

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE RATAN DAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

LIBARDO VILLAMIZAR MONTES
CARLOS ANDRÉS QUIÑONES BUITRAGO

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL SANTANDER
BUCARAMANGA

2005

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE RATAN DAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

LIBARDO VILLAMIZAR MONTES
CARLOS ANDRÉS QUIÑONES BUITRAGO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar el título de Ingeniero Electricista

DIRECTOR DEL PROYECTO
Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL SANTANDER
BUCARAMANGA

2005

ABSTRACT

The technique that estimates the location of fault on a radial distribution system has been implemented. such system can be compounded of several single and/or multiphase laterals. Load taps and non-homogeneity of the system are taken into account. Distributed parameter models of the line and voltage dependent load models are used. The loads up to the fault are considered independently and the loads beyond the fault are consolidated to a single load at the remote end. The load constants, describing the change of load impedance with voltage, are computed from the pre-fault load voltages and currents.

The apparent location of a fault is first estimated by computing the impedance from the fundamental frequency voltage and current phasors, and converting the reactive component of the impedance to line length. The sequence voltages and currents at the nodes up to the fault are calculated. The sequence voltages at the remote end are expressed as a linear function of the distance to the fault. The sequence voltages and currents at the fault are expressed as function of the distance to the fault as well as the impedances of loads beyond the fault. An equation for the fault impedance is then developed and its imaginary component is equated to zero. This provides a non-linear equation which is linearized and then solved using an iterative approach. Multiple estimates may be obtained for a fault in a distribution system that has laterals.

The implemented technique, which can handle single-phase-to-ground, two-phase-to-ground, phase-to-ground and balanced three-phase faults was tested to evaluate its suitability. Results from computer simulations of faults on a model of 25 kV distribution circuit are presented. The results indicated that the proposed technique works well for faults resistance until 25 ohms.

RESUMEN

En este trabajo de grado se implementó una técnica que estima la localización de una falla en un sistema de distribución radial con ramificaciones monofásicas o multifásicas. La técnica tiene en cuenta las cargas distribuidas y la no-homogeneidad del sistema, usa el modelo de parámetros distribuidos de la línea y un modelo para determinar la impedancia de carga en falla a partir de la tensión aplicada al nodo y el valor de la carga en prefalla. Las cargas localizadas antes del punto de falla se determinan de forma independiente, las cargas localizadas después del punto de falla se concentran en el último nodo.

Para la localización de la falla se realiza una estimación inicial determinando la impedancia equivalente del sistema a partir de la tensión y corriente a la frecuencia fundamental. Se determinan las tensiones y corrientes de secuencia en los nodos localizados antes del punto de falla, se expresan las tensiones de secuencia del último nodo como una función lineal de la distancia de la falla, las tensiones y corrientes en el punto de falla se expresan también como una función de la distancia de falla. Se desarrolla una ecuación y se iguala a cero la parte imaginaria, obteniendo una ecuación no-lineal la cual es linealizada, dicha ecuación es resuelta a partir de un proceso iterativo. Se obtienen múltiples estimaciones del punto de falla debido a las ramificaciones del sistema de distribución.

Se realizaron una serie de pruebas a la técnica simulando fallas de tipo bifásicas línea-línea-tierra, bifásicas línea-línea, monofásicas línea-tierra y trifásicas balanceadas. Las pruebas se realizaron en un sistema distribución prototipo descrito en la tesis. Los resultados indican que la técnica propuesta tiene una buena precisión para resistencias de fallas con valores de hasta 25Ω .

*A mis padres
Pedro Villamizar y
Carmen R. Montes*

Libardo Villamizar Montes

*A Dios todo poderoso, por ser
la luz que guía el sendero de mi vida.
A mi madre por su apoyo ferviente, a
mamita por su confianza en mi y a Luis por ser
un ejemplo en mi vida.
A mi padre por sus buenos consejos, a
claudia por su cariño y a mis tios por su
apoyo incondicional.
A Adriana por brindarme su amor y compañía.*

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud y agradecimientos al Dr. Hermann Raúl Vargas, por su dirección, asesoría y colaboración en la elaboración de nuestro trabajo de grado.

Al Ing. Jorge Andrés Cormane Angarita por que con su apoyo permanente e incondicional se hizo posible la culminación de este proyecto.

A nuestros compañeros y profesores quienes nos apoyaron en nuestro desarrollo profesional y humano a lo largo de la carrera.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	16
1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	16
2. LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	18
2.1. INTRODUCCIÓN	18
2.2. TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA	18
2.3. LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	18
2.4. OTRAS TÉCNICAS PROPUESTAS	19
2.4.1. “System for Locating Faults and Estimating Fault Resistance in Distribution Networks with Tapped Loads” por Damir Novosel	19
2.4.2. “Method and device of fault location for distribution networks” por Murari Saha	24
3. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO ALGORÍTMICO	29
3.1. INTRODUCCIÓN	29
3.2. DETECCIÓN DE LA FALLA	29
3.3. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE FALLA	30
3.4. ESTIMACIÓN DE LA SECCIÓN EN FALLA	31
3.5. DESARROLLO DEL SISTEMA RADIAL EQUIVALENTE	33
3.6. MODELADO DE LAS CARGAS	34
3.6.1. Selección del modelo de carga	35
3.6.2. Estimación de los valores de tensión y corriente de prefalla	37
3.6.3. Estimación de las constantes de carga	39
3.7. ESTIMACIÓN DE LAS TENSIONES Y CORRIENTES DE FALLA	39
3.8. ESTIMACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA	43
4. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ALGORÍTMICO	49
4.1. INTRODUCCIÓN	49
4.2. FUNCIÓN LECTORDL	49
4.2.1. Alcance de la rutina	49
4.2.2. Funcionamiento de la rutina	49

4.3.	FUNCIÓN CAMINOS	50
4.3.1.	Alcance de la rutina	50
4.3.2.	Funcionamiento de la rutina	50
4.4.	FUNCIÓN DETECCIÓN 4_4	50
4.4.1.	Alcance de la rutina	50
4.4.2.	Funcionamiento de la rutina	50
4.5.	FUNCIÓN CONSOLIDADOR	51
4.5.1.	Alcance de la rutina	51
4.5.2.	Funcionamiento de la rutina	51
4.6.	FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_6_3	51
4.6.1.	Alcance de la rutina	51
4.6.2.	Funcionamiento de la rutina	51
4.7.	FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_7	52
4.7.1.	Alcance de la rutina	52
4.7.2.	Funcionamiento de la rutina	52
4.8.	FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_8	52
4.8.1.	Alcance de la rutina	52
4.8.2.	Funcionamiento de la rutina	53
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS	54
5.1.	INTRODUCCIÓN	54
5.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA UTILIZADO	54
5.2.1.	Parámetros del sistema utilizado	54
5.3.	VARIABILIDAD DE LA REACTANCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA CON LA RESISTENCIA DE FALLA	55
5.4.	TIPOS DE PRUEBAS	57
5.5.	RESULTADOS	58
6.	MANUAL DEL USUARIO	70
6.1.	INTRODUCCIÓN	70
6.2.	INSTALACIÓN	70
6.3.	COMO EJECUTAR LOFASID	70
6.4.	ARCHIVOS DE ENTRADA	71
6.4.1.	Datos de las cargas	71
6.4.2.	Datos de la línea	73
6.4.3.	Corriente umbral	74
6.4.4.	Datos de prefalla	74
6.4.5.	Acerca de los datos de falla	76
6.4.6.	Botón calcular	76
6.5.	RESULTADOS	76
6.6.	RESULTADOS OPCIONALES A LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA	78
6.6.1.	Tensiones y corrientes de prefalla	78
6.6.2.	Tensiones y corrientes de falla	79
6.6.3.	Generar archivos de resultados	79

6.7. MENÚ HERRAMIENTAS	80
6.8. MENÚ ARCHIVO	82
7. CONCLUSIONES	84
A. PRUEBAS EN SISTEMAS REALES	87
A.1. INTRODUCCIÓN	87
A.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	87
A.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN	87
A.4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	88

Índice de figuras

2.1. Equivalente monofásico del sistema en prefalla.	20
2.2. Modelo del sistema en falla.	20
2.3. Circuito equivalente del sistema para determinar la impedancia de la fuente.	20
2.4. Modelo del sistema asumiendo la falla en el nodo k	24
2.5. Representación de la impedancia de lazo de falla vista desde el nodo inicial Z_{1f}	25
2.6. Representación de la impedancia ΔZ_f	25
3.1. Diagrama de bloques para detectar el tipo de falla.	30
3.2. Sistema de distribución con 2 posibles fallas en F y $F1$	34
3.3. Diagrama simplificado para una falla en F	34
3.4. Diagrama simplificado para una falla en $F1$	35
3.5. Diagrama de un sistema en secuencia con una carga instalada en la fase A del nodo N	36
3.6. Línea de distribución entre los nodos M y R	37
3.7. Tensiones y corrientes en el nodo R	38
3.8. Tensiones y corrientes en prefalla en el nodo N y X	39
3.9. Tensiones y corrientes en falla en el nodo F y N	40
3.10. Diagrama de flujo del método.	48
5.1. Sistema de distribución utilizado para las pruebas	55
5.2. Sistema de distribución con falla en el nodo inicial.	58
5.3. Impedancia equivalente del sistema en prefalla vista desde el nodo inicial	58
5.4. Definición de la sección anterior y siguiente al punto de falla	60
5.5. Estimación de error para una falla monofásica A-T	60
5.6. Estimación de error para una falla monofásica B-T	61
5.7. Estimación de error para una falla monofásica C-T	62
5.8. Estimación de error para una falla bifásica A-B	63
5.9. Estimación de error para una falla bifásica A-C	64
5.10. Estimación de error para una falla bifásica B-C	65
5.11. Estimación de error para una falla bifásica A-B-T	66
5.12. Estimación de error para una falla bifásica A-C-T	67
5.13. Estimación de error para una falla bifásica B-C-T	68
5.14. Estimación de error para una falla bifásica A-B-C	69
6.1. Ventana principal de lofasid.	71
6.2. Ingreso de la ruta al archivo de los datos de las cargas.	73

6.3. Datos de prefalla.	74
6.4. Botón guardar datos de prefalla.	75
6.5. Botón borrar datos de prefalla.	75
6.6. Campo para cargar los datos de prefalla.	76
6.7. Botón para calcular la distancia de la falla.	76
6.8. Campo de resultados de la ubicación de la falla.	77
6.9. Campo de resultados de la localización de la falla.	78
6.10. Valores de tensión y corriente de prefalla.	79
6.11. Valores de tensión y corriente de falla.	79
6.12. Campo de opciones para generar el archivo de resultados.	80
6.13. Opción crear sistema.	80
6.14. Campo para dibujar y editar los sistemas de distribución.	81
6.15. Ventana de información de los parametros de la línea y datos de las cargas.	82
6.16. Opciones del menu archivo.	82

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución entregan energía eléctrica a los usuarios hasta sus puntos de ubicación en la cantidad requerida. Cualquier tipo de falla en los sistemas de distribución hace que el suministro de energía eléctrica sea interrumpido.

Los sistemas de distribución presentan características distintas a los sistemas de transmisión y subtransmisión. Debido a esto se hace ineficiente la implementación de las técnicas para localizar fallas en sistemas de transmisión en los de distribución. De tal modo, se hace necesario incurrir en nuevos métodos, los cuales se han diseñado teniendo en cuenta las características de los sistemas de distribución.

1.1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

Siguiendo la metodología presentada en el plan de trabajo los objetivos de la tesis se iniciaron con la recopilación y análisis acerca del método algorítmico de Rátan Das para la localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica[6]. Se continuó con el diseño y elaboración de una herramienta software en Matlab basada en el método algorítmico estudiado.

Seguido a la implementación de la herramienta se obtuvieron los valores de tensión y corriente a partir de la simulación de un sistema prototipo en condiciones de falla utilizando Matlab. Con base en los datos de la simulación se realizaron pruebas a la herramienta para valorar el comportamiento del método algorítmico.

Finalmente se elaboró el manual del usuario de la herramienta software para su posterior utilización en otros proyectos.

1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El documento está organizado en 7 capítulos. En el capítulo dos se describen las características de los sistemas de distribución y las circunstancias que se generan al no detectar los puntos de falla de forma rápida. Se describen brevemente algunos métodos de localización de fallas, para crear un

punto de comparación con el método implementado.

En el capítulo tres se describe el método diseñado por Ratan Das. En el capítulo cuatro se presenta la estructura del programa implementado, los algoritmos más importantes del programa definiendo su alcance y la descripción de su funcionamiento.

El quinto capítulo contiene las pruebas realizadas al método. Se presenta el sistema prototipo y sus parámetros. Adicionalmente se muestran las tablas que contienen las estimaciones realizadas por el programa para cada tipo de falla.

En el capítulo seis se presenta el manual del usuario. El manual especifica los requisitos mínimos necesarios para la instalación y ejecución del programa, adicionalmente describe los pasos para la instalación y ejecución de este.

Para concluir se presentan en el apendice una serie de pruebas realizadas a dos sistemas a partir de datos reales.

Capítulo 2

LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica juega un papel importante en la sociedad de consumo. En este capítulo se presenta la forma como se desarrolla el transporte de energía eléctrica, algunas características de los sistemas de transmisión y distribución, la forma como se ve afectado la continuidad del suministro y algunas técnicas empleadas para localizar fallas en sistemas de distribución.

2.2. TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En la actualidad los consumidores se encuentran distribuidos en áreas alejadas de los centros de generación. Es por esto que para suministrar energía a los usuarios se requiere tanto de sistemas de transmisión como de distribución.

Los sistemas de transmisión[3] y los sistemas de distribución son complementarios, pero cada uno tiene características diferentes. Los sistemas de transmisión presentan una topología y operación mallada, conducen energía desde grandes distancias a sitios específicos, además son sistemas balanceados, ya que las cargas que alimentan son trifásicas.

Los sistemas de distribución presentan una operación radial y las cargas se encuentran distribuidas a lo largo de la línea. La topología del sistema depende de la forma como las cargas se encuentren distribuidas en la zona. Las cargas que se conectan normalmente a los sistemas de distribución no son balanceadas, pueden ser monofásicas, bifásicas o trifásicas.

2.3. LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

En muchas ocasiones los sistemas de transporte de energía eléctrica presentan interrupciones en el suministro de energía, debido a fallas en la red. Las fallas se originan principalmente por descargas atmosféricas directas, sobretensiones causadas por descargas indirectas dentro de la zona y cortos

circuitos causados por aves u otro objeto externo que hace contacto con la red.

La mayoría de estas fallas causan daños mecánicos a los elementos. Estos deben ser reparados de forma inmediata con el fin de disminuir los efectos en la calidad del servicio. Para cumplir con este fin es necesario localizar el sitio donde ocurrió la falla. Por esta razón la localización de fallas se ha convertido en un tema esencial para el sector de distribución.

La mayoría de los esfuerzos en el área de localización de fallas se ha concentrado en los sistemas de transmisión, debido a la disposición de más recursos y al impacto que generan en los sistemas de transmisión. Ya que el número de usuarios afectados al ocurrir una falla en un sistema de transmisión es mayor en comparación con los afectados cuando esta se presenta en un sistema de distribución.

En los diversos estudios realizados se ha establecido que el 80 % del total de las interrupciones se originan por fallas en sistemas de distribución[6].

Debido a las características de los sistemas de transmisión, los algoritmos de localización de fallas ven comprometida su eficiencia al ser implementados en sistemas de distribución, por esta razón es necesario un estudio independiente de metodologías para localizar fallas en sistemas de distribución.

2.4. OTRAS TÉCNICAS PROPUESTAS

2.4.1. “System for Locating Faults and Estimating Fault Resistance in Distribution Networks with Tapped Loads” por Damir Novosel

- Descripción general

El método algorítmico para localización de fallas y estimación de la resistencia de falla propuesto [1] considera los efectos de la resistencia de falla y corriente de carga de la red de distribución, desarrollando dos modelos que hacen uso de los principios del método de la reactancia.

El método utiliza los datos de tensión y corriente en prefalla, medidos en la subestación, determinando las impedancias de la fuente y de la carga, las cuales son parte fundamental en el desarrollo de los modelos propuestos. En este método se presentan dos modelos. El primero utiliza una iteración sencilla de aproximación, el segundo método utiliza cálculos más complejos que no requieren iteración. Los valores de impedancia de la fuente y de la carga se utilizan en ambos modelos.

- Modelo del sistema de potencia real

El método concentra todas las cargas que se encuentran después del punto de falla en un solo punto Z_{rload} . Las cargas que se encuentran entre el nodo inicial y el punto de falla también son concentradas en un solo punto Z_{tap} . La impedancia equivalente de carga $Z_{load} = Z_{rload} + Z_{tap}$ asume que todas las cargas se encuentran concentradas en el punto final como se muestra en la figura 2.1 en prefalla y utiliza esta nueva topología para determinar el punto donde ocurrió

la falla como se muestra en la figura 2.2. Esta suposición se hace aproximada si las impedancias de carga son mayores que la impedancia serie de la línea.

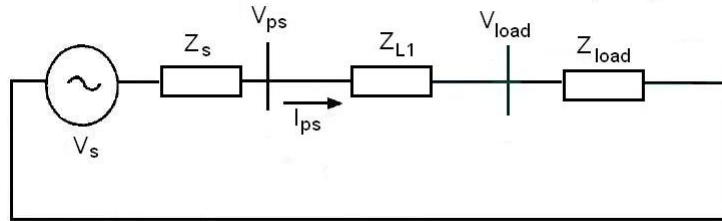


Figura 2.1: Equivalente monofásico del sistema en prefalla.

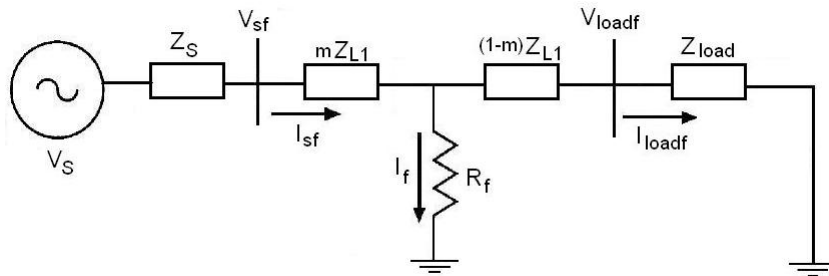


Figura 2.2: Modelo del sistema en falla.

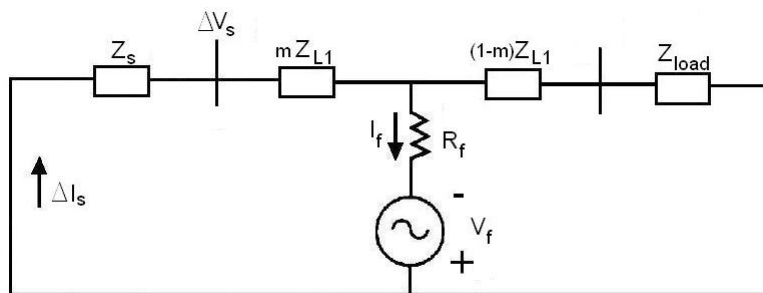


Figura 2.3: Circuito equivalente del sistema para determinar la impedancia de la fuente.

La impedancia de carga se define como:

$$Z_{load} = Z_{load1} = \frac{V_{ps1}}{I_{ps1}} - Z_{L1} \tag{2.1}$$

donde:

V_{ps1} es la tensión de secuencia positiva el nodo inicial.

I_{ps1} es la corriente de secuencia positiva el nodo inicial.

Z_{L1} es la impedancia de secuencia positiva serie de la línea.

La impedancia de la fuente se determina a partir de la variación de tensión y corriente en el nodo inicial en prefalla y postfalla definidas en la figura 2.3:

$$Z_s = -\frac{\Delta V_s}{\Delta I_s} \quad (2.2)$$

donde:

$\Delta V_s = V_{fs} - V_{ps}$ es la diferencia entre la tensión de falla y de prefalla en el nodo inicial.

$\Delta I_s = I_{fs} - I_{ps}$ es la diferencia entre la corriente de falla y de prefalla en el nodo inicial.

La impedancia equivalente del sistema en falla se denota como:

$$Z_{meas} = \frac{V_{sf}}{I_{sf}} = mZ_{L1} + R_f * \frac{1}{d_s} * \frac{1}{n_s} \quad (2.3)$$

donde d_s se define como el factor de distribución de corriente.

$$d_s = \frac{\Delta I_s}{I_f} = \frac{Z_{load} + (1 - m)Z_{L1}}{Z_s + Z_{load} + Z_{L1}} = |d_s| \angle \beta_s \quad (2.4)$$

n_s se define como:

$$n_s = \frac{\Delta I_{sf}}{I_s} = |n_s| \angle \gamma_s \quad (2.5)$$

Al despejar V_{sf} de la ecuación (2.3) queda:

$$V_{sf} = mZ_{L1}I_{sf} + R_f \frac{|\Delta I_s|}{|d_s|} \angle (\lambda_s - \beta_s) \quad (2.6)$$

- Descripción del método iterativo

Si se asume el ángulo β_s igual a cero en la ecuación (2.6) se puede hallar el valor de m como se muestra en la ecuaciones (2.7), (2.8),(2.9), (2.10) , que es la distancia por unidad desde el nodo inicial al punto de falla. Este valor de m se puede reemplazar en la ecuación (2.6) para hallar β_s . El nuevo valor de β_s se emplea para hallar de forma mas aproximada el valor de m . Este proceso es repetitivo hasta satisfacer los criterios de convergencia.

$$m = \frac{Re(V_{sf} \times Im(\Phi) - Im(V_{sf}) \times Re(\Phi))}{R_{L1} \times M - X_{L1} \times N} \quad (2.7)$$

Definiendo:

$$M = [Re(I_{sf} \times Im(\Phi) - Im(I_{sf}) \times Re(\Phi))] \quad (2.8)$$

$$N = [Re(I_{sf} \times Re(\Phi) - Im(I_{sf}) \times Im(\Phi))] \quad (2.9)$$

$$\Phi = 1^{j\phi}, \phi = (\lambda_s - \beta_s) \quad (2.10)$$

donde:

X_{L1} es la componente imaginaria y R_{L1} la componente real de Z_{L1} .

