

# TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS PARA UN SISTEMA DE POTENCIA RADIAL, CON CARGAS LATERALES DESEQUILIBRADAS Y CIRCUITOS NO HOMOGÉNEOS

## RESUMEN

Los métodos de localización de fallas en sistemas de distribución estiman la distancia de la falla a partir del fundamental de tensión y corriente, medidos en un extremo de la línea. La mayoría de los métodos no tienen en cuenta la no homogeneidad de los circuitos, la presencia de cargas laterales, monofásica, bifásica y trifásica. La precisión de estos métodos depende fundamentalmente de las cargas y de la resistencia de falla.

En este artículo se presenta un método que estima la localización de fallas paralelas en sistemas de distribución radial a partir de medidas de tensión y corriente a frecuencia fundamental en un terminal de la línea. En el método se tienen en cuenta las cargas desequilibradas, circuitos laterales y diferentes tipos de conductores a lo largo de la línea.

**PALABRAS CLAVES:** Fallas, localización, sistemas de distribución

## ABSTRACT

*Fault location methods applied to power distribution systems estimate the fault distance based on the fundamental component of single end voltages and currents. Most of these methods do not consider the non homogeneity of the distribution lines, load taps, laterals, presence of single phase and three phase loads and fault resistance.*

*This paper presents a fault location method to determine the fault distance on radial distribution power systems using single end voltages and currents. The presented method considers non equilibrate loads, laterals, and different types of conductors on the distribution circuit.*

**KEYWORDS:** Faults, location, power distribution systems

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas y con el aumento del consumo de electricidad, los sistemas eléctricos de potencia han ido creciendo en número y longitud de las líneas de transmisión y distribución. En caso de fallas, la restauración del servicio puede ser considerablemente más rápida si puede estimar el sitio de la falla, por tanto este tópico ha sido de considerable interés durante los últimos 30 años. Sin embargo, las investigaciones se han orientado a localizar fallos en sistemas de transmisión debido al impacto de las fallas sobre el sistema de potencia y al tiempo requerido para localizar la falla en líneas de gran longitud [1].

En los años recientes y resuelto el problema de fallas paralelas en líneas de transmisión, la investigación se orienta a la localización de fallas en sistemas de distribución debido a su gran complejidad por la presencia de conductores no homogéneos, cargas laterales y desbalance de carga. Adicionalmente, solo se cuenta con valores del fundamental de tensión y corriente, medidas en la subestación de distribución, para la localización de la falla.

## JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista Ph.D.(c)  
jjmora@ohm.utp.edu.co  
Profesor auxiliar,

## CÉSAR AUGUSTO CORTÉS

Ingeniero Electricista  
cortesar@ohm.utp.edu.co

## JORGE HERNÁN GUTIÉRREZ

Ingeniero Eléctricista  
jhg@ohm.utp.edu.co

Universidad Tecnológica de  
Pereira

Grupo de Planeamiento de  
Sistemas Eléctricos - GP

Los métodos más primitivos para la localización de fallas consisten en inspección visual de la línea, energización de la línea por partes para reducir la longitud total que tiene que ser inspeccionada, tarjetas de sobre-tensión ubicadas en las torres de transmisión y rastreadores de corriente. Estos procedimientos son lentos, inexactos y muy costosos [2][3].

Los métodos algorítmicos o basados en el modelo emplean los parámetros del sistema y la fundamental de tensión y corriente de prefalla y de falla. Tienen una alta precisión, pero en sistemas altamente ramificados y con diferentes calibres de conductor, ésta disminuye. Adicionalmente presentan problemas de múltiple estimación [4][5].

Finalmente, los métodos basados en el conocimiento se fundamentan en el aprovechamiento de la información obtenida a consecuencia de la automatización de redes de distribución. Estos evalúan valores de similitud entre la corriente de falla estimada y la medida. Tienen la ventaja que no necesitan el modelo del sistema para la localización de la falla, además de su fácil implementación. La principal desventaja radica en que no

estiman la localización exacta de la falla, sino por el contrario obtiene una región probable [3][5][6].

En este artículo se presenta la formulación del método para la falla monofásica. Posteriormente, se presenta el sistema de pruebas y el resultado de las simulaciones para localización de fallas. En la parte final, se presentan las conclusiones derivadas de la investigación.

