

# ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN PARA LA APLICACIÓN GENERALIZADA DE LOCALIZADORES DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

ANDRÉS BEDOYA-CADENA\*  
JUAN MORA-FLÓREZ\*\*  
SANDRA PÉREZ-LONDOÑO\*\*\*

## RESUMEN

En este artículo se presenta una estrategia generalizada para llevar a cabo la reducción de sistemas de distribución ramificados a alimentadores radiales equivalentes, como procedimiento básico para la aplicación generalizada de muchos de los métodos de localización de fallas basados en la estimación de la impedancia. La estrategia propuesta se prueba al implementar un método de localización de fallas, donde se muestra la facilidad para el análisis de las localizaciones y adicionalmente con errores en la estimación de la distancia a la falla inferiores al 3,5 % para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas. Estos resultados confirman la validez de la propuesta.

**PALABRAS CLAVE:** calidad de energía; métodos de localización de fallas; alimentador radial equivalente; sistemas de distribución.

---

\* Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira. Asistente de Investigación, Programa de Ingeniería Eléctrica, Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad (ICE3), Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. afbedoya@utp.edu.co

\*\* Ingeniero Electricista y Magíster en Potencia Eléctrica, Universidad Industrial de Santander. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Universitat de Girona. Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Eléctrica, Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad (ICE3), Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. jjmora@utp.edu.co

\*\*\* Ingeniera Electricista, Magíster y Doctora (c) en Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira. Profesora Asociada, Programa de Ingeniería Eléctrica, Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad (ICE3), Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. saperez@utp.edu.co

## REDUCTION STRATEGY FOR GENERALIZED APPLICATION OF FAULT LOCATORS IN ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

### ABSTRACT

This paper presents a generalized strategy applied to perform the reduction of power distribution systems composed by several tapped feeders into equivalent radial feeders, as basic procedure required to the generalized implementation of impedance based fault location methods. The proposed strategy is tested using a fault location method, where it is shown a straightforward procedure to analyze the locations, and additionally the results shows errors lower than 3.5 % in the distance estimation for single line to ground, phase to phase, three phase faults. These results confirm the validity of the proposal.

KEY WORDS: power quality; fault location methods; equivalent feeder; power distribution systems.

## ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO PARA A APLICAÇÃO GENERALIZADA DE LOCALIZADORES DE FALHAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### RESUMO

Neste artigo apresenta-se uma estratégia generalizada para realizar a redução de sistemas de distribuição ramificados a radiais equivalentes, como procedimento básico para a aplicação generalizada de muitos dos métodos de localização de falhas baseados na estimativa da impedância. A estratégia proposta prova-se ao levar a prática um método de localização de falhas, onde se mostra a facilidade para a análise das localizações e adicionalmente com erros na estimativa da distância à falha inferiores ao 3,5 % para o caso monofásico, bifásico e trifásico.

PALAVRAS-CÓDIGO: qualidade de energia; métodos de localização de falhas; radial equivalente; sistemas de distribuição.

### 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica es un tema de amplia investigación, debido al gran interés que despierta en los operadores del sistema eléctrico. Entre los aspectos más importantes de la calidad se tienen la forma de onda y la continuidad del suministro.

Con relación a la continuidad, en Colombia se definió el Índice de Referencia Agrupado de la Discontinuidad (IRAD), que relaciona la cantidad promedio de energía no suministrada, durante el período usado como referencia, y el Índice Trimestral Agrupado de la Discontinuidad (ITAD,) que relaciona la cantidad promedio de energía no suministrada durante el

trimestre de evaluación (CREG, 2008). La mayoría de entidades reguladoras del mundo han establecido límites de obligatorio cumplimiento para operadores de red, so pena de pagar compensaciones.

Las fallas en la red eléctrica son causas fundamentales que afectan la continuidad del suministro de energía. Si se pueden localizar eficiente y oportunamente, se contribuirá a que las empresas distribuidoras de energía eléctrica mejoren sus índices de continuidad (Mora, 2006).

El problema de localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica es complejo y aún no ha sido resuelto en su totalidad. Debido a que muchas de las metodologías propuestas para



localizar fallas emplean datos del modelo de red, que por lo general se encuentran en una base de datos o en algún programa de simulación, surge la necesidad de una herramienta que permita efectuar el intercambio de información con el localizador de fallas, para que éste pueda utilizarse de forma generalizada en cualquier circuito real.

En este artículo se propone una estrategia para lectura y procesamiento de la información del circuito real, almacenada en una base de datos e integrada a una tarjeta de ATP (Alternative Transients Program). Además, se propone una metodología para la reducción de cualquier circuito a un equivalente simplificado con un único lateral de  $n$  cargas intermedias, para la implementación generalizada de métodos de localización de fallas en sistemas de distribución reales.

Como contenido, en la sección 2 se presentan los aspectos teóricos de algunos métodos de localización y del lenguaje de intercambio de datos propuesto para la representación de las cargas y la admitancia equivalente de un circuito. En la sección 3 se describe la estrategia propuesta por los autores para la reducción de sistemas radiales para obtener un radial equivalente. En la sección 4 se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología de reducción propuesta y los resultados obtenidos al aplicar

un método de localización de fallas. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones más importantes de la investigación.

## 2. CONCEPTUALIZACIÓN BÁSICA ASOCIADA

### 2.1 Algunos métodos de localización de fallas paralelas en sistemas de distribución

En esta sección se presenta, mediante tres casos, la estructura conceptual de los métodos de localización de fallas.

#### 2.1.1 Método de la componente reactiva de falla

El método descrito en Warrington (1968) determina la distancia a una falla entre los nodos M y N de la figura 1, a partir de la reactancia de falla y la reactancia total de la línea.

Para determinar la reactancia de falla se utilizan medidas de tensión ( $V_{mf}$ ) y corriente ( $I_{mf}$ ) en el nodo M y en estado de falla, como se presenta en (1).

$$Z_{falla} = \frac{V_{mf}}{I_{mf}} = d \cdot Z_L + R_f \quad (1)$$

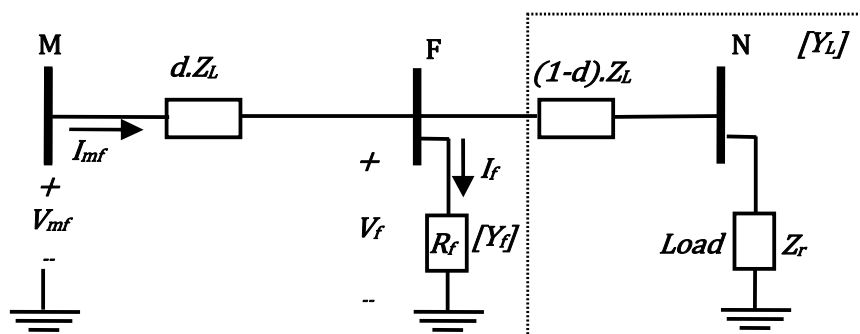


Figura 1. Circuito en condición de falla

Si se conoce la impedancia total de la línea ( $Z_L$ ) entre los nodos M y N, ignorando la carga y aprovechando que la impedancia de falla ( $R_f$ ) es completamente resistiva, se propone una comparación entre la impedancia de falla y la impedancia de la línea, para así obtener la distancia a la falla ( $d$ ) mediante la ecuación 2.

$$d_{(p.u.)} = \frac{\text{Imag}(Z_{falla})}{\text{Imag}(Z_L)} \quad (2)$$

### 2.1.2 Método propuesto por Novosel et al.

El método de Novosel et al. (1998) propone una técnica de localización que emplea un circuito de componentes superimpuestas (figura 2). Este circuito refleja el cambio que sufre una sección de línea de un circuito de distribución entre los nodos M y N, en estado de prefalla a falla.