Una vez calculado el valor de m , se calcula el valor de R_f empleando la siguiente ecuación:

$$R_f = \frac{Re(V_{sf}) - mRe(I_{sf})X_{L1}}{Re\left(\frac{\Delta I_s}{d_s}\right)} \quad (2.11)$$

- Descripción del método exacto

Al tomar la ecuación (2.4) y sustituirla en la ecuación (2.6) se obtiene la siguiente ecuación cuadrática.

$$m^2 - mk_1 + k_2 - k_3R_f = 0 \quad (2.12)$$

donde:

$$k_1 = \frac{V_{sf}}{I_{sf}Z_{L1}} + \frac{Z_{load}}{Z_{L1}} + 1 \quad (2.13)$$

$$k_2 = \frac{V_{sf}}{I_{sf}Z_{L1}} \left(\frac{Z_{load}}{Z_{L1}} + 1 \right) \quad (2.14)$$

$$k_3 = \frac{\Delta I_s}{I_{sf}Z_{L1}} \left(\frac{Z_s + Z_{load}}{Z_{L1}} + 1 \right) \quad (2.15)$$

La ecuación (2.12) tiene dos variables desconocidas m y R_f . Esta ecuación se puede separar en parte imaginaria y parte real para eliminar R_f .

$$m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ b &= - \left(Re(k_1) - \frac{Im(k_1) \times Re(k_3)}{Im(k_3)} \right) \\ c &= Re(k_2) - \frac{Im(k_2) \times Re(k_3)}{Im(k_3)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

El autor deduce que el valor acertado de m se determina con:

$$m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.18)$$

- Características del método

- Es necesario conocer los parámetros del sistema y los valores de tensión y corriente de falla y prefalla.
- Mejora la precisión que brinda el método de la reactancia, al considerar la resistencia de falla y corrientes de carga.
- Es un método de análisis sencillo para determinar el tipo de falla, basado en las medidas de prefalla y falla de tensiones y corrientes en la subestación.
- La impedancia de carga se considera como una impedancia constante que no depende de la tensión en la carga.
- La impedancia de carga se calcula con los valores de tensión y corriente en prefalla.
- Concentra todas las cargas en el último nodo, esto hace al modelo inexacto en puntos cercanos a la subestación. El modelo se hace inexacto en sistemas con grandes longitudes de línea o con cargas muy pequeñas. Lo anterior se deduce del hecho que la suposición de concentrar todas las cargas funciona siempre y cuando la impedancia de carga sea mucho mayor que la impedancia serie de la línea.
- Las cargas instaladas en el sistema pueden ser polifásicas.

- Para representar las líneas emplea el modelo de línea corta.
- Tiene en cuenta la no-homogeneidad del sistema al determinar la impedancia equivalente del sistema.

2.4.2. “Method and device of fault location for distribution networks” por Murari Saha

- Descripción general

El método algorítmico [7] utiliza las medidas de tensión y corriente a frecuencia fundamental en un terminal de la línea antes y durante la falla, estimando la sección donde ocurrió la falla. Posteriormente se estima la distancia a la falla, basado en la topología de la red, secciones de los cables, laterales y cargas a lo largo del alimentador.

- Estimación del nodo en falla

La estimación se realiza por medio de la comparación de dos impedancias. La impedancia del lazo de falla Z_{1f} se determina a partir de los valores de tensión y corriente de prefalla y la impedancia de secuencia positiva de falla asumiendo que la resistencia de falla es cero Z_{1k}^f para el k -ésimo nodo definida en la figura 2.4. Se asume la falla en cada nodo, se determinan la impedancia de secuencia positiva y se comparan las dos impedancias, este proceso se repite hasta lograr determinar el nodo cercano a la falla.

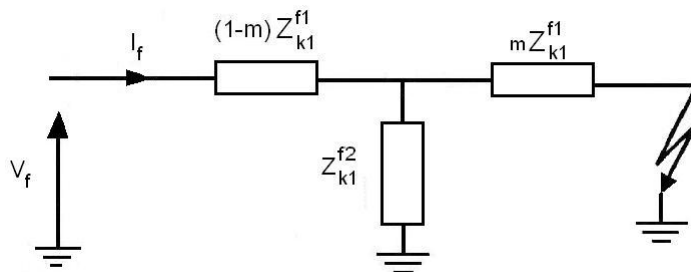


Figura 2.4: Modelo del sistema asumiendo la falla en el nodo k .

$$Z_{1k}^f = (1 - m)Z_{1k}^{f1} + \frac{mZ_{1k}^{f1}Z_{1k}^{f2}}{mZ_{1k}^{f1} + Z_{1k}^{f2}} \quad (2.19)$$

$$Z_{1f} = \frac{V_f}{I_f} \quad (2.20)$$

donde:

V_f es la tensión de falla.

I_f es la corriente de falla.

El chequeo que se realiza dependiendo del tipo de falla, se define como $Im(Z_{ek}) \preceq 0$ para $k = 1, 2, \dots, M$.

$$Z_{ek} = \begin{cases} Z_{1k}^f - Z_{1f} & \text{Falla línea-línea} \\ Z_{1k}^f + k_l Z_{0k}^f - Z_{1N} & \text{Falla línea-tierra} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$k_l = \frac{I_{pN}}{3I_p - I_{pN}}, Z_{1N} = \frac{V_{ph}}{I_p - I_{pN}/3}$$

- Estimación de la distancia de falla para una falla bifásica línea-línea

Después de lograr determinar el nodo en falla como el nodo k , se procede a determinar la distancia al punto de falla. En la estimación del nodo en falla se asumió una resistencia de falla igual a cero. En esta parte se tiene en cuenta la resistencia de falla como se muestra en las figuras 2.5 y 2.6.

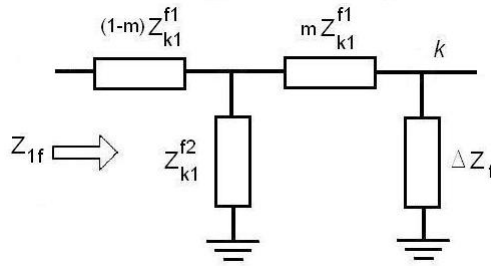


Figura 2.5: Representación de la impedancia de lazo de falla vista desde el nodo inicial Z_{1f} .

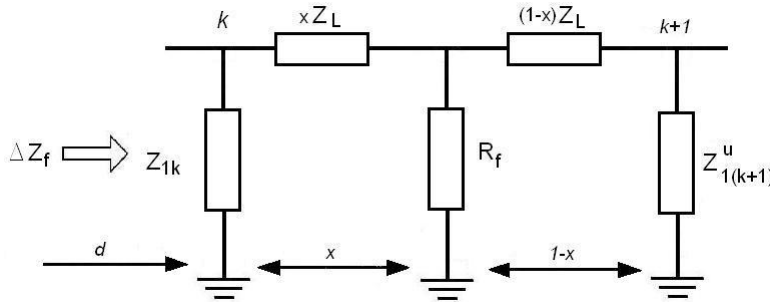


Figura 2.6: Representación de la impedancia ΔZ_f .

La impedancia de lazo de falla vista desde la subestación se define como:

$$Z_{1f} = Z_{1k}^f = (1 - m)Z_{1k}^{f1} + \frac{(mZ_{1k}^{f1} + \Delta Z_f)Z_{1k}^{f2}}{mZ_{1k}^{f1} + \Delta Z_f + Z_{1k}^{f2}} \quad (2.22)$$

La impedancia ΔZ_f representa la impedancia vista desde el nodo k al punto de falla y se define como:

$$\Delta Z_f = \frac{Z_{1k} \left(x Z_L + \frac{R_f((1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{R_f + (1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u} \right)}{Z_{1k} + x Z_L + \frac{R_f((1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{R_f + (1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u}} \quad (2.23)$$

De la ecuación (2.22) se despeja ΔZ_f , la nueva ecuación se iguala con la ecuación (2.23) para obtener:

$$R_f = x^2 \frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} - x Z_L - \frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M} \quad (2.24)$$

donde:

$$M = (\Delta Z_f - Z_{1k})(Z_L + Z_{1(k+1)}^u) - \Delta Z_f Z_{1k}$$

Tomando la parte imaginaria en ambos lados de la ecuación (2.24) se tiene:

$$Im(R_f) = x^2 Im \left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} \right) - x Im(Z_L) - Im \left(\frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M} \right) \quad (2.25)$$

Se obtiene x como:

$$x_1 = \frac{Im(Z_L) + \sqrt{p}}{2Im \left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} \right)}, \quad x_2 = \frac{Im(Z_L) - \sqrt{p}}{2Im \left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} \right)} \quad (2.26)$$

Donde:

$$p = Im(Z_L^2) + 4Im \left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} \right) Im \left(\frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M} \right)$$

El valor de x_1 es siempre imaginario por tanto el valor de $x = x_2$.

- Estimación de la distancia de falla para una falla bifásica línea-línea-tierra
La deducción de la distancia de falla se hace de forma similar a la de una falla bifásica línea-línea. La deducción parte de:

$$Z_{1k}^f = Z_{1N} - k_l Z_{0k}^f = (1 - m) Z_{1k}^{f1} + \frac{(m Z_{1k}^{f1} + \Delta Z_f) Z_{1k}^{f2}}{m Z_{1k}^{f1} + \Delta Z_f + Z_{1k}^{f2}} \quad (2.27)$$

Se define la resistencia de falla R_f como:

$$R_f = x^2 \frac{Z_{Le}^2 (\Delta Z_f - Z_{ke})}{M} - x Z_{Le} - \frac{\Delta Z_f Z_{ke} (Z_{Le} + Z_{e(k+1)}^u)}{M} \quad (2.28)$$

Donde:

$$M = (\Delta Z_f - Z_{ke})(Z_{Le} + Z_{e(k+1)}^u) - \Delta Z_f Z_{ke}$$

$$\begin{aligned} Z_{Le} &= \frac{2Z_{1L} + Z_{0L}}{3}, \\ Z_{ke} &= \frac{2Z_{1k} + Z_{0k}}{3}, \\ Z_e^u &= \frac{2Z_1^u + Z_0^u}{3} \end{aligned}$$

Se obtiene x como:

$$x = \frac{Im(Z_{Le}) - \sqrt{p}}{2Im\left(\frac{Z_{Le}^2 (\Delta Z_f - Z_{ke})}{M}\right)} \quad (2.29)$$

Donde:

$$p = Im(Z_{Le}^2) + 4Im\left(\frac{Z_{Le}^2 (\Delta Z_f - Z_{ke})}{M}\right) Im\left(\frac{\Delta Z_f Z_{ke} (Z_{Le} + Z_{e(k+1)}^u)}{M}\right)$$

• Características del método

- Es necesario conocer los parámetros del sistema como son los datos de la línea y los datos de las cargas, además de los valores de tensión y corriente en prefalla y falla.
- Realiza la ubicación del nodo en falla bajo la suposición que la resistencia de falla es cero, para resistencias de fallas muy altas es posible que no estime de manera precisa el nodo en falla y determine una distancia de falla errónea.
- El método no realiza estimaciones para fallas trifásicas.
- Al determinar la impedancia equivalente del sistema no considera la variabilidad de la admitancia de la carga con la tensión.
- La impedancia de carga se calcula con los valores de tensión y corriente en prefalla.
- Las cargas después del nodo en falla se concentran en el último nodo.
- Las cargas instaladas en el sistema pueden ser polifásicas.

-
- Para representar las líneas usa el modelo pi de la línea.
 - Tiene en cuenta la no-homogeneidad del sistema al determinar la impedancia equivalente del sistema.
 - Se estiman múltiples puntos de falla, se estima un número igual al número de ramificaciones que tenga el sistema.

Capítulo 3

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO ALGORÍTMICO

3.1. INTRODUCCIÓN

El método propuesto por RATAN DAS en su tesis doctoral[6] forma parte de un gran número de técnicas diseñadas para localizar fallas en sistemas de distribución. La selección de esta técnica se hizo a partir de una comparación previa realizada a los métodos algorítmicos existentes por parte del grupo de estudiantes de maestría en ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. De esta comparación se definió la técnica “DETERMINING THE LOCATIONS OF FAULTS IN DISTRIBUTIONS SYSTEMS” como una de las más eficientes y exactas.

La técnica propuesta [6, 2] utiliza los valores de tensión y corriente en prefalla¹ y en falla², así como los parámetros de la línea y datos referentes a las cargas conectadas al sistema. La técnica realiza un número de estimaciones de la ubicación de la falla igual al número de ramales laterales que existan en el sistema de distribución.

Los sistemas de distribución en los que se utiliza este método son sistemas no homogéneos, con cargas distribuidas polifásicas.

En este capítulo se presenta una breve descripción sobre las características más importantes del método, funcionamiento y estructura básica de la herramienta software implementada. Al final se presenta la figura 3.10 en la cual se muestra el diagrama del flujo del método implementado de forma simplificada.

3.2. DETECCIÓN DE LA FALLA

El modelo que se presenta a continuación se ha diseñado para sistemas de distribución que cuentan con un equipo de detección de fallas en el ramal alimentador³. El equipo de detección de fallas se encargará de muestrear los valores de tensión y corriente en prefalla. Además, al momento de ocurrir

¹Prefalla se define como los momentos antes de ocurrir una falla, en este tiempo funciona en estado estable.

²Falla hace alusión al estado estable de falla, se define uno o tres ciclos después de haber ocurrido el corto, este tiempo es suficiente para que el estado transitorio haya terminado.

³Los relés electrónicos usados actualmente en la industria cuentan con las funciones requeridas para este modelo.

3.4. ESTIMACIÓN DE LA SECCIÓN EN FALLA

Se realiza una primera aproximación de la distancia de la falla ubicando la sección donde ocurrió la falla. La estimación de la sección se realiza comparando la reactancia equivalente del sistema con la reactancia modificada. La reactancia equivalente se determina a partir de los valores de tensión y corriente de falla. La forma como se determinan estos dos parámetros varía de acuerdo con el tipo de falla. Se debe tener presente que para determinar la estimación de la sección en falla se desprecia el efecto de magnetización de las líneas y no se tienen en cuenta las cargas conectadas al sistema.

1. Falla monofásica línea-tierra

Fase A-tierra

$$Z_{ml} = \frac{V_{am}}{I_{amr}} \quad (3.1)$$

y

$$X_{ml} = \text{Im}(Z_{ml}) \quad (3.2)$$

donde:

Z_{ml} es la impedancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

X_{ml} es la reactancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

La reactancia modificada para la primera sección entre los nodos M y R se define como:

$$X_{mr}^m = X_{1mr} + \frac{X_{0mr} - X_{1mr}}{3} \quad (3.3)$$

Donde:

X_{0mr} es la reactancia de secuencia cero entre el nodo M y R .

X_{1mr} es la reactancia de secuencia positiva entre el nodo M y R .

Si la reactancia modificada X_{mr}^m , es mayor que la reactancia equivalente, la falla se encuentra en la primera sección del sistema. Si la reactancia modificada es menor que la reactancia equivalente entonces, la falla se encuentra ubicada más allá del nodo R y se continúa determinando la reactancia de secuencia de las siguientes secciones para determinar la sección en falla.

La reactancia modificada de la segunda sección se calcula empleando la ecuación (3.3). Esta reactancia se suma a la reactancia de la primera sección para obtener una reactancia total modificada. Si la nueva reactancia modificada es menor que la reactancia equivalente entonces, la falla se encuentra más allá de las dos primeras secciones. El proceso continúa hasta que la reactancia total modificada es mayor que la reactancia equivalente. La sección estimada se mencionarán a partir de ahora como X y $X + 1$ ⁴.

⁴Los nodos X y $X + 1$ hacen mención a la sección estimada.

La localización aparente para una falla de la fase B -tierra o para una falla de la fase C -tierra se determinan de forma similar.

2. Falla bifásica línea-línea-tierra

Fase A-B-tierra

La impedancia equivalente se define como:

$$Z_{m2g} = \frac{V_{bm} - V_{cm}}{I_{bmr} - I_{cmr}} \quad (3.4)$$

y

$$X_{m2g}^m = Im(Z_{m2g}) \quad (3.5)$$

Donde:

Z_{m2g} es la impedancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

X_{m2g} es la reactancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

La reactancia modificada para la primera sección entre los nodos M y R se define como:

$$X_{mr} = X_{1mr} \quad (3.6)$$

Donde:

X_{1mr} es la reactancia de secuencia positiva entre el nodo M y R .

La reactancia equivalente se compara con la reactancia modificada de cada sección. Si la reactancia modificada es mayor que la reactancia equivalente, la falla se encuentra en la primera sección del sistema. Si la reactancia modificada es menor entonces, la falla se encuentra más allá del nodo R . Se continúa determinando la reactancia de secuencia de las siguientes secciones para determinar la sección en falla.

Se toma la reactancia de secuencia de la segunda sección y se suma a la reactancia de la primera sección para obtener nueva reactancia total modificada. Si la nueva reactancia modificada es menor que la reactancia equivalente, la falla se encuentra más allá de las dos primeras secciones. El proceso continúa hasta que la reactancia total es mayor que la reactancia aparente. Los nodos de la sección estimada se mencionaran a partir de ahora como X y $X + 1$

Las localizaciones aparente para las fallas de las fases C y la fase A a tierra y las fases A y la fase B a tierra se determinan de forma similar.

3. Falla bifásica línea-línea

El procedimiento usado para determinar la sección donde ocurrió la falla para fallas de tipo bifásicas línea-línea es el mismo usado para fallas de tipo bifásica línea-línea-tierra.

4. Falla trifásica

La impedancia equivalente se define como:

$$Z_{m3} = \frac{V_{1m}}{I_{1mr}} \quad (3.7)$$

y

$$X_{m3} = \text{Im}(Z_{m3}) \quad (3.8)$$

donde:

Z_{m3} es la impedancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

X_{m3} es la reactancia equivalente entre el nodo M y el nodo de la falla.

La reactancia modificada para la primera sección entre los nodos M y R se define como:

$$X_{mr}^m = X_{1mr} \quad (3.9)$$

donde:

X_{1mr} es la reactancia de secuencia positiva entre el nodo M y R .

La reactancia equivalente se compara con la reactancia de secuencia positiva de cada sección. Si la reactancia modificada es mayor que la reactancia equivalente, la falla se encuentra en la primera sección del sistema. Si la reactancia modificada es menor entonces, la falla se encuentra más allá del nodo R . Se continúa determinando la reactancia de secuencia de las siguientes secciones para determinar la sección en falla.

Se toma la reactancia de secuencia de la segunda sección y se suma a la reactancia de la primera sección, para obtener la reactancia total. Si la nueva reactancia de secuencia es menor que la reactancia equivalente entonces la falla se encuentra más allá de las dos primeras secciones. El proceso continúa hasta que la reactancia total de secuencia es mayor que la reactancia equivalente. Los nodos de la sección estimada se mencionarán a partir de ahora como X y $X+1$.

3.5. DESARROLLO DEL SISTEMA RADIAL EQUIVALENTE

El sistema se simplifica modificando el sistema original dependiendo de la sección donde se ha estimado la falla. En esta modificación se desprecia el efecto de las corrientes que magnetizan la línea.

En el sistema de distribución mostrado en la figura 3.2 se han definido dos fallas en distintos puntos, si se toma cada tipo de falla de forma independiente para el caso de la falla F la localización de la falla se ha determinado en la sección de los nodos X y $X+1 (= Y)$. El sistema radial de distribución con ramificaciones se transforma en un sistema radial equivalente sin ramificaciones y las cargas en las ramificaciones se concentran en el nodo de unión con el alimentador principal del

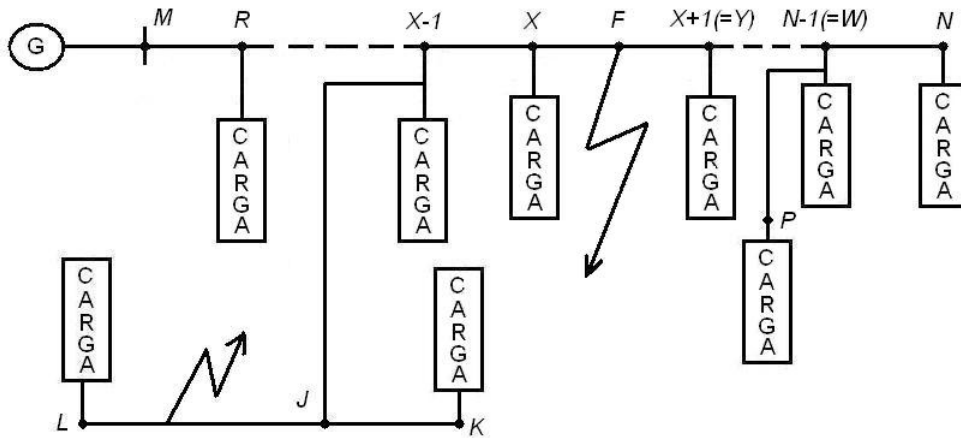


Figura 3.2: Sistema de distribución con 2 posibles fallas en F y $F1$

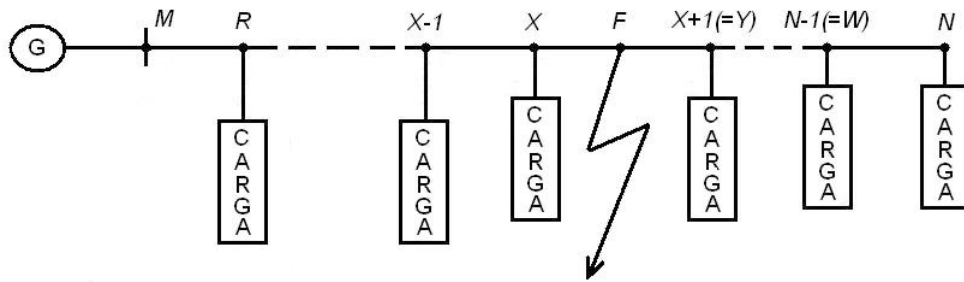


Figura 3.3: Diagrama simplificado para una falla en F

sistema. El sistema modificado se muestra en la figura 3.3.