## 2. ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE LOCALIZACIÓN

La técnica analizada determina inicialmente los nodos entre los cuales se encuentra la falla, a partir del fundamental de tensión y corriente. Luego emplea la componente reactiva de la impedancia para estimar la localización exacta de la falla entre los nodos determinados en el paso anterior. El método considera factores como cargas intermedias, laterales y diferentes tipos de conductores a lo largo de la línea.[2]

La técnica propuesta se describe considerando una falla  $F$  entre los nodos  $X$  y  $X+1$ , del sistema de distribución mostrado en la figura 1.

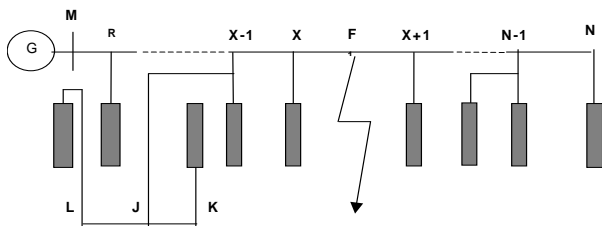


Fig. 1. Diagrama unifilar de una línea de distribución.

En el diagrama de bloques que se muestra en la figura 2, resume la técnica aquí analizada.

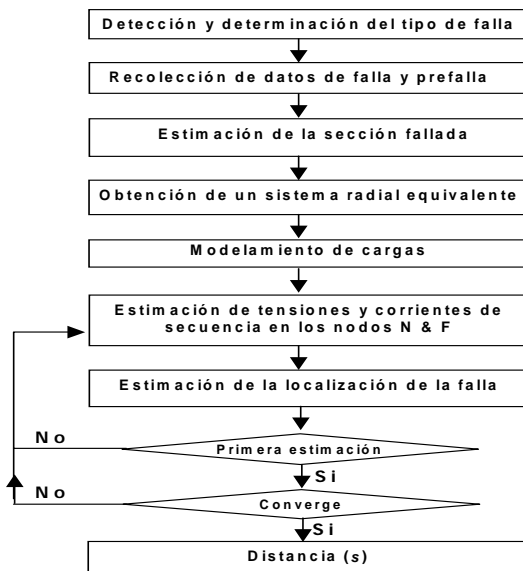


Fig. 2. Esquema del localizador de fallas.

### 2.1. Detección y determinación del tipo de falla

La corriente de línea estimada durante la falla contiene la componente de carga y también la componente de falla. Si una o más de las corrientes de línea  $I_{amr}$ ,  $I_{bmr}$ ,  $I_{cmr}$  es

más grande que una corriente de umbral  $I_t$ , se asume que ocurrió una falla. Si la magnitud de  $I_{0mr}$  es mayor que un valor de umbral  $I_{0t}$ , se asume que una o dos fases se encuentran en corto circuito con tierra.

A partir del análisis anterior, se determina el tipo de falla como se presenta en la figura 3

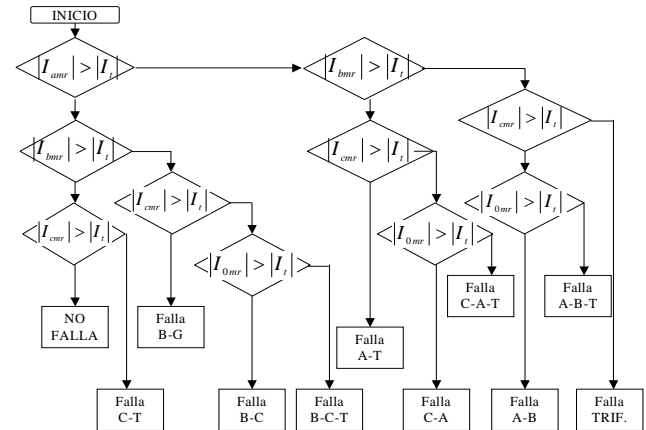


Fig. 3. Diagrama para determinar el tipo y las fases falladas.

### 2.2. Recolección de los datos de prefalla y falla

Una vez se detecta la falla se almacenan los valores de los fasores de tensiones y corrientes de prefalla. Los datos de falla se recolectan algunos ciclos después de la detección de la falla, cuando ya haya terminado el transitorio.

