de impedancia constante.

El propósito de esta prueba es obtener un punto de referencia frente al desempeño de los localizadores de fallas con modelos estáticos de cargas en el sistema. Este primer escenario se define como el escenario base. Luego, se hace un análisis comparativo con el desempeño frente a los demás escenarios de prueba relacionados en este documento. En este escenario se espera obtener un buen desempeño para la estimación de la distancia al punto bajo falla, debido a que los métodos de localización tradicionales están diseñados para trabajar con modelos estáticos de carga en el sistema y modelos estáticos de impedancia constante en el localizador.

##### b) Segundo escenario

Se realizan pruebas en condición nominal de operación del sistema de potencia con modelos estáticos de carga ZIP, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba se tiene en cuenta el modelo de carga ZIP en el localizador.

El propósito de esta prueba es incluir el modelo de carga estático en los localizadores de fallas estudiados. Estos localizadores consideran modelos estáticos de carga de impedancia constante al actualizar las tensiones y corrientes que pasan por los tramos. Estos modelos estáticos de impedancia constante se reemplazan con los modelos de carga ZIP de corriente potencia o impedancia constante. Luego, se compara el desempeño para este escenario con respecto al escenario base con el fin de encontrar la variación que se presenta al incluir el modelo ZIP de carga estático en los localizadores de fallas desarrollados por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>. Debido a que estos localizadores consideran modelos estáticos de carga de impedancia constante para el escenario base y que el modelo ZIP también es un modelo estático de carga, se estima para este escenario que los resultados serán muy similares a los que se presentan para el escenario base.

##### c) Tercer escenario

Se realizan pruebas en condición nominal de operación del sistema de potencia, con modelos dinámicos de recuperación exponencial en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba no se tiene en cuenta el modelo de carga de recuperación exponencial en el localizador ya que este tiene el modelo estático de impedancia constante.

Con esta prueba se pretende analizar el comportamiento de los localizadores de fallas tradicionales en un sistema de prueba con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial. Luego, estos resultados se comparan con los resultados obtenidos en el escenario base para medir la variación del desempeño que se presenta al incluir los modelos dinámicos en el sistema de pruebas.

El modelo dinámico de carga de recuperación exponencial tienen un tiempo determinado de respuesta ante perturbaciones en la tensión, por lo cual, es necesario tener en cuenta el tiempo en que se toman los datos de falla, ya que si se toman los datos luego del tiempo de recuperación, se obtendrán resultados muy similares a los obtenidos para el escenario base. Esto se debe a que el modelo de recuperación exponencial en estado estable se comporta como un modelo estático de carga, ya que si se toman los datos de posfalla después de que transcurra el tiempo de recuperación, no se tiene en cuenta el comportamiento dinámico.

En este proyecto se toman los datos de posfalla antes de superar el tiempo de recuperación, es decir, en estado transitorio. En este escenario se esperan obtener bajos resultados para el desempeño de la localización al punto bajo falla con respecto al escenario base, debido a que este modelo introduce variaciones dinámicas en la carga y problemas de inestabilidad ante caídas severas en la tensión.

#### d) Cuarto escenario

Se realizan pruebas en condición nominal, con modelos dinámicos de recuperación exponencial en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba se tiene en cuenta el modelo de carga de recuperación exponencial en el localizador.

El objetivo de esta prueba consiste en analizar el desempeño obtenido al incluir el comportamiento dinámico del modelo de recuperación exponencial en los localizadores de fallas desarrollados por el grupo de investigación *ICE*<sup>3</sup>. Este modelo tiene un tiempo de recuperación determinado y se debe tener en cuenta como se presenta en el escenario anterior. Luego se comparan los resultados obtenidos en este escenario frente al escenario base para determinar la variación que se presenta al incluir el modelo de recuperación exponencial tanto en el sistema de pruebas como en el método de localización. Además, se debe comparar los resultados obtenidos en este escenario con respecto al tercer escenario para medir la variación que se presenta cuando se tiene o no se tiene en cuenta el modelo de recuperación exponencial en el localizador, mientras en el sistema se tienen modelos dinámicos de carga de recuperación exponencial.

Se estima que el desempeño para este escenario debe superar el desempeño que se presenta en el tercer escenario, ya que se supone obtener una mejor representación del sistema vista desde el localizador, cuando se incluyen los modelos y los parámetros de carga presentes en el sistema. Sin embargo, los resultados del desempeño para este escenario puede que no sean tan buenos con respecto al escenario base debido a que los modelos dinámicos responden de forma abrupta ante grandes caídas de tensión, provocando inestabilidad en el sistema.

#### e) Quinto escenario

Se realizan pruebas en condición nominal, con modelos compuestos de carga en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba no se tiene en cuenta el modelo compuesto de carga en el localizador ya que éste tiene un modelo de impedancia constante. El objetivo principal de esta prueba consiste en realizar un análisis para el desempeño de los localizadores de fallas desarrollados por el grupo de investigación *ICE*<sup>3</sup>, cuando se tienen modelos compuestos de carga en el sistema de pruebas. Luego se hace un análisis comparativo del desempeño obtenido para este escenario con respecto al desempeño obtenido en el escenario base con el fin de determinar la variación que se presenta cuando se incluyen los modelos compuestos de carga en el sistema de pruebas.

Los modelos compuestos de carga representan el comportamiento de una carga de modelo ZIP en paralelo con un motor de inducción, este motor proporciona la componente dinámica en la respuesta del modelo ante variaciones de tensión en la carga, sin embargo, cuando las variaciones son demasiado bruscas, se presentan problemas de inestabilidad en el sistema. Este modelo tiene una respuesta rápida frente a perturbaciones en la tensión con respecto al modelo de recuperación exponencial, por lo cual es necesario tomar las medidas de falla antes de que el sistema llegue a su estado estable, o en su defecto, a un estado inestable. Los sistemas en campo tienen protecciones que desconectan el área bajo falla luego de un tiempo

determinado a partir del evento, estas protecciones protegen al sistema de posibles inestabilidades provocadas por caídas bruscas en la tensión. Por lo general, los tiempos de actuación para las protecciones se encuentran entre 100ms y 1 segundo, lo cual indica un límite de tiempo para tomar las medidas de posfalla para el sistema completo mientras se encuentra en su etapa transitoria. Además, si se toman las medidas de posfalla luego de que actúen las protecciones, se tendría un sistema reducido que proporciona una gran incertidumbre en el método de localización de fallas.

En este escenario se estima obtener un bajo desempeño de la estimación al punto bajo falla frente al escenario base, debido que el modelo compuesto de carga responde de forma brusca ante severas perturbaciones en la tensión.

**f) Sexto escenario**

Se realizan pruebas en condición nominal, con modelos compuestos de carga en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba se tiene en cuenta el modelo compuesto de carga en el localizador.

El propósito de esta prueba consiste en realizar un análisis del desempeño de los localizadores de fallas desarrollados por el grupo de investigación *ICE*<sup>3</sup>, cuando se tienen modelos de carga compuesto tanto en el sistema de pruebas como en el localizador. Estos modelos de carga se integran en los localizadores por medio de las actualizaciones de tensión y corriente. Luego se compara el desempeño obtenido en este escenario frente al que se obtiene del escenario base. Además, se debe comparar los resultados obtenidos en este escenario con respecto al quinto escenario para medir la variación que se presenta cuando se tiene o no se tiene en cuenta el modelo de carga compuesto en el localizador, mientras se tiene modelo de carga compuesto en el sistema. El modelo compuesto de carga representa de forma adecuada un modelo de carga ZIP en paralelo con un motor de inducción, por lo cual se esperan buenos resultados para la estimación al punto bajo falla con respecto a escenario cinco, pero una baja estimación con respecto al escenario base.

**g) Séptimo escenario**

Se realizan pruebas en condición nominal, con modelos compuestos de carga, Modelos de recuperación exponencial y modelos ZIP, en el sistema de pruebas prototipo, para fallas monofásicas a tierra, bifásicas y trifásicas, con variaciones de resistencia de falla. En esta prueba no se tiene en cuenta el modelo de carga en el localizador ya que éste tiene un modelo de impedancia constante.

En este escenario se pretende medir el desempeño de los localizadores de fallas con distintos modelos de carga en el sistema. Luego se compara el desempeño obtenido en este escenario frente al que se obtiene del escenario base.

Para este caso, se estiman buenos resultados para la estimación al punto bajo falla debido a que se reduce la cantidad de cargas dinámicas en el sistema de pruebas.

### **4.3. Pruebas en el sistema prototipo**

Las pruebas se realizan en el sistema IEEE de 34 nodos y a nivel de tensión de 24,9 kV, con distintos modelos de carga. La estimación al punto de falla se realiza con los métodos descritos en la sección 2.3, además del método modificado de la mínima reactancia de falla.

### 4.3.1. Resultados obtenidos para el primer escenario

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el primer escenario de pruebas frente a fallas monofásicas a tierra. En la figura 4.2.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con diferentes valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Aquí se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema. En las figuras 4.2.b y 4.2.c, se presenta el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema.

#### a. Resultados obtenidos con el método basado en componentes de secuencia

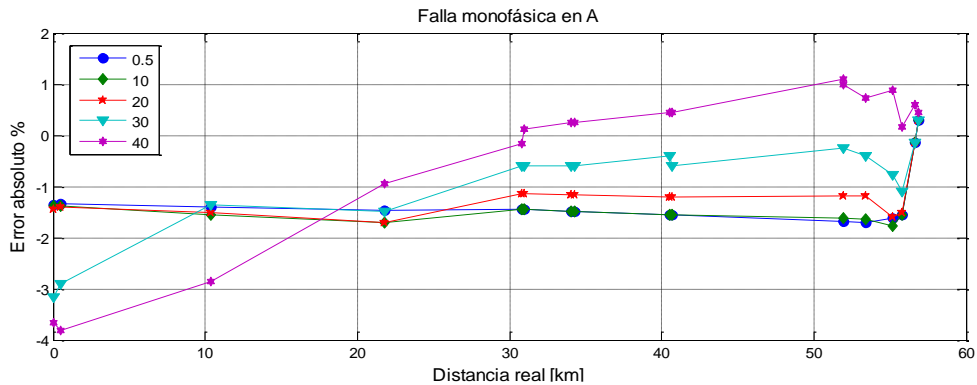


Figura 4.2.a. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

#### b. Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

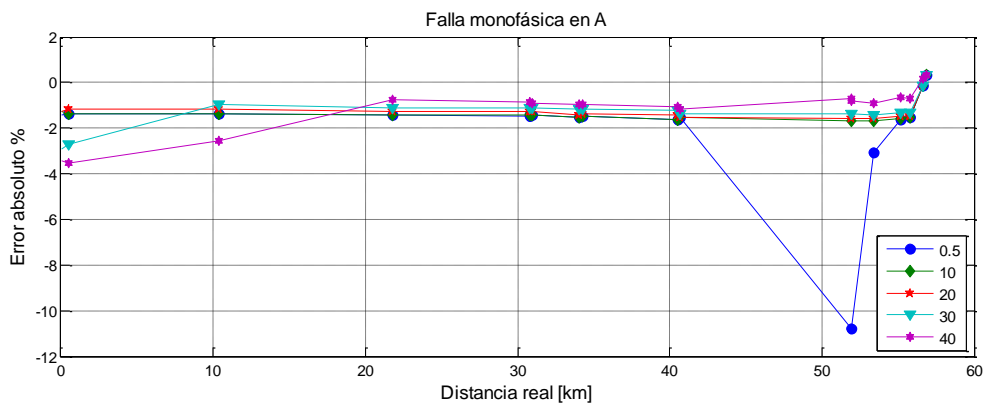


Figura 4.2.b. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia



### c. Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

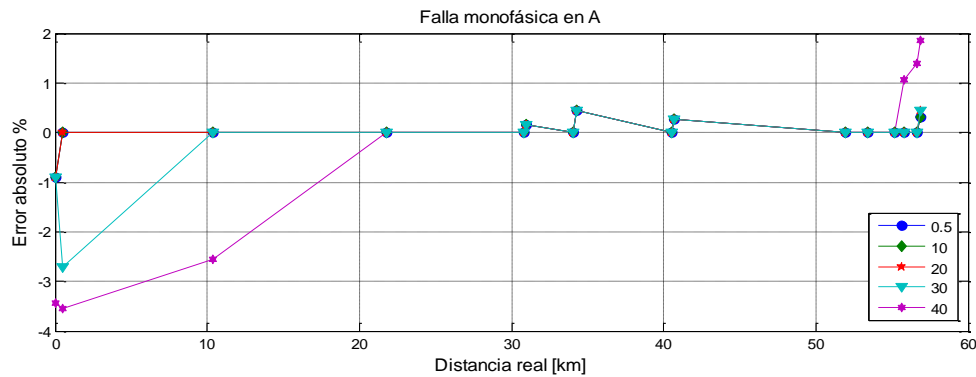


Figura 4.2.c. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

Como complemento de esta sección, en el anexo 5 se presenta de forma detallada los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de pruebas propuestos.

## 4.4. Análisis de resultados

A continuación se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta.

### 4.4.1. Escenario 1

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos de carga ZIP. Las figuras A.5.1.a, A.5.1.b y A.5.1.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -4% y 2%, a excepción del método de mínima reactancia que tiene una posición en -12%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error muy cercano al 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.2.a, A.5.2.b y A.5.2.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. Los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -2% y 0.5%. Las figuras A.5.3.a, A.5.3.b y A.5.3.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos son eficientes ante fallas trifásicas y proporcionan un buen desempeño con un error de estimación entre -1.5% y 3%. Aquí se observa nuevamente que el método de la mínima reactancia de falla modificado proporciona un error muy cercano al 0% alrededor del centro de la línea. Entre los tres métodos de localización estudiados se puede concluir que el método basado en componentes de secuencia es más robusto que los demás, esto se debe a que este método analiza cada falla con un conjunto de ecuaciones algebraicas distintas capaces de producir una buena representación del sistema para cualquier tipo de falla.

### 4.4.2. Escenario 2

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos de carga ZIP y teniendo en cuenta el modelo ZIP en el localizador. Tal como se esperaba para este escenario, no se tiene ninguna variación significativa a los resultados obtenidos en el escenario base. Esto se debe a que los localizadores trabajan con modelos de carga de impedancia constante cuando se aplican las actualizaciones de tensión y corriente que pasan por los tramos. Estos modelos de impedancia constante provienen de la herramienta ATPExchange desarrollada por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup> de la Universidad Tecnológica de Pereira. Por medio de este escenario se puede concluir que el método

para implementar los modelos de carga en función de la admitancia, en los localizadores de fallas por medio de las actualizaciones de tensión y corriente, se encuentra bien diseñado y proporciona un buen comportamiento para el análisis de localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica.

#### **4.4.3. Escenario 3**

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos de carga de recuperación exponencial. Las figuras A.5.7.a, A.5.7.b y A.5.7.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -2% y 0.5%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error del 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.8.a, A.5.8.b y A.5.8.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. De nuevo, los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -1.5% y 1.2%. Las figuras A.5.9.a, A.5.9.b y A.5.9.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos son eficientes ante fallas trifásicas y proporcionan un buen desempeño con un error de estimación entre -1.5% y 2%. Aquí se observa que el método de la mínima reactancia de falla modificado presenta un comportamiento similar al método de la mínima reactancia de falla. A pesar de que se esperaba un bajo desempeño para este escenario con respecto al escenario base, aquí se obtiene un buen comportamiento en los localizadores de fallas tradicionales cuando se incluyen cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y se toman las medidas de posfalla en la etapa transitoria de la recuperación debida a una falla en el sistema. A pesar de que en este escenario no se tiene en cuenta el modelo de carga dinámico en el localizador, se puede concluir que los métodos de localización de fallas desarrollados por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup> son robustos ante modelos dinámicos de recuperación exponencial en el sistema.

#### **4.4.4. Escenario 4**

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos de carga de recuperación exponencial, y teniendo en cuenta el modelo en el localizador. Las figuras A.5.10.a, A.5.10.b y A.5.10.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -3.5% y 3%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error muy cercano al 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.11.a, A.5.11.b y A.5.11.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. De nuevo, los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -1.5% y 3%. Las figuras A.5.12.a, A.5.12.b y A.5.12.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos son eficientes ante fallas trifásicas y proporcionan un buen desempeño con un error de estimación entre -3% y 3%, a excepción del método de mínima reactancia que tiene dos posiciones en -12%. Como conclusión se presenta que al introducir el modelo dinámico en el localizador, se presenta un error mayor al que se tiene cuando no se introduce el modelo dinámico en el localizador. Esto se debe a que al introducir el modelo dinámico, se presentan posibles errores dado que la carga en el sistema es desbalanceada, y para lograr integrarlo se asume la carga balanceada. Además, se debe tener en cuenta los tiempos de falla y prefalla para simular el comportamiento dinámico de la carga en el localizador. A pesar de que se tiene en cuenta el tiempo de posfalla en el localizador, se debe realizar un estudio sobre el tiempo óptimo en que se asume la toma de datos en el estado de posfalla para las cargas en el localizador, es decir, el localizador debe simular la respuesta de la carga dinámica a partir de los valores de tensión en el estado de prefalla y posfalla, luego debe estimar la admitancia equivalente de la carga en un instante determinado para el estado de prefalla y posfalla. Luego estas admitancias se deben incluir en las actualizaciones de tensión y corriente en el localizador.