La impedancia de la fuente se halla empleando (3), en donde las mediciones de tensión en prefalla ( $V_{mp}$ ) y en condición de falla ( $V_{mf}$ ), al igual que las corrientes en prefalla ( $I_{mp}$ ) y en condición de falla ( $I_{mf}$ ), en el nodo M, se obtienen con la red de secuencia positiva.

$$Z_s = -\frac{\Delta V_m}{\Delta I_m} = -\frac{V_{mf} - V_{mp}}{I_{mf} - I_{mp}} \quad (3)$$

Del circuito de la figura 2 se define un factor de distribución de corriente  $\delta_i$ , con la componente superimpuesta de corriente ( $\Delta I_m$ ) y la corriente por la falla ( $I_f$ ), como se presenta en (4).

$$\delta_i = \frac{\Delta I_m}{I_f} = \frac{(1-d) \cdot Z_{L1} + Z_{Load}}{Z_s + Z_{L1} + Z_{Load}} \quad (4)$$

Utilizando el circuito en falla de la figura 1, pero en componentes de secuencia y considerando la impedancia de secuencia positiva de la línea ( $Z_L$ ) y la carga ( $Z_{load}$ ) en el nodo N, y empleando (4) se puede obtener:

$$V_{mf} = d \cdot Z_{L1} \cdot I_{mf} + R_f \cdot I_f = d \cdot Z_{L1} \cdot I_{mf} + R_f \cdot \left( \frac{\Delta I_m}{\delta_i} \right) \quad (5)$$

La distancia a la falla ( $d$ ) y la resistencia de falla ( $R_f$ ) se obtiene resolviendo (5).

### 2.1.3 Método propuesto por Choi et al.

El método de localización de fallas propuesto por Choi et al. (2004) ejecuta un análisis directo del circuito en componentes de fase. De la figura 1, la tensión en el nodo M está dada por (6).

$$[V_{mf}] = d \cdot [Z_L] \cdot [I_{mf}] + [V_f] \quad (6)$$

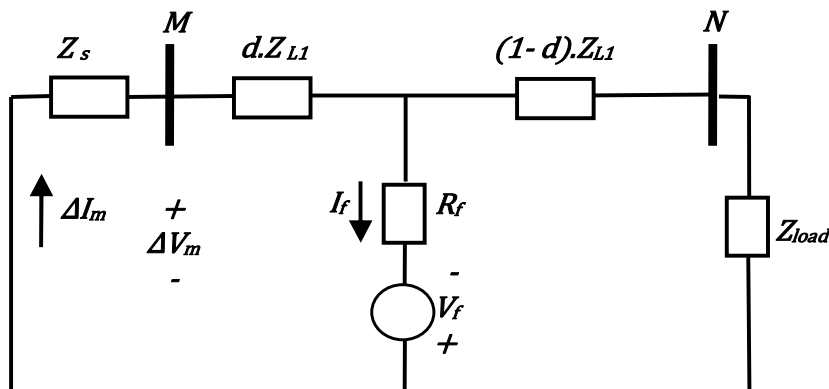


Figura 2. Circuito de las componentes superimpuestas



En el nodo de falla (F), existen dos circuitos en paralelo, uno asociado a la admitancia de falla  $[Y_f]$  y otro a la admitancia de carga  $[Y_L]$ .

La admitancia de la carga  $[Y_L]$  se obtiene calculando el inverso de la impedancia de línea entre el nodo F y N y la impedancia de carga conectada al nodo N. Aplicando la ley de distribución de corrientes en un circuito paralelo, se obtiene el valor de la corriente de falla:

$$[I_f] = [Y_f]([Y_f] + ((1 - d) \cdot [Z_L] + [Z_r])^{-1})^{-1} \cdot [I_{mf}] \quad (7)$$

Empleando las ecuaciones (6) y (7), se obtiene una ecuación compleja que tiene únicamente como incógnitas la distancia a la falla ( $d$ ) y la resistencia de falla ( $R_f$ ).

## 2.2 Retos para la utilización de los localizadores en sistemas de distribución reales

Como se presentó en la sección 2.1, los métodos de localización de fallas están propuestos para encontrar una falla en una sección de línea (entre nodos M y N); sin embargo, los sistemas de distribución reales son de topología radial y bastante ramificados, con diferentes tipos de conductor, longitud y configuración. Esto muestra claramente que la aplicación de un método definido entre los

nodos M y N requiere un conjunto de estrategias que permitan hacerlo aplicable a un circuito real como el de la figura 3, tal como proponen los autores en este artículo.

A partir de la figura 3,  $C_i$  es la configuración  $i$ -ésima del tramo de línea, que depende del calibre, de la disposición y de la longitud de los conductores de cada sección.

Como los sistemas de distribución son complejos, se deben tener disponibles la información de la impedancia de cada tramo de línea ( $Z$ ) y los valores de admitancia de las cargas ( $Y$ ). Adicionalmente, como los métodos de localización están definidos para una sección, se requiere una estrategia generalizada para su implementación a partir de la definición de un radial equivalente, formado solo por líneas y cargas, que represente una parte del sistema de distribución original. En un sistema de distribución existen tantos radiales equivalentes como nodos finales haya. Para el sistema presentado en la figura 3, se tienen 5 radiales equivalentes y uno de estos corresponde al presentado en la figura 4.