### 2.3. Estimación de la sección fallada

Las ecuaciones necesarias para calcular la impedancia aparente desde el nodo  $M$  hasta  $F$  dependen del tipo de falla y emplean las tensiones y corrientes durante la falla, despreciando los efectos de las cargas y la línea en vacío. Las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo  $M$  se obtienen a partir de la teoría de las componentes simétricas [7].

### 2.4. Estimación de la impedancia aparente - Caso de falla monofásica

A continuación se presenta el análisis para una falla monofásica a tierra. La deducción de la impedancia aparente para fallas fase-fase, fase-fase-tierra y trifásica se presenta en [3].

La ecuación para el cálculo de la reactancia aparente para una falla de la fase A a tierra se presenta en (1)

$$X_{m1} = \text{Im} (Z_{m1}) = \text{Im} \left( \frac{V_{am}}{I_{amr}} \right) \quad (1)$$

Donde:

$Z_{m1}$  Impedancia aparente de secuencia positiva, desde el nodo  $M$  hasta la falla.

$X_{m1}$  Reactancia aparente de secuencia positiva, desde el nodo  $M$  hasta la falla

La reactancia modificada es aquella que se obtiene mediante el análisis de las componentes simétricas. Con falla monofásica para la primera sección entre el nodo  $M$  y el nodo  $R$  se obtiene con (2)

$$X_{mr}^m = X_{1mr} + \frac{X_{0mr} - X_{1mr}}{3} \quad (2)$$

Donde:

- $X_{mr}^m$  Reactancia modificada entre el nodo  $M$  y  $R$
- $X_{0mr}$  Reactancia de secuencia cero entre  $M$  y  $R$
- $X_{1mr}$  Reactancia de secuencia positiva entre  $M$  y  $R$ .

Si la reactancia modificada es menor que la reactancia aparente, entonces la falla está localizada mas allá del nodo  $R$ . La reactancia de la segunda sección se calcula utilizando la ecuación (2), y adicionando la primera sección para obtener la reactancia modificada total. Si la nueva reactancia modificada es menor que la reactancia aparente, la falla está situada más allá de las primeras dos secciones. Se continúa el proceso iterativo hasta que la reactancia modificada total sea mayor que la reactancia aparente. Así la localización de la falla se obtiene en la sección  $X$  y  $X+1$ .

### 2.5. Obtención de un sistema radial equivalente

Establecida la localización de la falla, en la sección comprendida entre los nodos  $X$  y  $X+1$ , el sistema radial de distribución con laterales se convierte en un sistema radial sin laterales. La carga en un lateral se concentra en la unión con la línea. El sistema de distribución mostrado en la figura 1, para una falla en  $F$ , se modifica concentrando cargas en los laterales a los nodos  $X-1$  y  $N-1$  respectivamente. El sistema modificado se muestra en la figura 4.

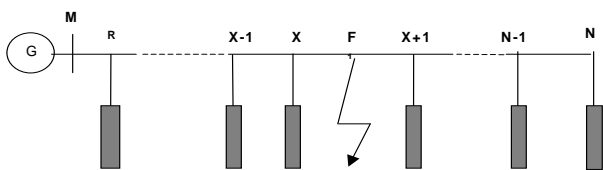


Fig. 4. Sistema radial equivalente para una falla en F

### 2.6. Estimación de las cargas

Los efectos de las cargas son considerados por la compensación de las corrientes. Se asume que las cargas en un nodo dependen de la tensión en ese nodo. Las constantes de la carga se estiman a partir de la tensión y las corrientes de pre-falla.

#### 2.6.1. Modelado de las cargas

Existen varios modelos para representar cargas en estudios de sistemas de transmisión [8]. La técnica utilizada emplea modelos de carga estáticos, tal como se presenta en la ecuación (3), para el nodo  $R$

$$Yr = Gr|Vr|^{np-2} + j Br|Vr|^{nq-2} \quad (3)$$

Donde:

- $Vr$ : Tensión en un nodo cualquiera  $R$
- $Yr$ : Admitancia de carga
- $Gr, Br$ : Constantes proporcionales a la conductancia y susceptancia respectivamente (estimadas de los valores de prefalla)
- $np, nq$ : Constantes para las componentes activa y reactiva de la carga.