#### 4.4.5. Escenario 5

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos compuestos de carga. Las figuras A.5.13.a, A.5.13.b y A.5.13.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -3% y 3%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error muy cercano al 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.14.a, A.5.14.b y A.5.14.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. De nuevo, los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -10% y 15%, a diferencia de con una posición loca en 27%. Las figuras A.5.15.a, A.5.15.b y A.5.15.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos proporcionan un bajo desempeño ante fallas trifásicas debido al comportamiento inestable de la carga. Debido a que la estabilidad del modelo compuesto es muy vulnerable ante caídas grandes de tensión, los datos adquiridos con los descriptores pueden tener potenciales errores que producen un bajo rendimiento de los localizadores. A pesar de que el rendimiento de los localizadores no es óptimo para este escenario, se puede notar que los métodos de localización de fallas desarrollados por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup> son robustos ante fallas monofásicas cuando se tienen cargas de modelo compuesto en el sistema. Las demás fallas simuladas para este escenario provocan una baja estimación al punto bajo falla en el sistema debido a la inestabilidad que produce el modelo del motor de inducción ante severas perturbaciones en la tensión.

#### 4.4.6. Escenario 6

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos compuestos de carga y teniendo en cuenta el modelo en el localizador. Las figuras A.5.16.a, A.5.16.b y A.5.16.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -3.5% y 3%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error muy cercano al 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.17.a, A.5.17.b y A.5.17.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. De nuevo, los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -2.5% y 0.5%. Las figuras A.5.18.a, A.5.18.b y A.5.18.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos proporcionan un bajo desempeño debido al comportamiento inestable del modelo compuesto de carga ante fallas entre líneas. Al incluir el modelo dinámico de carga en los localizadores se obtiene un respuesta similar a la que se obtiene en el escenario 5, además se presenta el mismo problema que en el escenario 4 con respecto a el tiempo en que se asume el estado de posfalla para las cargas dinámicas. Los métodos de localización estudiados en este proyecto proporcionan un buen desempeño frente a fallas monofásicas, las cuales presentan mayor incidencia en el sistema de distribución de energía eléctrica.

#### 4.4.7. Escenario 7

En este escenario se obtuvieron los resultados de estimación de la distancia al punto bajo falla en el sistema IEEE de 34 nodos con modelos de carga de recuperación exponencial, modelos compuestos de carga y modelos ZIP de potencia, corriente e impedancia constante. Las figuras A.5.19.a, A.5.19.b y A.5.19.c, muestran los resultados ante fallas monofásicas con los tres métodos implementados. Aquí se tienen resultados para el error de estimación entre -4% y 2.5%. El método de mínima reactancia modificado proporciona un error muy cercano al 0% en las fallas ocurridas alrededor del centro de la línea. Las figuras A.5.20.a, A.5.20.b y A.5.20.c, muestran los resultados ante fallas bifásicas con los tres métodos implementados. De nuevo, los métodos de mínima reactancia no producen una buena estimación ante fallas bifásicas, a diferencia del método basado en componentes de secuencia que proporciona un error de estimación entre -2.5% y 0.5%. Las figuras A.5.21.a, A.5.21.b y A.5.21.c, muestran los resultados ante fallas trifásicas con los tres métodos implementados, estos métodos son eficientes ante fallas trifásicas y proporcionan un buen desempeño con un error de estimación

entre -1.5% y 2.5%. Este escenario tiene un buen desempeño para la estimación de la distancia al punto bajo falla debido a que tiene menos modelos dinámicos de carga en el sistema, lo cual proporciona una mejor estabilidad en el sistema de pruebas ante severas caídas de tensión en la carga.

#### **4.5. Problemas encontrados**

El modelo compuesto de carga requiere como entrada los valores de tensión en el eje directo y el eje de cuadratura. Debido a que en ATP se trabaja con las funciones de tensión y corriente en dominio del tiempo, se hace necesario realizar la transformada de Fourier para expresar la tensión en el dominio de la frecuencia. Luego se utiliza la transformada de Park para expresarlos como tensión en eje directo y en eje de cuadratura.

El sistema es inestable ante fuertes perturbaciones en la tensión cuando se tienen modelos dinámicos de carga, por lo cual fue necesario convertir los modelos de carga dinámicos en modelos de impedancia constante una vez que la tensión en la carga dada en p.u. se encuentre en un valor mínimo a la tensión de ruptura ( $V_{break}$ ).

Para reducir los tiempos de simulación, fue necesario encontrar los valores de las variables en estado estable. De esta manera se asume el sistema en estado operativo al momento de iniciar la simulación automática de fallas, por lo que solo se requiere 0.3 segundos para estabilizarse el circuito. Si se asume el sistema desenergizado al momento de la simulación, es decir, las variables de estado iguales a cero, el sistema toma 8 segundos para estabilizarse.

## Capítulo 5

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

#### 5.1. Conclusiones

En este proyecto se implementó una metodología con el fin de analizar el comportamiento de dos localizadores de fallas en sistemas de distribución con distintos modelos dinámicos de carga. Para lograr este objetivo principal, se desarrolló e implementó un nuevo bloque que contiene un modelo de carga de recuperación exponencial, y uno que contiene el modelo de carga compuesto de orden tres. Estos dos modelos de carga se implementan en el software ATP mediante el bloque programable *Models* (Type-94), en modo Norton non-transmission con lenguaje de programación basado en Fortran. A pesar de que ya se habían implementado modelos de carga ZIP/Exponencial en ATP, y posteriormente en el análisis de localización de fallas, los modelos dinámicos de carga no se habían incluido en los estudios de localización.

Estos bloques que contienen los modelos dinámicos de carga, fueron incorporados fácilmente en las herramientas ATPeXchange y simulacionRF. Estas herramientas son desarrolladas por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup> de la Universidad Tecnológica de Pereira y mediante este proyecto se modificaron para incorporar los de modelo dinámico, según se presenta en el anexo 4.

El método de la mínima reactancia para localización de fallas, presenta buenos resultados ante fallas monofásicas y trifásicas. Sin embargo, el método de localización basado en componentes de secuencia presenta un buen desempeño para todos los tipos de fallas de cortocircuitos. Esto se debe a que este último método presenta una ecuación diferente para cada tipo de falla, de manera que ataca directamente el problema de localización desde el circuito equivalente que resulta de la descomposición de las redes de secuencia.

A pesar de que los modelos dinámicos de carga alteran las medidas de tensión y corriente en la subestación, se puede observar la robustez de los métodos de localización de fallas cuando se tienen fallas monofásicas, las cuales presentan incidencia del 70% según referencias citadas. Sin embargo, en el caso particular de las fallas monofásicas, el método de mínima reactancia proporciona un muy buen desempeño, superando el desempeño del método de componentes de secuencia.

Con el fin de obtener un acercamiento al sistema de potencia en campo, se implementa un sistema que combina modelos compuestos de carga, modelos de recuperación exponencial y modelos ZIP de corriente, potencia e impedancia constante. De esta manera se tiene un sistema de potencia simulado con modelos variados de carga, tal como se presenta el sistema en campo.

## 5.2. Trabajos a futuro

Como trabajos a futuro, se propone:

- a. Integrar el efecto de modelos dinámicos de carga para problemas de localización de fallas en sistemas de distribución, en el estudio de la generación distribuida.
- b. Realizar un estudio con el cual se determine el tiempo óptimo para tomar medidas de posfalla en la subestación, cuando se tienen modelos dinámicos de carga. En este estudio se debe tener en cuenta los demás elementos que conforman la red eléctrica como protecciones, reconectores, cambiadores de tap, entre otros.
- c. Modificar la programación de la herramienta ATPeXchange desarrollada por el grupo de investigación *ICE<sup>3</sup>*, para que en la reducción de los circuitos laterales se considere el tipo de carga presente en el lateral.
- d. Desarrollar un método metaheurístico o de identificación adaptativa para la estimación de parámetros en modelos dinámicos de carga como el de recuperación exponencial, el modelo compuesto de carga y el modelo en función de transferencia, entre otros.
- e. Implementar un sistema de identificación que determine los parámetros de un modelo de carga, además, un sistema de control que permita reducir las pérdidas de potencia con un óptimo despacho de energía.

## Capítulo 6

### BIBLIOGRAFÍA

- [ANDE95] Anderson, P. M. “Analysis of Faulted Power Systems” Wiley-IEEE Press 1995.
- [ATIA00] Fahmy, O. M., Attia, A. S., and Badr, M. A. L. “A Novel Analytical Model for Electrical Loads Comprising Static and Dynamic Components” *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 1249.1256 Received 17 May 2005; received in revised form 6 August 2006; accepted 22 September 2006, Available online 13 November 2006.
- [BEDO13] Bedoya, A. “Estrategia generalizada para la aplicación de métodos de localización de fallas basados en la estimación de la impedancia o MBM”. Tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2013.
- [CHIA96] Chiang, Hsiao-Dong, Wang, Jin-Cheng., Huang, Chiang-Tsung., Chen, Yung-Tien., and Huang, Chang-Horng. .Development of a Dynamic ZIP-Motor Load Model From On-Line Field Measurements. *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 7, pp. 459-468, 1997, Received 18 September 1996; accepted 19 December 1996.
- [CHIL05] FCFM. “Modelo estático y dinámico de carga”. Material del curso de ingeniería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2005.
- [CLMA06] He Renmu, Ma Jin, and David J. Hill. “Composite Load Modelling via Measurement Approach” *IEEE Trans. Power Systems*, vol.21, no.2, pp.663-672, May. 2006.
- [CONC82] Concordia, C, Ihara S, .Load Representation in Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 4 April 1982.
- [CREG08] 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.
- [CRIS14] 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.
- [CROZ99] Crozier C, Wisdom W. “A power quality and reliability index based on customer interruption costs”, *Power Engineering Review*, IEEE, Vol 19, Issue 4, April 1999 Pages: 59-61.
- [CSEP14] Juan F. Robledo. “Análisis de Colapsos en Sistemas Eléctricos de Potencia”. Tesis de pregrado Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2014.
- [DAGE00] J. B Dagenhart. “The 40- Ground-Fault Phenomenon” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pages 30-32,2000.
- [DASR98] Das, R. “Determining the locations of Faults in distribution systems” Doctoral Thesis University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, spring 1998.
- [DMLP02] Inés Romero N. “Dynamic Load Models for Power Systems, Estimation of Tyme-Varying Parameters During Normal Operation” Tesis doctoral, Departament of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Sweden, 2002.

- [EPRE13] L. Rodríguez, S. Pérez, J. Mora. “Estimación de Parámetros de un Modelo de Carga de Recuperación Exponencial Empleando Técnicas Metaheurísticas”. *Scientia et Technica XVIII*, vol.18, no.3, pp.453-462, Octubre, 2013. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [GERM07] 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.
- [IEEE00] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee “*Radial Test Feeders*”. 2000. <http://www.Ewh.ieee.org/soc/pes/sacom/testfeeders.html>
- [KARL94] D. Karlsson and D. J. Hill, “Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol.9, no.1, pp.157-166, Feb. 1994.
- [LAUR14] 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.
- [LRDA93] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load representation for dynamic performance analysis of power systems,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 472 – 482, May 1993.
- [MORA06] 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.
- [MORE07] Moreno, E.A., Pérez, E.A., Cano, J.C., and Vélez, J.H. “Metodología para la Determinación de Algunos Parámetros del Modelo de Carga Dependiente del Voltaje”. XII ERIAC - Encuentro Regional Ibero-Americano del CIGRÉ, Foz do Iguazú-Pr, Brasil, 20 a 24 de mayo de 2007.
- [NDLM96] P. Ju, E. Handschin, D. Karlsson. “Nolinear Dynamic Load Modelling: Model and Parameter Estimation”. *IEEE Trans. Power Systems*, vol.11, no.4, pp.1689-1697, Nov. 1996.
- [RICA13] Ricardo Herrera O. “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”, Tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2013.
- [RMRI04] R.M. Rifaat, "On composite load modelling for voltage stability and under voltage load shedding" In *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp.1603-1610.
- [SLMP95] System Dynamic Performance Subcommittee Power System Engineering Committee. “Standar Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”. *IEEE Trans. Power Systems*, vol.10, no.3, pp.1302-1313, Aug. 1995.
- [STOJ07] Stojanović, D. P., Korunović, L. M., and Milanović, J. V. .Dynamic Load Modelling Based on Measurements in Medium Voltage Distribution Network.. *Electric Power Systems Research* 78 (2008) 228.238, Received 11 September 2006; accepted 8 February 2007, Available online 28 March 2007.



## Anexo 1

En este anexo se presenta el código fuente que se implementó en ATP con lenguaje similar al Fortran para el modelo dinámico de carga de recuperación exponencial.

```
MODEL R_E -- NB! 6 character name limit

-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Norton non-TR model |
| - these data and input values are provided to the model by ATP |
| - these output values are used by ATP |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order |
-----endcomment

DATA n -- number of phases
    ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side

INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
    v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
    i0[1..n] -- current(t=0) into each left node

VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
    is[1..n] -- Norton source(t+timstep) at each left node
    g[1..ng] -- conductance(t+timstep) at each left node
        -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
    flag -- set to 1 whenever conductance value is modified

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment

-- End header.
CONST freq {val: 60}

DATA Snom -- Potencia nominal en VA
    FP -- Factor de Potencia
    Vnom -- Voltaje nominal del sistema
    Vopi {dflt: 0} -- Voltaje de operacion inicial
    Modelo{dflt: 0} -- Selecciona el tipo de modelo 1: Modelo de Recuperacion Exponencial, 2: Modelo
Exponencial
    Nps {dflt: 0} -- Exponente pala la respuesta estacionaria activa
    Nqs {dflt: 0} -- Exponente pala la respuesta estacionaria reactiva
    Npt {dflt: 0} -- Exponente pala la respuesta transitoria activa
    Nqt {dflt: 0} -- Exponente pala la respuesta transitoria reactiva
    Tp {dflt: 0} -- Constante de tiempo-tiempo de recuperacion activa
    Tq {dflt: 0} -- Constante de tiempo-tiempo de recuperacion reactiva
    H {dflt: 0} -- Paso para discretizacion con euler (Xk - Xk-1)
    Vista {dflt: 0} -- Para habilitar escritura en Reduccion 1=> Habilita; 0=> Deshabilita
    pr {dflt: 1} -- Para variacion de la potencia activa
    px {dflt: 1} -- Para variacion de potencia reactiva
    Nodo {dflt: 1} -- Para indicar el numero del nodo
```

Fase {dflt: 0} -- Para indicar la fase 1=> Para fase A; 2=> Para fase B; 3=> Para fase C

```
VAR
  vrms
  Vcal
  Pnom
  Qnom
  P
  Q
  G
  B
  Ymag
  Yang
  Zmag
  Zang
  R
  X
  L
  Ram    -- Resistencia de amortiguamiento, se usa para evitar las oscilaciones debidas a la regla
trapezoidal.
-- Para control del modelo de la carga
  Gp
  Xp
  Gq
  Xq
-----
  st
  k
  g
  g_1    -- añadida para usar con Ram
INIT
  st := 2/timestep
  Xp := 0
  Xq := 0
ENDINIT
-----
-- SUBMODELO: CALCULO VALOR RMS
-----
MODEL rms_meter
DATA  freq    -- base frequency
      xrms_ini {dflt:-1} -- initial rms value
INPUT  x      -- monitored signal
VAR    xrms   -- rms value of monitored signal
      x2     -- internal, x*x
      ix2    -- internal, integral of x2
      period -- 1/freq
OUTPUT xrms
DELAY CELLS(ix2): 1/freq/timestep +1
INIT
  period := recip(freq)
  histdef(ix2) := 0
  integral(x2) := 0
  IF xrms_ini <0 THEN xrms:=0 ELSE xrms:=xrms_ini ENDIF
ENDINIT
EXEC
```

```

x2 := x*x
ix2 := integral(x2)
IF t>period THEN
  xrms := sqrt((ix2 - delay(ix2, period))/period)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
-----
-- FIN SUBMODELO
-----
EXEC
-----
-- Usando el submodelo
USE rms_meter AS rms_meter_v
DATA freq := frec
  xrms_ini := Vopi
INPUT x := v
OUTPUT vrms := xrms
ENDUSE
-----
Vcal := vrms/Vnom -- Este es el voltaje en pu
-- write(Vcal)
-- Calculando las nuevas impedancias
Pnom := Snom*FP
Qnom := Snom*sin(acos(FP))
IF t<0.1 THEN
  Xp := Pnom*(Vcal**Nps - Vcal**Npt)
  Xq := Qnom*(Vcal**Nqs - Vcal**Nqt)
ENDIF
IF Modelo=1 THEN
  Gp := (-Xp+Pnom*(Vcal**Nps - Vcal**Npt))
  Xp := Xp + Gp*H/Tp
  P := Xp + Pnom*(Vcal**Npt)

  Gq := (-Xq+Qnom*(Vcal**Nqs - Vcal**Nqt))
  Xq := Xq + Gq*H/Tq
  Q := -( Xq + Qnom*(Vcal**Nqt))

IF Vcal<0.6 THEN
  P := Pnom*(Vcal**2)
  Q := -Qnom*(Vcal**2)
ENDIF
ENDIF
IF Modelo=3 THEN
  P := Pnom*(Vcal**Nps)
  Q := -(Qnom*(Vcal**Nqs))
ENDIF
G := P/(vrms**2)
B := Q/(vrms**2)
Ymag := norm(G,B)
Yang := atan2(B,G)
Zmag := 1/Ymag
Zang := -Yang
R := Zmag*cos(Zang)/pr
X := Zmag*sin(Zang)/px

```

```

L := X/(120*pi)
Ram := L/timestep
-----
-- Escritura de elementos necesarios para la reduccion
IF Vista=1 THEN
  IF Fase=1 THEN
    write('CargaModel')
    write('N'Nodo'A')
    write(R)
    write(X)
  ENDIF
  IF Fase=2 THEN
    write('CargaModel')
    write('N'Nodo'B')
    write(R)
    write(X)
  ENDIF
  IF Fase=3 THEN
    write('CargaModel')
    write('N'Nodo'C')
    write(R)
    write(X)
  ENDIF
ENDIF
-----
-- Cálculo de las variables de salida
g := (1/Ram + 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con V(t)
g_1 := (1/Ram - 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con v(t-timestep)
k := (1+R*((1/Ram - 1/(st*L))))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- Para i(t-timestep)
--write(g)
--write(k)
--write(g_1)
IF t=0 THEN
  flag := 1
  i := i0 -- t=0 current through L
  is := -k*i0 + g_1*v0 -- history term for next step
ELSE
  flag := 1
  i := g*v - is -- applying trapezoidal rule, calculate from v(t)
  is := -k*i + g_1*v -- history term from trapezoidal rule, for next step
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

## Anexo 2

En este anexo se presenta el código fuente que se implementó en ATP con lenguaje similar al Fortran para el modelo compuesto de carga.