## 2.3 Aspectos básicos del XML (Extensible Markup Language)

El lenguaje extensible de marcado XML es un lenguaje que se está convirtiendo rápidamente en un estándar para el almacenamiento estructurado de datos. Este es un metalenguaje extensible de

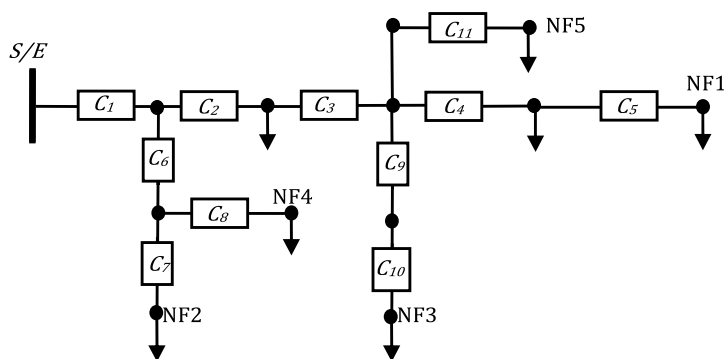


Figura 3. Topología general de los sistemas de distribución

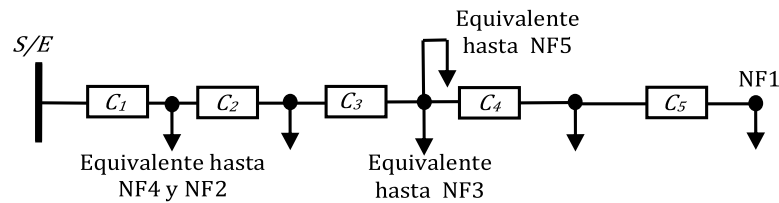


Figura 4. Radial equivalente

etiquetas desarrollado por el World Wide Web Consortium (W3C), que recurre a etiquetas para marcar, describir, clasificar y organizar información de una manera específica (W3C, 2008).

El XML se usa para el almacenamiento óptimo de datos y, por lo general, los lenguajes de programación empleados para el desarrollo de aplicaciones pueden leer la información que contienen los documentos XML de una forma ágil, sencilla y confiable.

Un documento en formato XML posee como característica principal la utilización de etiquetas definidas por el usuario con la siguiente estructura: <Etiqueta>INFORMACION</Etiqueta>.

### 2.4 Manejo de cargas a partir del análisis matricial

La mayoría de los transformadores de distribución tienen conexión delta-estrella, y para propósitos de localización de fallas, las cargas pueden modelarse a partir de una admitancia constante. En caso de una conexión en delta, si se conoce la admitancia entre fases (Y), la ecuación 8 relaciona las tensiones (V) y las corrientes (I), de donde se infiere cuál es la matriz de admitancia de carga (Morales, Mora y Vargas, 2010).

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y_{AB} + Y_{CA}) & -Y_{AB} & -Y_{CA} \\ -Y_{AB} & (Y_{BC} + Y_{AB}) & -Y_{BC} \\ -Y_{CA} & -Y_{BC} & (Y_{CA} + Y_{BC}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

Cuando la carga es bifásica, se hacen cero las admitancias donde hay circuito abierto. Una carga monofásica es un caso especial de una carga con conexión en estrella aterrizada, que se describe por medio de la ecuación 9, y las admitancias donde hay circuito abierto son iguales a cero.

$$Y_{CARGA} = \begin{bmatrix} Y_A & 0 & 0 \\ 0 & Y_B & 0 \\ 0 & 0 & Y_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.5 Admitancia equivalente de un circuito

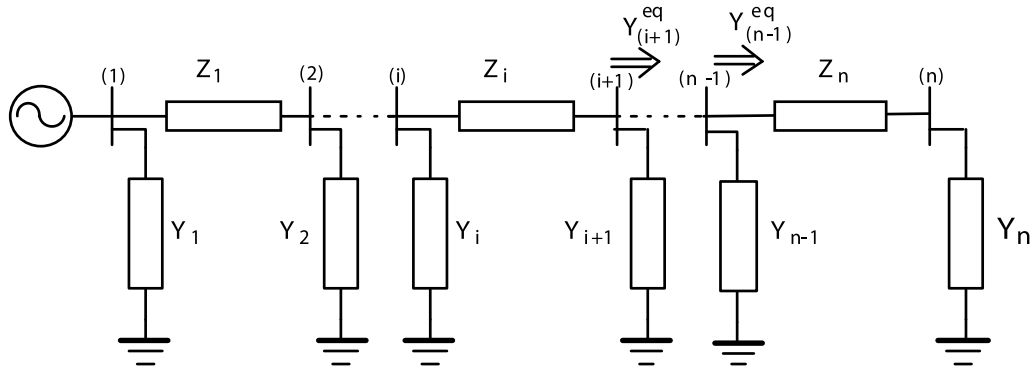
Para obtener radiales equivalentes a partir de un sistema de distribución ramificado, es necesario acumular subcircuitos que se desprenden de sus nodos de bifurcación. Estos sistemas equivalentes son necesarios, dado que son los que utilizan los métodos de localización de fallas comúnmente encontrados en la literatura científica (Warrington, 1968; Das, 1998; Novosel *et al.*, 1998; Choi *et al.*, 2004; Mora, 2006).

En la figura 5 se presenta un circuito simplificado de un alimentador con n cargas laterales.

A partir de la figura 5, la admitancia equivalente en el nodo (n-1) es la mostrada en (10).

$$Y_{n-1}^{eq} = Y_{n-1} + [Z_{n-1} + [Y_n]^{-1}]^{-1} \quad (10)$$

Las cargas están representadas por su admitancia  $Y_i$  mientras que las líneas se representan por la impedancia  $Z_i$ . Debido a que las matrices de



**Figura 5.** Reducción de un circuito mediante la admitancia equivalente

admitancias resultan ser singulares y no es posible obtener su inversa, el cálculo de la admitancia equivalente se realiza empleando (11) que se deriva y se justifica a partir de lo demostrado en las ecuaciones (12).

$$Y_i^{eq} = \begin{cases} Y_N & \text{si } i = n \\ Y_i + Y_{i+1}^{eq} [Z_{n-1} Y_{i+1}^{eq} + I]^{-1} & \text{si } 1 \leq i \leq n-1 \end{cases} \quad (11)$$

La expresión matricial  $[A + B^{-1}]^{-1}$ , que corresponde al segundo término de la parte derecha de (10), puede reescribirse realizando algunas operaciones previas presentadas en (12) (Morales, Mora y Vargas, 2010).

$$\begin{aligned} A + B^{-1} &= (A + B^{-1}).B.B^{-1} \\ A + B^{-1} &= (A.B + I).B^{-1} \\ [A + B^{-1}]^{-1} &= [(A.B + I).B^{-1}]^{-1} \\ [A + B^{-1}]^{-1} &= [B^{-1}]^{-1}.[A.B + I]^{-1} \\ [A + B^{-1}]^{-1} &= B.[A.B + I]^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

Este planteamiento es la estrategia básica para la obtención del radial equivalente.

### 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El desarrollo de una estrategia de reducción de sistemas de distribución ramificados a sistemas radiales equivalentes es básico para la aplicación automática y generalizada de localizadores basados en la estimación de la impedancia (Bedoya, 2010). La metodología automática para la reducción de los circuitos que se propone en este artículo se divide en dos etapas principales que se presentan en la figura 6.