Las tensiones y corrientes en el nodo  $F$  durante la falla, se calculan asumiendo que todas las cargas que están ubicadas después del sitio de la estimación de la falla, se concentran en el extremo remoto  $N$ .

Los modelos de carga de tipo estático requieren de consideraciones adicionales dependiendo de la conexión de la carga. Una carga monofásica se modela como una falla línea-tierra con una impedancia de falla igual a la impedancia de carga. Una carga bifásica se modela como una falla fase-fase con la impedancia de falla igual a la impedancia de carga. Las cargas trifásicas se asumen como cargas equilibradas y se modelan como fallas trifásicas equilibradas. Para todos los tipos de cargas se utiliza la representación de las redes de secuencia.

#### 2.6.2 Estimación de las cargas de prefalla hasta el nodo fallado

Determinada la sección fallada entre los nodos  $X$  y  $X+1$ , se calculan las cargas de prefalla en los todos nodos hasta el nodo  $X$ . La estimación se hace repartiendo la carga de prefalla en cada nodo involucrando un factor de diversidad, tal como se presenta en la ecuación (4).

$$Carga\ en\ R = Carga\ nominal\ en\ R \times \left( \frac{Carga\ total\ de\ prefalla}{Carga\ total\ conectada} \right) \quad (4)$$

La carga total de prefalla con la tensión y la corriente medidos en el nodo  $M$  y la potencia reactiva utilizada por la línea a tensión nominal. En el caso de sistemas automatizados con información de nodos, el valor en tiempo real de prefalla se usa como valor de carga.

#### 2.6.3. Estimación de las tensiones y corrientes de prefalla en los nodos

Las tensiones y corrientes se obtienen del modelo de cuadripolo de una línea simplificado, debido a la corta longitud de las líneas de distribución, tal como se presenta en la ecuación (5).

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_{mr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -B_{mr} \\ C_{mr} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ I_{mr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Las constantes de la línea se presentan en (6)

$$B_{mr} = Z_{mr}^s \sinh(\gamma_{mr} L_{mr}) \quad C_{mr} = \frac{\sinh(\gamma_{mr} L_{mr})}{Z_{mr}^s} \quad (6)$$

Donde:

- $V_m, V_r$  Tensiones en los nodos  $M$  y  $R$

- $I_{mr}, I_{rm}$  Corrientes desde  $M$  a  $R$ , y de  $R$  a  $M$  respectivamente.
- $\gamma_{mr}$  Constante de propagación por unidad de longitud.
- $L_{mr}$  Longitud de la sección.
- $Z_{mr}$  Impedancia aparente de la sección.

**2.6.4 Cálculo de admitancias**

La admitancia de prefalla de cargas monofásicas se calcula con potencia aparente de la carga  $S_{1\phi}$ , como se presenta en (7).

$$|Y_r| = \frac{|S_{1\phi}|}{|V_n|^2} \tag{7}$$

La admitancia de prefalla de carga bifásicas entre la fase B y C en el nodo R, se halla a partir de (8).

$$|Y_r| = \frac{|S_{2\phi}|}{|V_{r,BC}|^2} \tag{8}$$

Las cargas trifásicas se asumen balanceadas. La admitancia de carga se calcula como se presenta en (9).

$$|Y_r| = \frac{|S_{r3\phi}|}{|V_{r,BC}|^2} \tag{9}$$

**2.6.5 Cálculo de tensiones y corrientes en los nodos**

A partir del cálculo de la admitancia se obtienen las corrientes en el nodo R, como se muestra en la figura 5.

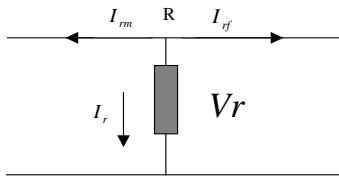


Fig. 5. Corrientes en el nodo R

Donde:

- $I_{rf}$  Corriente que fluye hacia la falla desde el nodo R.
- $I_r$  Corriente de carga en el nodo R

Las tensiones y corrientes de secuencia en prefalla, para los todos nodos hasta el nodo X, se obtienen con la ecuación (5) y con el modelo de corrientes de la figura 5.