```
MODEL COM_L -- NB! 6 character name limit

-- Start header. Do not modify the type-94 header.
comment-----
| First, declarations required for any type 94 Norton non-TR model |
| - these data and input values are provided to the model by ATP |
| - these output values are used by ATP |
| - these names can be changed, except 'n', but not their order |
-----endcomment

DATA n -- number of phases
    ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side

INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
    v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
    i0[1..n] -- current(t=0) into each left node

VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
    is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
    g[1..ng] -- conductance(t+timestep) at each left node
        -- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
    flag -- set to 1 whenever conductance value is modified

OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag

comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment

-- End header.
CONST frec {val: 60}

DATA Snom -- Potencia nominal en VA
    FP -- Factor de potencia de la carga
    Vnom -- Voltaje nominal del sistema
    Vopi {dflt: 1} -- Voltaje de operacion inicial
    Modelo {dflt: 5} -- Define el modelo de carga 4: Moelo ZIP, 5: Modelo Compuesto
----- Para el Modelo ZIP -----
    bp {dflt: 2} -- Para bp ~ 1, ap0 = ap2 = 0
    bq {dflt: 2} -- Para bq ~ 1, aq0 = aq2 = 0
    Vbreak {dflt: 0.6} -- Voltaje en p.u de ruptura
    ap0 {dflt: 0} -- Porcentaje para el modelo de potencia activa constante
    ap1 {dflt: 1} -- Porcentaje para el modelo de corriente activa constante
    ap2 {dflt: 0} -- Porcentaje para el modelo de inpedancia activa constante
    aq0 {dflt: 0} -- Porcentaje para el modelo de potencia reactiva constante
    aq1 {dflt: 1} -- Porcentaje para el modelo de corriente reactiva constante
    aq2 {dflt: 0} -- Porcentaje para el modelo de inpedancia reactiva constante
----- Para el Modelo del Motor -----
    Rs {dflt: 0} -- Resistencia del estator
```

Xs {dflt: 0} -- Reactancia del estator  
 Xm {dflt: 0} -- Reactancia del magnetizacion  
 Rr {dflt: 0} -- Resistencia del rotor  
 Xr {dflt: 0} -- Reactancia del rotor  
 AA {dflt: 0} -- Coeficiente de torque de la maquina  
 BB {dflt: 0} -- Coeficiente de torque de la maquina  
 CC {dflt: 0} -- Coeficiente de torque de la maquina  
 H1 {dflt: 0} -- Constante de inercia del rotor  
 T0 {dflt: 0} -- Torque de carga en estado estable  
 h {dflt: 0} -- Tamaño de paso

-----

pr {dflt: 1} -- Para variacion de la potencia activa  
 px {dflt: 1} -- Para variacion de potencia reactiva  
 Nodo {dflt: 1} -- Para indicar el numero del nodo  
 Fase {dflt: 0} -- Para indicar la fase 1=> Para fase A; 2=> Para fase B; 3=> Para fase C  
 Vista {dflt: 1} -- Para habilitar escritura en Reduccion 1=> Habilita; 0=> Deshabilita

VAR ap[1..3]  
     aq[1..3]  
     bpn            -- para trabajar bp como variable  
     bqn            -- para trabajar bq como variable  
     vrms  
     Vcal  
     Pnom  
     Qnom  
     P  
     Q  
     G  
     B  
     Ymag  
     Yang  
     Zmag  
     Zang  
     R  
     X  
     L  
     Ram    -- Resistencia de amortiguamiento, se usa para evitar las oscilaciones debidas a la regla trapezoidal.

-- Para control del modelo de la carga

bpant  
 bqant  
 ap0ant  
 ap1ant  
 ap2ant  
 aq0ant  
 aq1ant  
 aq2ant  
 control

----- Para el Modelo de Carga Compuesto -----

a0  
 a1  
 a2  
 b0  
 b1

```
b2
T11
X1
X2
Edk_1
Eqk_1
Wk_1
Edk
Eqk
Wk
Ud
Uq
Id
Iq
Pm
Qm
Pzip
Qzip
```

```
-----
----- Para la Transformada de Fourier -----
```

```
Fun_A0
Fun_An
Fun_Bn
A00
Ann
Bnn
Cnn
Theta0
```

```
-----
st
k
g
g_1 -- añadida para usar con Ram
INIT
```

```
----- Para la Transformada de Fourier -----
```

```
Fun_A0 := 0
Fun_An := 0
Fun_Bn := 0
Vcal := 1
```

```
----- Para el Modelo de Carga Compuesto -----
```

```
Edk_1 := 0.8505
Eqk_1 := -0.2020
Wk_1 := 0.9897
```

```
-----
st := 2/timestep
a0 := ap0
a1 := ap1
a2 := ap2
b0 := aq0
b1 := aq1
b2 := aq2
ap[1..3] := [ap0,ap1,ap2]
aq[1..3] := [aq0,aq1,aq2]
bpn := bp
```

```

    bqn := bq
    -- Inicio control bp y bq
    IF bp <> 1 THEN
        ap[1] := 0
        ap[2] := 1
        ap[3] := 0
    ENDIF
    IF bq <> 1 THEN
        aq[1] := 0
        aq[2] := 1
        aq[3] := 0
    ENDIF
    -- Fin control
    control:=0
ENDINIT
-----
-- SUBMODELO: CALCULO VALOR RMS
-----
MODEL rms_meter
DATA freq -- base frequency
    xrms_ini {dflt:-1} -- initial rms value
INPUT x -- monitored signal
VAR xrms -- rms value of monitored signal
    x2 -- internal, x*x
    ix2 -- internal, integral of x2
    period -- 1/freq
OUTPUT xrms
DELAY CELLS(ix2): 1/freq/timestep + 1
INIT
    period := recip(freq)
    histdef(ix2) := 0
    integral(x2) := 0
    IF xrms_ini < 0 THEN xrms:=0 ELSE xrms:=xrms_ini ENDIF
ENDINIT
EXEC
    x2 := x*x
    ix2 := integral(x2)
    IF t>period THEN
        xrms := sqrt((ix2 - delay(ix2, period))/period)
    ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
-----
-- FIN SUBMODELO
-----
EXEC
----- TRANSFORMADA DE FOURIER -----
IF t<=0.0167 THEN
    Fun_A0 := h*v + Fun_A0
    Fun_An := h*v*cos(377*t) + Fun_An
    Fun_Bn := h*v*sin(377*t) + Fun_Bn
    A00 := (1/0.0167)*Fun_A0
    Ann := (2/0.0167)*Fun_An
    Bnn := (2/0.0167)*Fun_Bn
    Cnn := sqrt(Ann**2 + Bnn**2)

```



```

IF Ann<=0 AND Bnn<=0 THEN
    Theta0 := atan(Bnn/Ann)-3.1416
ENDIF
IF Ann>0 OR Bnn>0 THEN
    Theta0 := atan(Bnn/Ann)
ENDIF
ENDIF

-----
-- Usando el submodelo
USE rms_meter AS rms_meter_v
DATA freq := freq
    xrms_ini := Vopi
INPUT x := v
OUTPUT vrms := xrms
ENDUSE

-----
Vcal := vrms/Vnom          -- Este es el voltaje en pu
-- write(Vcal)

-----
-- CONTROL DEL MODELO DE LA CARGA PARA PERTURBACIONES DE V
-----
    IF Vcal <= Vbreak AND (bpn <> 2 OR bqn <> 2) THEN
        -- Guardo el modelo anterior
            bpant :=bpn
            bqant :=bqn
            ap0ant:=ap[1]
            ap1ant:=ap[2]
            ap2ant:=ap[3]
            aq0ant:=aq[1]
            aq1ant:=aq[2]
            aq2ant:=aq[3]
        -- Ahora cambio al nuevo modelo (Modelo Zcte)
            bpn := 2
            bqn := 2
            ap[1] := 0
            ap[2] := 1
            ap[3] := 0
            aq[1] := 0
            aq[2] := 1
            aq[3] := 0
            control := 1      -- Indica cambio de modelo
        ENDIF
    -- Si se acaba la perturbacion de voltaje entonces
        IF Vcal >= Vbreak AND control = 1 THEN
            -- Regreso al modelo anterior
                bpn := bpant
                bqn := bqant
                ap[1] := ap0ant
                ap[2] := ap1ant
                ap[3] := ap2ant
                aq[1] := aq0ant
                aq[2] := aq1ant
                aq[3] := aq2ant
                control := 0      -- Vuelve al modelo anterior
            ENDIF

```

```

-----
-- FIN DEL CONTROL
-----
-- Calculando las nuevas impedancias
Pnom := Snom*FP
Qnom := -Snom*sin(acos(FP))
IF Modelo=4 THEN
  P := Pnom*(ap[1]+ap[2]*(Vcal**bpn)+ap[3]*(Vcal**2))
  Q := Qnom*(aq[1]+aq[2]*(Vcal**bqn)+aq[3]*(Vcal**2))
ENDIF
IF Modelo=5 THEN
  Pzip := Pnom*(a0+a1*(Vcal**bpn)+a2*(Vcal**2))
  Qzip := Qnom*(b0+b1*(Vcal**bqn)+b2*(Vcal**2))
  Ud := Vcal*cos(-(Theta0 - 3.1416/2))
  Uq := Vcal*sin(-(Theta0 - 3.1416/2))
  T11 := (Xr+Xm)/Rr
  X2 := Xs+Xm
  X1 := Xs+(Xm*Xr)/(Xm+Xr)
  Id := (1/(Rs**2+X1**2))*(Rs*(Ud-Edk_1)+X1*(Uq-Eqk_1))
  Iq := (1/(Rs**2+X1**2))*(Rs*(Uq-Eqk_1)-X1*(Ud-Edk_1))
  Edk := Edk_1 + ((-h/T11)*(Edk_1 + (X2 - X1)*Iq) - h*(Wk_1 - 1)*Eqk_1)*(2*3.1416*60)
  Eqk := Eqk_1 + ((-h/T11)*(Eqk_1 - (X2 - X1)*Id) + h*(Wk_1 - 1)*Edk_1)*(2*3.1416*60)
  Wk := Wk_1 - (h/(2*H1))*((AA*(Wk_1**2) + BB*Wk_1 + CC)*T0 - (Edk_1*Id+Eqk_1*Iq))
  Edk_1:= Edk
  Eqk_1:= Eqk
  Wk_1 := Wk
  Pm := Ud*Id+Uq*Iq
  Qm := Uq*Id-Ud*Iq
  IF Vcal<Vbreak OR Vcal>1.1 THEN
    Pm := 0
    Qm := 0
  ENDIF
  P := Pnom*Pm + Pzip
  Q := Qnom*Qm + Qzip
ENDIF
G := P/(vrms**2)
B := Q/(vrms**2)
Ymag := norm(G,B)
Yang := atan2(B,G)
Zmag := 1/Ymag
Zang := -Yang
R := Zmag*cos(Zang)/pr
X := Zmag*sin(Zang)/px
L := X/(120*pi)
Ram := L/timestep
-----
-- Escritura de elementos necesarios para la reduccion
IF Vista=1 THEN
  IF Fase=1 THEN
    write('CargaModel')
    write('N'Nodo'A')
    write(R)
    write(X)
  ENDIF
  IF Fase=2 THEN

```

```

        write('CargaModel')
        write('N'Nodo'B')
        write(R)
        write(X)
    ENDIF
    IF Fase=3 THEN
        write('CargaModel')
        write('N'Nodo'C')
        write(R)
        write(X)
    ENDIF
ENDIF
-----
-- Cálculo de las variables de salida
  g := (1/Ram + 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con V(t)
  g_1 := (1/Ram - 1/(st*L))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- con v(t-timestep)
  k := (1+R*((1/Ram - 1/(st*L))))/(1+R*((1/Ram + 1/(st*L)))) -- Para i(t-timestep)
--write(g)
--write(k)
--write(g_1)
IF t=0 THEN
  flag := 1
  i := i0 -- t=0 current through L
  is := -k*i0 + g_1*v0 -- history term for next step
ELSE
  flag := 1
  i := g*v - is -- applying trapezoidal rule, calculate from v(t)
  is := -k*i + g_1*v -- history term from trapezoidal rule, for next step
ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

```

## Anexo 3

### MODELO DINÁMICO DE CARGA EN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Este modelo en función de transferencia se encuentra reportado en el software Simulink. Es la base para representar cualquier modelo dinámico que tenga una respuesta sub-amortiguada, sobre-amortiguada o críticamente amortiguada, frente a un escalón unitario de tensión.

En las ecuaciones (A.3.1) y (A.3.2) se tiene la representación del modelo en función de transferencia.

$$P_d = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_p} \left( \frac{1 + T_1 S}{1 + T_2 S} \right) \quad (\text{A. 3.1})$$

$$Q_d = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{N_q} \left( \frac{1 + T_3 S}{1 + T_4 S} \right) \quad (\text{A. 3.2})$$

Donde,

$S$  : Variable asociada a la transformada de Laplace.

$T_1$  y  $T_2$  : Tiempos de respuesta para la potencia activa.

$T_3$  y  $T_4$  : Tiempos de respuesta para la potencia reactiva.

$N_p$  y  $N_q$  : Exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga.

$P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga respectivamente.

$P_d$  y  $Q_d$  : Potencia demandada activa y reactiva de la carga respectivamente.

$\frac{V}{V_0}$  : Tensión de la carga en por unidad.

### Propuesta de solución para el Modelo Dinámico en Función de Transferencia

Se plantea la solución para el modelo dinámico en función de transferencia en dos partes, primero se aplica la transformada  $Z$  a la ecuación (A.3.1) se obtiene la ecuación (A.3.3), similarmente se presenta el caso para la potencia reactiva.

$$P_d(Z) = \left( \frac{b_{p1}Z - b_{p0}}{a_{p1}Z - a_{p0}} \right) u(Z) \quad (\text{A. 3.3})$$

Con:

$$u(Z) = P_0 \left( \frac{V(Z)}{V_0} \right)^{N_p}$$

Luego se transforma la ecuación (A.3.3) para obtener la ecuación en diferencias hacia atrás como se muestra en (A.3.4).

$$P_d[k] = \left( \frac{b_{p1} - b_{p0}q^{-1}}{a_{p1} - a_{p0}q^{-1}} \right) u[k] \quad (\text{A. 3.4})$$

Con:

$$u[k] = P_0 \left( \frac{V[k]}{V_0} \right)^{N_p}$$

Al reescribir la ecuación (A.3.4) se obtiene la ecuación en diferencias que modela el comportamiento de la función de transferencia, como se muestra en las ecuaciones (A.3.5) y (A.3.6), para la potencia activa y reactiva respectivamente.

Por lo general se diseña con  $a_1 = 1$  y se verifica el cumplimiento de  $a_0 + b_1 - b_0 = 1$ , de esta manera se logra tener una respuesta de estado estable tiempo después de la perturbación.

$$P_d[k] = a_{p0} * P_d[k - 1] + b_{p1} * u[k] - b_{p0} * u[k - 1] \quad (\text{A. 3.5})$$

$$Q_d[k] = a_{q0} * Q_d[k - 1] + b_{q1} * u[k] - b_{q0} * u[k - 1] \quad (\text{A. 3.6})$$

Con:

$$u[k] = P_0 \left( \frac{V[k]}{V_0} \right)^{N_p}$$

Donde,

$a_{p0}, a_{p1}, b_{p0}, b_{p1}$  : Constantes que relacionan la respuesta de la potencia activa.

$a_{q0}, a_{q1}, b_{q0}, b_{q1}$  : Constantes que relacionan la respuesta de la potencia reactiva.

$N_p$  y  $N_q$  : Exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga.

$P_0$  y  $Q_0$  : Potencia nominal activa y reactiva de la carga respectivamente.

$P_d$  y  $Q_d$  : Potencia demandada activa y reactiva de la carga respectivamente.

$\frac{V}{V_0}$  : Tensión de la carga en por unidad.

$u$  : Variable de estado.

$[k], [k - 1]$  : Estado actual y anterior respectivamente.

## Anexo 4

En este anexo se presentan las modificaciones propuestas a las herramientas ATPeXchange y simulacionRF desarrolladas por el grupo de investigación ICE<sup>3</sup>.

ATPeXchange es la herramienta que proporciona los datos de la reducción en las cargas, líneas, transformadores y de más elementos presentes en el sistema como breaks, medidores de tensión, medidores de corriente, entre otros. La tarjeta de datos de ATP contiene todos los parámetros presentes en el sistema bajo estudio.

Para introducir los modelos dinámicos de carga en la herramienta ATPeXchange, se debe incluir los parámetros de carga que ingresa el usuario en la ventana de datos del bloque Models (ver figura 3.6.a y 3.7.a). En InfoModels se captura de forma ordenada los datos de los modelos de cargas y transformadores presentes en la tarjeta de datos de ATP.

En la figura A.4.1 se muestra la modificación propuesta para detectar y capturar los parámetros de carga en InfoModels, independiente del modelo de carga en el sistema. Si el modelo de carga es compuesto, entonces la paleta de datos contiene 29 parámetros necesarios para la representación del modelo, de lo contrario solo se necesitan 17 parámetros para representar el modelo ZIP o de Recuperación Exponencial.