Si la localización aparente es en una ramificación como el caso de la falla $F1$, el sistema se modifica como se muestra en la figura 3.4. La carga en el nodo K se consolida con la carga en el nodo J y todas las cargas entre los nodos X y N se consolidan con las cargas en el nodo $X - 1$.

3.6. MODELADO DE LAS CARGAS

El modelo utilizado para representar matemáticamente las cargas depende de la tensión aplicada a la carga. Las constantes de carga definen la relación tensión-admitancia. Éstas se estiman a partir de las tensiones y corrientes de la carga en prefalla. El proceso se describe en los siguientes pasos:

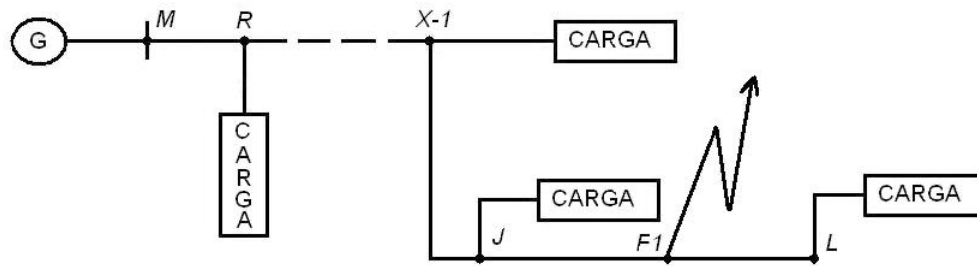


Figura 3.4: Diagrama simplificado para una falla en $F1$

- ◇ Selección del modelo de carga.
- ◇ Estimación de las corrientes y tensiones de prefalla en todos los nodos antes de X y en el nodo N .
- ◇ Estimación de las constantes de carga.

3.6.1. Selección del modelo de carga

Algunos modelos no-lineales han sido sugeridos para representar cargas en estudios de sistemas de transmisión [6]. Estos mismos conceptos se aplican en estudios relacionados con sistemas de distribución.

En esta técnica se emplea el modelo de tipo respuesta estática. Las cargas se representan como impedancias paralelas variables con respecto al valor de la tensión en el nodo respectivo.

- Cargas monofásica

Una carga monofásica se modela como una falla monofásica a tierra, con una impedancia de falla igual a la impedancia de carga. Por ejemplo, para el caso de una carga monofásica conectada a la fase A, la representación se realiza conectando las redes de secuencia a través de una impedancia de falla igual a tres veces la impedancia de carga, como se muestra en la figura 3.5.

- Cargas bifásicas

Una carga bifásica se modela como una falla línea-línea, con la impedancia de falla igual a la impedancia de carga.

- Cargas trifásicas

Las cargas trifásicas se asumen como cargas balanceadas y se modelan como una falla trifásica. Para una carga sin conexión a tierra, la red de secuencia cero se convierte en un circuito abierto.

El modelo de respuesta estática representa las admitancias de carga a través de la siguiente ecuación:

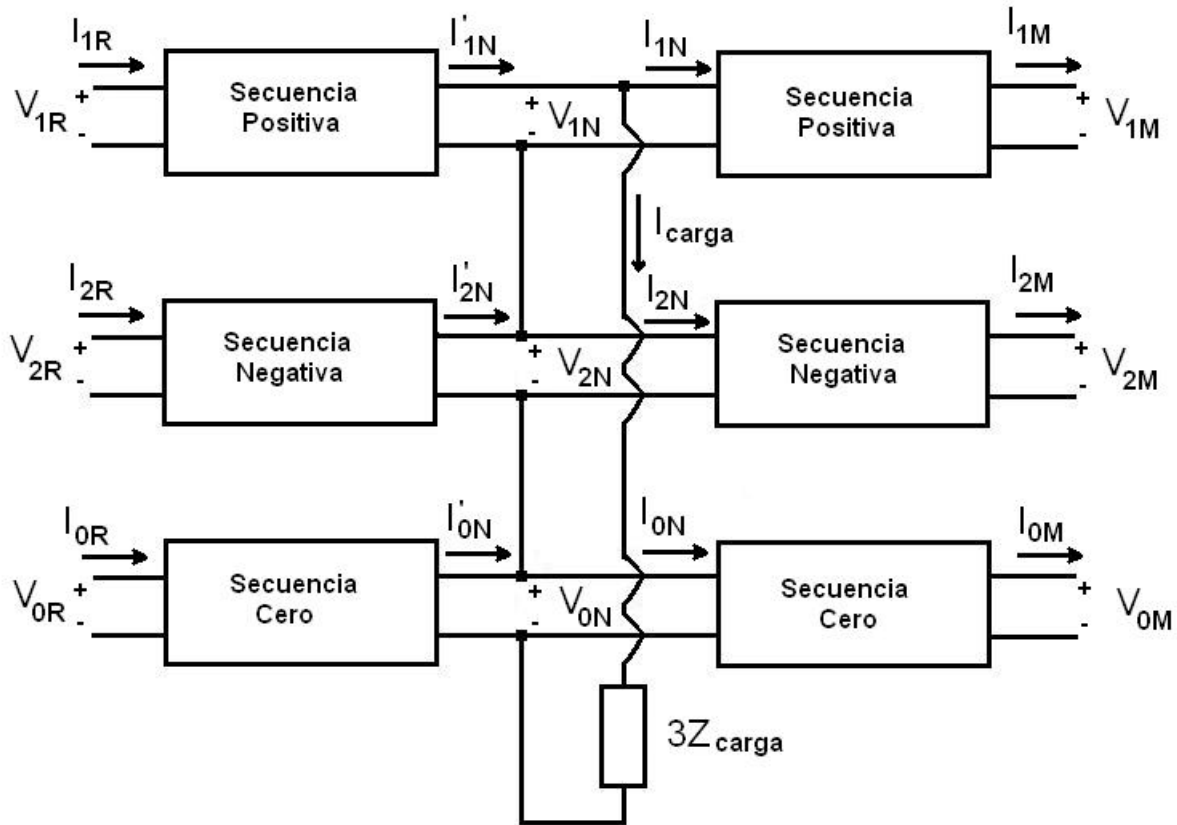


Figura 3.5: Diagrama de un sistema en secuencia con una carga instalada en la fase A del nodo N

$$Y_r = (G_r |V_r|^{n_p-2} + jB_r |V_r|^{n_q-2}) \quad (3.10)$$

donde:

Y_r es la impedancia de carga.

G_r es la constante proporcional de la conductancia de la carga.

B_r es la constante proporcional de la susceptancia de la carga.

Los valores de n_p y n_q usados para los tres tipos de cargas se definen como⁵:

$n_p = n_q = 0$ para cargas de potencia constante.

$n_p = n_q = 1$ para cargas de corriente constante.

$n_p = n_q = 2$ para cargas de impedancia constante.

⁵Los valores de las constantes de carga empleados para las pruebas difieren de los comumente usados. En el capítulo 5 se especifican los valores usados.

3.6.2. Estimación de los valores de tensión y corriente de prefalla

Las tensiones y corrientes en los terminales de la sección mostrada en la figura 3.6 se expresan como [5, 4]:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -B_{mr} \\ C_{mr} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_{mr} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

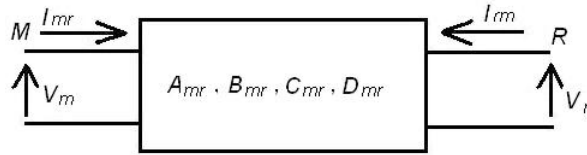


Figura 3.6: Línea de distribución entre los nodos M y R

Las corrientes de carga en prefalla en el nodo R se obtienen teniendo presente:

- Carga monofásica

Las impedancias de carga de prefalla se calculan a partir de la corriente aparente definida por la carga S_r .

$$|Z_r| = \frac{|V_r|^2}{|S_r|} \quad (3.12)$$

La admitancia de carga de prefalla Y_r y la corriente de secuencia se estiman usando las ecuaciones (3.13) y (3.14).

$$Y_r = \frac{1}{Z_r} \quad (3.13)$$

$$I_{0r} = I_{1r} = I_{2r} = \frac{V_{0r} + V_{1r} + V_{2r}}{3Z_r} \quad (3.14)$$

- Carga bifásica

Las corrientes de carga en prefalla I_r de la fase B y C en el nodo R se definen como:

$$I_r = \frac{V_{rBC}}{Z_r} \quad (3.15)$$

Las corrientes de secuencia de prefalla para la carga se calculan a partir de las corrientes de línea, las cuales se obtienen a partir de las corrientes de carga.

- Carga trifásica

Las cargas trifásicas se asumen balanceadas. La admitancia de carga se calcula de manera similar a una carga monofásica. Las corrientes de secuencia en prefalla de una carga trifásica en el nodo R se definen como:

$$I_{0r} = \frac{V_{0r}}{Z_r} \quad , \quad I_{1r} = \frac{V_{1r}}{Z_r} \quad y \quad I_{2r} = \frac{V_{2r}}{Z_r} \quad (3.16)$$

En la figura 3.7 se muestra la secuencia que se realiza para determinar la corriente que se inyecta desde el nodo R al siguiente nodo.

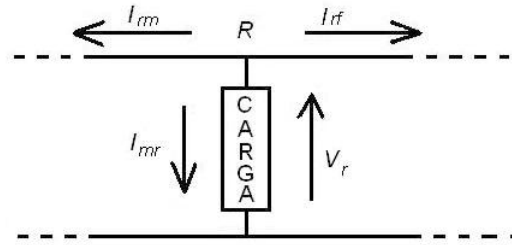


Figura 3.7: Tensiones y corrientes en el nodo R

$$I_{rf} = I_{rm} - I_r \quad (3.17)$$

donde:

I_{rf} es la corriente que fluye desde el nodo R a la falla.

I_r es la corriente de carga en el nodo R .

Los valores de tensión y corriente de prefalla en el nodo N se estiman asumiendo que todas las cargas después del nodo X están consolidadas en el nodo N como se muestran en la figura 3.8.

Las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo N se calculan usando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Las admitancias de secuencia se definen como:

$$Y_{n0} = \frac{I_{n0}}{V_{n0}} \quad , \quad Y_{n1} = \frac{I_{n1}}{V_{n1}} \quad y \quad Y_{n2} = \frac{I_{n2}}{V_{n2}} \quad (3.19)$$

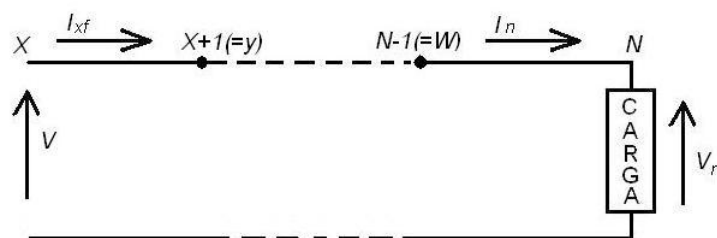


Figura 3.8: Tensiones y corrientes en prefalla en el nodo N y X

3.6.3. Estimación de las constantes de carga

En todos los nodos ubicados antes del nodo X se estiman las constantes de carga G_r y B_r , a partir de la tensión de prefalla, la admitancia de carga y los valores apropiados de las constantes de la respuesta de carga n_p y n_q . Los valores de n_p y n_q se definen en la ecuación (3.10).

Las constantes de carga en el último nodo se estiman a partir del valor de la tensión y de las admitancias obtenidas a partir de las ecuaciones (3.18), (3.19) y (3.10).

3.7. ESTIMACIÓN DE LAS TENSIONES Y CORRIENTES DE FALLA

Esta sección describe el procedimiento para estimar las tensiones y corrientes de secuencia en el punto donde ocurrió la falla, nodo F .

Antes de estimar los valores de tensión y corriente en el último nodo, se deben estimar los valores de tensión y corriente en el nodo X .

Las corrientes de secuencia de la carga en el nodo R durante el estado de falla se determinan empleando el modelo de respuesta estática. La corriente en el siguiente nodo se obtiene a partir de la ecuación (3.17), este procedimiento se repite hasta obtener las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo X .

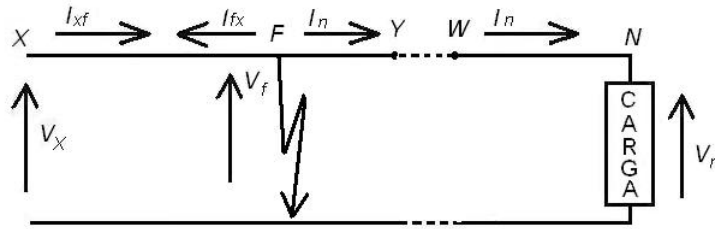
Las tensiones y corrientes de los nodos localizados después del nodo X deben ser referenciadas dependiendo del tipo de falla según la tabla 3.1 [5, 4].

Los valores de tensión y corriente de secuencia en el nodo F durante la falla, se determinan asumiendo que las cargas ubicadas después del nodo X están concentradas en el último nodo, como se muestra en la figura 3.9.

Los valores de tensión y corriente en el nodo F se expresan como una función de la tensión y corriente en el nodo X como se muestra en la ecuación (3.20).

Tabla 3.1: Selección de la fase de referencia para los diferentes tipos de fallas

Fase A como referencia	Fase B como referencia	Fase C como referencia
A-tierra	B-tierra	C-tierra
B-C-tierra	C-A-tierra	A-B-tierra
B-C	C-A	A-B
trifásica		


 Figura 3.9: Tensiones y corrientes en falla en el nodo F y N

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ sC_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

donde:

s es la distancia al nodo F desde el nodo X , la cual se expresa como una fracción de la longitud de la sección entre los nodos X y $X + 1 (= Y)$ dado por:

$$l_{xf} = sL_{xy} \quad (3.21)$$

B_{xy} y C_{xy} son las constantes de la sección entre los nodos X y $X + 1 = (Y)$.

La secuencia de tensiones y corrientes en los nodos N y F , durante la falla están dados como:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-s)B_{xy} \\ -(1-s)C_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Organizando las ecuaciones anteriormente mostradas.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

donde:

K' s son constantes complejas y se definen como:

$$\begin{aligned}
K_a &= D_e + B_e C_{xy} \\
K_b &= -B_e C_{xy} \\
K_c &= -B_e - D_e B_{xy} \\
K_d &= D_e B_{xy} \\
K_e &= C_e + A_e C_{xy} \\
K_f &= -A_e C_{xy} \\
K_g &= -A_e C_{xy} \\
K_h &= C_e B_{xy}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

La corriente en el nodo F , I_{fn} que se muestra en la figura 3.7, esta dada por:

$$I_{fn} = -I_{fx} - I_f \tag{3.25}$$

Sustituyendo I_{fn} en la ecuación (3.23) se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Sustituyendo V_f y I_{fx} de la ecuación (3.20) en la ecuación (3.26) y organizando el resultado de la ecuación se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ sC_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} + I_f \begin{bmatrix} K_c & sK_d \\ K_g & sK_h \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

Sustituyendo I_n de la ecuación (3.19) y organizando la ecuación (3.27), se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -V_n Y_n \end{bmatrix} + I_f \begin{bmatrix} K_c + sK_d \\ K_g + sK_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ -sC_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

Organizando la ecuación (3.28) y despreciando los términos de segundo orden y los de órdenes superiores⁶. Se obtiene la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} 1 & K_c + sK_d \\ -Y_n & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_c + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

donde:

⁶Debido a que el valor de s es menor a la unidad, el autor para facilitar los calculos desprecia los términos de s cuyo orden es superior a dos.

$$\begin{aligned}
K_i &= K_b + K_c C_{xy} \\
K_j &= K_d - K_a B_{xy} \\
K_k &= K_f - K_g C_{xy} \\
K_l &= K_h - K_e B_{xy}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Organizando las ecuaciones se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} K_g + sK_h & K_c + sK_d \\ Y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_c + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix}}{K_g - sK_h + Y_n(K_c - sK_d)} \tag{3.31}$$

Despreciando los términos de segundo orden y superiores, la ecuación (3.31) se resume en:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \frac{1}{K_v - sK_w} \begin{bmatrix} K_m + sK_n & sK_p \\ K_q + sK_r & K_v + sK_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

donde:

K' s son constantes complejas y se definen como:

$$\begin{aligned}
K_m &= K_g K_a - K_c K_e \\
K_n &= K_h K_a + K_g K_i - K_d K_e - K_c K_k \\
K_p &= K_h K_c + K_g K_j - K_d K_g - K_c K_l \\
K_q &= Y_n K_a + K_e \\
K_r &= Y_n K_i + K_k \\
K_u &= Y_n K_j + K_l \\
K_v &= Y_n K_c + K_g \\
K_w &= Y_n K_d + K_h
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Los parámetros K_m y K_w se determinan a partir de la ecuación (3.33), esta usa el valor de la tensión en el nodo N y el de la corriente de falla en el nodo F . Los valores de tensión y corriente de secuencia en el nodo F y los de secuencia en el nodo N se obtienen usando las ecuaciones (3.20) y (3.22) como se muestra:

$$\begin{aligned}
V_{0f} &= V_{0x} - sB_{0xy}I_{0xy} \\
V_{1f} &= V_{1x} - sB_{1xy}I_{1xy} \\
V_{2f} &= V_{2x} - sB_{2xy}I_{2xy} \\
I_{0f} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}}(K_{0q} + sK_{0r})V_{0x} + (K_{0v} + sK_{0u})I_{0xf} \\
I_{1f} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}}(K_{1q} + sK_{1r})V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u})I_{1xf} \\
I_{2f} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}}(K_{2q} + sK_{2r})V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u})I_{2xf}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
V_{0n} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}}(K_{0m} + sK_{0n})V_{0x} + sK_{0p}I_{0xf} \\
V_{1n} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}}(K_{1m} + sK_{1n})V_{1x} + sK_{1p}I_{1xf} \\
V_{2n} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}}(K_{2m} + sK_{2n})V_{2x} + sK_{2p}I_{2xf}
\end{aligned} \tag{3.35}$$

3.8. ESTIMACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA

Este procedimiento es utilizado para calcular s , que es la distancia desde el nodo X al punto de falla, expresada como una fracción de la longitud de la sección.

- Fallas monofásicas línea-tierra

El valor de la tensión de fase en la cual ocurrió la falla V_f , esta dada por la siguiente ecuación:

$$V_f = I_f R_f \tag{3.36}$$

Donde:

I_f es la corriente de falla

R_f es la resistencia de falla

Expresando la tensión de fase y la corriente de falla en términos de las componentes de secuencia y organizando los términos se tiene:

$$\frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} = R_f \tag{3.37}$$

Tomando la componente imaginaria a ambos lados de la ecuación anterior se tiene:

$$Im\left(\frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}}\right) = 0 \tag{3.38}$$

Substituyendo las tensiones y corrientes de secuencia de la ecuación (3.34), racionalizando y despreciando los términos de orden superior a dos ⁷:

$$Im\left(\frac{K_A + sK_B}{K_C + sK_D}\right) = 0 \quad (3.39)$$

Donde:

$$\begin{aligned} K_A &= (V_{0x} + V_{1x} + V_{2x})(K_{0v}K_{1v}K_{2v}) \\ K_B &= [(V_{0x} + V_{1x} + V_{2x})(K_{1v}(K_{2v}K_{0w} + K_{0v}K_{2w}) + (K_{1w}K_{0v})K_{2v})] - \\ &\quad [(B_{0xy}I_{0xf} + B_{1xy}I_{1xf} + B_{2xy}I_{2xf})(K_{0v}K_{1v}K_{2v})] \\ K_C &= [(K_{1v}K_{2v})(K_{0q}V_{0x} + K_{0v}I_{0xf})] + \\ &\quad [(K_{2v}K_{0v})(K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf})] + \\ &\quad [(K_{0v}K_{1v})(K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf})] \\ K_D &= [(K_{1v}K_{2v})(K_{0r}V_{0x} + K_{0v}I_{0xf}) + (K_{1v}K_{2w} + K_{1w}K_{2v})(K_{0q}V_{0x}K_{0v}I_{0x})] + \\ &\quad [(K_{2v}K_{2v})(K_{1r}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf}) + (K_{2v}K_{0w} + K_{2w}K_{0v})(K_{1q}V_{1x}K_{1v}I_{1x})] + \\ &\quad [(K_{0v}K_{1v})(K_{2r}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf}) + (K_{0v}K_{1w} + K_{0w}K_{1v})(K_{2q}V_{2x}K_{2v}I_{2x})] \end{aligned} \quad (3.40)$$

Los parámetros K_A a K_D se expresan en términos de sus componentes real e imaginaria como se muestra:

$$\begin{aligned} K_A &= K_{AR} + jK_{AI} \\ K_B &= K_{BR} + jK_{BI} \\ K_C &= K_{CR} + jK_{CI} \\ K_D &= K_{DR} + jK_{DI} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Donde:

$$\begin{aligned} K_{AR} &= ImK_A \\ K_{AI} &= ReK_A \\ K_{BR} &= ImK_B \\ K_{BI} &= ReK_B \\ K_{CR} &= ImK_C \\ K_{CI} &= ReK_C \\ K_{DR} &= ImK_D \\ K_{DI} &= ReK_D \end{aligned} \quad (3.42)$$

Substituyendo la ecuación anterior en la ecuación (3.39) y racionalizando el resultado

$$Im\left(\frac{[(K_{AR} + sK_{BR}) + j(K_{AI} + sK_{BI})][(K_{CR} + sK_{DR}) - j(K_{CI} + sK_{DI})]}{[(K_{CR} + sK_{DR}) + j(K_{CI} + sK_{DI})][(K_{CR} + sK_{DR}) - (K_{CI} + sK_{DI})]}\right) \quad (3.43)$$

⁷Debido a que el valor de s es menor a la unidad, el autor para facilitar los calculos desprecia los términos de s cuyo orden es superior a dos.