Las tensiones y corrientes de secuencia de prefallo en el extremo remoto, se estiman asumiendo que todas las cargas mas allá del nodo X están agrupadas con la carga en el nodo N, tal como se muestra en la figura 6.

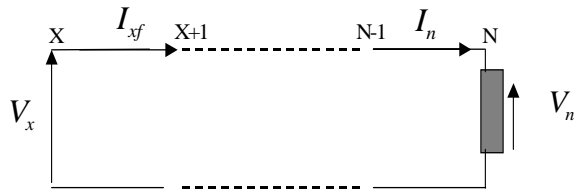


Fig. 6. Modelo para cálculo de tensiones corrientes de prefallo en los nodos N y X.

Las tensiones y corrientes de prefalla, para cada secuencia hasta el nodo N, son calculados utilizando la ecuación (5), para las secciones en cascada que pueden

existir desde X hasta N, con los datos de tensión y corriente del nodo X. Para cada secuencia, las admitancias se calculan con la corriente entrando al nodo N y con su tensión, tal como se presenta en (10)

$$Y_n = \frac{I_n}{V_n} \tag{10}$$

**2.6.6 Estimación de las constantes de carga**

Las constantes  $G_r$  y  $B_r$  para cada carga, se calculan con la tensión de prefalla, la admitancia de carga y los valores apropiados de las constantes de la respuesta de carga  $n_p$ , y  $n_q$ , mostradas a continuación:

$n_p = n_q = 0$  : Modelo de carga a potencia constante.

$n_p = n_q = 1$  : Modelo de carga de corriente constante.

$n_p = n_q = 2$  : Modelo de carga de impedancia constante.

La estimación se realiza con los valores de tensión y de corriente de prefalla en cada nodo, mediante las ecuaciones (5) y (10), considerando que la carga después del nodo de falla (F) se agrupa en el nodo N.

**2.7 Estimación de tensiones y corrientes en el extremo remoto N y en la falla F.**

La tensión y corriente de secuencia en el nodo X se calculan antes que en los nodos F y N. Las tensión y corriente de secuencia en R durante la falla se calculan con las medidas tomadas en el nodo M y la ecuación (5). Las corrientes de secuencia en la carga en el nodo R, durante la falla son obtenidos usando un modelo fase-tierra, fase-fase o trifásico de carga. Las admitancias durante la falla se calculan con (3). Las corrientes en el nodo siguiente se calculan con el modelo de la figura 5. Este procedimiento se repite hasta el nodo X.

Las tensiones y las corrientes en el nodo X se calculan con la fase A como referencia. Sin embargo, dependiendo del tipo de falla, la tensión y corriente se convierten la referencia real, como se presenta en la tabla 1.

Referencia Fase A	Referencia Fase B	Referencia Fase C
A a tierra	B a tierra	C a tierra
B Y C a tierra	C y A a tierra	A y B a tierra
B a C	C a A	A a B
Trifásica balanceada		

Tabla 1. Fase de referencia para los diferentes tipos de fallos

Las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo F durante la falla, se calculan asumiendo que todas las cargas más allá del nodo X están concentradas en el nodo N. Las tensiones y las corrientes en el nodo F se pueden expresar en función de sus valores en el nodo X, como se presenta en (11)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -s \times B_{xy} \\ s \times C_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_x \end{bmatrix} \tag{11}$$

Donde  $s$  es la distancia desde X hasta F, expresada como fracción de la longitud entre los nodos X y X+1. Las

tensiones y corrientes de secuencia en los nodos  $N$  y  $F$  durante la falla están relacionadas por la ecuación (12).