```
40 - while ~strcmp(l(1:5), '>END')
41 -     if i <= 7
42 -         A{c,i} = str2num(l(15:24)); % info de la carga
43 -         %----- Aporte Daniel Fernando Patiño Ipus 1er semestre 2015-----%
44 -         %----- Detecta el modelos de carga dinamicos -----%
45 -         elseif i==9
46 -             Aa(c,9) = str2num(l(15:24)); % info del tipo de carga
47 -             if Aa(c,9) == 5 %---- Detecta Modelo de carga Compuesto ----%
48 -                 Aa(c,21)=Aa(c,9);
49 -                 oo=29;
50 -             else %---- Detecta Modelo de carga ZIP o R_E ----%
51 -                 oo=17;
52 -                 Aa(c,21)=0;
53 -             end
54 -             elseif i >=10 && i <= oo
55 -                 Aa(c,i-9) = str2num(l(15:24)); % info del tipo de carga
56 -             end
57 -         %-----%
58 -         i = i+1;
59 -         l = fgetl(id); % Leer líneas de la tarjeta
60 -     end
```

**Figura A.4.1.** Detecta y captura parámetros de carga en InfoModels

En la figura A.4.2 se muestra la inclusión del modelo de carga dinámico en la reducción para que pueda ser leído por el localizador, para esto se utiliza la variable nx en la que se escriben los parámetros de la carga separados por un guion bajo.

```

78  %- Inclusion del Modelo dinámico de carga en la Reduccion para que lo lea el localizador -%
79  if    Aa(c,21) == 5
80      nx = 'C_E';
81      for i = 1:21;
82          gx = ['00',num2str(Aa(c,i))];
83          nx = [nx,gx(3:end),'_'];
84      end
85  elseif Aa(c,9) < 0.99      % selecciona modelo ZIP ó EXP
86      nx = 'Z_E';
87      for i = 1:7;
88          gx = ['00',num2str(Aa(c,i))];
89          nx = [nx,gx(3:end),'_'];
90      end
91  elseif Aa(c,9) == 1      % selecciona modelo DYN1 Recuperación Exponencial
92      nx = 'R_E';
93      for i = 1:7;
94          gx = ['00',num2str(Aa(c,i))];
95          nx = [nx,gx(3:end),'_'];
96      end
97  elseif Aa(c,9) == 2      % selecciona modelo DYN2 Función de Transferencia Discretizada
98      nx = 'T_E';
99      for i = 1:7;
100         gx = ['00',num2str(Aa(c,i))];
101         nx = [nx,gx(3:end),'_'];
102     end
103  elseif Aa(c,9) == 3      % selecciona modelo DYN3 Estático Exponencial
104      nx = 'E_E';
105      for i = 1:7;
106         gx = ['00',num2str(Aa(c,i))];
107         nx = [nx,gx(3:end),'_'];
108     end
109  end
110  % ----- en LecturaXML se debe incluir el nombre en las posiciones 99, 136, 170 ----- %

```

**Figura A.4.2.** Escritura de parámetros.

Luego, tal como aparece en el último comentario de la figura A.4.2, se debe ingresar en LecturaXML los nombres de las cargas que aparecen en las tres primeras posiciones de nx, para ello se modifican las posiciones 99, 136 y 170 en LecturaXML. La modificación en las tres posiciones es la misma, por lo tanto solo se muestra la posición 99 en la figura A.4.3.