#### 3.1 Etapa 1. Generación de base de datos del circuito en XML y almacenamiento en MATLAB

El programa de simulación ATP almacena todos los parámetros del circuito en un texto plano con una estructura definida denominada tarjeta (ATP, 2002; Prikler y Høidalen, 2002). A partir de estas tarjetas se puede obtener de forma automática la información necesaria para propósitos de localización de fallas en la red de distribución. Para esto, lo primero que se propone es realizar la lectura de las tarjetas del ATP y guardar su información en un formato estándar para el almacenamiento de datos en XML.

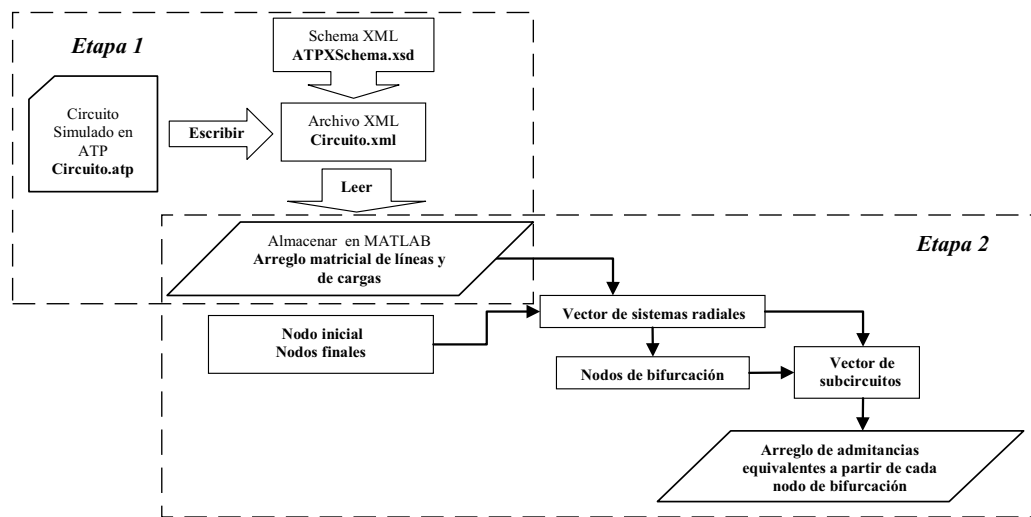


Figura 6. Etapas de la estrategia general de reducción

Para producir la escritura de la base de datos en XML (archivo con extensión \*.xml), se requiere definir un esquema estructural utilizando un archivo con extensión \*.xsd, que se encuentra asociado a la base de datos escrita en XML.

Finalmente, con la base de datos en formato XML y mediante la herramienta “The XML Toolbox” (Molinari y Cox, 2007), de distribución gratuita, y en combinación con MATLAB, se efectúa la lectura y almacenamiento de los datos del circuito en dos arreglos matriciales. El primero de estos arreglos contiene la siguiente información de las líneas del circuito: nombre del tramo de línea, identificador del nodo inicial y del final, matriz de impedancia del tramo y longitud del tramo.

El segundo arreglo matricial contiene información de las cargas del circuito, el identificador del nodo al cual se encuentra conectada la carga y las matrices de admitancia.

### 3.2 Etapa 2. Algoritmo de reducción de sistemas ramificados a radiales equivalentes

A partir de los arreglos matriciales de líneas y cargas, y con la información del nodo inicial y los

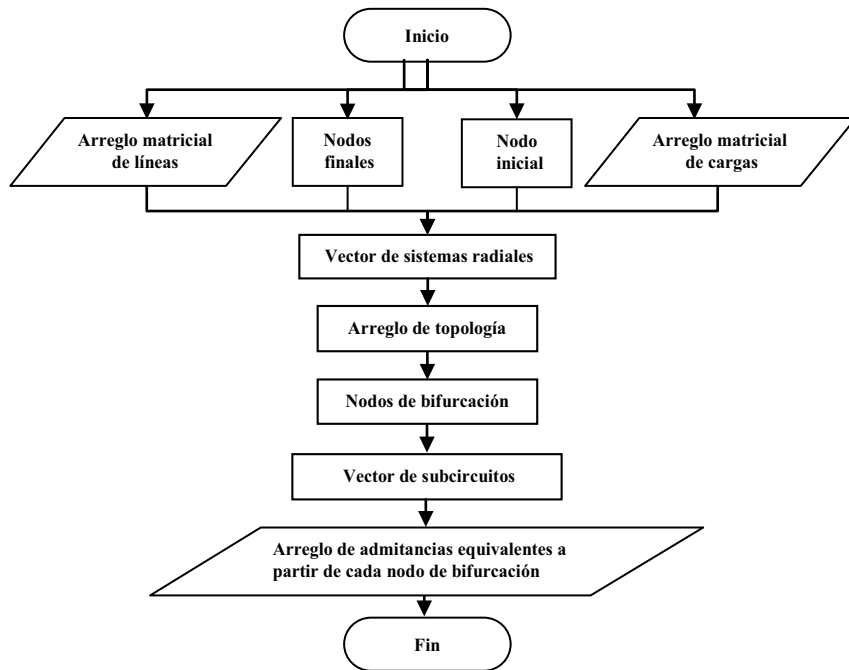
nodos finales del sistema por reducir, se generan otros arreglos matriciales que, junto con los arreglos iniciales, suministran toda la información de los sistemas radiales equivalentes, tal como se representa esquemáticamente en la figura 7.

#### 3.2.1 Obtención del vector de sistemas radiales

Para obtener el vector de sistemas radiales, se precisa conocer los nodos finales del sistema que se va a reducir. Con cada uno de los nodos finales, que se almacena en el arreglo de topología de un sistema radial, se realiza la búsqueda del nodo almacenado en el arreglo matricial de líneas como nodo inicial de línea. Este nodo se almacena en el arreglo de topología. A continuación, el nodo inicial almacenado pasa a ser el final y esta operación se realiza repetidamente hasta recorrer todo el circuito, lo que equivale a encontrar el nodo inicial, que a su vez corresponde a la subestación principal.

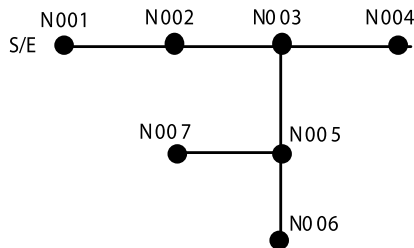
A manera de ejemplo sencillo, para el sistema mostrado en la figura 8, que tiene tres nodos finales (N004, N006 y N007) y un nodo inicial (N001), siguiendo el método descrito, se encuentra un arreglo de topología de un sistema radial, como el mostrado en la tabla 1.