La ecuación (3.43) se simplifica dando como resultado

$$(K_{AI} + sK_{BI})(K_{CR} + sK_{DR}) - (K_{AR} + sK_{BR})(K_{CI} + sK_{DI}) = 0 \quad (3.44)$$

Despreciando los términos de orden superior a dos, se obtiene:

$$s = \frac{K_{AR}K_{CI} - K_{AI}K_{CR}}{(K_{CR}K_{BI} - K_{CI}K_{BR}) + (K_{DR}K_{AI} - K_{DI}K_{AR})} \quad (3.45)$$

El valor de s se determina en el siguiente proceso iterativo:

1. Los parámetros K_n , K_m y K_p se determinan a partir de la ecuación (3.33).
 2. Los parámetros K_q a K_w definidos a partir de la ecuación (3.33), se calculan usando en la primera iteración la admitancia de prefalla, resultado de la concentración de las cargas en el nodo N .
 3. Los parámetros K_A , K_B , K_C y K_D se determinan con la ecuación (3.40), usando los valores de K_q , K_r , K_u , K_v y K_w calculados en el paso anterior.
 4. El valor de s es determinado con la ecuación (3.45) a partir de los parámetros K_A , K_C , K_B y K_D obtenidos en el paso 3.
 5. La tensión en el nodo N se obtiene empleando la ecuación (3.35), los parámetros calculados en los pasos 1-2 y el valor de s determinado en el paso 4.
 6. La nueva tensión en el nodo N y la ecuación (3.10) son usadas para obtener las admitancias de secuencia actualizadas de la carga consolidada.
 7. Los parámetros K_q , K_r , K_u , K_v y K_w se actualizan a partir de los nuevos valores de la admitancia consolidada en el nodo N calculados en el paso 6.
 8. Los parámetros K_A , K_B , K_C y K_D se actualizan empleando los valores de K_q , K_r , K_u , K_v y K_w determinados en el paso 7.
 9. El valor de s se obtiene empleando la ecuación (3.45) y los valores actualizados de los parámetros K_A , K_B , K_C y K_D calculados en el paso 8.
 10. La convergencia del valor de s es chequeada en cada iteración. Si la solución no converge entonces se actualiza la tensión en el nodo N . Empleando los parámetros determinados en los pasos 1 a 7 y los valores de s calculados en el paso 9. El procedimiento se repite desde el paso 6, hasta obtener la solución.
- Fallas bifásica línea-línea-tierra y línea-línea
- La resistencia de falla R_f para una falla bifásica línea-línea-tierra se expresa como:

$$\left(\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} \right) = R_f \quad (3.46)$$

Para una falla bifásica línea-línea la resistencia de falla se expresa igual a un medio de la resistencia de falla:

$$\left(\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} \right) = \frac{R_f}{2} \quad (3.47)$$

Ya que R_f es resistiva la ecuación (3.46) y (3.47) se toman como:

$$Im \left(\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} \right) = 0 \quad (3.48)$$

Sustituyendo las tensiones y corrientes de secuencia de la ecuación (3.34) en la ecuación anterior y despreciando los términos de orden superior a dos:

$$Im \left(\frac{K_{A2} + sK_{B2}}{K_{C2} + K_{D2}} \right) = 0 \quad (3.49)$$

donde:

$$\begin{aligned} K_{A2} &= (V_{1x} - V_{2x})(K_{1v}K_{2v}) \\ K_{B2} &= (V_{1x} - V_{2x})(K_{1v}K_{2w} + K_{1w}K_{2v}) - (B_{1xy}I_{1xf} - B_{2xy}I_{2xf})(K_{1v}K_{2v}) \\ K_{C2} &= K_{2v}(K_{1q}V_{1x} + K_{1v}I_{1xf}) + K_{1v}(K_{2q}V_{2x} + K_{2v}I_{2xf}) \\ K_{D2} &= [K_{2v}(K_{1r}V_{1x} + K_{1u}I_{1xf}) + K_{2w}(K_{1q}V_{1x}K_{1v}I_{1x})] - \\ &\quad [K_{1v}(K_{2r}V_{2x} + K_{2u}I_{2xf}) + K_{1w}(K_{2q}V_{2x}K_{2v}I_{2x})] \end{aligned} \quad (3.50)$$

Para determinar la distancia s se hace de forma iterativa, siguiendo el procedimiento empleado para fallas monofásicas línea-tierra.

- Fallas trifásica balanceada

La resistencia de falla R_f para una falla trifásica balanceada, se expresa como:

$$\frac{V_{1f}}{I_{1f}} = R_f \quad (3.51)$$

Como R_f es resistiva se tiene

$$Im \left(\frac{V_{1f}}{I_{1f}} \right) = R_f \quad (3.52)$$

Substituyendo las tensiones y corrientes de secuencia de la ecuación (3.34), se obtiene:

$$Im \left(\frac{(V_{1x} - sB_{1xy}I_{1xf})(K_{1v} + sK_{1w})}{(K_{1q} + sK_{1r})V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u})I_{1xf}} \right) = 0 \quad (3.53)$$

Despreciando los términos de orden superior a dos:

$$Im \left(\frac{K_{A3} + sK_{B3}}{K_{C3} + sK_{D3}} \right) = 0 \quad (3.54)$$

Donde:

$$\begin{aligned}K_{A3} &= V_{1x} K_{1v} \\K_{B3} &= V_{1x} K_{1w} - B_{1xy} I_{1xf} K_{1v} \\K_{C3} &= K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf} \\K_{D3} &= (K_{1r} V_{1x} + K_{1u} I_{1xf})\end{aligned}\tag{3.55}$$

Para determinar la distancia s se hace de forma iterativa, siguiendo el procedimiento es usado para fallas monofásicas línea-tierra y para fallas bifásicas línea-línea-tierra y bifásicas línea-línea.

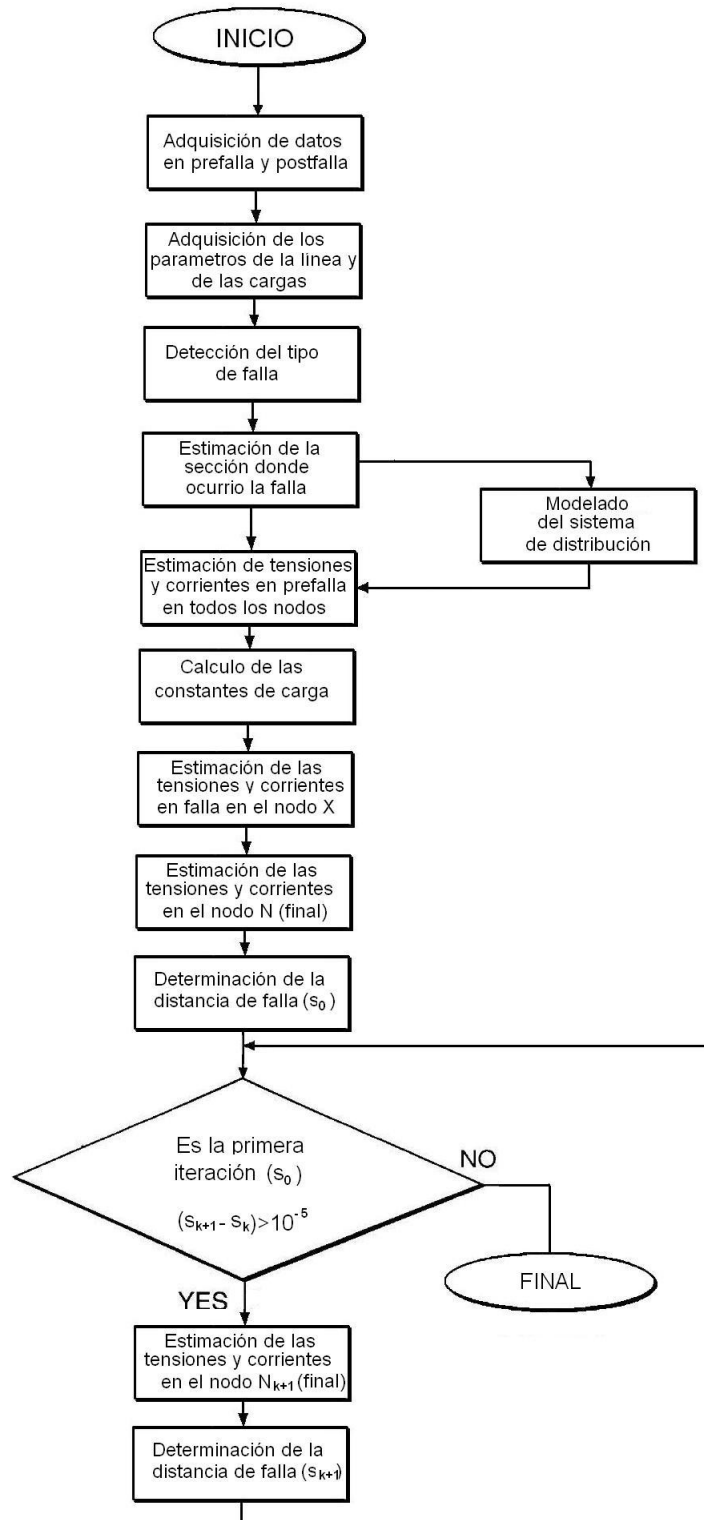


Figura 3.10: Diagrama de flujo del método.

Capítulo 4

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO ALGORÍTMICO

4.1. INTRODUCCIÓN

La herramienta software desarrollada se basa en la técnica descrita en el capítulo anterior. La implementación se realizó en MATLAB con una interfaz gráfica que brinda un fácil y sencillo uso en la localización de fallas. En este capítulo se muestran el alcance y funcionamiento de las rutinas más importantes de la herramienta.

4.2. FUNCIÓN LECTORDL

4.2.1. Alcance de la rutina

Con esta rutina se almacenan en matrices los datos característicos del sistema tales como los parámetros de la línea y los datos de las cargas, que se encuentran consignados inicialmente en archivos de texto.

4.2.2. Funcionamiento de la rutina

El proceso está dividido en dos partes independientes que son:

- **Almacenamiento de los parametros de la línea:** Los parámetros característicos de la línea como son las impedancias de secuencia y las longitudes de las secciones se almacenan en forma matricial. Adicionalmente, se realiza una copia temporal llamada “Archivo Datos Línea Temporal.txt”. Esta copia hace parte del grupo de archivos temporales creados con el fin de verificar la información almacenada.
- **Almacenamiento de los datos de las características de la carga:** Este procedimiento es similar al anterior, aunque se realiza un cambio en la forma como se especifican las fases a las que se conecta la carga, inicialmente definidas por medio de letras. Para el cambio se elaboró una codificación numérica que asigna un número a los diferentes tipos de conexión de

las cargas.

4.3. FUNCIÓN CAMINOS

4.3.1. Alcance de la rutina

Identifica las diferentes trayectorias de los ramales que conforman el sistema de distribución.

4.3.2. Funcionamiento de la rutina

Toma el nodo inicial e identifica que nodos están conectados a este, a través de tramos de línea. Estas secciones conectadas al nodo implican un número definido de ramificaciones.

Después de identificar los nodos conectados al nodo inicial, se determinan los nodos conectados a estos. De esta forma se generan las trayectorias de las secciones consecutivas que forman los ramales del sistema.

4.4. FUNCIÓN DETECCIÓN 4_4

4.4.1. Alcance de la rutina

Dentro del proceso de localización de la falla se hace una estimación inicial de las secciones donde posiblemente ocurrió la falla.

4.4.2. Funcionamiento de la rutina

La rutina está dividida en cuatro bloques independientes según el tipo de falla. En cada bloque se determina la reactancia equivalente y la reactancia modificada, utilizando la formulación respectiva.

Después de determinar la reactancia equivalente y la reactancia modificada de la primera sección se comparan. Si la reactancia modificada es menor entonces, la falla ocurrió más adelante, mientras que si la reactancia equivalente es mayor la falla ocurrió en esta sección.

Para el caso en el que la reactancia modificada sea menor que la reactancia equivalente, se determina la reactancia modificada de la siguiente sección y se suma a la anterior. Con el procedimiento anterior se ha creado una nueva reactancia modificada, la cual se compara con la reactancia equivalente. Si la reactancia modificada es mayor que la reactancia equivalente, se guardan los nodos de sección dentro de una matriz. Si la reactancia modificada resulta menor que la impedancia equivalente se repite el proceso anterior. Si el proceso termina y la reactancia modificada aun es menor a la reactancia equivalente no es posible localizar la ubicación de la falla para la trayectoria considerada.

4.5. FUNCIÓN CONSOLIDADOR

4.5.1. Alcance de la rutina

Durante el desarrollo del proceso de localización de la falla es necesario modificar el sistema analizado. Convertir el sistema radial con cargas distribuidas y ramificaciones en un sistema radial con cargas concentradas. La modificación depende de la estimación de la sección fallada, es por esto que para cada estimación que se realice existirá una configuración diferente del sistema radial. A cada nueva configuración se llama camino crítico. En esta rutina se determinarán los caminos críticos teniendo en cuenta las estimaciones de las secciones falladas.

4.5.2. Funcionamiento de la rutina

En esta rutina se concentran las cargas conectadas a los ramales que no pertenecen al camino crítico al nodo común. Para las cargas de los ramales que se encuentran ubicados después de la sección fallada, se concentran todas en el ultimo nodo del camino crítico.

El programa toma el nodo donde está conectada la carga y determina si este pertenece al camino crítico, si no es así entonces se localiza el punto de bifurcación entre el camino critico y el ramal. Al hallar el nodo común se cambia en la matriz que contiene la información de las cargas el nombre del nodo al cual esta conectado.

Después de haber realizado la concentración de las cargas, se deben tomar todas las cargas ubicadas después de la sección estimada y consolidarlas en el último nodo del camino critico definido.

4.6. FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_6_3

4.6.1. Alcance de la rutina

Determinar las constantes de carga. Estas permiten calcular la impedancia de las cargas para un nivel de tensión determinado.

4.6.2. Funcionamiento de la rutina

Este proceso se realiza para cada camino crítico. Se toma cada sección que compone el camino crítico y se representa como un cuadripolo en secuencia positiva, negativa y cero. Estos se determinan a partir de los parámetros de la línea.

Se identifican los nodos entre los cuales está conectado el cuadripolo inicial. A partir de los valores de tensión y corriente en el nodo inicial, se determina la tensión y la corriente en el nodo final del cuadripolo.

Posteriormente se determina que parte de la corriente en el nodo final del cuadripolo es consumida por las cargas. Conociendo la corriente que se inyecta al nodo y la corriente consumida por la carga, se calcula la corriente que va a los ramales. El proceso es repetitivo y se realiza para todos los cuadripolos que pertenecen al camino crítico.

A partir del cálculo de la tensión y las cargas instaladas en cada nodo, se determinan las admittancias de carga, seguidamente se calculan las constantes de carga y se almacenan.

El procedimiento antes mencionado se usa para los nodos antes de la sección estimada. Para el último nodo del camino crítico el proceso es distinto y por tanto se realiza en un bloque independiente.

Para calcular las tensiones y corrientes en el último nodo del camino crítico, se determina el cuadripolo equivalente desde la sección estimada hasta el nodo final.

4.7. FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_7

4.7.1. Alcance de la rutina

Esta rutina determina las tensiones y corrientes de secuencia en el estado de falla en los nodos antes de la sección estimada en falla. Para realizar este cálculo es necesario conocer las tensiones y corrientes en el nodo inicial en falla, además de las constantes de carga ya calculadas.

4.7.2. Funcionamiento de la rutina

Se toman los valores en estado estable de falla de tensión y corriente en el nodo inicial y los cuadripolos de secuencia, para determinar la tensión y corriente en el nodo final del cuadripolo.

Posteriormente se determina que parte de la corriente en el nodo final del cuadripolo es consumida por las cargas. Conociendo la corriente que se inyecta al nodo y la corriente consumida por la carga, se calcula la corriente que va a los ramales. El proceso es repetitivo y se realiza para todos los cuadripolos que pertenecen al camino crítico. Para determinar la corriente inyectada a las cargas se calculan las impedancias de cargas a partir de las constantes de carga y la tensión del respectivo nodo.

4.8. FUNCIÓN ESTIMACIÓN 4_8

4.8.1. Alcance de la rutina

Determinar el porcentaje de la longitud de la sección estimada a la cual ocurrió la falla. Para este proceso se toman los valores de tensión y corriente en el primer nodo de la sección estimada y los parámetros de secuencia de la línea.

4.8.2. Funcionamiento de la rutina

Inicialmente se definen las constantes $K_a, K_b, K_c, \dots, K_h$ las cuales representan los parámetros en cuadripolos entre el nodo de falla y el nodo N^1 . El nodo de falla es un nodo virtual que depende del valor s , por tanto estas constantes están en función de s^2 .

Las variables $K_m, K_n, K_p, K_q, \dots, K_w$ representan los cuadripolos entre el nodo n y el nodo X . Para determinar dichas constantes es necesario emplear las constantes $K_a, K_b, K_c, \dots, K_h$ y la admitancia de carga total consolidada del nodo n . En la primera iteración se usa la admitancia calculada en estado prefalla en “Estimación4_6_3”.

Utilizando las constantes $K_m, K_n, K_p, K_q, \dots, K_w$ y las tensiones en el nodo n , se calculan las constantes K_A, K_B, K_C, K_D . y con estas el valor de s .

Con la primera aproximación de s se determina la tensión en el nodo n , con este y las constantes de carga se determina la admitancia de carga consolidada en el nodo n .

Con el nuevo valor de admitancia en el nodo n se determinan las constantes $K_m, K_n, K_p, K_q, \dots, K_w$. y K_A, K_B, K_C, K_D , obteniendo la siguiente aproximación de s .

Este procedimiento es repetitivo y termina cuando cumpla alguno de los criterios de convergencia. Uno de los dos criterios de convergencia es la diferencia entre el valor anterior de s y el presente. El otro criterio de convergencia es por un número máximo de iteraciones.

$$|S_{k+1} - S_k| < 10^{-5}$$

$$\text{Máx}[itera] = 50000$$

¹ N es el último nodo del camino crítico.

² s es el valor en por ciento de la longitud de la sección estimada a la cual ocurrió la falla.

Capítulo 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Después de haber mostrado el método y la estructura del algoritmo implementado se prosigue con las pruebas del programa. El sistema de prueba es el utilizado por el autor [6]. El sistema se implementó en Matlab.

Inicialmente se muestra el sistema de distribución utilizado con todos sus parámetros. La forma como se determina el error y como se determina la distancia desde el nodo inicial. Cada tipo de falla se trata en una sección separada de este capítulo, mostrando los resultados para diferentes valores de resistencia de falla. En cada tabla se muestra el nodo donde se realizó la falla, la distancia desde el nodo inicial al nodo en falla, la distancia estimada por el programa y el error porcentual.

5.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA UTILIZADO

En la figura 5.1 se muestra el sistema de distribución utilizado para las pruebas. Entre los nodos 1 y 11 existen $37km$ de longitud. Esta línea está compuesta por diferentes tipos de conductores. Se instalaron cargas de diferentes tipos en los nodos del sistema excepto en los nodos 3, 4, 5, 10 y 20. Los nodos 3, 4 y 5 forman parte de una sección de $16km$. El nodo 20 divide en dos secciones la sección entre 18 y 21. El nodo 10 es la unión de dos secciones de diferente tipo de conductor.

5.2.1. Parámetros del sistema utilizado

Los datos de la línea se presentan por secciones. Los nodos a los que esta conectada cada sección, la distancia de cada sección y las impedancia del equivalente pi como se muestra en la tabla 5.1.

La información acerca de los datos de las cargas especifica en la tabla 5.2, se presenta el valor nominal de la carga, el nodo y las fases al que esta conectada la carga, como es la distribución en por ciento de la carga con respecto a los tres tipos de cargas básicos: motor, iluminacion y calentador.

Los datos del generador se presentan en por unidad como se muestra en la tabla 5.3 y la base para hacer la respectiva conversión a Ohms.