```

99  -   aa = [strfind(Nm,'EXP'),strfind(Nm,'ZIP'),strfind(Nm,'R_E'),strfind(Nm,'E_E'),strfind(Nm,'Z_E'),strfind(Nm,'C_E'),strfind(Nm,'T_E')];
100 -   if ~isempty(aa)
101 -       MatrizLecturaCargas1(k,3) = Nm(aa:end);
102 -   else   MatrizLecturaCargas1(k,3) = 'EXP2';
103 -   end

```

**Figura A.4.3.** Guardar parámetros en MatrizLecturaCargas1.

En esta etapa se verifica que existan cargas con modelo ZIP/Exponencial, recuperación exponencial, modelo compuesto o función de transferencia, luego se escribe la variable nx en la columna 3 de MatrizLecturaCargas1, de lo contrario asume una carga de impedancia constante y escribe EXP2 en la columna 3 de MatrizLecturaCargas1.

En la figura A.4.4 se muestra la MatrizLecturaCargas producto de la reducción con las modificaciones propuestas. En la columna 3 se encuentran los parámetros de las cargas en el orden que se toman desde la tarjeta de datos, aquí se aprecian dos modelos distintos de carga, el modelo compuesto y el modelo de recuperación exponencial.

	1	2	3	4
1	'N830'	[6.5321e-05 - 3.1...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
2	'N832'	[3.8510e-05 - 1.7...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
3	'N834'	[4.8386e-05 - 2.4...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
4	'N836'	[1.1613e-04 - 5.8...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
5	'N840'	[8.7096e-05 - 5.5...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
6	'N844'	[6.7499e-04 - 5.2...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
7	'N848'	[9.6773e-05 - 7.7...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
8	'N858'	[3.1451e-05 - 1.4...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
9	'N860'	[2.0806e-04 - 1.3...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
10	'N820'	[4.0886e-04 - 2.1...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
11	'N818'	[8.2257e-05 - 4.1...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
12	'N822'	[3.2661e-04 - 1.6...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
13	'N824'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
14	'N826'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
15	'N828'	[1.6935e-05 - 7.2...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
16	'N854'	[0.0000 + 0.0000i...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
17	'N856'	[0.0000 + 0.0000i...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
18	'N846'	[0.0000 + 0.0000i...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
19	'N862'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
20	'N838'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
21	'N864'	[4.8386e-06 - 2.4...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
22	'N842'	[2.1774e-05 - 1.2...	'C_E0.31_0.353_0.6_0_0.9_0_0_0.9_0_0.031_0.1_3.2_0.018_0.18_1_0_0_0.7_0.1_0.0001_5_'	1.4376e+04
23	'N802'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
24	'N806'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
25	'N810'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
26	'N808'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04
27	'N816'	[0.0000 + 0.0000i...	'R_E0.31_0.353_1.85_4.18_163.4_131.7_0.01_'	1.4376e+04

Figura A.4.4. MatrizLecturaCargas.

Luego de debe modificar los tiempos en que se toman las medidas de tensión y corriente en la subestación en estado de prefalla y posfalla. Para esto se crean dos entradas en la interfaz de la herramienta simulacionRF como se muestra en la figura A.4.5, estas entradas son números enteros que determinan el ciclo en el cual se toman los datos de prefalla y posfalla.

Estos ciclos se seleccionan de manera que al tomar los datos de prefalla, permita mínimo un ciclo antes de que ocurra la falla, luego se toman los datos de posfalla y debe transcurrir mínimo un ciclo para que finalice la simulación automática de fallas. En las ecuaciones (A.4.1) y (A.4.2) se muestran las restricciones mencionadas para la selección de los ciclos.

$$Ciclo_{prefalla} + 1Ciclo \leq Ciclo_{falla} \tag{A.4.1}$$

$$Ciclo_{posfalla} + 1Ciclo \leq Ciclo_{final} \tag{A.4.2}$$

Donde,

$Ciclo_{prefalla}$  : Ciclo en que se toman datos de prefalla.

$Ciclo_{posfalla}$  : Ciclo en que se toman datos de posfalla.

$Ciclo_{falla}$  : Ciclo en que ocurre la falla.

$Ciclo_{final}$  : Ciclo máximo de simulación.





Figura A.4.5. Interfaz simulacionRF.

## Anexo 5

### A.5.1. Resultados obtenidos para el primer escenario

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el primer escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

#### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.1.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con diferentes valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Aquí se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase

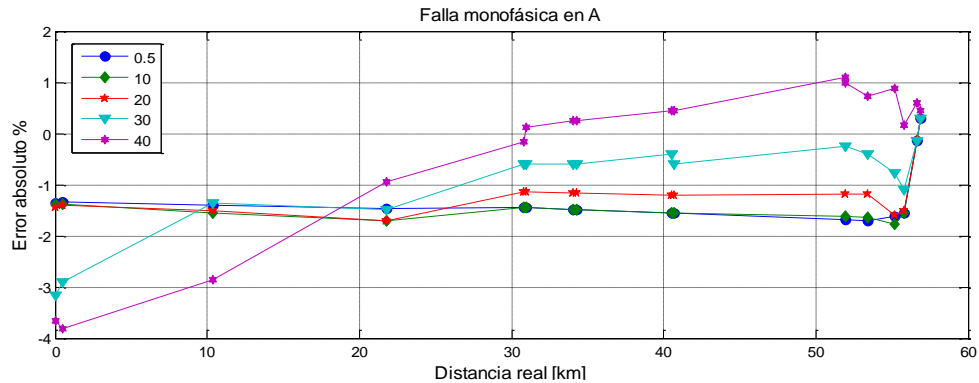


Figura A.5.1.a. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.1.b y A.5.1.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