**Figura 7.** Reducción de sistemas ramificados a radiales equivalentes

El método descrito permite obtener todos los sistemas radiales del sistema. Finalmente, el arreglo de sistemas radiales es un vector que contiene las secuencias de nodos que forman cada uno de los sistemas radiales equivalentes del sistema ramificado por reducir. Para el sistema del ejemplo mostrado en la figura 8, el vector de sistemas radiales se presenta en la tabla 2.



**Figura 8.** Sistema de distribución simplificado

**Tabla 1.** Arreglo de topología de un sistema radial

Nodo Inicial	Nodo Final	Fila arreglo de líneas
'N005'	'N006'	5
'N003'	'N005'	4
'N002'	'N003'	2
'N001'	'N002'	1

**Tabla 2.** Vector de sistemas radiales del sistema ramificado de ejemplo

Sistema radial 1			Sistema radial 2			Sistema radial 3		
'N003'	'N004'	3	'N005'	'N006'	5	'N005'	'N007'	6
'N002'	'N003'	2	'N003'	'N005'	4	'N003'	'N005'	4
'N001'	'N002'	1	'N002'	'N003'	2	'N002'	'N003'	2
			'N001'	'N002'	1	'N001'	'N002'	1

### 3.2.2 Determinación de los nodos de bifurcación

Para obtener un sistema radial equivalente es importante conocer cuáles son los nodos que en el sistema de distribución presentan bifurcaciones, ya que a partir de estos se desprenden dos o más subcircuitos, que vistos desde un radial equivalente son admitancias concentradas en estos nodos.

Los nodos con bifurcaciones se identifican mediante un arreglo topológico del sistema de distribución. Del arreglo matricial de líneas se extraen las columnas de nodos iniciales y finales y además se adiciona una columna que hace referencia a la fila del arreglo matricial de líneas.

Para el sistema mostrado en la figura 8, el arreglo de topología corresponde al presentado en la tabla 3. Por fin, en el arreglo de topología se buscan en la columna 'Nodo inicial' los nodos que se repiten y estos corresponden a los nodos de bifurcación del sistema ramificado.

Según el arreglo presentado en la tabla 3, los nodos identificados como 'N003' y 'N005' son nodos de bifurcación, lo cual se verifica con facilidad al observar la figura 8.

**Tabla 3.** Arreglo de topología del sistema de prueba

Nodo Inicial	Nodo Final	Fila arreglo de líneas
'N003'	'N004'	3
'N002'	'N003'	2
'N001'	'N002'	1
'N005'	'N006'	5
'N003'	'N005'	4

### 3.2.3 Obtención del arreglo de admitancias equivalentes a partir de un nodo de bifurcación

Para hallar cuál es el subcircuito que se desprende del nodo de bifurcación, se busca este nodo en todos los sistemas radiales, a excepción del sistema radial con el que se inició el procedimiento. Luego,

se guarda la secuencia de nodos del sistema radial, hasta la posición de la columna nodo inicial, donde se encuentre el nodo de bifurcación analizado.

El procedimiento descrito se efectúa para todos los nodos de bifurcación del sistema. En un arreglo de subcircuitos se almacenan el número del sistema radial del cual empezó la búsqueda, el nodo de bifurcación y el subcircuito hallado. Debido a que los subcircuitos encontrados pueden presentar bifurcaciones, se debe hacer una nueva búsqueda de subcircuitos en este arreglo. Este procedimiento se debe realizar hasta que no se encuentren más subcircuitos.

Al terminar se obtiene un vector de arreglos de subcircuitos, tal como el presentado en la tabla 4, para el sistema mostrado en la figura 8.

Más adelante, se calcula la admitancia equivalente de cada subcircuito, empezando por el último arreglo encontrado. Se procede en este orden, puesto que para obtener la admitancia equivalente de los demás subcircuitos se requiere la admitancia equivalente obtenida para los últimos.

Al final se obtiene un arreglo matricial de admitancias equivalentes donde se almacena el número que identifica al sistema radial, el identificador del nodo de bifurcación y la admitancia equivalente del subcircuito.

## 4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

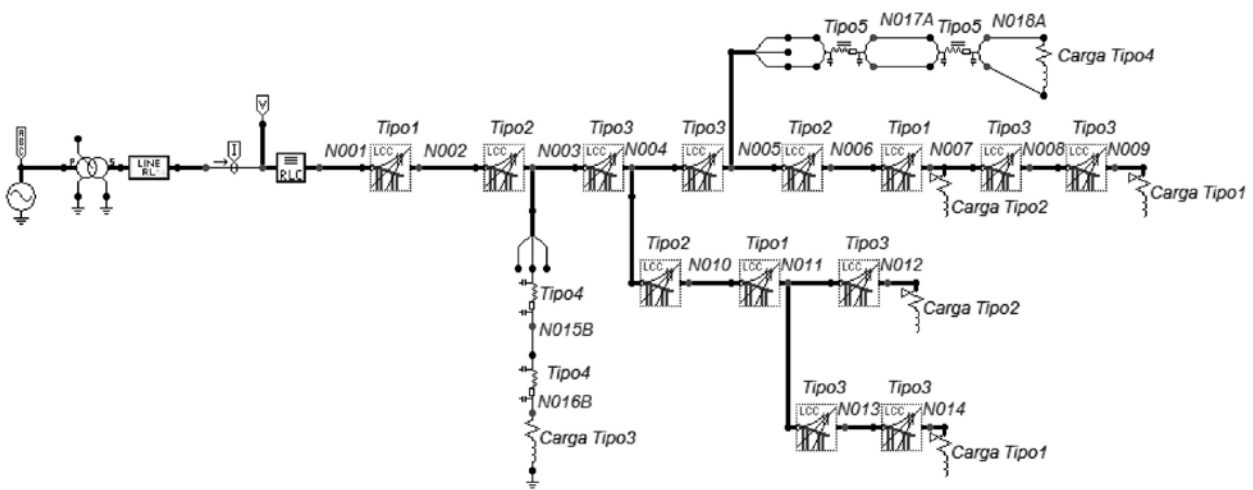
### 4.1 Sistema de distribución utilizado en las pruebas

Como sistema de prueba se utiliza un sistema de 13,2 kV, de 18 nodos y de 17 líneas, que se presenta en la figura 9. El sistema tiene un ramal principal trifásico que se bifurca en tres ocasiones. La primera bifurcación corresponde a un ramal monofásico, la segunda a un ramal trifásico, que a la vez se bifurca, y la tercera bifurcación a un ramal bifásico.