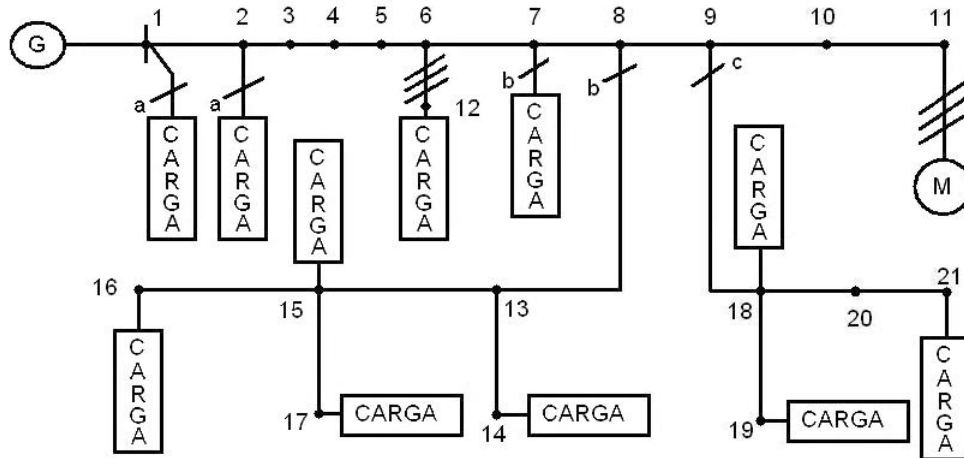


Figura 5.1: Sistema de distribución utilizado para las pruebas

El factor de potencia se determina dependiendo del tipo de carga. Se toma el valor en kVA para cada tipo de carga. Se determina la parte real e imaginaria de cada porción con el factor de potencia. Se suman las partes reales e imaginarias por separado y se determina el factor de potencia de la carga. en la tabla 5.4 se presentan los factores de potencia y las constantes de carga¹ para cada tipo de carga empleadas en el programa.

5.3. VARIABILIDAD DE LA REACTANCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA CON LA RESISTENCIA DE FALLA

El método de la componente reactiva deduce que la reactancia equivalente del sistema visto desde el nodo inicial es independiente del valor de la resistencia de falla. Pero el modelo con el que se deduce el método de la componente reactiva no tiene en cuenta las cargas instaladas a lo largo de la línea y emplea el modelo de línea corta.

En la técnica diseñada por Ratan Das se tiene en cuenta las cargas instaladas a lo largo de la línea y se usa el modelo pi para representar las secciones de la línea.

En la figura 5.2 se muestra un sistema pequeño con el que se demuestra la variabilidad de la reactancia equivalente del sistema con respecto a la resistencia de falla para una falla trifásica.

La impedancia equivalente del sistema en falla que se muestra en la figura 5.3 se define como:

$$Z_{eq}^f = \frac{R_f \times Z_{eq}}{R_f + Z_{eq}} \quad (5.1)$$

$$Z_{eq}^f = R_{eq} + jX_{eq}$$

Racionalizando la ecuación (5.1) y reemplazando Z_{eq} queda:

¹Los valores de n_p y n_q son proporcionados por Ratan Das en su tesis y difieren a los empleados de forma general.

Tabla 5.1: Parametros de línea del sistema de distribución

Sección		Distancia (km)	Impedancias Serie		Admitancia Paralela	
Nodo Inic.	Nodo Fin.		Pos. y Neg. (Ω/km)	Cero (Ω/km)	Pos. y Neg. (S/km)	Cero (S/km)
1	2	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
2	3	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
3	4	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
4	5	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
5	6	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
6	7	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
7	8	5,150	$0,5519 + j * 0,5390$	$0,7290 + j * 1,727$	$j * 3,59e - 6$	$j * 2,39e - 6$
8	9	2,414	$0,5519 + j * 0,5390$	$0,7290 + j * 1,727$	$j * 3,59e - 6$	$j * 2,39e - 6$
9	10	4,506	$0,5519 + j * 0,5390$	$0,7290 + j * 1,727$	$j * 3,59e - 6$	$j * 2,39e - 6$
10	11	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
6	12	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
8	13	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
13	14	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
13	15	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
15	16	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
15	17	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
9	18	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
18	19	2,414	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
18	20	3,219	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$
20	21	3,219	$7,3977 + j * 0,8998$	$7,3977 + j * 0,8998$	$j * 2,51e - 6$	$j * 2,51e - 6$

$$Z_{eq}^f = \frac{((R_f R_{eq})(R_f + R_{eq}) + R_f X_{eq}^2) + j(R_f X_{eq} R_{eq})}{(R_f + R_{eq}^2 + X_{eq}^2)} \quad (5.2)$$

Tomando la parte imaginaria de la ecuacion (5.2):

$$Im(Z_{eq}^f) = X_{eq}^f = \frac{(R_f X_{eq} R_{eq})}{(R_f + R_{eq}^2 + X_{eq}^2)} \quad (5.3)$$

En la ecuación (5.3) se muestra la forma como la reactancia equivalente del sistema depende de la resistencia de falla y de la impedancia equivalente de prefalla del sistema. Si la resistencia de falla es mucho mayor que la impedancia equivalente de prefalla la reactancia equivalente del sistema dependerá solamente de la resistencia de falla. Por tanto si se comparan los casos de una falla cerca

Tabla 5.2: Datos de carga del sistema de distribución

Nodo	Fase	Carga (kVA)	Composición de la carga [%]		
			Calentador	Iluminación	Motor
1	A	15,0	99,8	0,1	0,1
2	A	15,0	99,8	0,1	0,1
7	B	15,0	99,8	0,1	0,1
11	ABC	1000,0	0,1	0,1	99,8
12	ABC	67,5	99,8	0,1	0,1
14	B	15,0	99,8	0,1	0,1
15	B	15,0	99,8	0,1	0,1
16	B	7,5	99,8	0,1	0,1
17	B	15,0	99,8	0,1	0,1
18	C	25,0	99,8	0,1	0,1
19	C	15,0	99,8	0,1	0,1
21	C	15,0	99,8	0,1	0,1

Tabla 5.3: Parametros del Generador

Tensión Base (MVA)	Potencia Base (kVA)	impedancia de Secuencia Positiva y Negativa (p.u.)	Impedancia de Secuencia Cero (p.u.)
25	1000	$0,68283 + j2,98139$	$0,09496 + j1,39289$

y el de una falla lejos al nodo inicial, el cambio de la reactancia equivalente de falla con respecto a la resistencia de falla es mayor para la falla cerca al nodo en inicial, debido a que la resistencia equivalente de prefalla del sistema es menor para este caso.

El método Ratan Das estima la sección de la falla a partir de la asunción de que la reactancia equivalente de falla es independiente de la resistencia de falla. El método pierde precisión a medida que la resistencia de falla aumenta. Para resistencias de falla mayor o igual a 25Ω el método estima la distancia de falla con altos errores de falla o simplemente concluye sin detectar la sección de la falla.

5.4. TIPOS DE PRUEBAS

Se simularon fallas monofásicas a tierra, bifásicas a tierra, bifásicas línea a línea y trifásicas a tierra en todos los nodos y para diferentes valores de resistencia. El programa determina solo la distancia desde el primer nodo de la sección estimada, es por esto que para los resultados se determinó la

Tabla 5.4: Factores de potencia y constantes de carga

Tipo de carga	Factor de potencia	Contantes de carga	
		n_p	n_q
Calentador	1,0	2,0	2,0
Iluminación	0,85 atraso	1,4	1,4
Motor	0,80 atraso	1,4	1,5/4,0

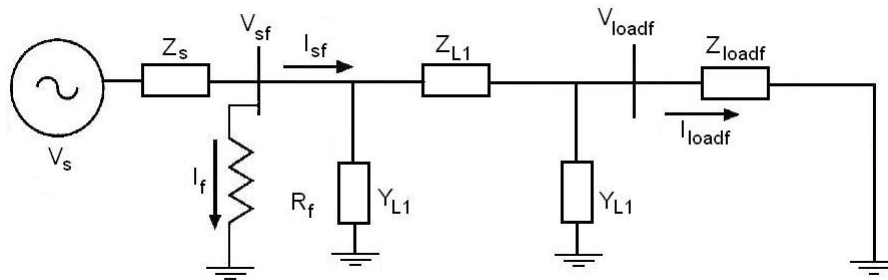


Figura 5.2: Sistema de distribución con falla en el nodo inicial.

distancia desde el nodo inicial. El error se determina con respecto a la distancia desde el nodo inicial al nodo en falla, como se muestra en la ecuación (5.4).

$$Error(\%) = \frac{DistanciaReal - DistanciaEstimada}{DistanciaReal} * 100\% \quad (5.4)$$

5.5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas al software en una serie de gráficas, en el eje x de la gráfica se presenta la distancia de la falla y en el eje y se presenta el error relativo en porcentaje entre la distancia real de la falla y la distancia estimada por el programa.

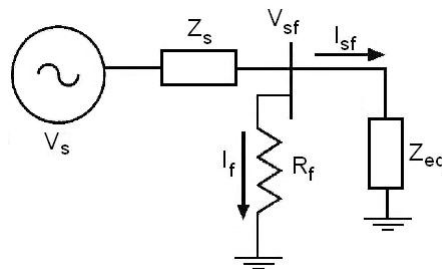


Figura 5.3: Impedancia equivalente del sistema en prefalla vista desde el nodo inicial

- Análisis de los resultados:

Teniendo en cuenta que la resistencia equivalente del sistema varía con respecto al valor de la resistencia de falla como se analizó anteriormente y que la estimación de la sección de la falla se realiza basándose en el método de la componente reactiva como se presentó en la descripción del método. Por otra parte, todos los nodos pertenecen por lo menos a dos secciones del sistema, ya que cada nodo es el punto de unión de al menos dos secciones, por lo tanto la estimación de la sección de la falla es una de éstas.

Con base en lo anterior y los resultados obtenidos de las pruebas se concluye que a medida que la resistencia de falla varía, la reactancia equivalente del sistema lo hace de forma proporcional. Generalmente para valores pequeños de resistencia de falla se estima la sección anterior al punto de falla como la sección de la falla como se muestra en la figura 5.4, a medida que la resistencia de falla aumenta la sección siguiente al punto de falla se convierte en la sección de la falla. Es por este motivo por el que los errores son normalmente negativos para grandes valores de resistencia de falla.

Los nodos finales como los nodos 11 y 12 son casos especiales, en estos tipos de nodos no existe la sección siguiente al punto de falla. En este tipo de situación el método no logra determinar la distancia de falla a partir de ciertos valores de resistencia de falla. Este problema es más frecuente en nodos cercanos al nodo inicial como es el caso del nodo 12, debido a que el cambio de la reactancia equivalente del sistema con respecto a la resistencia de falla es mayor en nodos cercanos al nodo inicial como se analizó anteriormente.

En las tablas 5.8, 5.9 y 5.10 se muestran los resultados para las pruebas de fallas bifásicas, el error es mucho mayor que en los demás resultados al aumentar la resistencia de falla. En los resultados de la tabla 5.14 para tipo de falla trifásico, el error cambia muy poco al aumentar la resistencia de falla. La razón de este fenómeno con respecto al tipo de falla es la simetría que pueden tener, por tanto solo existen valores de secuencia positiva y el error que se introduce al desprestigiar los términos de orden mayor a dos no afecta para este caso. En caso contrario la falla bifásica es asimétrica y el error afecta los resultados.