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} De & -Be \\ Ce & -Ae \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-s)*B_{xy} \\ -(1-s)*C_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

A partir de esta expresión, se obtiene una nueva para las componentes de secuencia de corriente y tensión en la falla  $F$  y tensión en el nodo  $N$ , dependientes del parámetro  $s$  y de constantes asociadas a la carga, tal como se presenta en las ecuaciones (13)(14) y (15).

$$\begin{aligned} V_{of} &= V_{0x} - sB_{0y}I_{0xf}, \\ V_{1f} &= V_{1x} - sB_{1y}I_{1xf}, \\ V_{2f} &= V_{2x} - sB_{2y}I_{2xf} \end{aligned} \quad (13)$$

$$I_{of} = \frac{1}{K'_{ov} + sK'_{0w}} \left\{ (K'_{oq} + sK'_{0r})V_{0x} + (K'_{ov} + sK'_{0u})I_{0xf} \right\}$$

$$I_{1f} = \frac{1}{K'_{1v} + sK'_{1w}} \left\{ (K'_{1q} + sK'_{1r})V_{1x} + (K'_{1v} + sK'_{1u})I_{1xf} \right\} \quad (14)$$

$$I_{2f} = \frac{1}{K'_{2v} + sK'_{2w}} \left\{ (K'_{2q} + sK'_{2r})V_{2x} + (K'_{2v} + sK'_{2u})I_{2xf} \right\}$$

$$V_{on} = \frac{1}{K'_{ov} + sK'_{0w}} \left\{ (K'_{om} + sK'_{0n})V_{0x} + sK'_{0p}I_{0xf} \right\}$$

$$V_{1n} = \frac{1}{K'_{1v} + sK'_{1w}} \left\{ (K'_{1m} + sK'_{1n})V_{1x} + sK'_{1p}I_{1xf} \right\} \quad (15)$$

$$V_{2n} = \frac{1}{K'_{2v} + sK'_{2w}} \left\{ (K'_{2m} + sK'_{2n})V_{2x} + sK'_{2p}I_{2xf} \right\}$$

### 2.8 Estimación de la localización de la falla

Para calcular la distancia desde el nodo  $X$  hasta la falla  $F$  ( $s$ ), como una parte de la longitud de la línea del nodo  $X$  hasta en nodo  $X+I$ , se presenta el análisis para la falla monofásica. Para fallas de fase, se presenta en [3]

La tensión de la fase fallada  $V_f$ , para una falla monofásica a tierra en  $F$  se presenta en (16).

$$V_f = I_f R_f \quad (16)$$

Donde  $I_f$  es la corriente de falla y  $R_f$  es la resistencia de falla. En términos de las componentes de secuencia y con la parte imaginaria igual a cero se tiene la ecuación (17).

$$\text{Im} \left( \frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} \right) = 0 \quad (17)$$

A partir de la manipulación de las ecuaciones (13), (14) y (15) se obtiene una la ecuación (18) para  $s$ , en términos de constantes que dependen también de la admitancia y de las tensiones y corrientes de secuencia.

$$s = \frac{K''_{AR} \times K''_{CI} - K''_{AI} \times K''_{CR}}{(K''_{CR} \times K''_{BI} - K''_{CI} \times K''_{BR}) + (K''_{DR} \times K''_{AI} - K''_{DI} \times K''_{AR})} \quad (18)$$

Como la admitancia depende de la tensión, se debe desarrollar el proceso iterativo tal como se presenta en la parte final del diagrama de flujo de la figura 1. El valor de  $s$  se calcula utilizando el siguiente procedimiento:

- Calcular las constantes  $K$  que no son dependientes de admitancia.
- Realizar una primera estimación de las constantes  $K'$ , que son dependientes de la admitancia, usando la admitancia de prefallo de la carga consolidada en  $N$ .
- Calcular las nuevas constantes  $K''$  a partir de las constantes  $K$  y  $K'$  y las tensiones y corrientes de secuencia.
- Calcular una estimación inicial de  $s$ , usando la ecuación (19).
- Calcular la tensión en  $N$  usando la ecuación (16)
- A partir del valor de tensión obtenido, se calcula el nuevo valor de admitancia para el nodo  $N$ , usando la ecuación (3) para cada secuencia.
- Actualizar las constantes  $K'$  a partir de los nuevos valores de las admitancias en  $N$ .
- Actualizar los valores de las constantes  $K''$ , con los datos obtenidos en el paso **g**.
- Calcular el valor de  $s$  usando la ecuación (19).
- Comprobar la convergencia del valor de  $s$ . Si la solución converge, es decir, hay una diferencia entre la estimación anterior y la actual, menor que un margen definido, ésta es la distancia del sitio de falla en p.u. desde el nodo  $X$ . Si no converge, se repite el proceso empezando en el paso **e**.