**Tabla 4.** Vector de subcircuitos del sistema de ejemplo

Subcircuitos (1)						Subcircuitos (2)				
# fila	Sistema radial	Nodo de bifurcación	Subcircuito			Fila de subcircuitos (1)	Nodo de bifurcación	Subcircuito		
1	1	'N003'	'N005'	'N006A'	5	1	'N005'	'N005'	'N007'	6
			'N003'	'N005'	4					
2	2	'N003'	'N003'	'N004'	3					
3	3	'N005'	'N005A'	'N007'	6					
4	3	'N003'	'N003'	'N004'	3					
5	3	'N005'	'N005A'	'N006'	5					



**Figura 9.** Sistema de distribución usado en las pruebas

El sistema de prueba presenta 5 tipos de líneas y 4 tipos de cargas que se muestran en la tabla 5 y en la tabla 6 respectivamente.

#### 4.2 Obtención de sistemas radiales equivalentes y arreglos del sistema de prueba

Los arreglos matriciales iniciales que constituyen los sistemas radiales equivalentes del sistema

de prueba son los arreglos de líneas y cargas. Estos se obtienen por el procedimiento propuesto en la sección 3.1 y presentan la estructura descrita en la misma sección.

En el sistema de prueba usado en este artículo se presentan 5 sistemas radiales. El primero de ellos empieza en el nodo 'N001' y termina en el nodo 'N009'. El segundo sistema radial equivalente va desde el nodo 'N001' hasta el nodo 'N012', tal como se muestra en la figura 10.

**Tabla 5.** Tipos de líneas del sistema de prueba

Tipo	Longitud [km]	Matriz de impedancia de línea [ohms]		
1 "Trifásica"	6	1,597+4,799i	0,343+3,040i	0,343+2,784i
		0,343+3,043i	1,597 + 4,799i	0,343+3,040i
		0,343+2,784i	0,343+ 3,040i	1,597+ 4,799i
2 "Trifásica"	4	1,065+3,199i	0,229+1,805i	0,229+1,596i
		0,229+1,805i	1,065+3,199i	0,229+1,805i
		0,229+1,596i	0,229+ 1,805i	1,065+3,199i
3 "Trifásica"	5	1,334+3,995i	0,289+2,319i	0,289+2,048i
		0,289+2,319i	1,334+3,999i	0,289+2,299i
		0,289+2,048i	0,289+2,299i	1,334+ 3,996i
4 "Monofásica"	5	$\infty + \infty j$	0 + 0i	0 + 0i
		0 + 0i	2,417+ 4,609i	0 + 0i
		0 + 0i	0 + 0i	$\infty + \infty j$
5 "Bifásica"	5	8,212+7,247i	0 + 0i	0,290+2,472i
		0 + 0i	$\infty + \infty j$	0 + 0i
		0,290+ 2,472i	0 + 0i	8,213 +7,246i

**Tabla 6.** Tipos de cargas del sistema de prueba

Tipo	Matriz de admitancia de carga [Siemens]		
1 "Trifásica"	1,219e-4-9,756e-5i	-6,098e-5+4,878e-5i	-6,098e-5+4,878e-5i
	-6,098e-5+4,878e-5i	1,219e-4-9,756e-5i	-6,098e-5+4,878e-5i
	-6,098e-5+4,878e-5i	-6,098e-5+4,878e-5i	1,219e-4-9,756e-5i
2 "Trifásica"	0,0001-5,000e-5i	-5,000e-5+2,500e-5i	-5,000e-5+2,500e-5i
	-5,000e-5+2,500e-5i	0,0001-5,000e-5i	-5,000e-5+2,500e-5i
	-5,000e-5+2,500e-5i	-5,000e-5+2,500e-5i	0,0001-5,000e-5i
3 "Bifásica"	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
	0 + 0i	8e-5-4e-5i	0 + 0i
	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
4 "Monofásica"	5,882e-5-1,471e-5i	0 + 0i	-5,882e-5+1,471e-5i
	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
	-5,882e-5+1,471e-5i	0 + 0i	5,882e-5-1,471e-5i

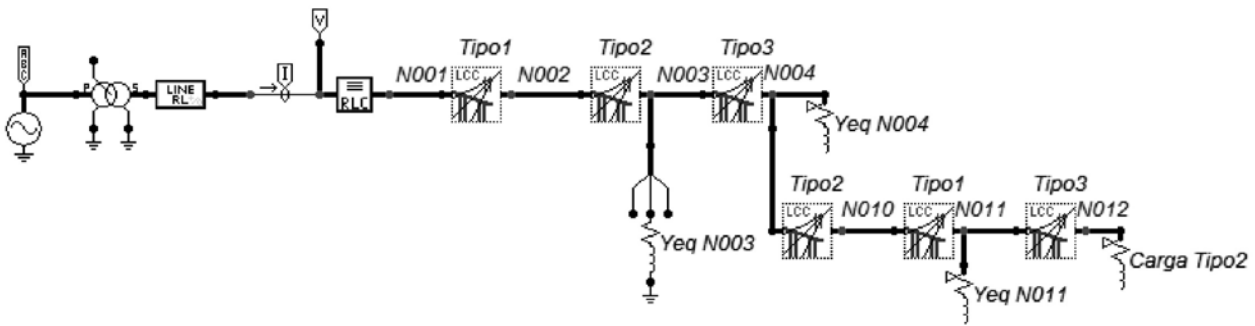


Figura 10. Sistema radial equivalente 2

Tabla 7. Vector de sistemas radiales del sistema de prueba

Sistema radial 1			Sistema radial 2			Sistema radial 3			Sistema radial 4			Sistema radial 5		
'N008'	'N009'	8				'N013'	'N014'	13				'N017'	'N018'	15
'N007'	'N008'	7	'N011'	'N012'	11	'N011'	'N013'	12				'N005'	'N017'	14
'N006'	'N007'	6	'N010'	'N011'	10	'N010'	'N011'	10	'N015'	'N016'	17	'N004'	'N005'	4
'N005'	'N006'	5	'N004'	'N010'	9	'N004'	'N010'	9	'N003'	'N015'	16	'N003'	'N004'	3
'N004'	'N005'	4	'N003'	'N004'	3	'N003'	'N004'	3	'N002'	'N003'	2	'N003'	'N004'	3
'N003'	'N004'	3	'N002'	'N003'	2	'N003'	'N004'	3	'N001'	'N002'	1	'N002'	'N003'	2
'N002'	'N003'	2	'N001'	'N002'	1	'N002'	'N003'	2				'N001'	'N002'	1
'N001'	'N002'	1				'N001'	'N002'	1						

Las secuencias de nodos que forman los sistemas radiales se almacenan en el vector de sistemas radiales, tal como se muestra en la tabla 7.

Para determinar los nodos de bifurcación, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la sección 3.3.2. Se obtiene el arreglo de topología mostrado en la tabla 8 y a partir de él se determina que los nodos de bifurcación son 'N005', 'N004', 'N003' y 'N011'.

Luego que se han determinado todos los nodos de bifurcación del sistema de prueba, se aplica el procedimiento descrito en la sección 3.2.3 para obtener

el arreglo de admitancias equivalentes mostrado en la tabla 9, a partir de los nodos de bifurcación.