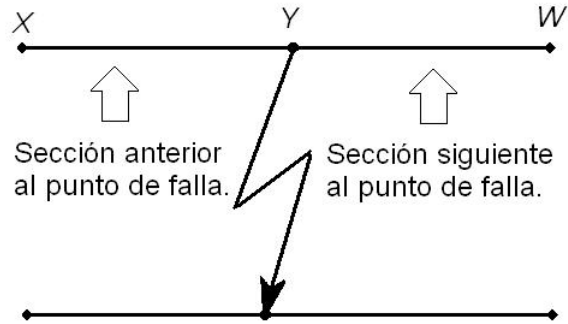


Figura 5.4: Definición de la sección anterior y siguiente al punto de falla

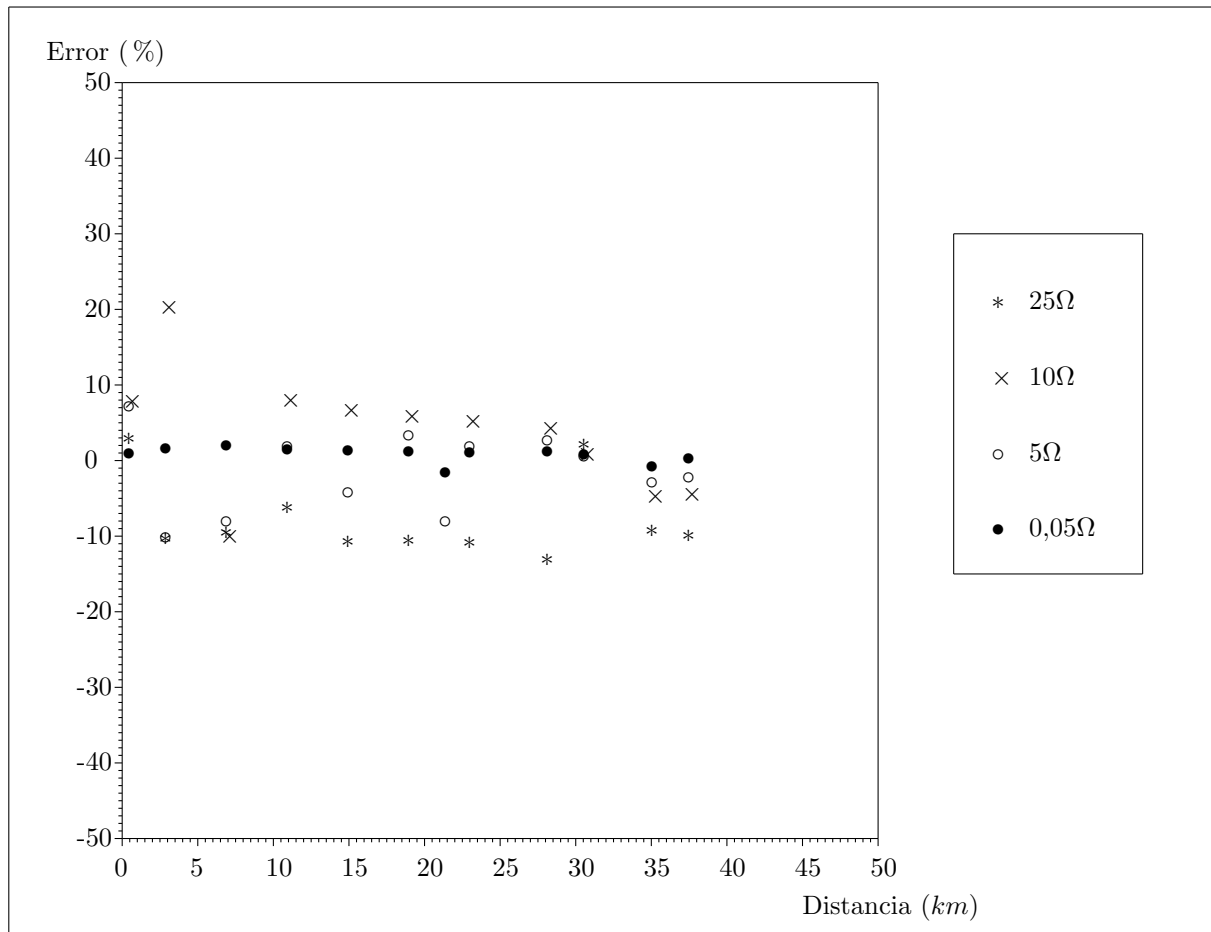


Figura 5.5: Estimación de error para una falla monofásica A-T

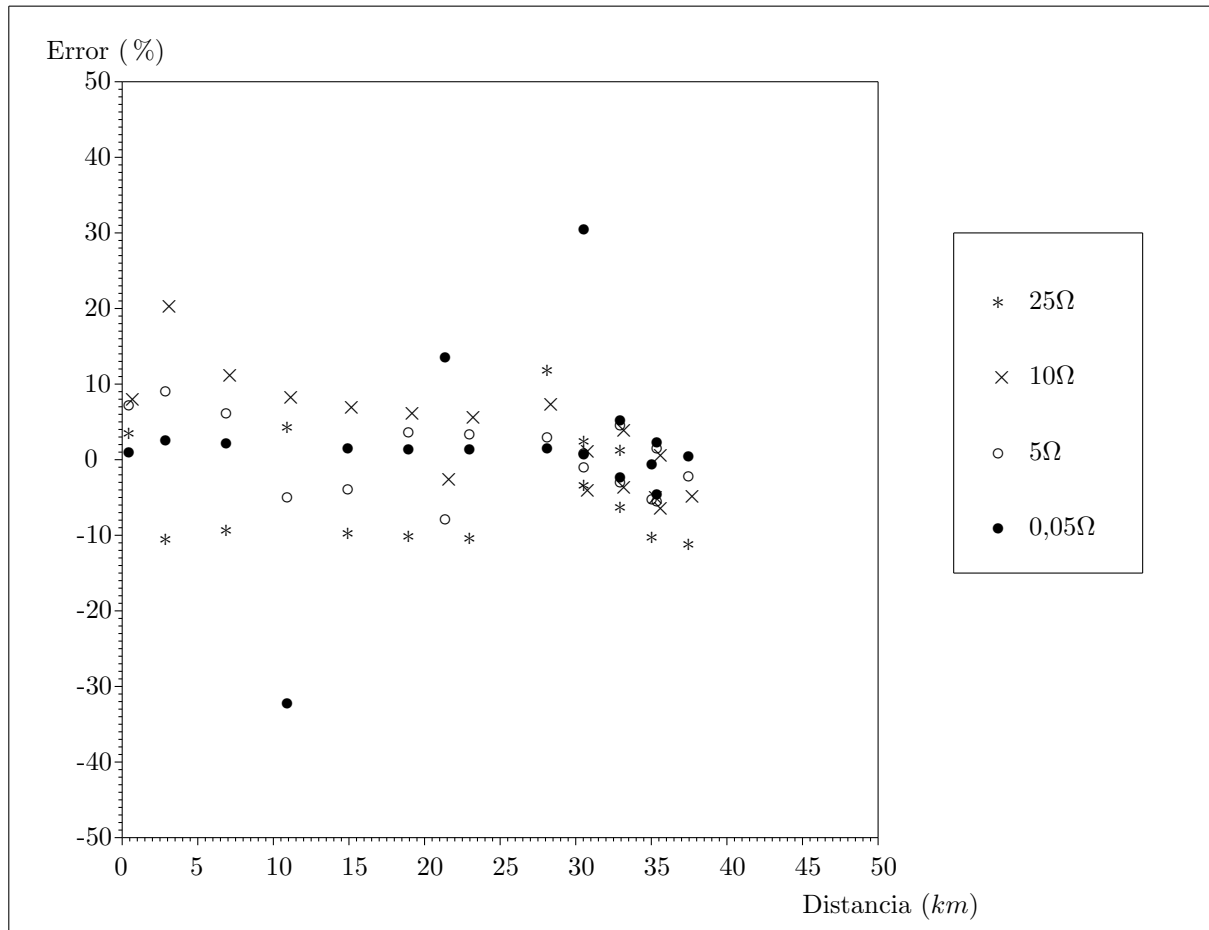


Figura 5.6: Estimación de error para una falla monofásica B-T

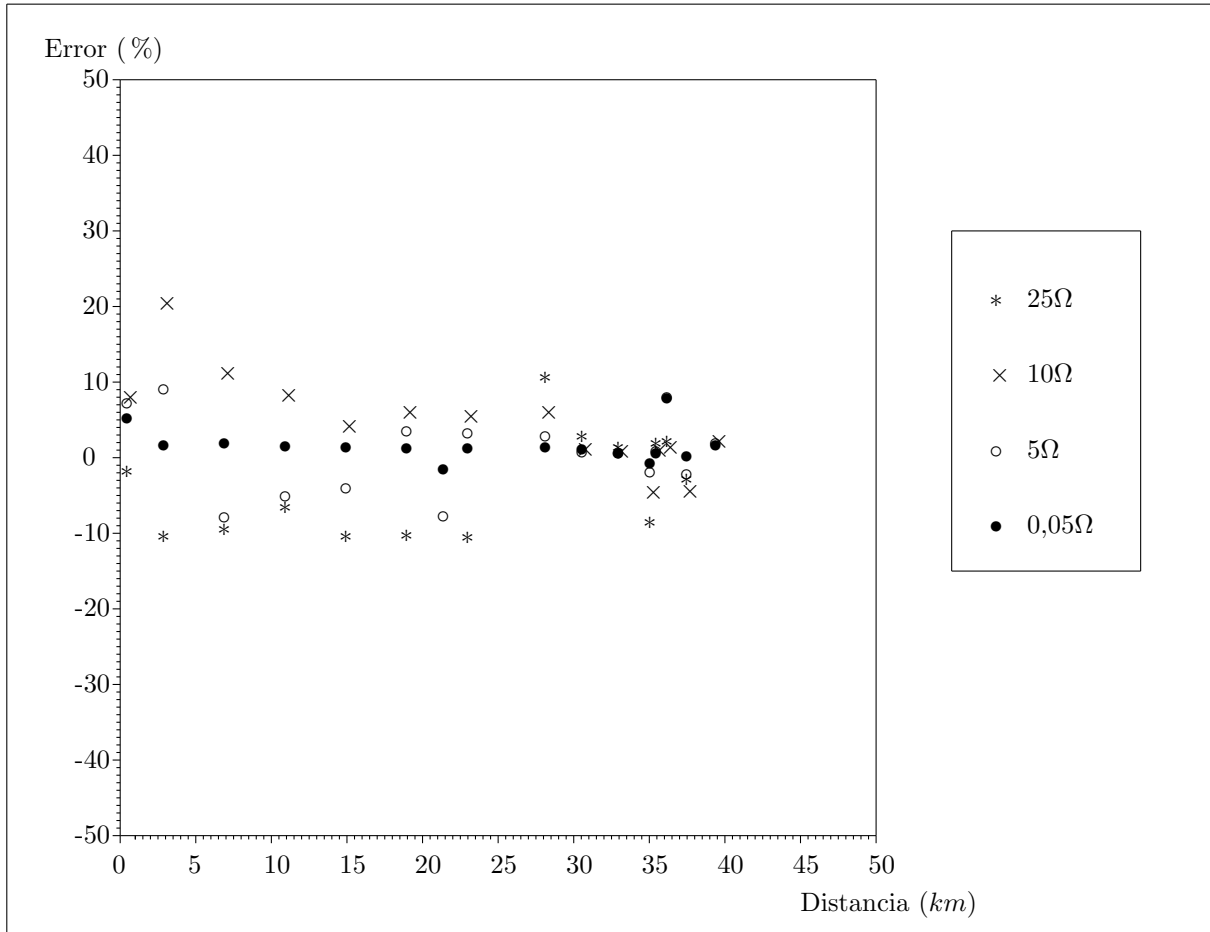


Figura 5.7: Estimación de error para una falla monofásica C-T

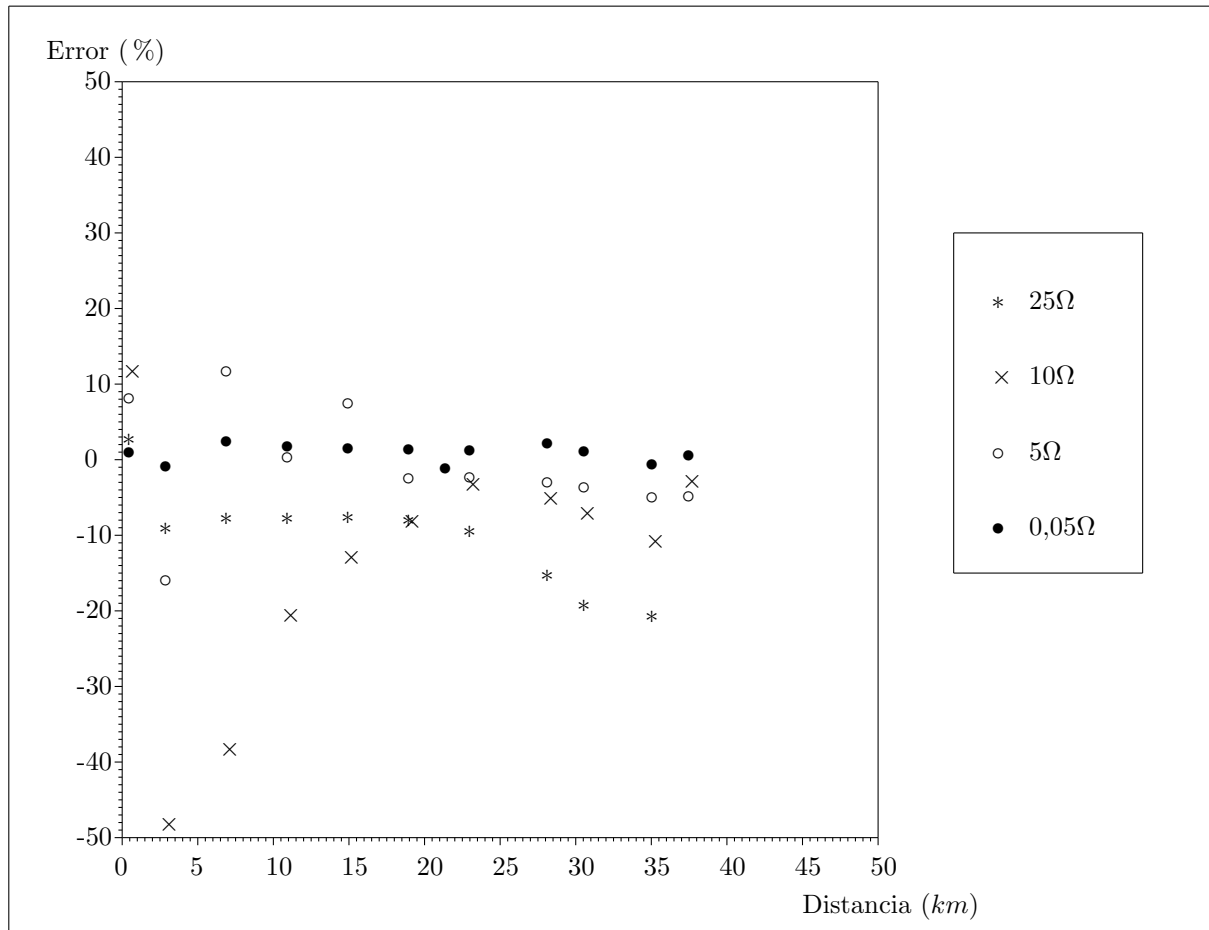


Figura 5.8: Estimación de error para una falla bifásica A-B

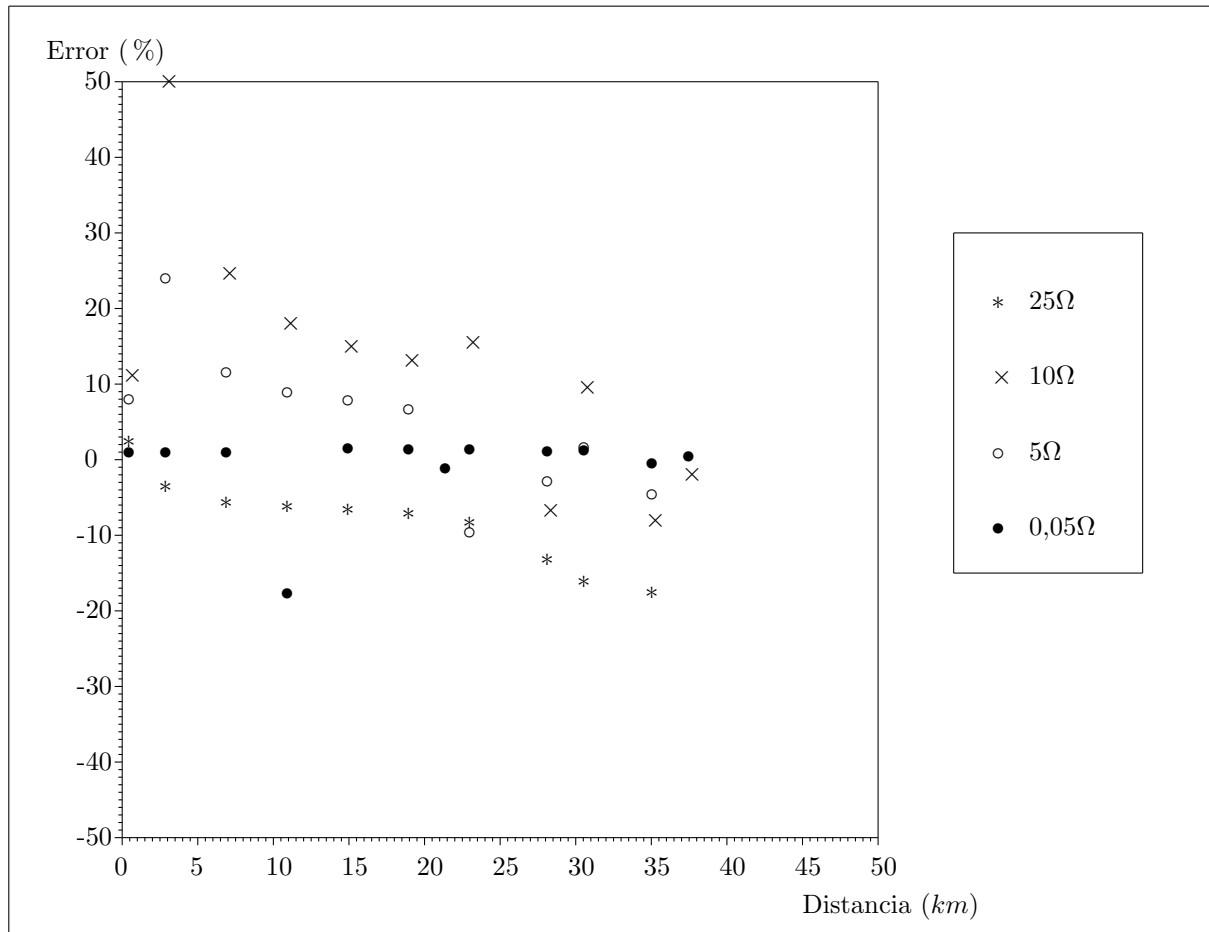


Figura 5.9: Estimación de error para una falla bifásica A-C

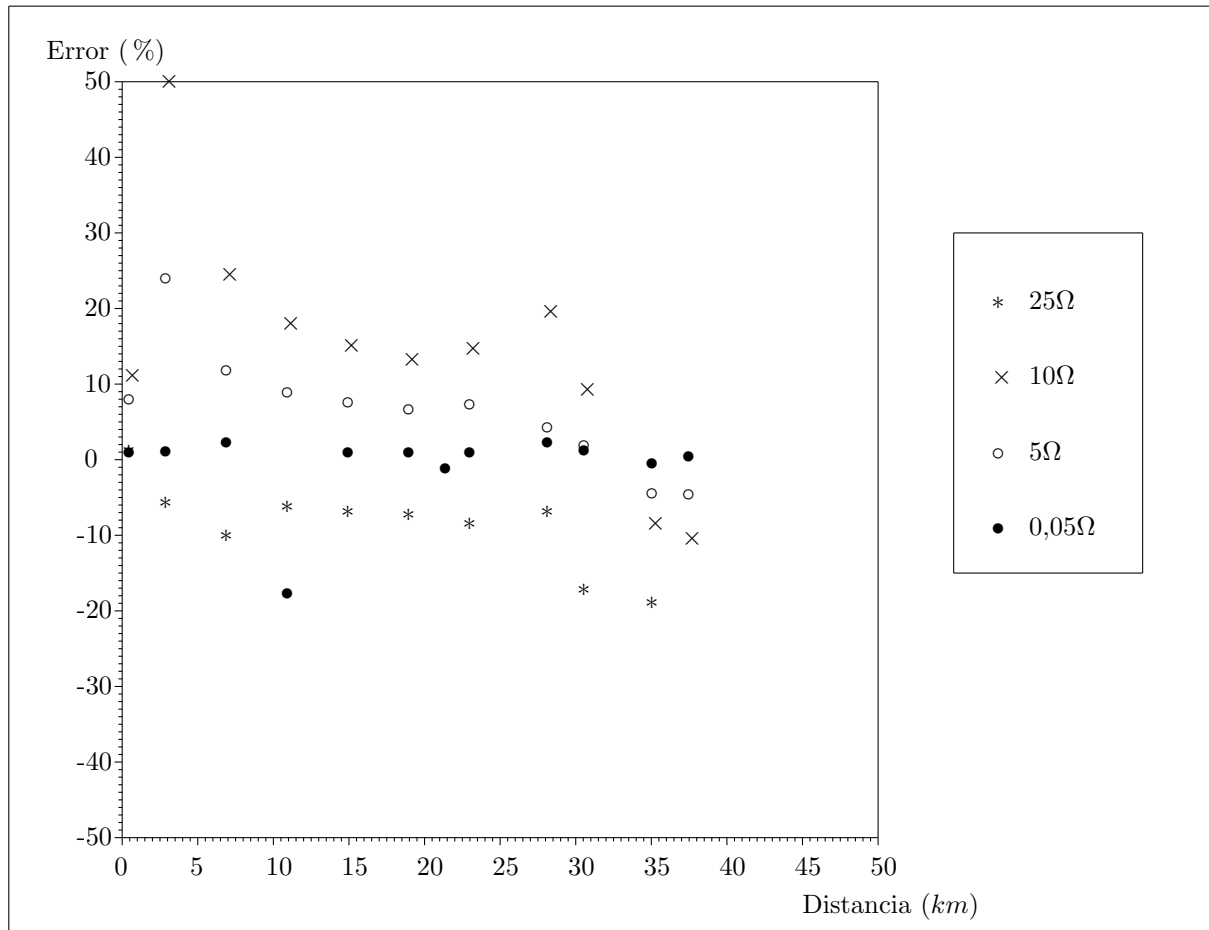


Figura 5.10: Estimación de error para una falla bifásica B-C

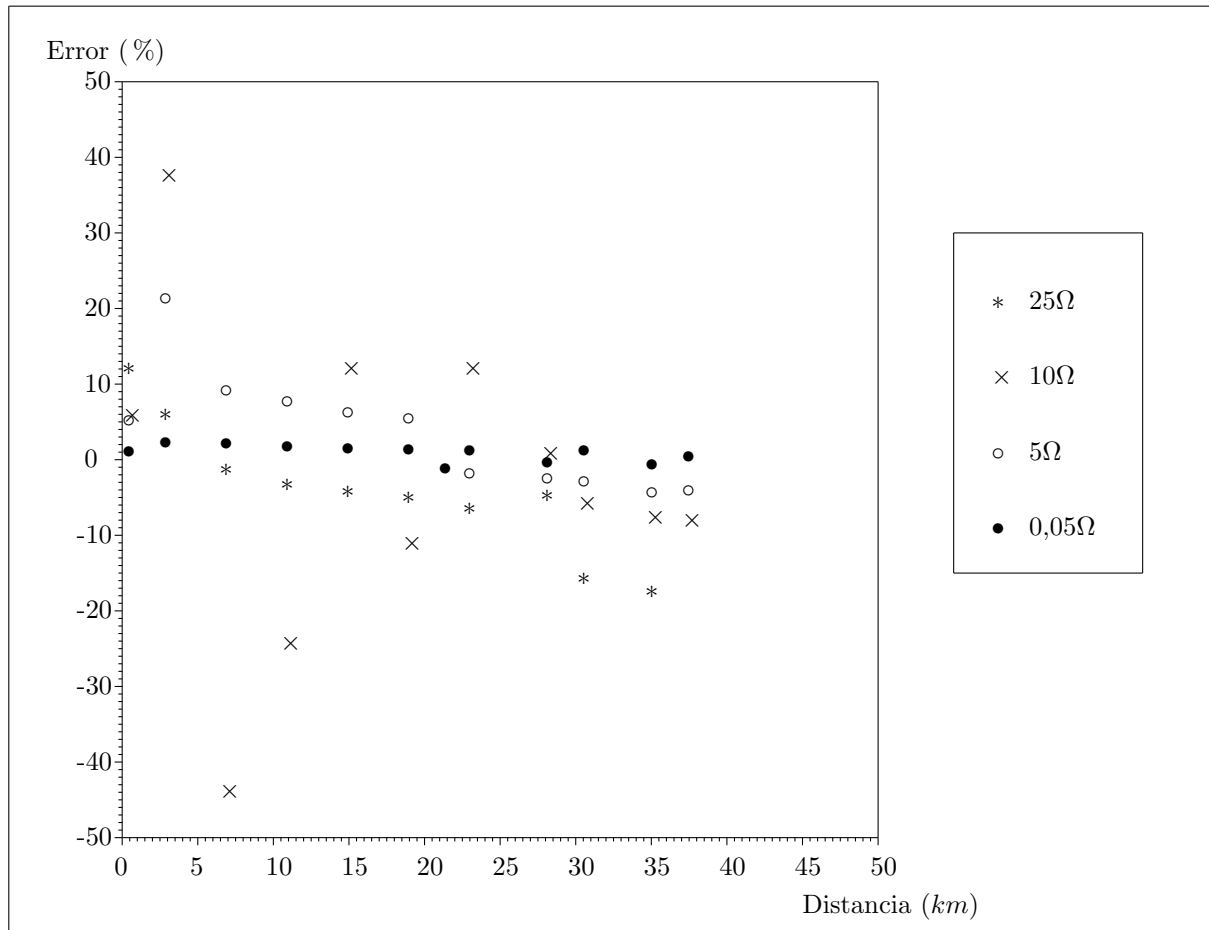


Figura 5.11: Estimación de error para una falla bifásica A-B-T

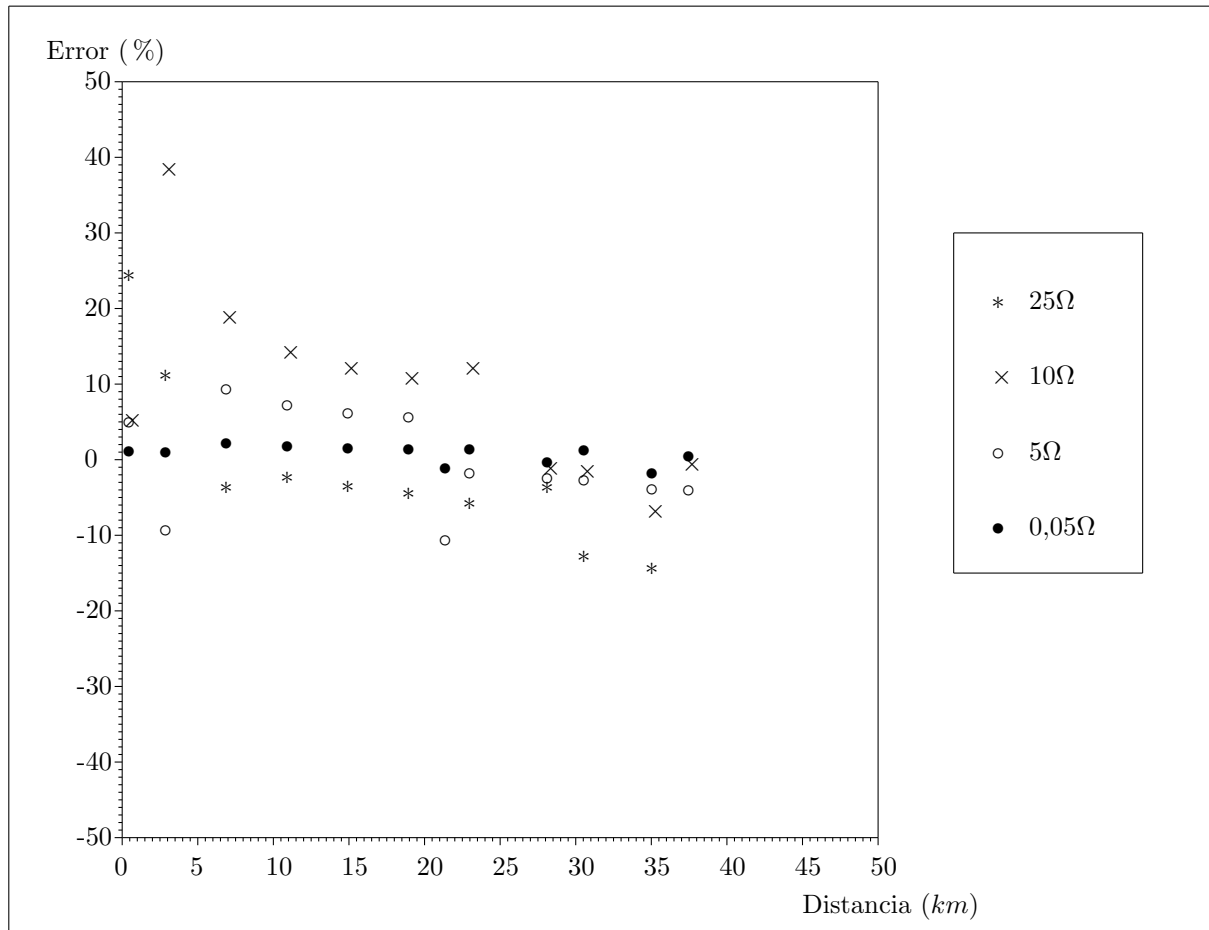


Figura 5.12: Estimación de error para una falla bifásica A-C-T

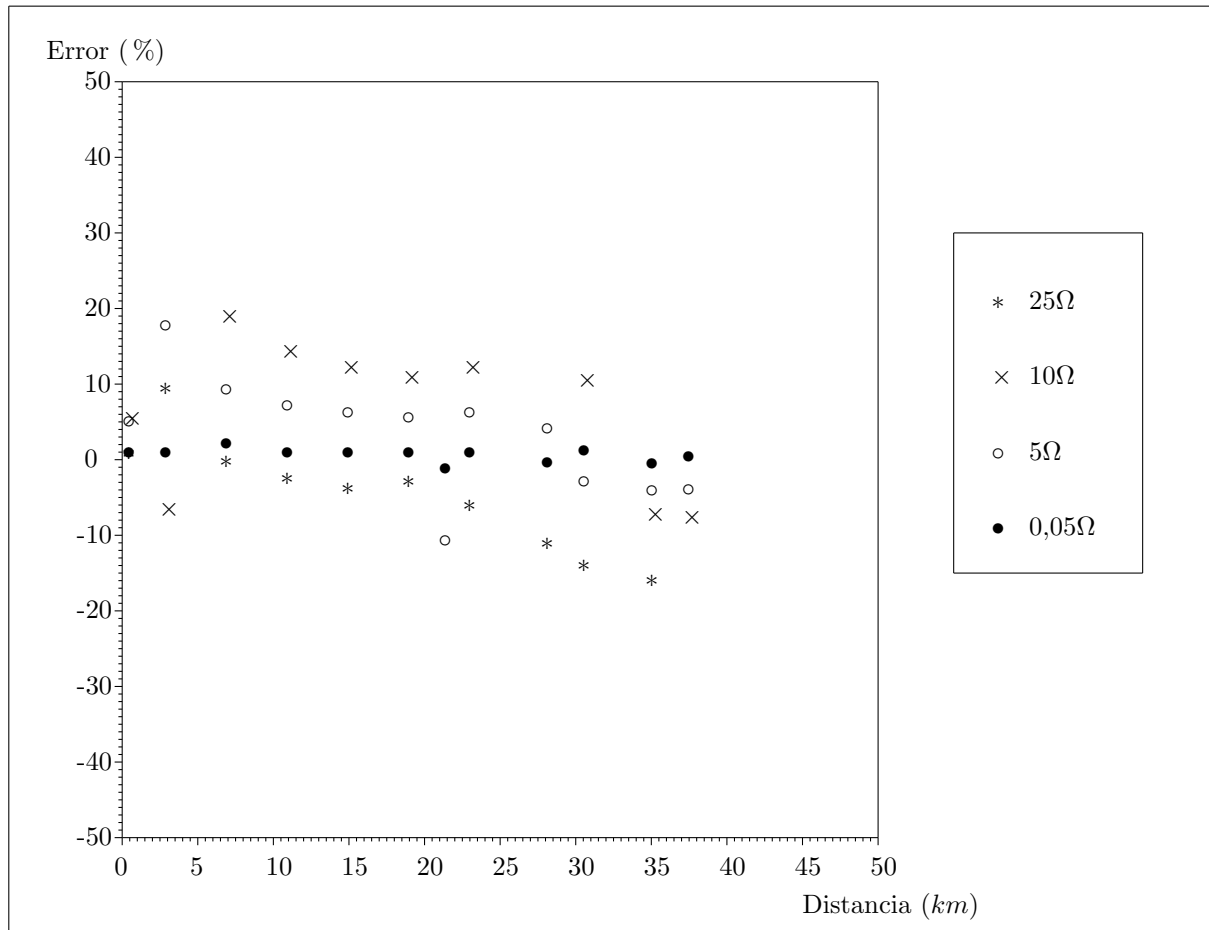


Figura 5.13: Estimación de error para una falla bifásica B-C-T

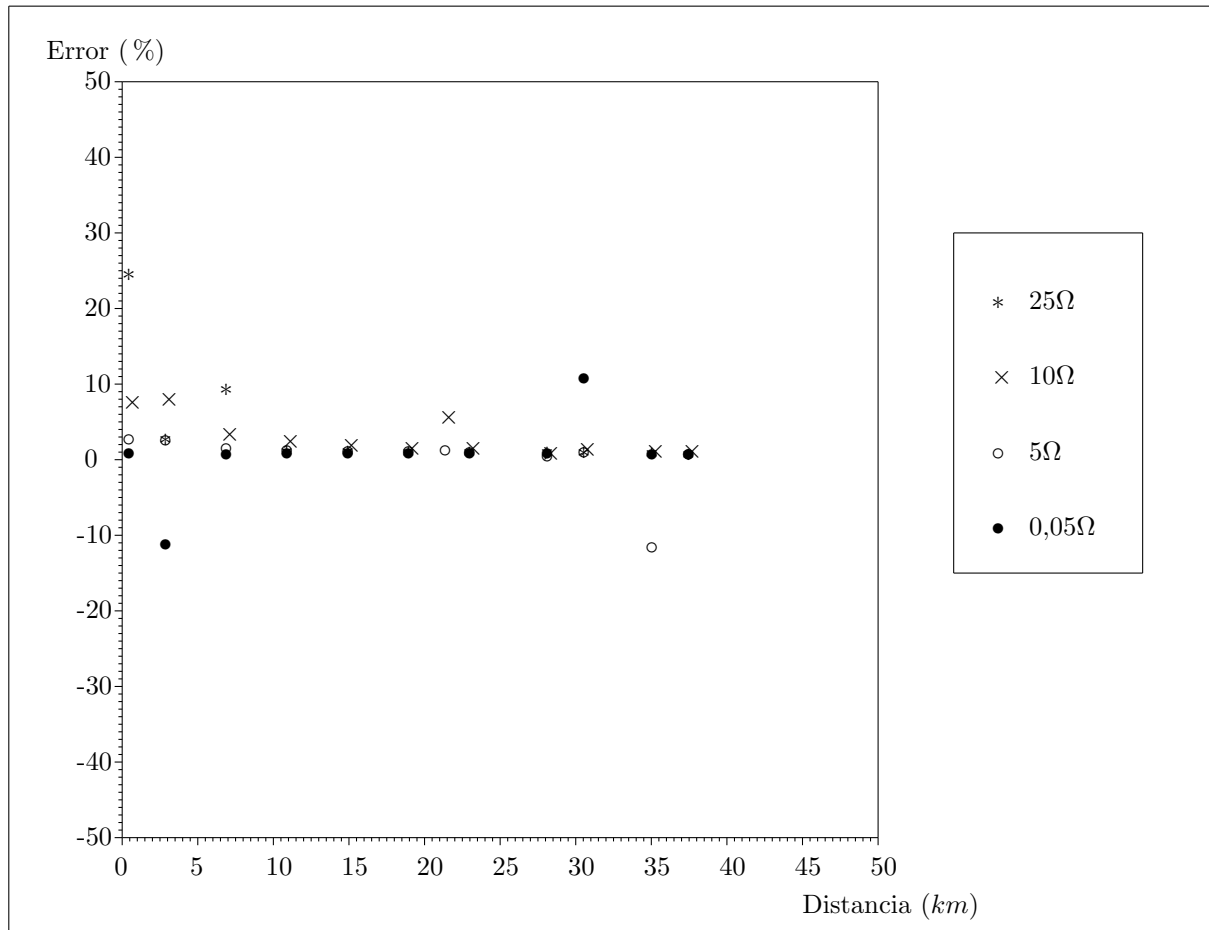


Figura 5.14: Estimación de error para una falla bifásica A-B-C

Capítulo 6

MANUAL DEL USUARIO

6.1. INTRODUCCIÓN

LOFASID es un software desarrollado para estimar la posible ubicación de fallas en sistemas de distribución radial, basado en el método algorítmico diseñado por RATAN DAS.

La elaboración de LOFASID fue realizada por Carlos Andrés Quiñones Buitrago y Libardo Villamizar Montes estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander como proyecto de pregrado.

Lofasid determina las posibles ubicaciones de una falla a partir de los valores rms de las tensiones y corrientes en las tres fases en los estados de prefalla y postfalla del nodo inicial. Además, el software toma tanto los parámetros de las líneas que conforman el sistema y las características de sus cargas.

6.2. INSTALACIÓN

Para poder utilizar Lofasid, se requiere tener instalado MATLAB 6.5, poseer un espacio disponible en disco de 15 MB.

Para instalar Lofasid en cualquier PC que cumple con los requerimientos anteriormente especificados, basta solamente con copiar la carpeta RATANDAS que se encuentra en el CD instalador. En la carpeta se encuentran todas las funciones, figuras, imágenes y archivos de texto necesarios para el funcionamiento de Lofasid. Si por alguna circunstancia se producen errores por la falta de un archivo o carpeta se recomienda, volver a copiar al disco toda la carpeta RATANDAS.

6.3. COMO EJECUTAR LOFASID

Una vez copiada la carpeta RATANDAS al disco, para ejecutar Lofasid se procede con los siguientes pasos:

1. Ejecutar MATLAB 6.5[9].

2. Cambiar el current directory de la toolbar de MATLAB 6.5[9] por la dirección donde se encuentra la carpeta *RATANDAS*. Si la carpeta *RATANDAS* se copia al disco C: entonces, el campo current directory deberá ser cambiado por *C:\RATANDAS*.
3. Posterior se digita en la ventana de ejecución de MATLAB la palabra “*ratandas*”, para acceder al programa.

6.4. ARCHIVOS DE ENTRADA

A partir de este momento se despliega la ventana principal de Lofasid la cual se muestra en la figura 6.1 que permite ingresar los datos necesarios para realizar la estimación de la posible ubicación de la falla del sistema.

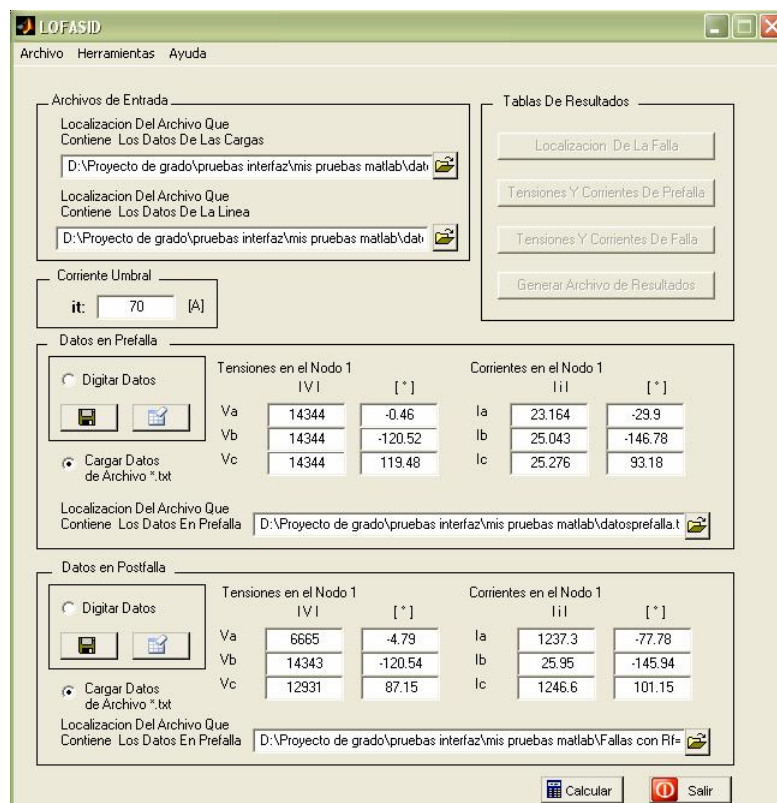


Figura 6.1: Ventana principal de lofasid.

6.4.1. Datos de las cargas

Es necesario conocer los datos acerca de las cargas que se encuentran conectadas al sistema. La información se suministra al software a través de un archivo de texto. A continuación se presentan las principales características que debe poseer este archivo.

El archivo que contiene los datos de las cargas debe poseer como formato las dos líneas siguientes:

Nodo	Fase	Carga (kVA)	Composición de la carga		
			Calentador	Iluminación	Motor

- **Nodo:** es un número entero que representa el nodo al cual esta conectado la carga.
- **Fase de Conexión:** es la combinación de las letras $A - B - C$ o una de ellas que representan las fases a las que está conectada la carga.

Ejemplo: para una carga bifásica conectada entre las fases A y B se utilizan las palabras AB .

- **Carga:** es el valor en kVA de la carga conectada al determinado nodo.
- **Composición:** se refiere a la composición de cada tipo de carga en por ciento, los tipos de cargas utilizadas en el proyecto son: Calentador, Iluminación y Motor. Cada tipo de carga tiene definido ciertas características en el software.

Ejemplo: para una carga totalmente resistiva, se define la composición de la siguiente forma.

Composición de la carga		
Calentador	Iluminación	Motor
99,8	0,1	0,1

Para mayor claridad en relación al archivo de texto se presenta un ejemplo que representa las cargas conectadas a un sistema determinado.

Ejemplo:

Nodo	Fase	Carga (kVA)	Composición de la carga		
			Calentador	Iluminación	Motor
1	A	15,0	99,8	0,1	0,1
7	B	15,0	99,8	0,1	0,1
11	ABC	1000,0	0,1	0,1	99,8
12	ABC	67,5	99,8	0,1	0,1
17	B	15,0	99,8	0,1	0,1
21	C	15,0	99,8	0,1	0,1

No se debe dejar espacios entre las líneas de encabezado y los datos de las cargas.

Para ingresar los datos de las cargas se digita la dirección de la ubicación del archivo que contiene la información o simplemente hacer click en el botón abrir para buscar el archivo como se muestra



Figura 6.2: Ingreso de la ruta al archivo de los datos de las cargas.

en la figura 6.2.

Se puede revisar si los datos suministrados son los utilizados por Lofasid. Una vez estimada la localización de la falla, se puede crear un archivo de resultados a través del botón Generar Archivo de Resultados, señalando la opción Datos de las Cargas.

6.4.2. Datos de la línea

Al igual que la información de la carga conectada al sistema, las características de la línea son cargadas a Lofasid a través de un archivo de texto. El archivo debe contener como encabezado tres líneas como las que se muestran a continuación:

Sección		Distancia	Impedancias serie		Admitancia Paralela	
Nodo Inic.	Nodo Fin.	(km)	Pos. y Neg. (Ω/km)	Cero (Ω/km)	Pos. y Neg. (S/km)	Cero (S/km)

- **Nodos de la Sección:** es el par de nodos a los que se esta instalada la sección.
- **Longitud:** es la magnitud de la sección dada en kilómetros.
- **Impedancias serie de la sección:** está compuesta por dos columnas, la primera esta relacionada con las impedancias de secuencia positiva y negativa, la segunda columna son las impedancias de secuencia cero. Las impedancias se deben especificar en Ω/km . Los valores de estas impedancias se deben escribir como números complejos en forma rectangular.
- **Admitancias paralelas:** está compuesta por dos columnas, la primera está relacionada con las admitancias de secuencia positiva y negativa, la segunda columna son las admitancias de secuencia cero. Estas admitancias deben estar en *siemens* – *km*. Los valores de estas admitancias se deben escribir como números complejos en forma rectangular.

Ejemplo:

Sección		Distancia (km)	Impedancias serie		Admitancia Paralela	
Nodo Inic.	Nodo Fin.		Pos. y Neg. (Ω/km)	Cero (Ω/km)	Pos. y Neg. (S/km)	Cero (S/km)
1	2	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
2	3	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
3	4	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
4	5	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
5	6	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
6	7	4,023	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
7	8	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$
8	9	2,414	$0,3480 + j * 0,5166$	$0,5254 + j * 1,704$	$j * 3,74e - 06$	$j * 2,49e - 06$

No se debe dejar espacios entre las líneas de encabezado y los datos de la línea. Para ingresar los datos de las cargas se debe digitar la dirección de la ubicación del archivo que contiene la información, o hacer clic en el botón abrir para buscar la ruta.

6.4.3. Corriente umbral

La corriente umbral se define a partir de un estudio de falla realizado al sistema, normalmente se usa la corriente mínima de falla utilizada en las protecciones del sistema.

6.4.4. Datos de prefalla

Para localizar la posible ubicación de la falla en el sistema analizado, se utilizan las tensiones y corrientes en el nodo inicial en prefalla y postfalla. Los valores de tensión deben ser RMS, Fase-neutro y con los ángulos de fasor definidos. Al igual que los valores de tensión, las corrientes deben ser RMS, Fase-Fase y con los ángulos de fasor definidos. Los datos de prefalla se ingresan en el campo que se presenta en la figura 6.3.

Figura 6.3: Datos de prefalla.

- **Digitar datos:** al hacer click sobre la opción digitar datos se habilitan los campos correspondientes que permiten ingresar manualmente las tensiones y corrientes de prefalla, figura 6.3.
- **Tensiones en el nodo 1:** las tensiones de cada fase de la barra inicial del sistema de distribución, se ingresan en los campos correspondientes, figura 6.3.
- **Corrientes en el nodo 1:** al igual que las tensiones se deben introducir las corrientes de línea medidas en el primer nodo del sistema en los campos correspondientes, figura 6.3.

- **Botón guardar datos de prefalla**

El botón guardar datos de prefalla figura 6.4, permite almacenar los datos de prefalla digitados de forma manual. Los datos se almacenan en un archivo de texto que podrá ser cargado posteriormente.

Al pulsar este botón se abrirá un cuadro de diálogo que permite definir el nombre y la ubicación del archivo de texto que se generará con la información de los datos de prefalla.

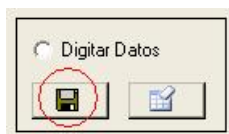


Figura 6.4: Botón guardar datos de prefalla.

- **Botón borrar datos de prefalla**

Al hacer click sobre este botón se borrarán todos los campos de los datos de prefalla, figura 6.5.



Figura 6.5: Botón borrar datos de prefalla.

- **Cargar datos de archivos *.txt**

Las tensiones y corrientes en prefalla pueden ser ingresadas a la interfaz haciendo click en la opción *Cargar Datos de Archivo *.txt*, figura 6.6. Al realizar esta operación se activa el campo *Localización del Archivo que contiene los datos de prefalla*. En este se podrá digitar la dirección de la ubicación del archivo si se conoce. Existe también la opción de buscar la ruta del archivo

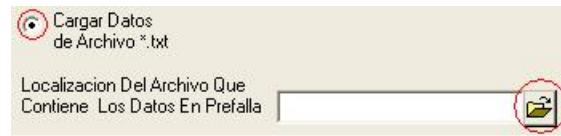


Figura 6.6: Campo para cargar los datos de prefalla.

a través del botón abrir.

El archivo que contiene los datos de prefalla es el que se genera cuando se utiliza la opción “Guardar Datos de Prefalla”. Es decir, que se podrá digitar los datos de prefalla en los campos correspondientes, guardarlos y posteriormente cargarlos a la interfaz sin tener que digitarlos de nuevo.

6.4.5. Acerca de los datos de falla

Los campos relacionados con los datos de falla funcionan de igual forma que los campos de prefalla. Si necesita información remítase a los temas de ayuda relacionados con los datos en prefalla.

6.4.6. Botón calcular

Al pulsar este botón figura 6.7, se inicia la búsqueda de la posible ubicación de la falla, después de realizar todos los cálculos, aparece automáticamente la información de los resultados obtenidos.

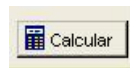


Figura 6.7: Botón para calcular la distancia de la falla.

6.5. RESULTADOS

Después de introducir todos los datos en los campos correspondientes e inmediatamente después de pulsar el botón calcular, se despliega una ventana como la que se muestra en la figura 6.8, esta ventana contiene la siguiente información:

- ◇ Tipo de falla
- ◇ Posible ubicación
- ◇ Sección fallada
- ◇ % de la Sección

- ◇ Longitud de la Sección
- ◇ Camino No
- ◇ Nodos del Camino

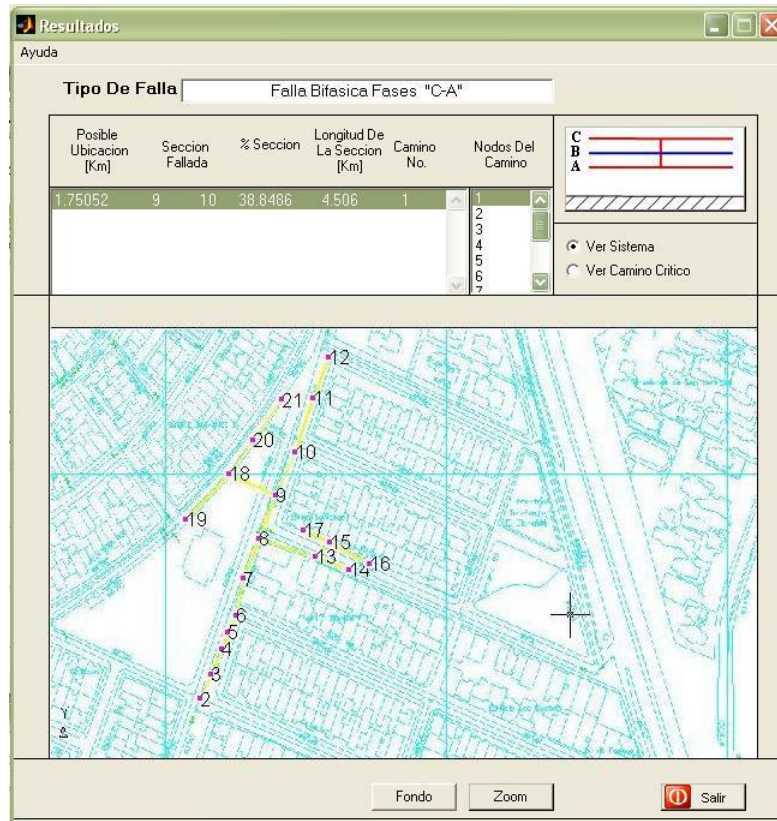


Figura 6.8: Campo de resultados de la ubicación de la falla.

- **Tipo de falla:** este campo presenta la información del tipo posible de falla ocurrida en el sistema, teniendo en cuenta los datos introducidos.
- **Posible ubicación:** representa la longitud desde el primer nodo de la sección fallada hasta la ubicación de la posible falla.
- **Sección fallada:** en esta parte se presentan los dos nodos que conforman la sección en la que posiblemente ocurrió la falla.
- **% de la sección:** representa el porcentaje de la sección fallada al cual ocurrió la posible falla.

- **Longitud de la sección:** representa la longitud de la sección fallada.
- **Camino No:** al realizar los cálculos para localizar la posible existencia de una falla en el sistema, Lofasid divide el sistema en caminos; estos están representados por una serie de nodos que se encuentran ubicados consecutivamente en el sistema.
- **Nodos del camino:** son los nodos que pertenecen a un determinado camino.

La figura de resultados posee dos campos que permiten ver una representación gráfica del sistema. Al hacer click sobre el campo “Ver Sistema ”, se despliega una imagen representativa del sistema. Esta gráfica posee la misma topología pero puede variar el aspecto visual. Al realizar click en el campo “Ver Camino...” se desplegará la imagen del camino seleccionado.

El botón Zoom permite observar con más detalle la imagen representativa del sistema.

6.6. RESULTADOS OPCIONALES A LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA

El programa permite acceder a los datos de tensiones y corrientes de prefalla y de falla en todos los nodos. Además, poder generar archivos con la información de la falla en formato de texto, figura 6.9.



Figura 6.9: Campo de resultados de la localización de la falla.

6.6.1. Tensiones y corrientes de prefalla

Al realizar la estimación de la localización de la falla, se hallan las tensiones y corrientes en todos los nodos en el estado de prefalla. Dichos valores se pueden visualizar como se muestran en la figura 6.10 al hacer click sobre el botón “Tensiones y Corrientes de Prefalla”. Al utilizar esta opción inmediatamente aparecerá una figura con las tensiones fase-neutro en cada nodo al igual que las corrientes de línea, además se incluyen los valores de secuencia.