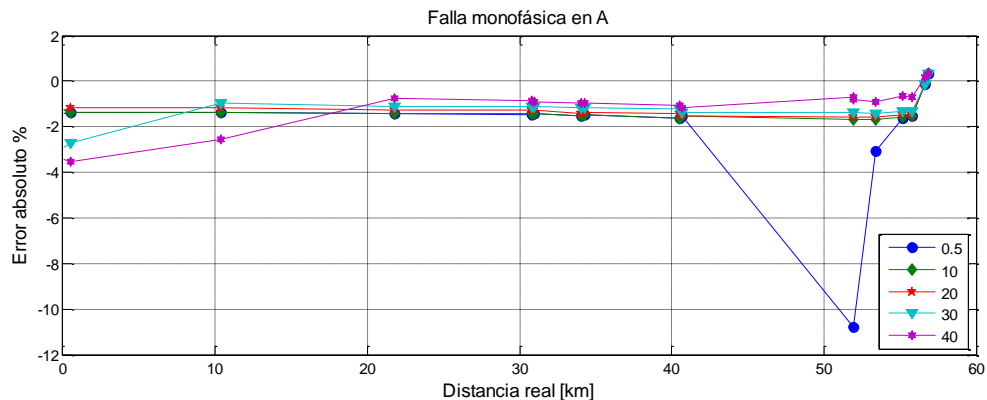
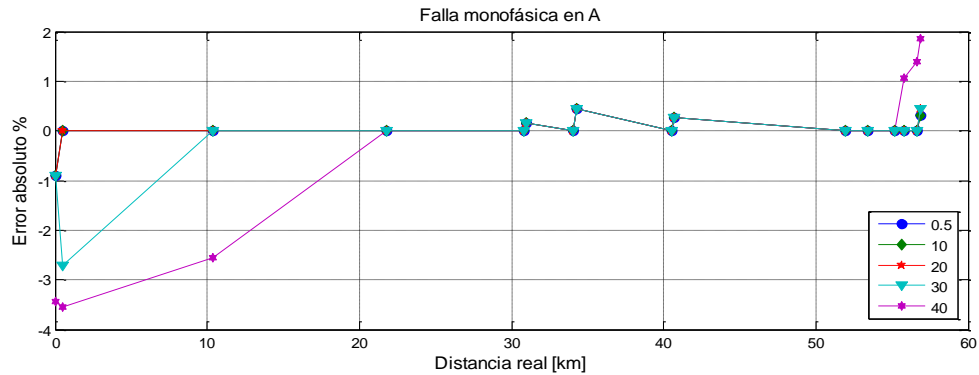


Figura A.5.1.b. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

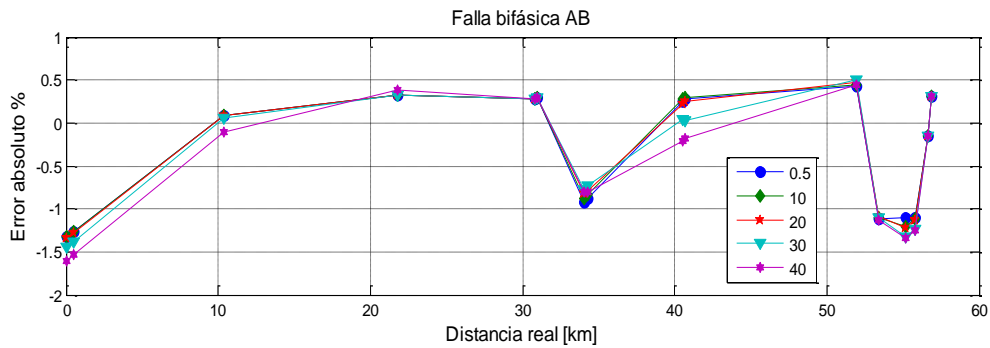


**Figura A.5.1.c.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

#### b) Falla bifásica

En la figura A.5.2.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre las fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Aquí se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.2.a.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.2.b y A.5.2.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre las fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

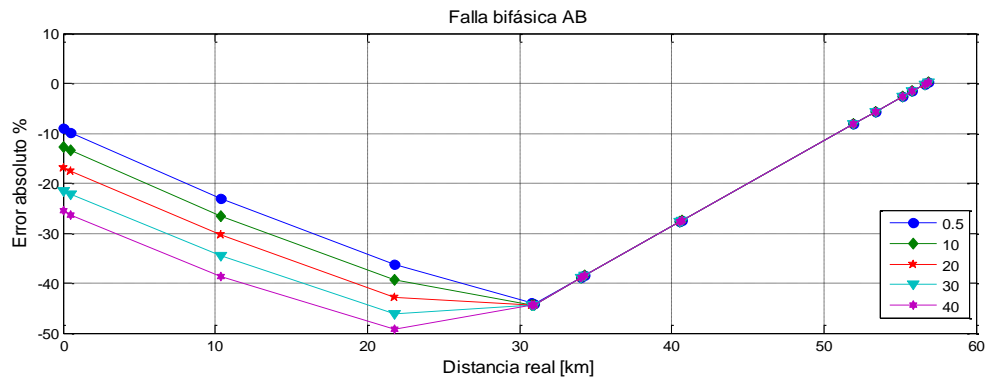


Figura A.5.2.b. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

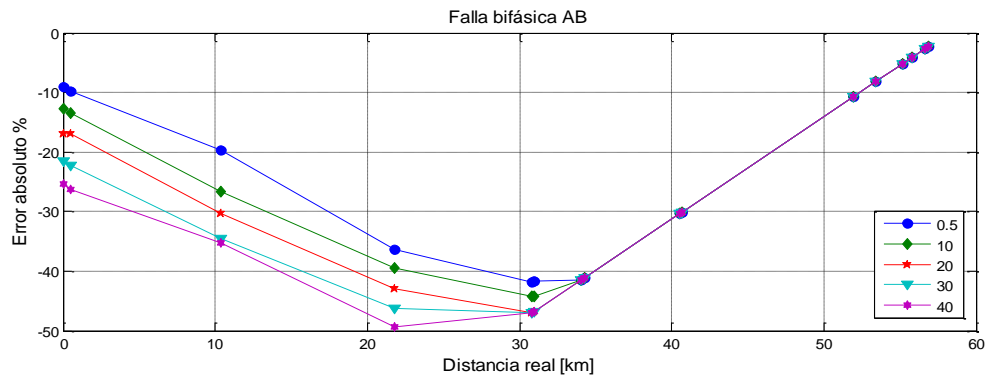


Figura A.5.2.c. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

#### c) Falla trifásica

En la figura A.5.3.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Aquí se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema.

Luego, en las figuras A.5.3.b y A.5.3.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase

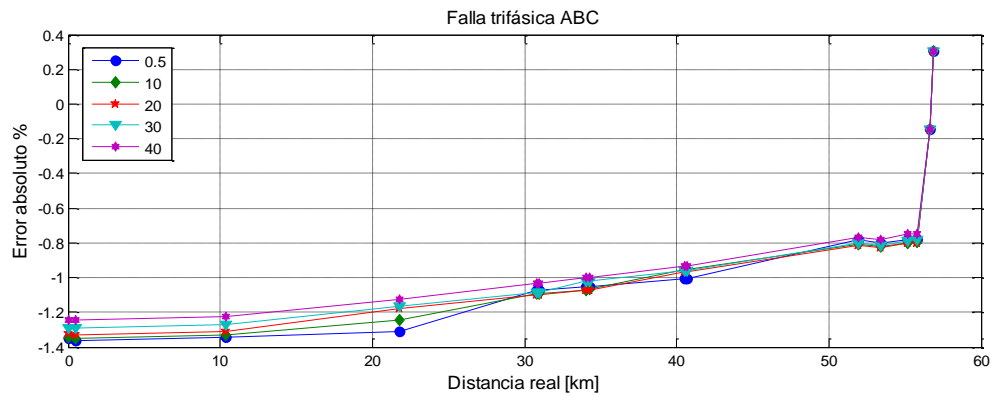


Figura A.5.3.a. Error relativo con modelo ZIP en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

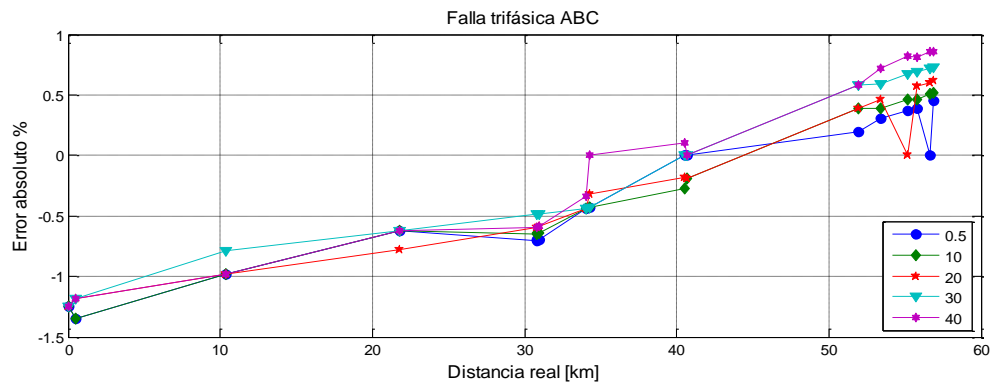


Figura A.5.3.b. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

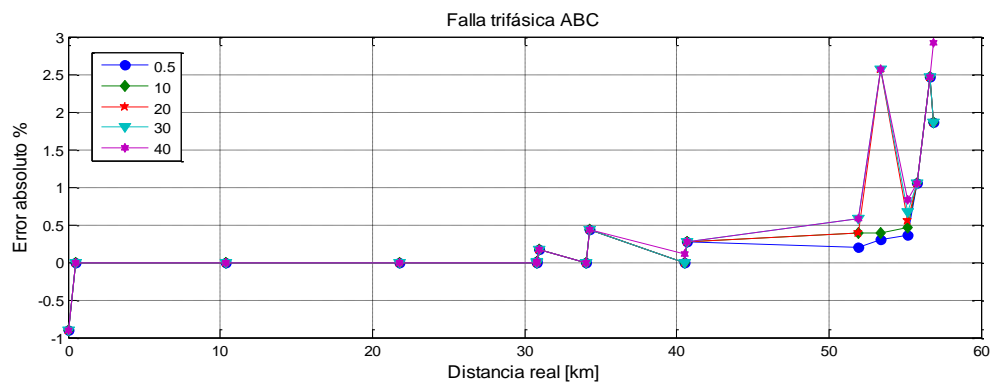


Figura A.5.3.c. Error relativo con modelo ZIP en el sistema falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

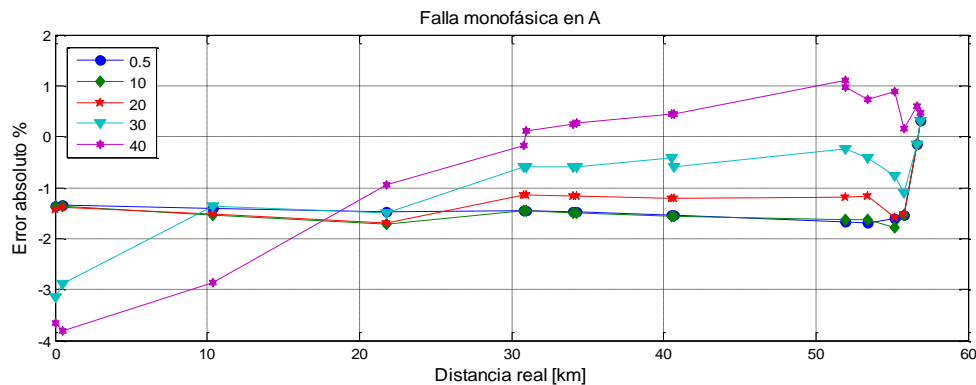
### A.5.2. Resultados obtenidos para el segundo escenario

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el segundo escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

#### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.4.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

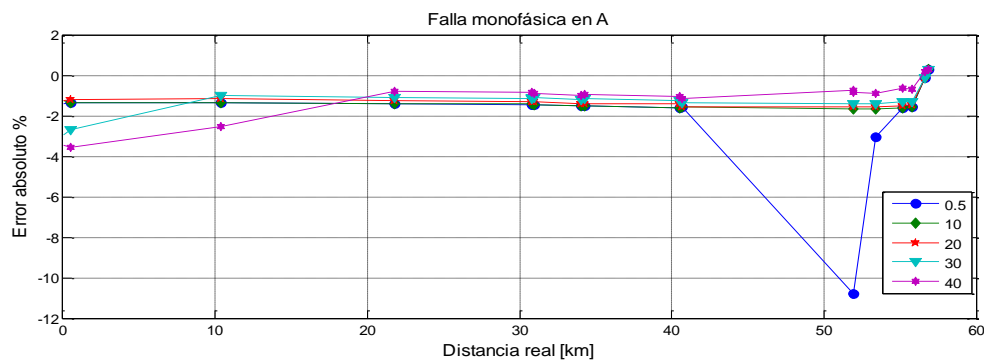
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.4.a.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

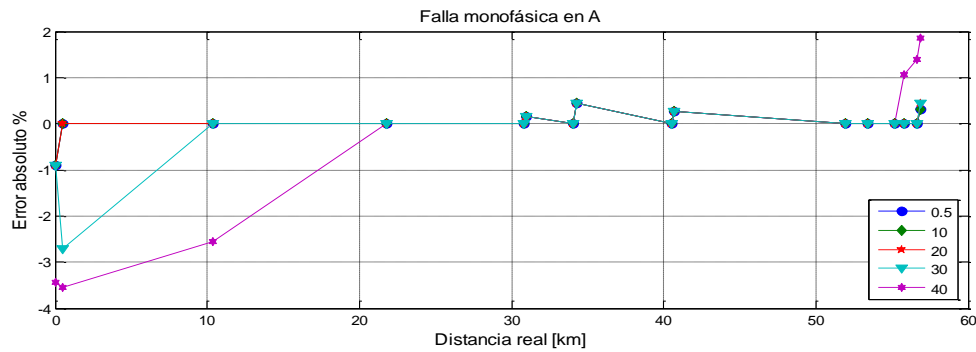
En las figuras A.5.4.b y A.5.4.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.4.b.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

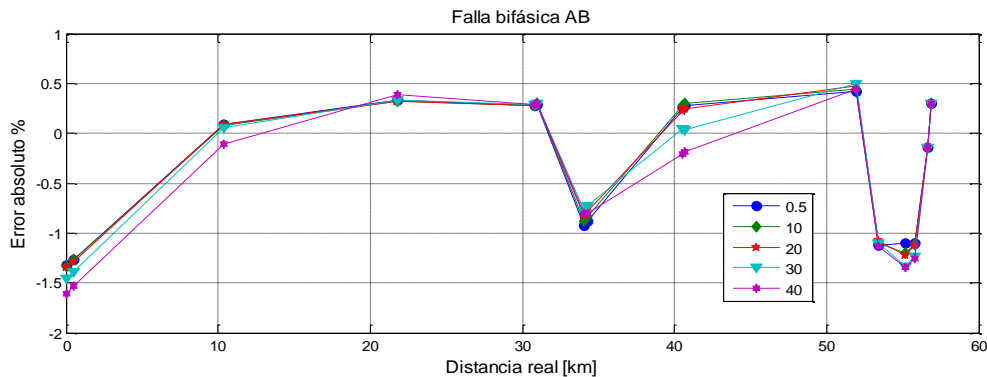


**Figura A.5.4.c.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

### b) Falla bifásica

En la figura A.5.5.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

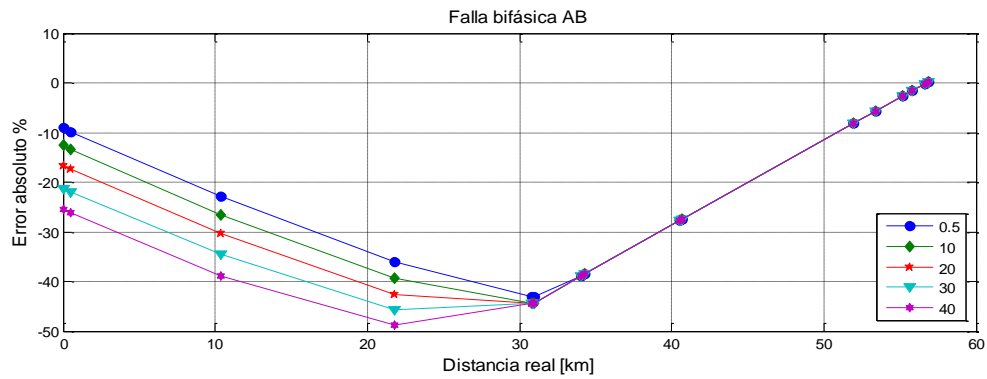
### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.5.a.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

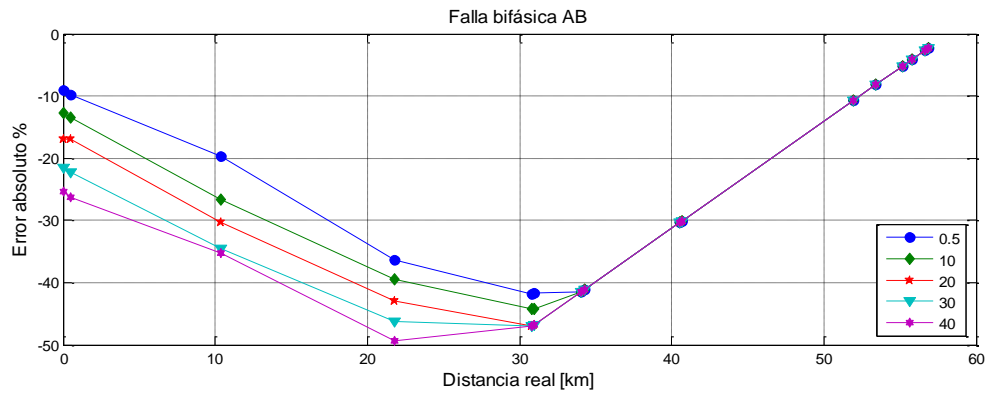
En las figuras A.5.5.b y A.5.5.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla**



**Figura A.5.5.b.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

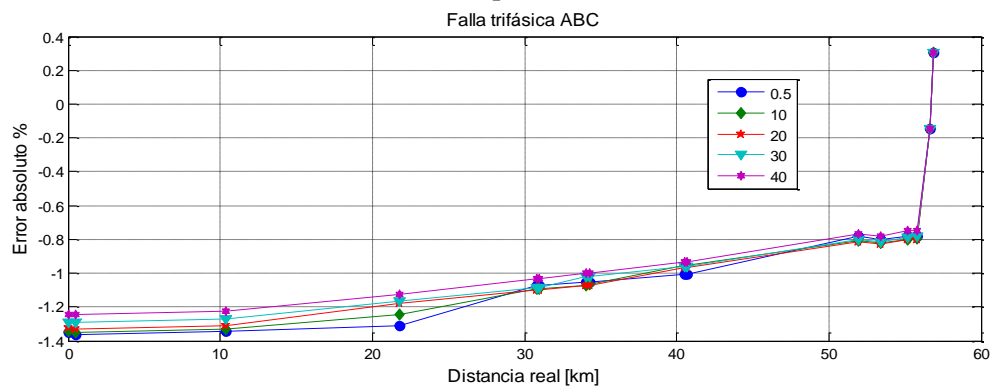
**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**



**Figura A.5.5.c.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

**c) Falla trifásica**

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



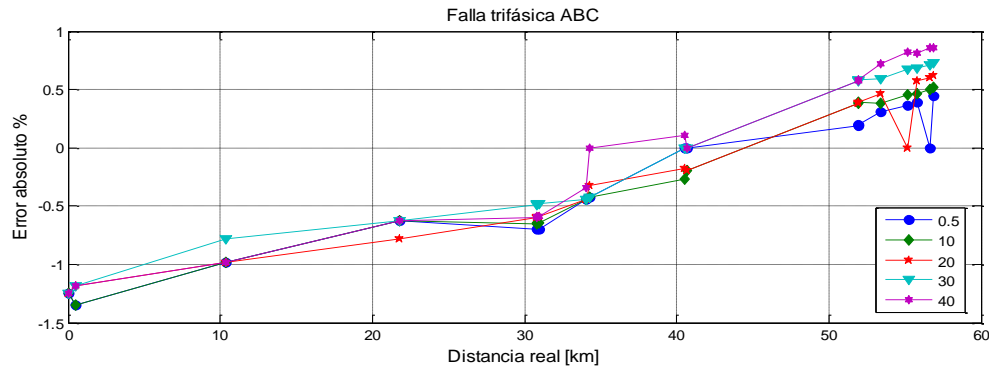
**Figura A.5.6.a.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.



En la figura A.5.6.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

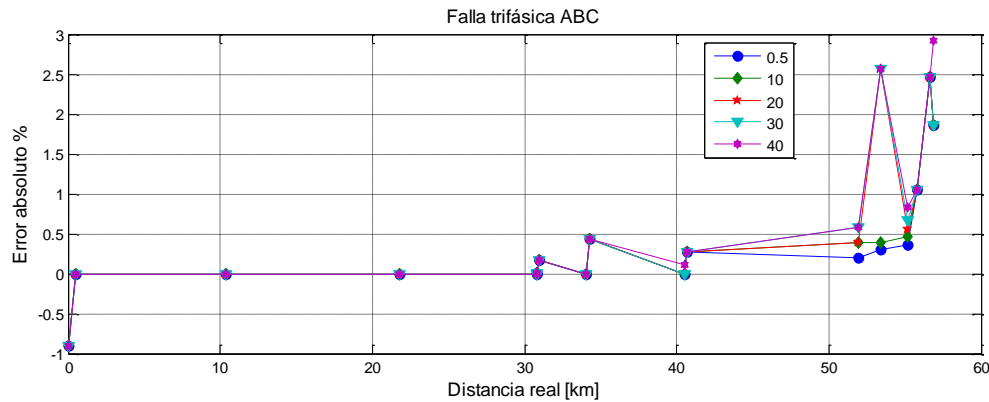
En las figuras A.5.6.b y A.5.6.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo ZIP en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.6.b.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado



**Figura A.5.6.c.** Error relativo con modelo ZIP en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

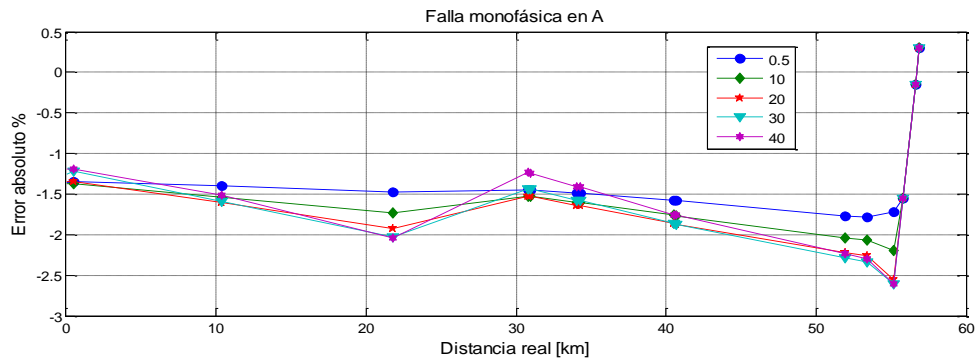
### A.5.3. Resultados obtenidos en el tercer escenario

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el tercer escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.7.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

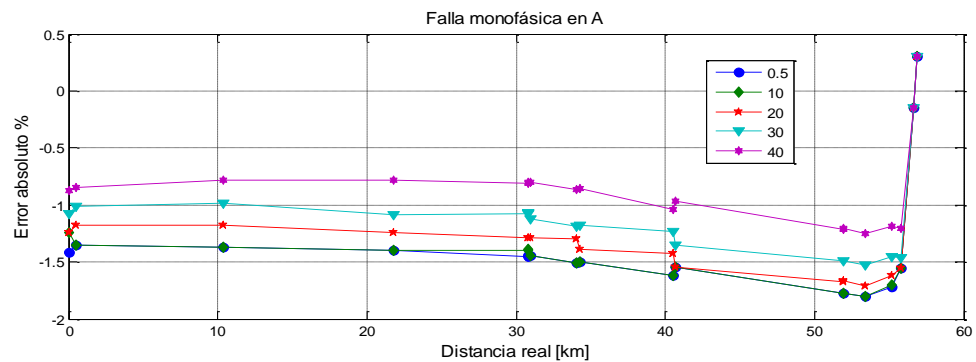
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.7.a.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

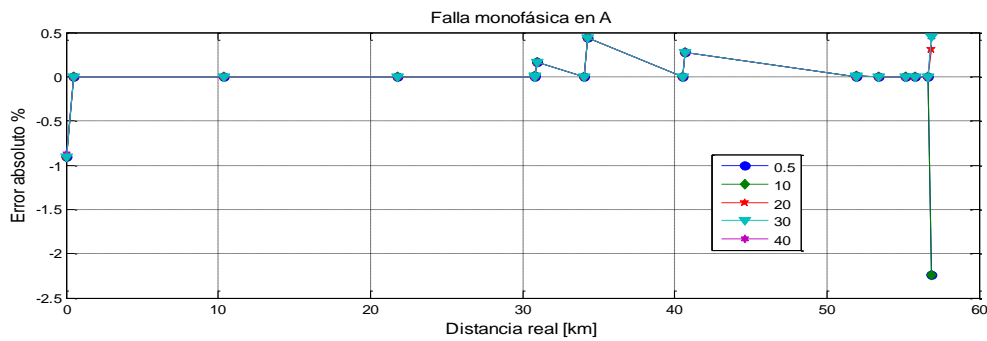
En las figuras A.5.7.b y A.5.7.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.7.b.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

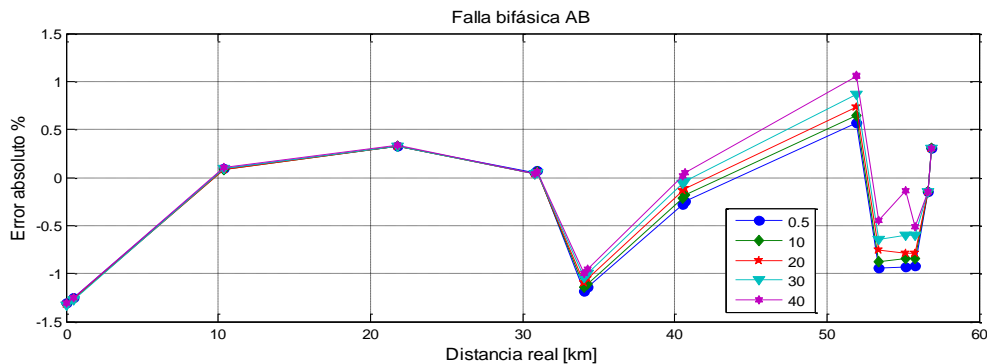


**Figura A.5.7.c.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

**b) Falla bifásica**

En la figura A.5.8.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



**Figura A.5.8.a.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.8.b y A.5.8.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

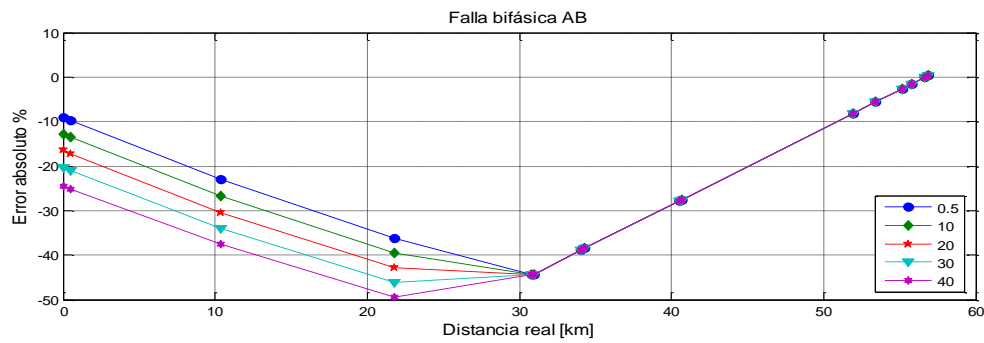


Figura A.5.8.b. Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

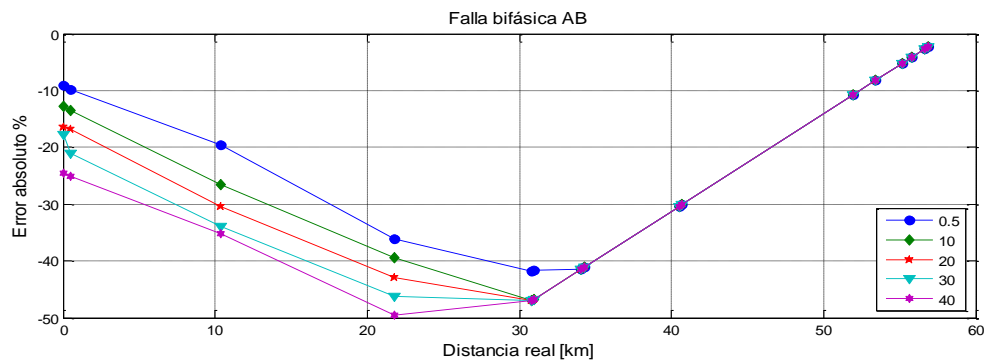


Figura A.5.8.c. Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

### c) Falla trifásica

En la figura A.5.9.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase

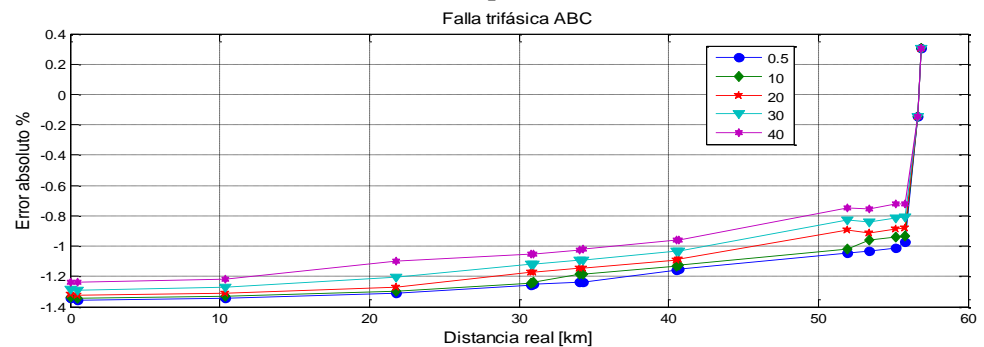
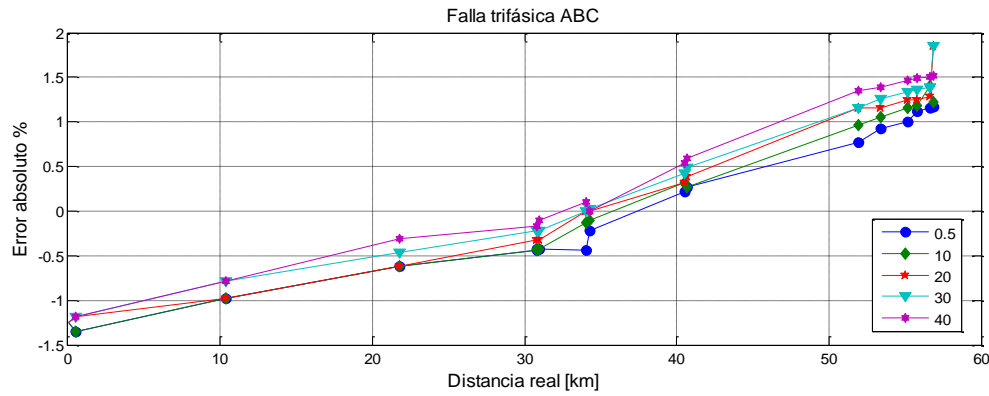


Figura A.5.9.a. Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

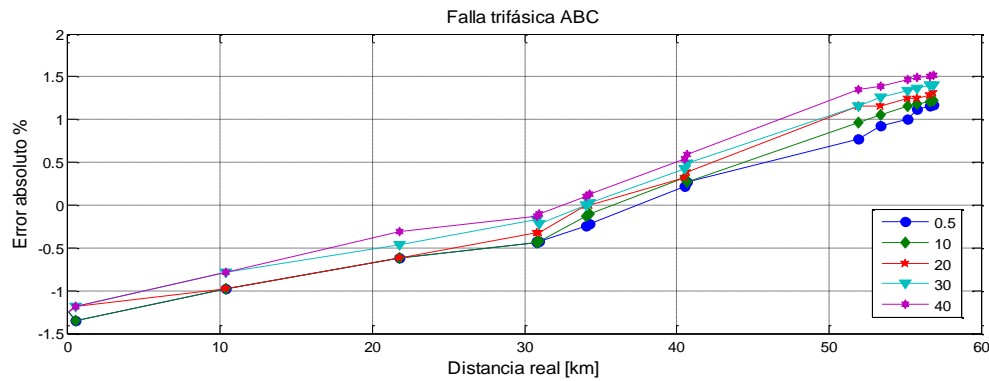
En las figuras A.5.9.b y A.5.9.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.9.b.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado



**Figura A.5.9.c.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

#### A.5.4. Resultados obtenidos en el cuarto escenario

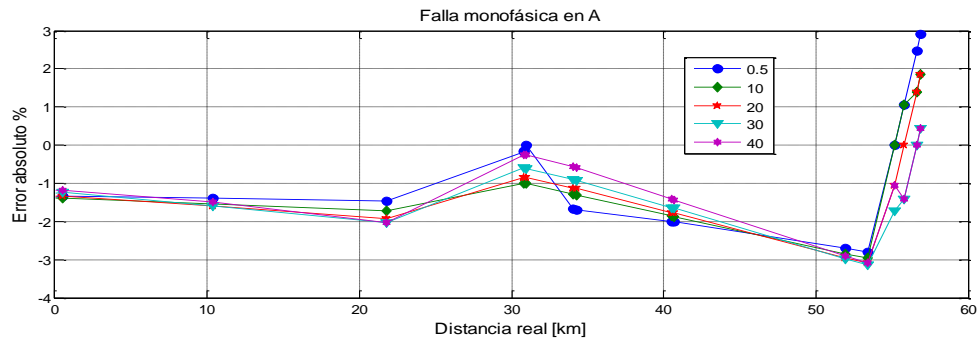
A continuación se presentan los resultados obtenidos para el cuarto escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

##### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.10.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

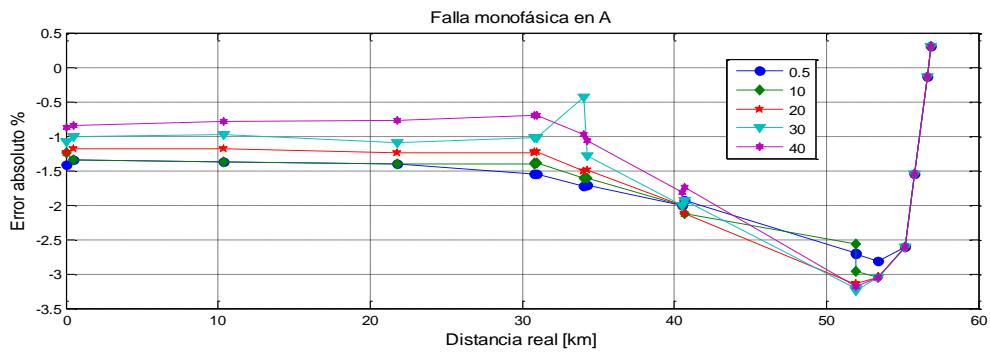
Luego, en las figuras A.5.10.b y A.5.10.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y  $40\Omega$ . Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



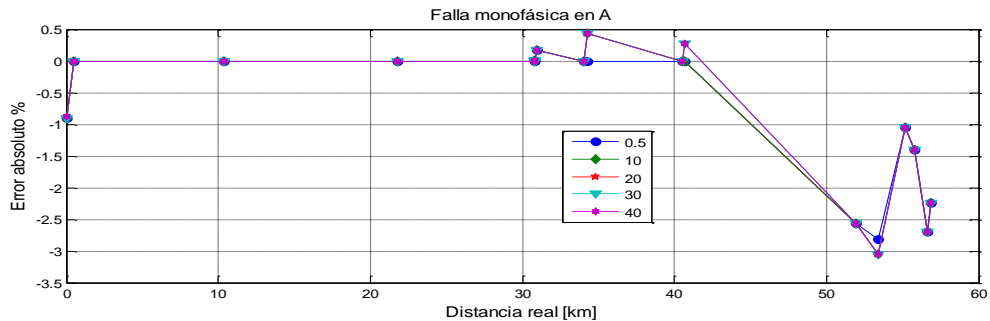
**Figura A.5.10.a.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.10.b.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

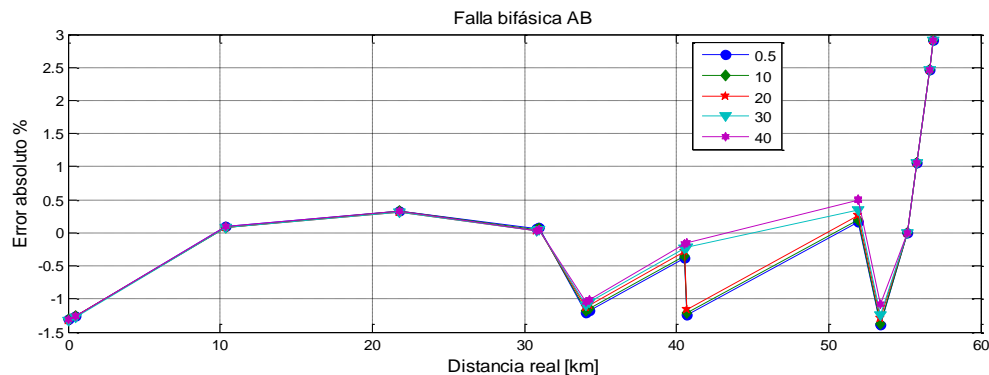


**Figura A.5.10.c.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

### b) Falla bifásica

En la figura A.5.11.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

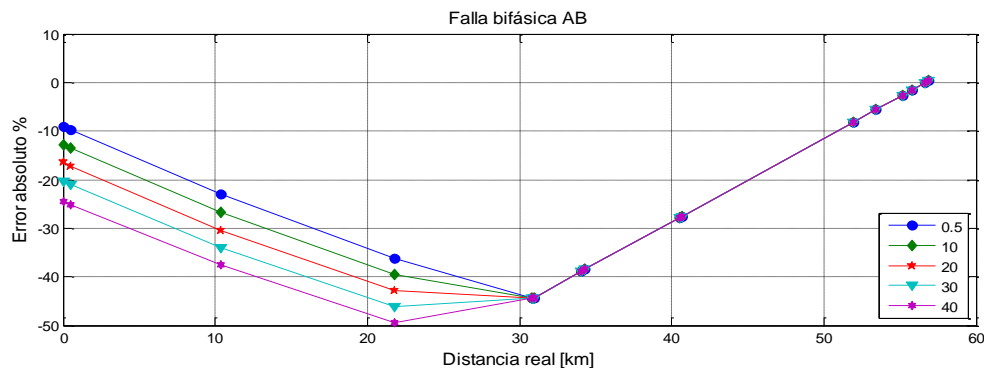
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.11.a.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

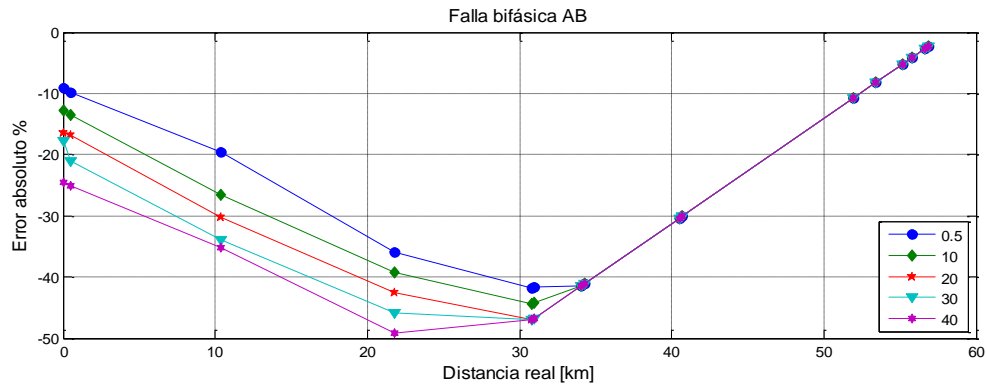
En las figuras A.5.11.b y A.5.11.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.11.b.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

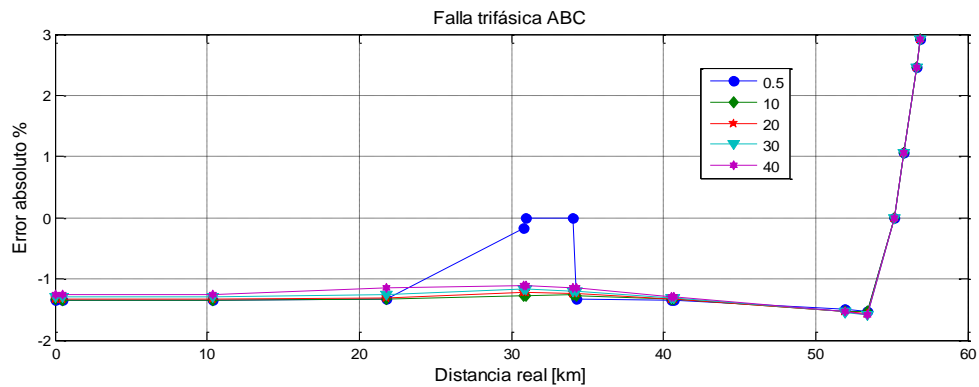


**Figura A.5.11.c.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

#### c) Falla trifásica

En la figura A.5.12.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40 $\Omega$ . Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.12.a.** Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.12.b y A.5.12.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40 $\Omega$ . Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente con cargas de modelo dinámico de recuperación exponencial en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.



### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

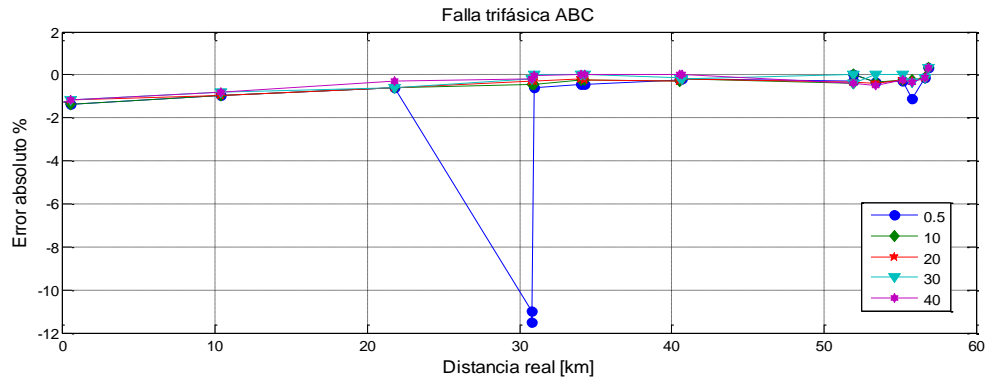


Figura A.5.12.b. Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

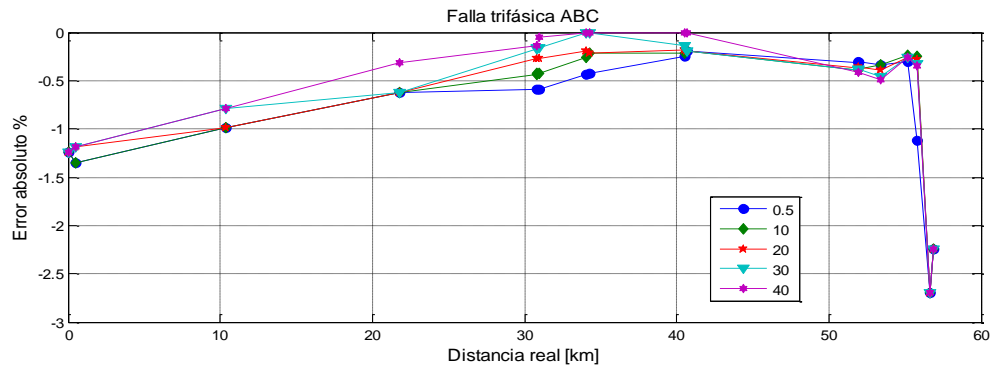


Figura A.5.12.c. Error relativo con modelo de recuperación exponencial en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

#### A.5.5. Resultados obtenidos en el quinto escenario

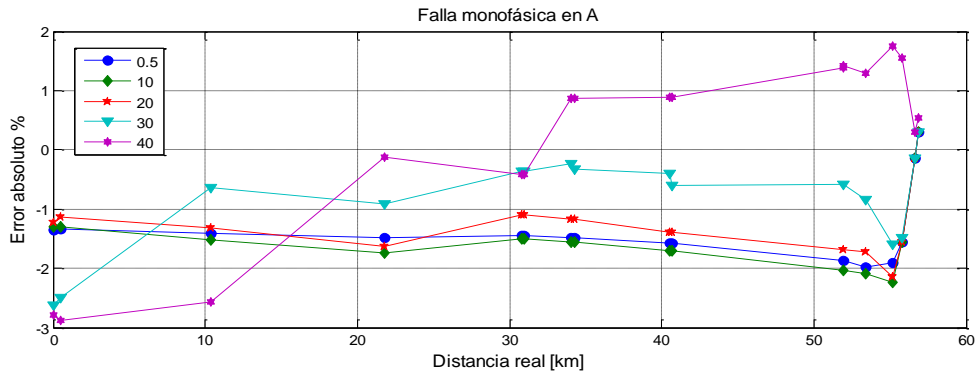
A continuación se presentan los resultados obtenidos para el quinto escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

##### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.13.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

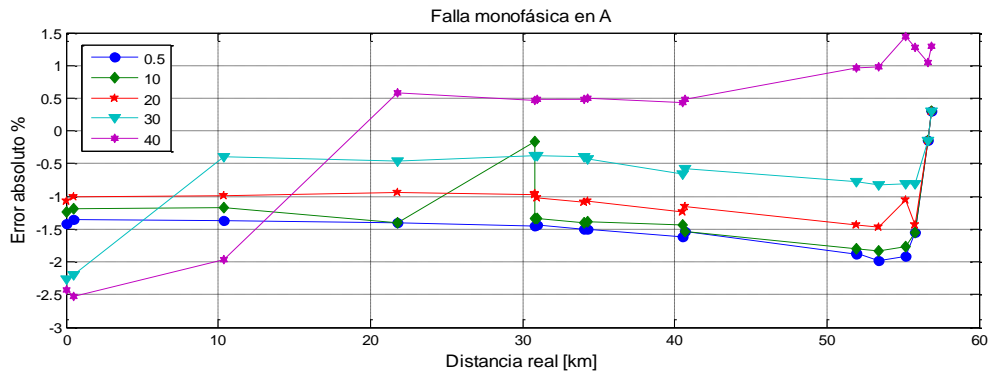
En las figuras A.5.13.b y A.5.13.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



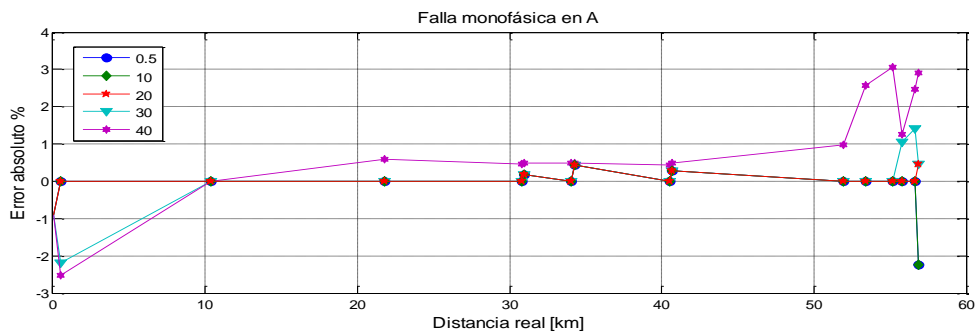
**Figura A.5.13.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla**



**Figura A.5.13.b.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

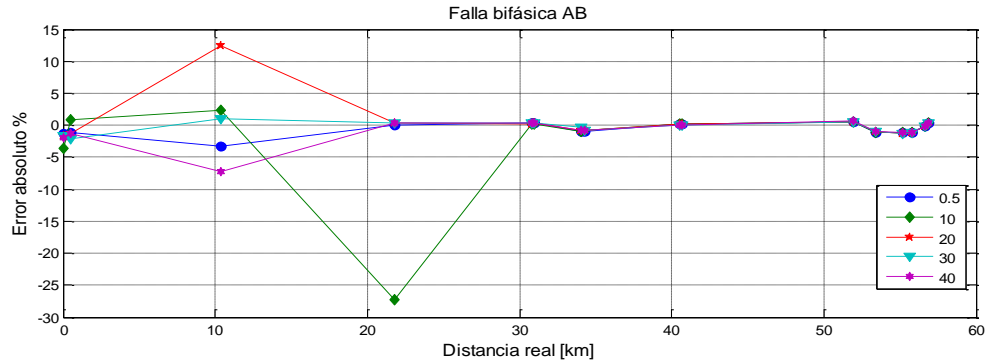


**Figura A.5.13.c.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

### b) Falla bifásica

En la figura A.5.14.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

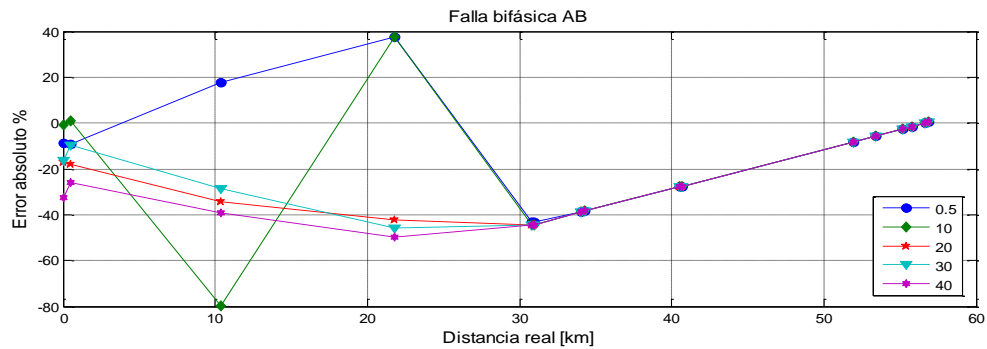
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.14.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

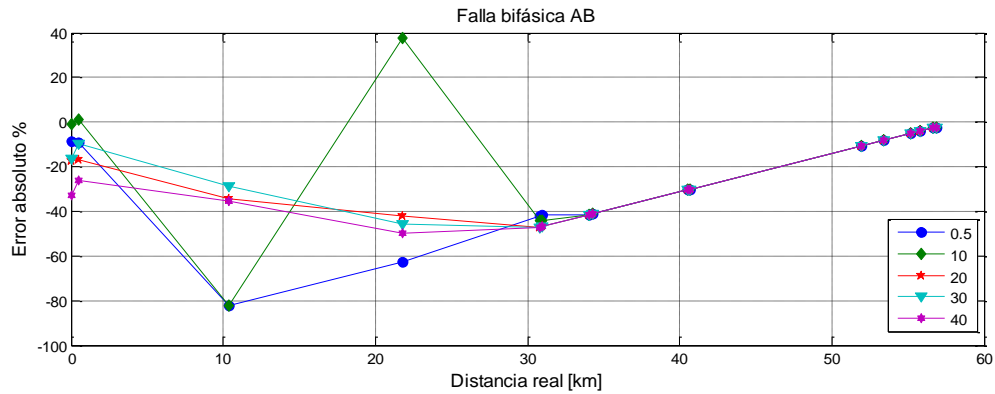
En las figuras A.5.14.b y A.5.14.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.14.b.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

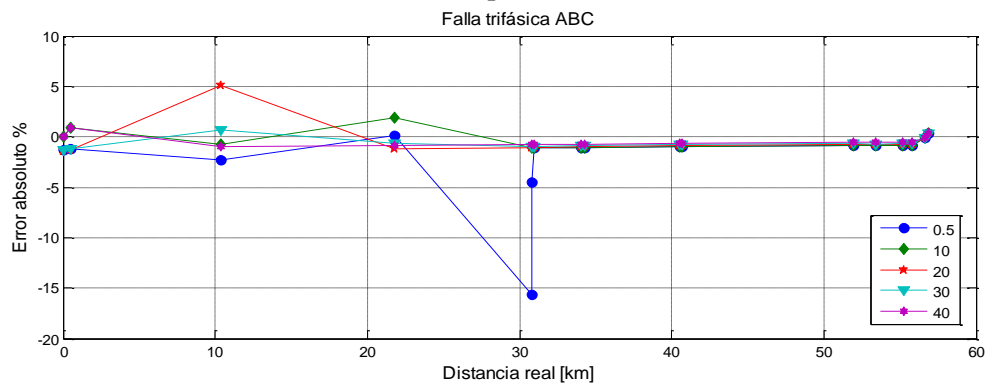


**Figura A.5.14.c.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

**c) Falla trifásica**

En la figura A.5.15.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



**Figura A.5.15.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.15.b y A.5.15.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

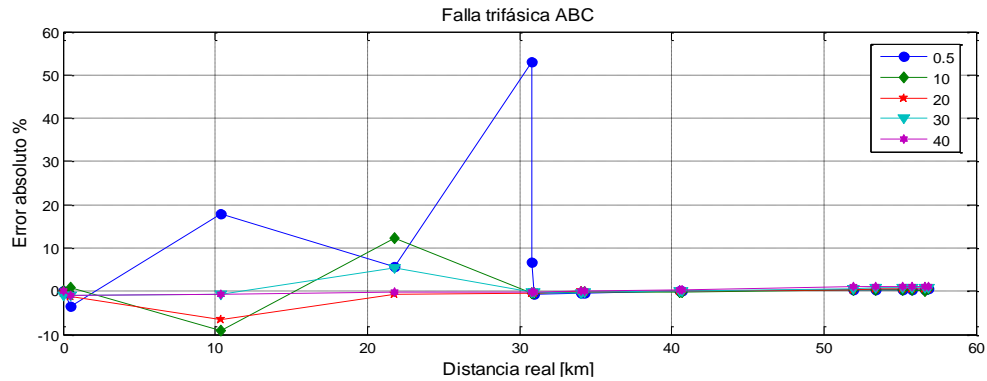


Figura A.5.15.b. Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

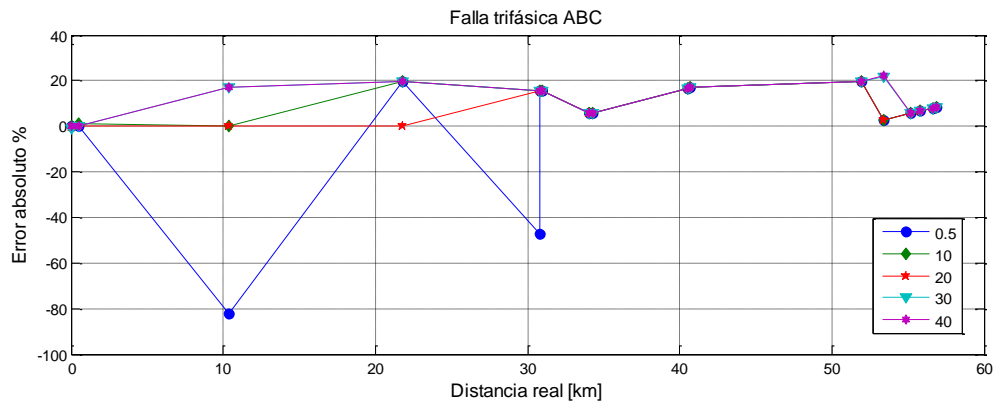


Figura A.5.15.c. Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

### A.5.6. Resultados obtenidos en el sexto escenario

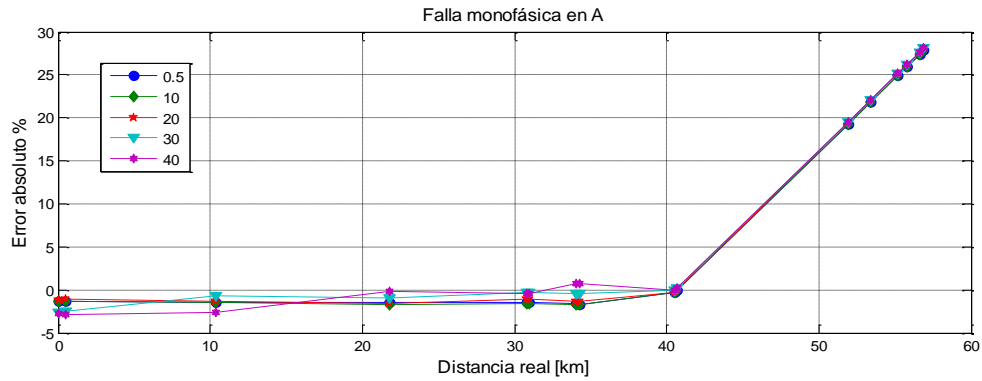
A continuación se presentan los resultados obtenidos para el sexto escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

#### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.16.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

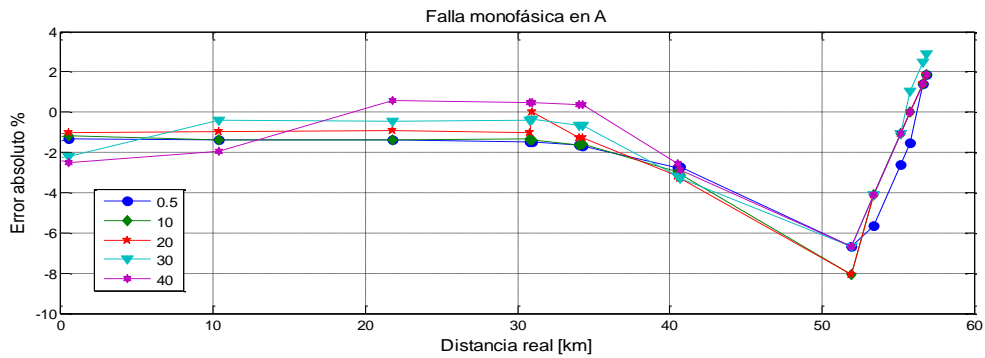
En las figuras A.5.16.b y A.5.16.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