### 4.3 Descripción de las pruebas y resultados

Para probar la estrategia de reducción se propone tomar los arreglos matriciales que forman los sistemas radiales equivalentes obtenidos en la sección 4.2, y usando esta información, programar y ajustar un método de localización de fallas basado en el modelo eléctrico de la red (Das, 1998).

Tabla 8. Arreglo de topología transpuesto del sistema de prueba

N008'	'N007'	'N006'	'N005'	'N004'	'N003'	'N002'	'N001'	'N011'	'N010'	'N013'	'N011'	'N004'	'N015'	'N003'	'N017'	'N005'
'N009'	'N008'	'N007'	'N006'	'N005'	'N004'	'N003'	'N002'	'N012'	'N011'	'N014'	'N013'	'N010'	'N016'	'N015'	'N018'	'N017'
8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	13	12	9	17	16	15	14

**Tabla 9.** Arreglo de admitancias equivalente del sistema de prueba

Sistema Radial	Nodo	Admitancia equivalente en el Nodo		
1	'N005'	5,869e-5 -1,471e-5i	0 + 0i	-5,869e-5 +1,471e-5i
		0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
		-5,869e-5 +1,471e-5i	0 + 0i	5,869e-5 -1,471e-5i
1	'N004'	2,593e-4 - 1,301e-4i	-1,296e-4 +6,501e-5i	-1,296e-4 +6,507e-5i
		-1,297e-4 +6,501e-5i	2,593e-4 - 1,301e-4i	-1,297e-4 +6,501e-5i
		-1,296e-4 +6,507e-5i	-1,296e-4 +6,501e-5i	2,593e-4 - 1,301e-4i
1	'N003'	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
		0 + 0i	7,992e-5 -4,001e-5i	0 + 0i
		0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
2	'N004'	2,797e-4 - 1,622e-4i	-1,106e-4 +7,369e-5i	-1,691e-4 +8,848e-5i
		-1,106e-4 +7,369e-5i	2,212e-4 - 1,474e-4i	-1,106e-4 +7,369e-5i
		-1,691e-4 +8,848e-5i	-1,106e-4 +7,369e-5i	2,797e-4 - 1,622e-4i
2	'N003'	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
		0 + 0i	7,992e-5 -4,001e-5i	0 + 0i
		0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
2	'N011'	1,598e-4 -8,003e-5i	-7,991e-5 +4,001e-5i	-7,989e-5 +4,002e-5i
		-7,991e-5 +4,001e-5i	1,598e-4 -8,001e-5i	-7,991e-5 +4,001e-5i
		-7,989e-5 +4,002e-5i	-7,991e-5 +4,001e-5i	1,598e-4 -8,003e-5i
3	'N004'	2,797e-4 - 1,622e-4i	-1,106e-4 +7,369e-5i	-1,691e-4 +8,848e-5i
		-1,106e-4 +7,369e-5i	2,212e-4 - 1,474e-4i	-1,106e-4 +7,369e-5i
		-1,691e-4 +8,848e-5i	-1,106e-4 +7,369e-5i	2,797e-4 - 1,622e-4i
3	'N003'	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
		0 + 0i	7,992e-5 -4,001e-5i	0 + 0i
		0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
3	'N011'	9,996e-5 -5,001e-5i	-4,998e-5 +2,500e-5i	-4,998e-5 +2,500e-5i
		-4,998e-5 +2,500e-5i	9,996e-5 -5,000e-5i	-4,998e-5 +2,500e-5i
		-4,998e-5 +2,500e-005i	-4,998e-5 +2,500e-5i	9,996e-5 -5,001e-5i
4	'N003'	5,378e-4 - 2,923e-4i	-2,399e-4 + 1,387e-4i	-2,979e-4 + 1,537e-4i
		-2,399e-4 + 1,387e-4i	4,797e-4 - 2,774e-4i	-2,399e-4 + 1,387e-4i
		-2,979e-4 + 1,537e-4i	-2,399e-4 + 1,387e-4i	5,378e-4 - 2,924e.4i
5	'N005'	2,214e-4 - 1,475e-4i	-1,107e-4 +7,372e-5i	-1,107e-4 +7,374e-5i
		-1,107e-4 +7,372e-5i	2,214e-4 - 1,474e-4i	-1,107e-4 +7,372e-5i
		-1,107e-4 +7,374e-5i	-1,107e-4 +7,372e-5i	2,214e-4 - 1,475e-4i
5	'N004'	2,593e-4 - 1,301e-4i	-1,296e-4 +6,501e-5i	-1,296e-4 +6,507e-5i
		-1,297e-4 +6,501e-5i	2,593e-4 - 1,301e-4i	-1,297e-4 +6,501e-5i
		-1,296e-4 +6,507e-5i	-1,296e-4 +6,501e-5i	2,593e-4 - 1,301e-4i
5	'N003'	0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i
		0 + 0i	7,992e-5 -4,001e-5i	0 + 0i
		0 + 0i	0 + 0i	0 + 0i

Por medio del ATP se simularon fallas monofásicas en la fase A del sistema radial equivalente de mayor longitud, el cual corresponde al sistema radial 1. Las fallas se simularon con diferentes resistencias de fallas (0,5, 10, 20, 30 y 40 Ω). Adicionalmente, empleando la ecuación 13 se calcula el error relativo en la estimación de la distancia a la falla. Los resultados del error relativo contra la distancia a la falla se muestran en la figura 11.

$$ErrorRelativo[\%] = \frac{DistanciaReal - DistanciaCalculada}{DistanciaReal} * 100 \tag{13}$$

Según la figura 11, se aprecia que los errores para los diferentes casos de fallas son inferiores al 3,5%, lo que indica una respuesta confiable para fallas monofásicas, demostrando así que la información obtenida por el algoritmo automático de determinación de los sistemas radiales equivalentes es fiable.



Además, se puede ver que el método de localización, cuando las resistencias de falla son superiores a  $10 \Omega$ , subestima el sitio de la falla. Para la resistencia de  $0,5 \Omega$  siempre se sobreestima el sitio de falla y para la resistencia de  $5 \Omega$  inicialmente se subestima el sitio de la falla y a partir de los 15 km del circuito se sobreestima el sitio de falla.

Ante fallas bifásicas y trifásicas, el método de localización obtiene gráficos de error relativo que muestran un comportamiento similar al de la figura 11, difiriendo primordialmente en el valor máximo de error relativo obtenido. Para fallas bifásicas los errores son inferiores a 2,5 %, y para trifásicas, inferiores a 2,4 %.