Figure No. 1

TENSIONES Y CORRIENTES CALCULADAS EN EL ESTADO DE PREFALLA

Barra	V [V]	Angulo [°]	i [A]	Angulo [°]	v0	v1	v2	Angulo [°]	i0	i1	i2	Angulo [°]
1	14433.7567	-10	26.7545	-6.1501	8.5748e-013			135	6.9219e-015			-159.8625
1	14433.7567	-130	26.7545	-126.1501	14433.7567			-10	26.7545			-6.1501
1	14433.7567	110	26.7545	113.8499	1.819e-012			90	7.1338e-015			-5.113
2	14413.3237	-10.14	26.7456	-6.4267	8.7982e-013			133.6961	6.9174e-015			-159.8743
2	14413.3237	-130.14	26.7456	-126.4267	14413.3237			-10.14	26.7456			-6.4267
2	14413.3237	109.86	26.7456	113.5733	1.8106e-012			90.2123	7.1503e-015			-5.1005

◀ ▶ Salir

Figura 6.10: Valores de tensión y corriente de prefalla.

6.6.2. Tensiones y corrientes de falla

Al hacer click sobre el botón Tensiones y Corrientes de Falla, aparece un campo que presenta las tensiones y corrientes en el estado de falla, como se muestra en la figura 6.11. Estos son los valores estimados para hallar la localización de la falla. Hay que resaltar que no todos los valores son determinados, debido a que el método algorítmico consolida las cargas que se encuentran después del nodo final de la sección fallada. Al hacer click sobre la barra señalada se puede desplazar por las figuras siguientes o anteriores si estas existen.

Figure No. 1

TENSIONES Y CORRIENTES CALCULADAS EN EL ESTADO DE FALLA

Barra	V [V]	Angulo [°]	i [A]	Angulo [°]	v0	v1	v2	Angulo [°]	i0	i1	i2	Angulo [°]
1	14433.7567	-10	26.7545	-6.1501	8.5748e-013			135	6.9219e-015			-159.8625
1	14433.7567	-130	26.7545	-126.1501	14433.7567			-10	26.7545			-6.1501
1	14433.7567	110	26.7545	113.8499	1.819e-012			90	7.1338e-015			-5.113
2	14413.3237	-10.14	26.7456	-6.4267	8.7982e-013			133.6961	6.9174e-015			-159.8743
2	14413.3237	-130.14	26.7456	-126.4267	14413.3237			-10.14	26.7456			-6.4267
2	14413.3237	109.86	26.7456	113.5733	1.8106e-012			90.2123	7.1503e-015			-5.1005

◀ ▶ Salir

Figura 6.11: Valores de tensión y corriente de falla.

6.6.3. Generar archivos de resultados

Al hacer clic sobre este botón se despliega el campo mostrado en la figura 6.12, a partir del cual se puede configurar el archivo de resultados. Este tiene como fin almacenar los datos que resultan del cálculo realizado. El archivo de resultados es un archivo de texto, que contendrá la información que el usuario escoja a través de la figura de configuración. Además, este archivo contendrá la fecha

y la hora en la cual se realizó el cálculo.

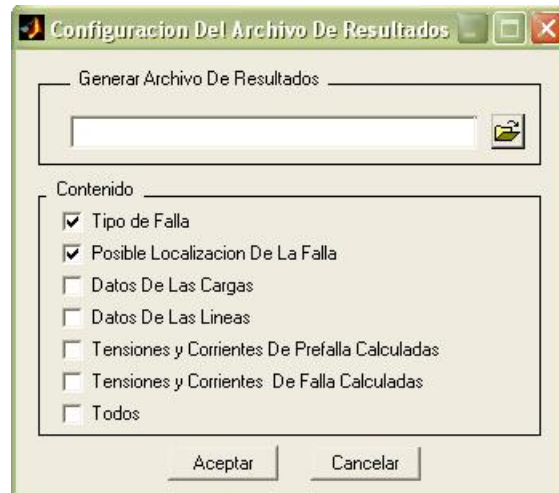


Figura 6.12: Campo de opciones para generar el archivo de resultados.

6.7. MENÚ HERRAMIENTAS

En el menú herramientas se encuentra en la opción “Crear Sistema”, figura 6.13, por medio de esta opción podemos acceder a una nueva ventana que nos permitirá crear los archivos de texto que contiene los datos de las cargas y de las líneas de una manera más fácil.

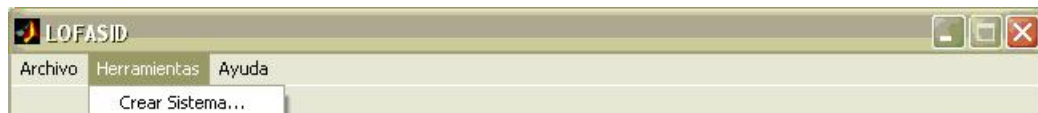


Figura 6.13: Opción crear sistema.

Inmediatamente después de hacer click en la opción “Crear Sistema” a parece la ventana “DIBUJAR SISTEMA”, figura 6.14. A través de esta ventana se puede dibujar y editar el sistema de distribución a analizar y generar los archivos de texto que contienen los parámetros de las líneas y las características de las cargas.

- **Botón de secciones:** dibuja las diferentes secciones del sistema de distribución.

Presionando este botón el puntero cambia de forma, permitiendo hacer click sobre dos puntos del área de dibujo. De esta forma se crea la primera sección del sistema de distribución. Una vez definidos los puntos entre los que estará la sección a crear, se despliega automáticamente una ventana con la que se muestra en la figura 6.15, en esta ventana se ingresan los parámetros

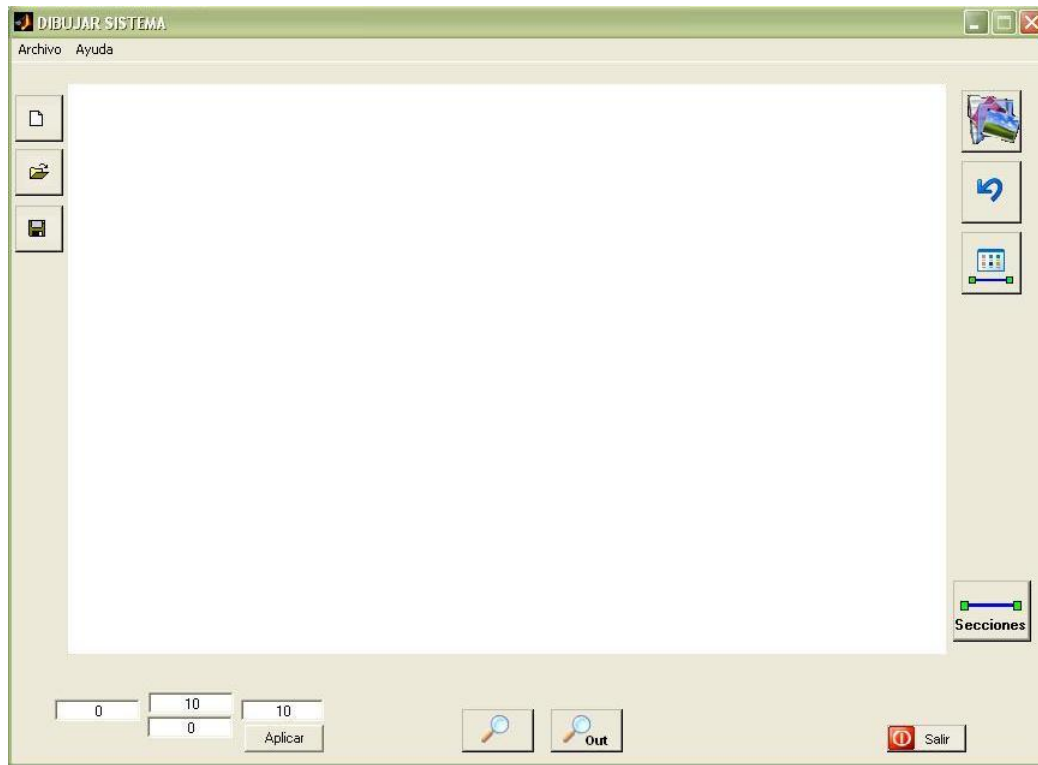


Figura 6.14: Campo para dibujar y editar los sistemas de distribución.

de la sección y de las cargas instaladas en los nodos.

Los nodos que forman las secciones son enumerados automáticamente a medida que estas van siendo dibujadas. Para dibujar otras secciones se realiza el mismo proceso anteriormente descrito.

- **Botón fondo:** selecciona una imagen de mapa de bits como fondo. Al hacer click sobre este botón se despliega un cuadro de dialogo, a través de cual se puede buscar la ruta de la imagen deseada.

Para quitar un fondo previamente seleccionado se debe hacer click en el fondo y hacer click sobre el botón “Cancelar” del cuadro de dialogo desplegado.

- **Botón deshacer:** borra la última sección dibujada. Se debe tener cuidado al pulsar este botón pues una vez borrada una sección no se puede recuperar.
- **Botón editar:** realiza cambios a los parámetros de las secciones existentes y a los de las cargas conectadas.

The screenshot shows a window titled 'EDITAR DATOS' with a dropdown menu set to '11 12'. The window is divided into two main sections: 'Sección' and 'Carga'.

Sección 11 12:

- Longitud [Km]: 2.414
- Impedancias Serie [Ohm/Km]:
- Secuencia Positiva y Secuencia Negativa: $0.348+0.5166i$
- Secuencia Cero: $0.5254+1.704i$
- Admitancia Shunt [Mhos/Km]:
- Secuencia Positiva y Secuencia Negativa: $0+3.74e-006i$
- Secuencia Cero: $0+2.49e-006i$

Carga:

Barra 11:

- Barra 11
- Fase(s) de Conexión:
- Carga [KVA]: 0
- Composición [%]:
- Calentador: 0
- Iluminación: 0
- Motor: 0

Barra 12:

- Barra 12
- Fase(s) de Conexión:
- Carga [KVA]: 67.5
- Composición [%]:
- Calentador: 99.8
- Iluminación: 0.1
- Motor: 0.1

Buttons: Aceptar, Cancelar

Figura 6.15: Ventana de información de los parametros de la línea y datos de las cargas.

- **Botón zoom:** acerca o aleja la vista del área de dibujo.

6.8. MENÚ ARCHIVO

A través de este menú figura 6.16 se puede guardar, abrir o crear nuevos sistemas de distribución. En este menú se encuentran las siguientes opciones:

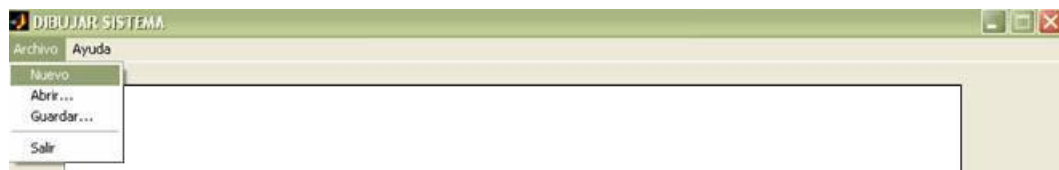


Figura 6.16: Opciones del menu archivo.

- **Nuevo:** al hacer click en esta opción se limpia el área de dibujo para crear un nuevo sistema.
- **Guardar:** esta opción permite guardar la información de las secciones dibujadas y de las cargas conectadas a los nodos.

Una vez seleccionada esta opción se despliega un cuadro de dialogo que permite definir la ubicación y el nombre de los archivos que contendrán los datos de las líneas y de las cargas. Estos archivos se generan automáticamente como archivos de texto. Los archivos podrán ser utilizados como datos de entrada en Lofasid posteriormente.

- **Abrir:** con esta opción se puede abrir un sistema de distribución creado utilizando la herramienta “Crear Sistema” del menú Herramientas de Lofasid.

Para abrir un sistema realizado con la herramienta “Crear Sistema” se debe hacer click en la opción abrir del menú “Archivo” de la figura “Dibujar Sistema” y especificar la dirección de los archivos de texto que contiene los datos de las cargas y de las líneas.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Se implementó el método algorítmico propuesto por el Dr. Ratan Das. El cual estima la sección donde posiblemente se localiza la falla, y la distancia desde el primer nodo de esta al punto de falla, este proceso se realiza para los distintos tipos de falla. El método entrega múltiples estimaciones de la ubicación de la falla, esta cantidad depende de la topología del sistema de distribución.

El software implementado emplea una forma sencilla de instalación y ejecución, cuenta con una interfaz que hace práctico introducir los datos de la línea y de las cargas, permite una visualización gráfica de los resultados y genera archivos de texto de los resultados para un posterior análisis.

El software es un prototipo implementado en Matlab, maneja cálculos matriciales sencillos, por tanto es posible implementarlo en un lenguaje de mas bajo nivel.

Los resultados obtenidos a partir del estudio de simulación indican que a medida que la resistencia de falla aumenta la aproximación disminuye, el método tiene una aproximación aceptable para resistencias de falla menores a los 25Ω .

Para fallas de tipo bifásicas línea-línea y línea-línea-tierra el método es menos exacto que para el resto de las fallas simuladas, debido a que este tipos de fallas son asimétricas.

El software puede ser utilizado para localizar fallas en sistemas reales, pero es necesario de acuerdo a las pruebas realizadas se complemente con técnicas de inteligencia artificial con el fin de reducir el error y las múltiples estimaciones. Lo anterior se concluye a partir de los valores obtenidos, los cuales muestran un aumento del error en la ubicación de la falla en las pruebas con los sistemas reales, comparado con los resultados de las simulaciones realizadas en matlab.

Se elaboró el manual del usuario del software el cual hace mas práctica la instalación, ejecución y manejo del software.

Se propone realizar la implementación de otro método algorítmico como el diseñado por Damir Novosel o Murari Saha, con el fin de comparar de forma exhaustiva el método.

En el proceso para determinar la distancia de falla se desprecian los términos de orden mayor

o igual a dos. La ecuación final es lineal y se resuelve de forma iterativa actualizando el valor de las admitancias de secuencia del último nodo. Si a partir de esta ecuación se determina también el valor de la resistencia de falla y se emplea con un manejo adecuado, se logra determinar una nueva ecuación, la cual se puede utilizar para eliminar los términos de orden igual a dos y no tener que despreciarlos. Con este nuevo arreglo la distancia de falla se resolverá de forma iterativa actualizando en cada proceso las admitancias de secuencia del último nodo y la resistencia de falla. Al realizar el arreglo antes mencionado y probar los resultados con los obtenidos inicialmente se observa que el error disminuye muy poco. Las pruebas se realizaron para un grupo pequeño de eventos.

Al disminuir la distancia de la sección por debajo de los 2km el método no logra estimar la sección donde se encuentra la falla, por lo que el error aumenta de forma considerable.

La técnica realiza una aproximación concentrando las cargas ubicadas después de la sección de la falla en el último nodo. Además, define las admitancias de carga en secuencia con el fin de determinar la relación entre los valores de tensión y corriente de secuencia en el nodo final. Se reduce el error en los cálculos si se determinan las tensiones y corrientes que se inyecta a los nodos que se encuentra después de la sección de la falla sin tener que concentrar las cargas en el último nodo. Con los valores de tensión y corriente determinados, se obtienen las admitancias de secuencia del nodo final.

Para el caso de fallas con valores de resistencia altos en los puntos finales del sistema, el sistema no logra estimar el punto de falla. Se recomienda modificar el método algorítmico para que cuando se finalice el proceso de estimación en un ramal sin lograr definir la sección, se cuantifique la diferencia entre las dos impedancias que se comparan dentro del proceso y se compare con un límite máximo definido previamente. Si la diferencia entre las impedancias es menor que el límite máximo, se toma la última sección del ramal como la sección de la falla. El límite máximo se puede definir a partir del valor de la reactancia equivalente del sistema para el caso de una falla con una resistencia de 25 ohms en uno de los nodos iniciales.

En el desarrollo de este proyecto se aplicaron los conocimientos obtenidos durante el transcurso de la carrera, además se muestra como con un poco de imaginación y análisis se pueden crear nuevas aplicaciones de los conceptos estudiados. Con esto se demuestra una vez más que existen muchas cosas por descubrir. Este trabajo representa el esfuerzo, la dedicación y el interés de los autores por reflejar la formación profesional adquirida durante estos últimos años, la cual fue ofrecida por todo el equipo interdisciplinario de la universidad.

Bibliografía

- [1] Novosel D., Hart D., Hu Y, and Myllymaki J. *SYSTEM FOR LOCATING FAULTS AND ESTIMATING FAULT RESISTANCE IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH TAPPED LOADS*. US Patent number 5.839.093, 1998.
- [2] M.S. Das, R. Sachdev and T.S. Sidhu. A fault locator for radial subtransmission and distribution lines. 1998.
- [3] Idarraga G., Valencia R., and Hernández R. Algoritmos para localización de fallas en líneas de transmisión, análisis para el caso colombiano. *Universidad Nacional de Colombia*, 2004.
- [4] Grainger John and Stevenson William D. *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA*. McGraw-Hill, 1999.
- [5] Anderson Paul M. *ANALYSIS OF FAULTED POWER SYSTEMS*. IEEE, 1995.
- [6] Das R. *DETERMINING THE LOCATIONS OF FAULTS IN DISTRIBUTION SYSTEMS*. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1998.
- [7] Murari Saha and Rosolowski Euginiusz. *METHOD AND DEVICE OF FAULT LOCATION FOR DISTRIBUTION NETWORKS*. US Patent number 6.483.435 B2, 2002.
- [8] GE Industrial System. *F60 feeder Management Relay UR Series Instruction Manual*, 2004.
- [9] Inc. The MathWorks. *Matlab Help*, 2002.

Apéndice A

PRUEBAS EN SISTEMAS REALES

A.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 4 se presentaron las pruebas realizadas al algoritmo con base en simulaciones en Matlab, a continuación se muestran un grupo de pruebas realizadas al algoritmo con base en información de sistemas reales. Se presentan pruebas con base en la información de dos sistemas de distribución. Para cada prueba se utilizó el reporte de falla ¹ y los archivos de oscilografía del evento².

A.2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Cada sistema de distribución tiene operación radial, el primer sistema línea arenales cuenta con $13km$ de línea distribuida en una zona de $10km^2$, compuesta por diferentes tipos de conductor calibre 336.4, 4/0 y 2/0, además de cargas de tipo trifásicas las cuales se encuentran distribuidas a lo largo de la línea. La topología del sistema cuenta con 180 nodos y 16 ramificaciones, los nodo se definieron teniendo en cuenta que el método es menos eficiente para secciones de corta distancia ³.

El segundo sistema línea río negro cuenta con $17km$ de línea distribuida en una zona de $20km^2$, compuesta por diferentes tipos de conductor calibre 336.4 y 2/0, además de cargas de tipo trifásicas las cuales se encuentran distribuidas a lo largo de la línea. La topología del sistema cuenta con 50 nodos con 15 ramificaciones.

A.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN

Cada sistema tiene instalado un equipo de protección en su nodo inicial, en cada sistema se utiliza un *F60 Feeder Management Relay*, es un relé digital multifuncional que usa la tecnología de comunicación electrónica denominada IED (Intelligent Electronic Device)[8].

¹Se seleccionaron los reportes de falla que presentan evidencias de donde ocurrió la falla, los reportes donde no se encontró evidencias de falla se descartaron para las pruebas.

²En los reportes de falla se define evento a la falla ocurrida en el sistema.

³Las secciones donde se estimo el punto de falla son mayores a $0,18km$.

El dispositivo está configurado con las funciones de 50 y 51 activas las cuales se definen como tiempo instantáneo y la curva de sobrecorriente de tiempo inverso respectivamente, tiene la capacidad de muestrear hasta 64 veces por ciclo de la frecuencia industrial los valores de tensión y corriente. Al momento de presentarse una falla genera un archivo de oscilografía, en el cual se almacena las ondas de tensión y corriente antes, durante y después de que ocurre la falla, además el archivo de oscilografía determina los fasores de tensión y corriente para cada punto de la onda almacenada ⁴.

A.4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Los resultados se presentan en dos tablas, una por cada sistema. Las pruebas están ordenadas de acuerdo a la fecha del evento de forma descendente. Para cada prueba se presenta el nodo donde ocurrió la falla, el tipo de falla, la distancia al punto de falla, la sección y la distancia estimada por el algoritmo. Los datos se comparan a partir del cálculo del error relativo.

Tabla A.1: Estimación de distancia de falla en el sistema línea arenales

Fecha evento	Nodo	Tipo de de falla	Distancia Real(km)	Distancia Estimada(km)	Error (%)
Julio 9 2003	46	B-t	3,704	3,985	-7,566
Julio 25 2003	140	A-t	7,542	-	-
Marzo 29 2004	40	C-t	3,007	3,380	-12,405
Abril 27 2004	13	A-B-t	3,098	2,830	7,640
Abril 29 2004	9	C-t	0,975	0,864	11,317
Mayo 21 2004	147	A-t	6,005	4,307	28,265
Julio 2 2004	9	C-t	1,043	0,888	14,889
Agosto 19 2004	148	B-C	5,994	4,934	17,683
Agosto 27 2004	130	C-t	5,773	4,081	29,302

Tabla A.2: Estimación de distancia de falla en el sistema línea río negro

Fecha evento	Nodo	Tipo de de falla	Distancia Real(km)	Distancia Estimada(km)	Error (%)
Octubre 29 2003	28	C-t	5,318	5,360	-0,780
Abril 19 2004	18	A-t	3,900	2,500	35,887
Abril 25 2004	20	B-t	4,016	2,423	39,660
Noviembre 22 2004	17	A-t	4,016	1,245	69,017

⁴Solo se han mencionado las características del F60 que son relevantes para las pruebas.