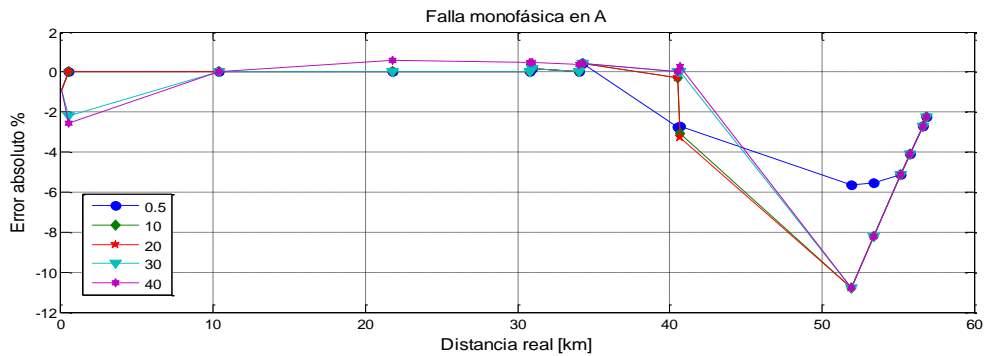
**Figura A.5.16.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla**



**Figura A.5.16.b.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

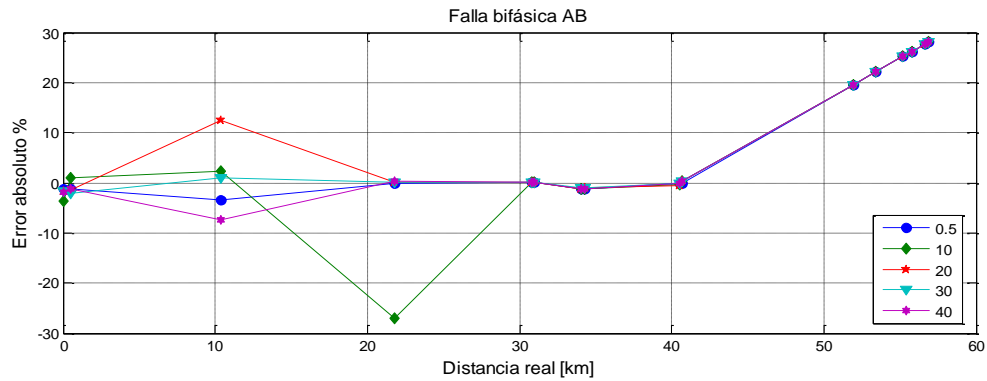


**Figura A.5.16.c.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

### b) Falla bifásica

En la figura A.5.17.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

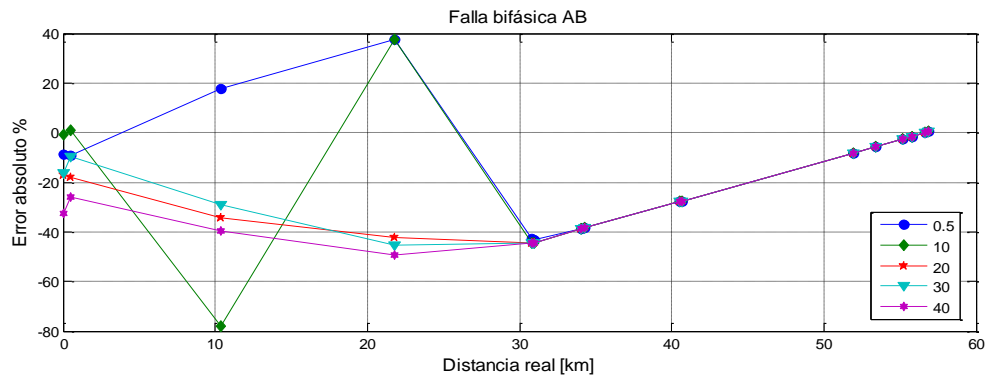
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.17.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

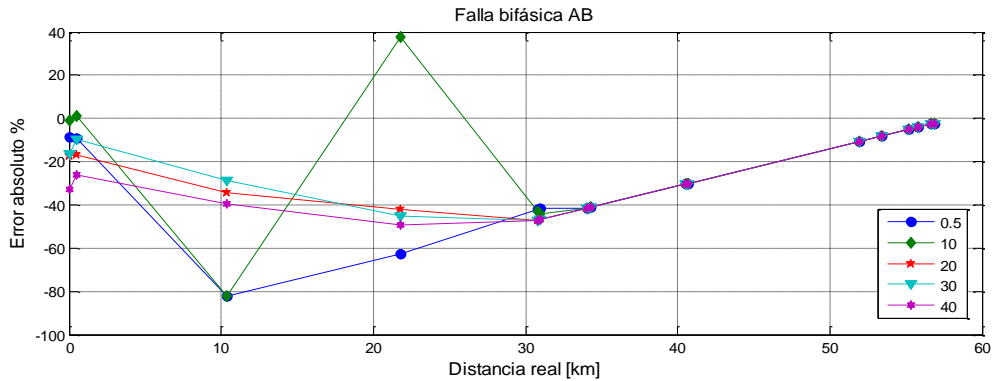
En las figuras A.5.17.b y A.5.17.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.17.b.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

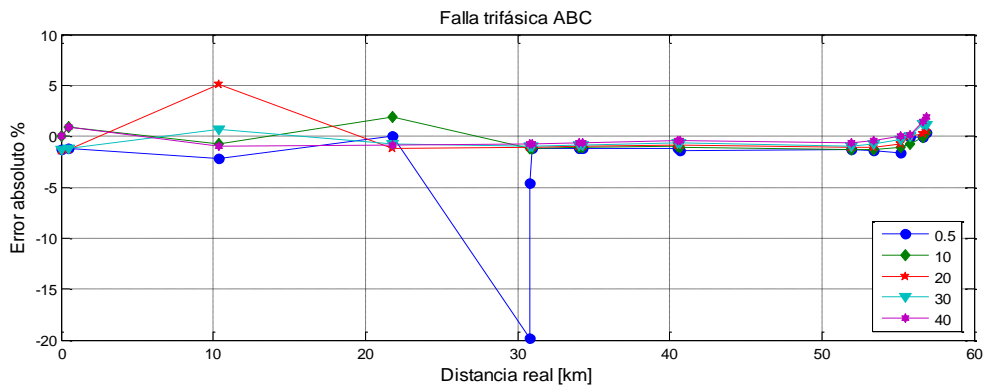


**Figura A.5.17.c.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

**c) Falla trifásica**

En la figura A.5.18.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en el localizador.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



**Figura A.5.18.a.** Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

En las figuras A.5.18.b y A.5.18.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos dinámicos compuestos de carga en el sistema y teniendo en cuenta el modelo de carga en los localizadores.



### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla

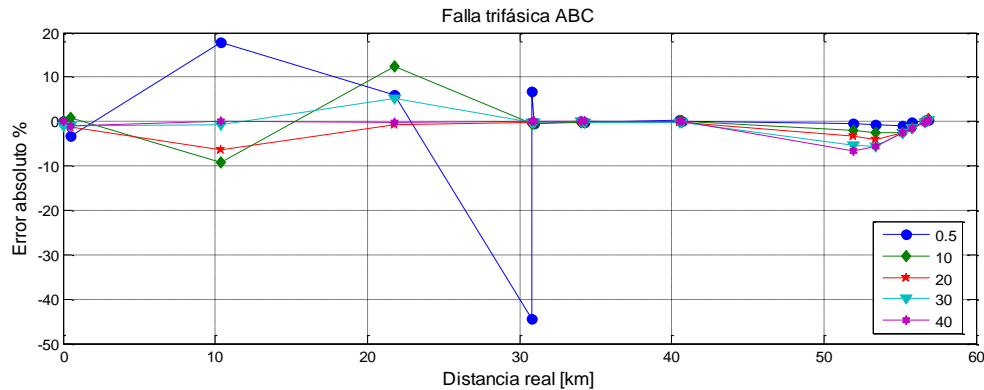


Figura A.5.18.b. Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

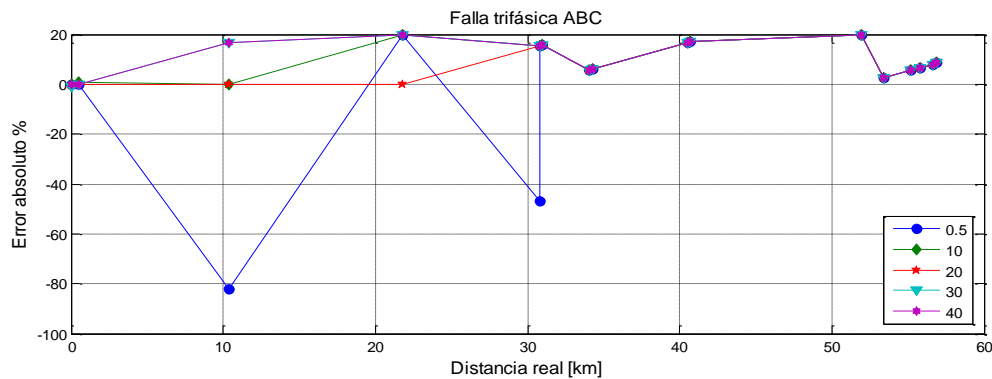


Figura A.5.18.c. Error relativo con modelo compuesto de carga en el sistema y en el localizador, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.

### A.5.7. Resultados obtenidos en el séptimo escenario

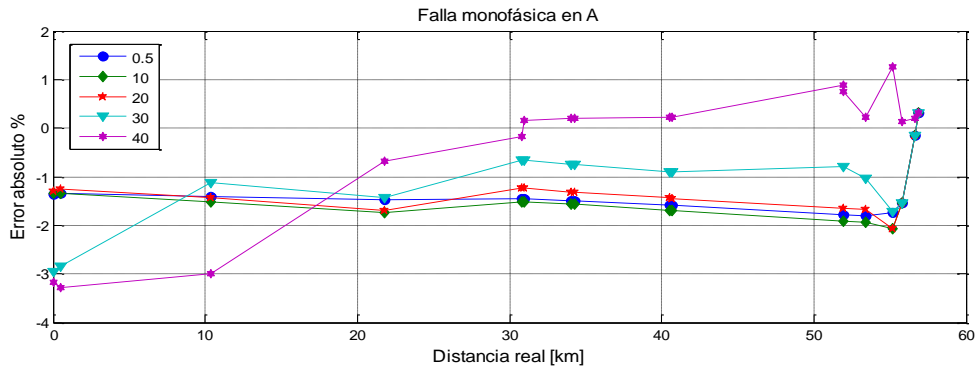
A continuación se presentan los resultados obtenidos para el séptimo escenario de pruebas frente a distintos tipos de falla.

#### a) Falla monofásica a tierra

En la figura A.5.19.a se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

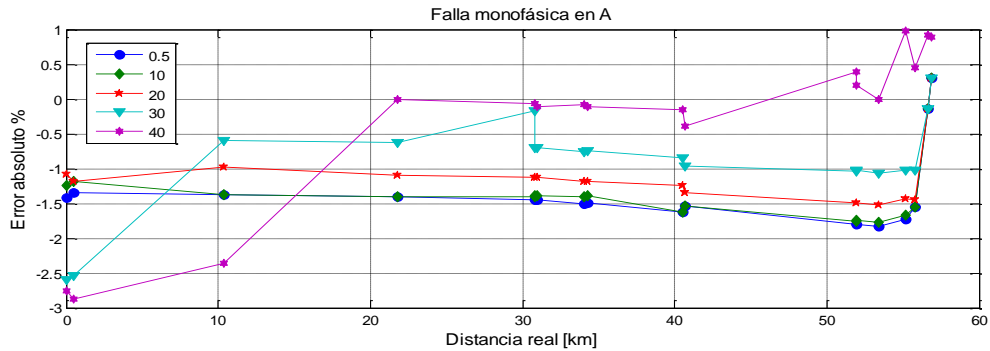
Luego, en las figuras A.5.19.b y A.5.19.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas monofásicas en la fase A con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

**Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase**



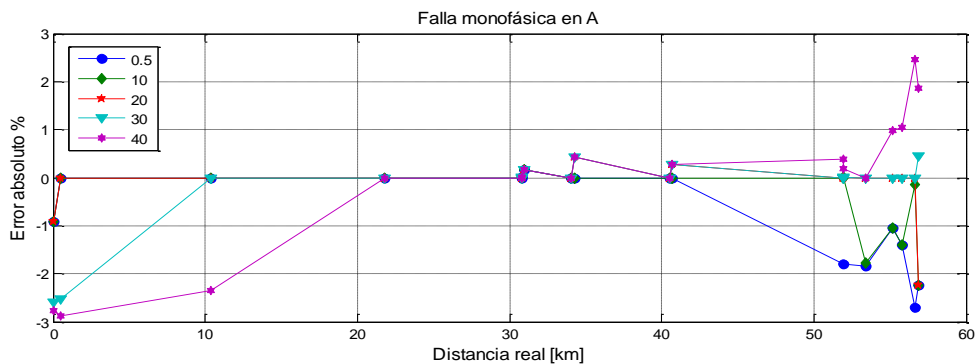
**Figura A.5.19.a.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de componentes de fase.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla**



**Figura A.5.19.b.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**

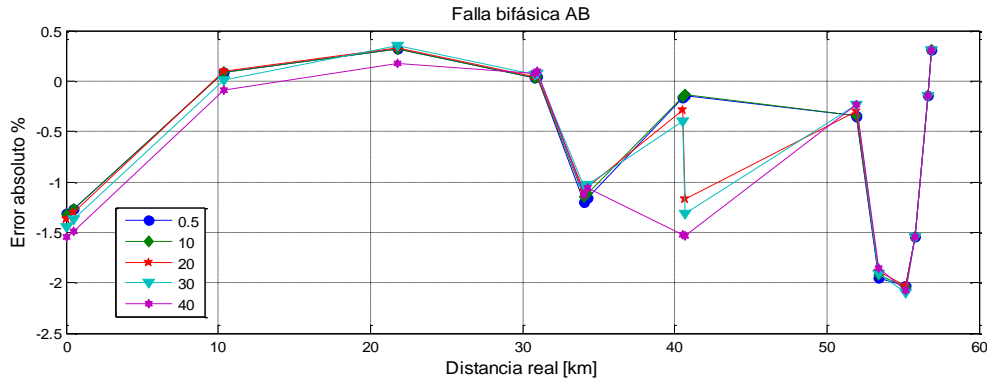


**Figura A.5.19.c.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla monofásica en A y el método de la mínima reactancia modificado.

### b) Falla bifásica

En la figura A.5.20.a se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

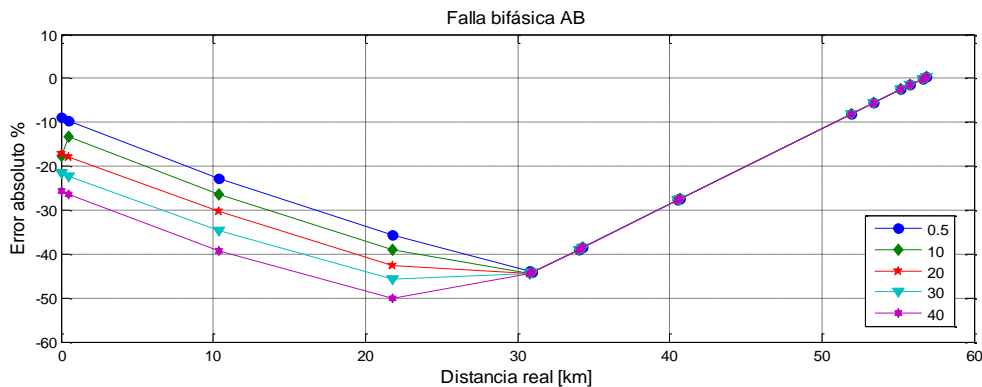
#### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.20.a.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de componentes de fase.

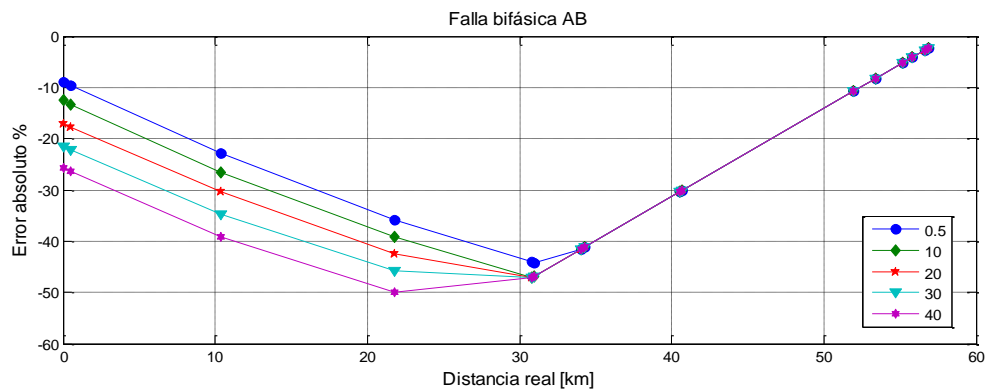
En las figuras A.5.20.b y A.5.20.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas bifásicas entre fases A y B con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

#### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla



**Figura A.5.20.b.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia.

### Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado

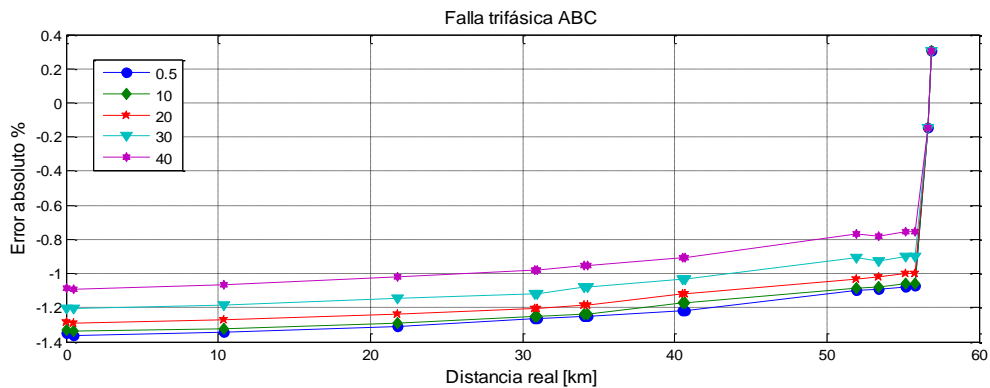


**Figura A.5.20.c.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla bifásica en AB y el método de la mínima reactancia modificado.

#### c) Falla trifásica

En la figura A.5.21.a se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización basado en componentes de fase con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

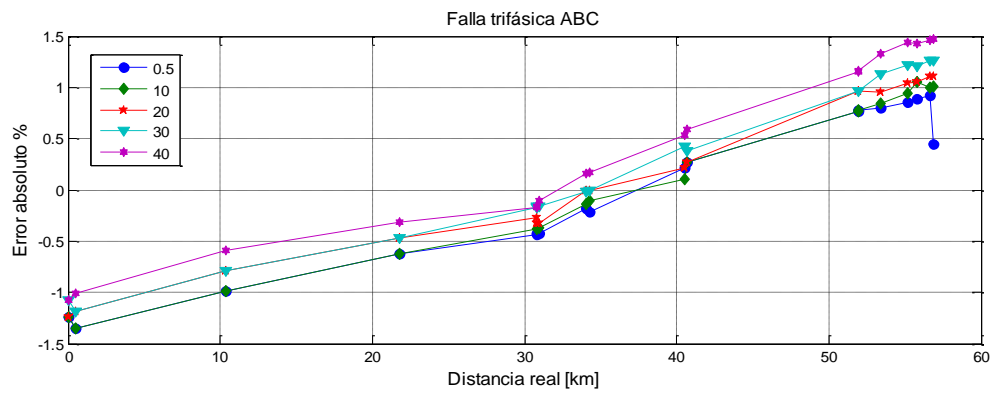
### Resultados obtenidos con el método basado en componentes de fase



**Figura A.5.21.a.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de componentes de fase.

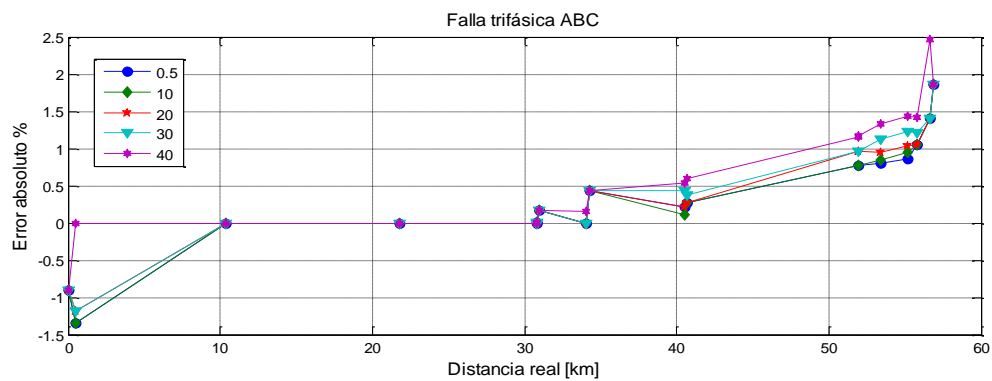
En las figuras A.5.21.b y A.5.21.c, se muestra el desempeño obtenido para fallas trifásicas con valores de resistencia entre 0 y 40Ω. Se utiliza el método de localización de la mínima reactancia de falla y el de la mínima reactancia de falla modificado respectivamente, con modelos estáticos de potencia, corriente e impedancia constante, además de modelos dinámicos compuestos de carga y de recuperación exponencial en el sistema.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla**



**Figura A.5.21.b.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia.

**Resultados obtenidos con el método de la mínima reactancia de falla modificado**



**Figura A.5.21.c.** Error relativo con modelos combinados de carga en el sistema, falla trifásica en ABC y el método de la mínima reactancia modificado.