Los errores en la estimación de la falla varían de acuerdo con el tipo de falla, pues para cada tipo el análisis circuital que se realiza es diferente y también porque, a medida que se aumenta la resistencia de falla, el efecto de la carga se hace más evidente. Como la carga es una variable desconocida para todos los métodos que usan solo las medidas en

un terminal, el error se hace más pronunciado, tal como se muestra en la figura 11. El efecto de la subestimación está asociado a la menor variación de la impedancia aparente, respecto a la variación del equivalente de la resistencia de falla y la impedancia de carga del circuito.

## 5. CONCLUSIONES

Los métodos de localización de fallas que se basan en el modelo eléctrico de la red, normalmente se fundamentan en ecuaciones desarrolladas para una sección del circuito, pero para ser aplicadas en sistemas eléctricos reales se encuentra una gran dificultad en el manejo de información y la obtención automática de los parámetros de la red.

El lenguaje de marcas extensible XML permite situar toda la información de un circuito de la manera más conveniente, para aplicar la estrategia generalizada de reducción de sistemas de distribución ramificados a radiales equivalentes que se presenta en este artículo.

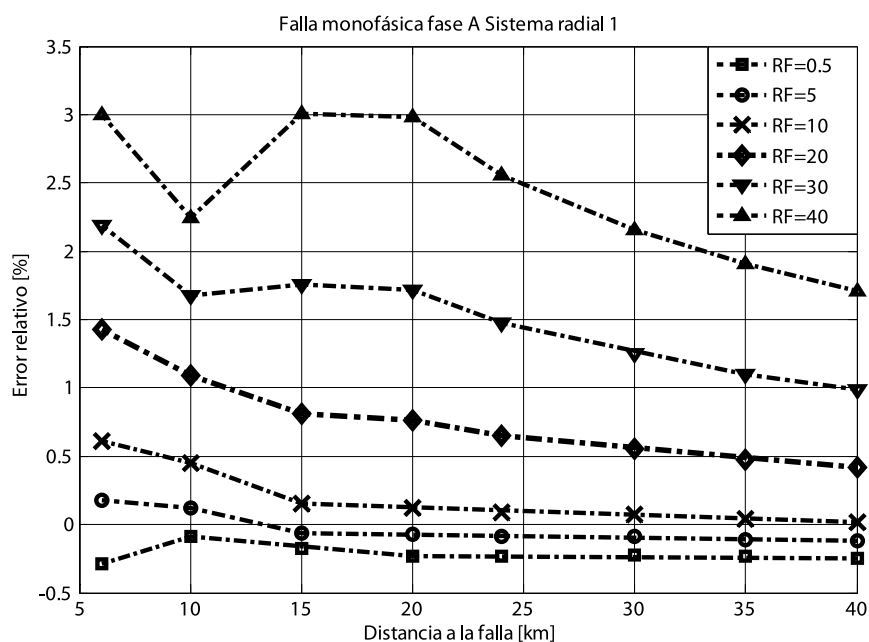


Figura 11. Error relativo ante fallas monofásicas en el sistema radial 1

Al revisar las referencias Warrington (1968), Das (1998), Novosel *et al.* (1998), Choi *et al.* (2004), Mora (2006) y Morales, Mora y Vargas (2010), asociadas a metodologías de localización de fallas que se basan en la estimación de la impedancia, se verifica que en ninguna de ellas se presenta un algoritmo que permita reducir sistemas ramificados a radiales equivalentes, para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica, lo que ratifica el aporte que cumple este artículo.

De acuerdo con las pruebas realizadas para validar la propuesta del artículo, se observa que el algoritmo de reducción desarrollado y aplicado al propuesto por Das (1998) presenta un buen desempeño ante fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas, pues los errores son inferiores a 3,5 %, a 2,5 % y a 2,4 % respectivamente, para un rango de resistencias de falla entre 0,5 y 40  $\Omega$ . En general, comparando esta metodología de localización con otras propuestas, se tiene un comportamiento similar, aunque cabe resaltar que el circuito de prueba no es un circuito comúnmente utilizado en la bibliografía y, por lo tanto, la comparación no es del todo estricta. El circuito de prueba empleado en este artículo se propone para presentar de manera didáctica una estrategia de reducción de sistemas de distribución, con el fin de realizar la aplicación generalizada de métodos de localización de fallas que se fundamentan en la estimación de la impedancia.

La base de datos que contiene los circuitos radiales equivalentes, generaliza y facilita la labor de implementar de una forma adecuada muchos de los métodos de localización de fallas basados en la estimación de la impedancia. Además esta base de datos no es de uso exclusivo en el problema de localización de fallas, pues presenta la posibilidad de ser el medio para comunicar información de cualquier otro tipo de análisis que tengan relación con sistemas eléctricos de distribución.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el grupo de investigación ICE3 y apoyado por la Universidad Tecnológica de Pereira por medio de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión y por el programa de Jóvenes Investigadores e Innovadores “Virginia Gutiérrez de Pineda” de Colciencias.

## REFERENCIAS

- ATP. (2002). *Alternative transient program rulebook*. Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP\_CAUE. 2002.
- Bedoya, A. *Desarrollo de un modelo para intercambio de datos entre ATP y MATLAB aplicado al problema de localización de fallas en sistemas eléctricos de distribución*. Trabajo de grado (Ingeniería Eléctrica). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2010.
- Choi, M.-S.; Lee, S.-J.; Lee, D.-S. and Jin, B.-G. (2004). “A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, No. 1 (January), pp. 35-41.
- CREG. (2008). Resolución CREG 097 de 2008. Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG [en línea] (Capítulo 11) [consultado el 15 de marzo de 2011]. Disponible en: <[http://www.creg.gov.co/html/i\\_portals/index.php?p\\_origin=internal&p\\_name=content&p\\_id=MI-182&p\\_options=](http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-182&p_options=)>.
- Das, R. (1998). *Determining the locations of faults in distribution systems*. Doctoral thesis. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1998.
- Molinari, M. and Cox S. (2007). *The XML toolbox: A user's guide*. The Geodise Project, University of Southampton [consultado el 10 de junio de 2010]. Disponible en: <[http://www.geodise.org/toolboxes/generic/xml\\_toolbox.htm](http://www.geodise.org/toolboxes/generic/xml_toolbox.htm)>.
- Mora, J. *Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento*. Tesis doctoral. Universitat de Girona, España, 2006.
- Morales, G.; Mora, J. and Vargas, H. (2010). *Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems*. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010 IEEE/PES. Sao Paulo, Brazil (8-10 November).





---

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 (17 November 1998).

Prikler, L. and Høidalen, H. (2002). *ATP draw manual, version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP*. 2002.

Warrington, A. R. van C. *Protective relays: Their theory and practice*. Vol. I. London: Chapman and Hall, 1968.

W3C (2008). *Extensible markup language (XML) 1.0* (fifth edition) [en línea] 2008 [consultado el 20 de octubre de 2010]. Disponible en: < <http://www.w3.org/TR/xml/>>.