### 3. PRUEBAS DESARROLLADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Mediante la implementación del método se desarrollaron pruebas preliminares en el sistema de 25 kV de SaskPower en Saskatoon, Canadá, que se presenta en la figura 7. El modelo del sistema se desarrollo en el "Power Block Set de Matlab®". Mediante el software, se estima la localización de fallas paralelas a partir muestras del fundamental de tensión y corriente, tomadas a una frecuencia de muestreo de 720 Hz.

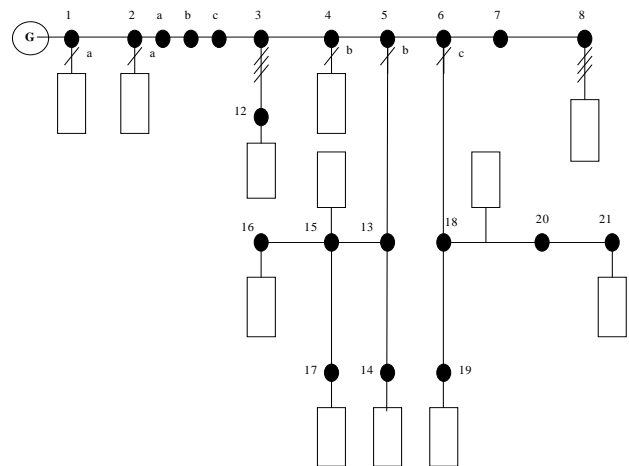


Fig. 7. Sistema de 25 kV de SaskPower en Saskatoon, Canadá

#### 3.1. Sistema de distribución utilizado para las pruebas

El circuito de la figura 7 tiene las siguientes características:

- La línea entre los nodos 1 y 8 tienen 37 km. de longitud y está compuesta de secciones de diferente tamaño, tipo de conductores.
- Hay cargas trifásicas o monofásicas conectadas en todos los nodos, excepto en los nodos a, b, c, 7 y 20.
- Los nodos a, b, c están divididos en una sección de 16 km.
- Entre el nodo 2 y 3, existen cuatro secciones iguales.
- El nodo 20 divide la sección comprendida entre el nodo 18 y 21 en dos secciones.
- El nodo 7 es la unión de dos secciones de diferente tipo de conductor.

Las líneas se implementaron con el equivalente  $\pi$  mientras que en las cargas se usan modelos estáticos dependientes de tensión, como se muestra en (3).

### 3.2. Tipos de pruebas

Las pruebas realizadas comprenden diferentes tipos de fallas (monofásica, fase fase, fase fase tierra y trifásicas balanceadas), en todos los nodos, para diferentes valores de resistencia de falla. El error se calcula según (19)

$$\varepsilon = \frac{\text{valor real} - \text{valor estimado}}{\text{valor real}} \times 100 \quad [\%] \quad (19)$$

### 3.3. Resultados para fallas monofásicas

En este numeral se presentan sólo los resultados para la falla monofásica de la fase C con 3 valores de resistencia de falla  $R_f$  (0,05, 5 y 10 ohms). Los resultados para todos los tipos de falla se presentan en [XX].

Nodo falla	Distancia real [km]	Distancia estimada d [km]					
		$R_f = 0.05 [\Omega]$		$R_f = 0.5 [\Omega]$		$R_f = 10 [\Omega]$	
		d	$\varepsilon$ [%]	d	$\varepsilon$ [%]	d	$\varepsilon$ [%]
1	0,000	0,000	-	0,093	-	0,000	-
2	2,414	2,436	-0,9	2,541	-5,3	2,711	-12,3
2-3a	6,437	6,491	-0,8	6,651	-3,3	6,895	-7,1
2-3b	10,461	10,649	-1,8	10,847	-3,7	11,182	-6,9
2-3c	14,484	14,879	-2,7	15,121	-4,4	15,574	-7,5
3	18,507	19,222	-3,9	19,483	-5,3	20,069	-8,4
4	22,530	22,564	-0,2	22,889	-1,6	23,266	-3,3
5	27,680	27,748	-0,2	28,101	-1,5	28,502	-3,0
6	30,094	30,112	-0,1	30,485	-1,3	30,802	-2,4
7	34,600	34,705	-0,3	34,973	-1,1	35,685	-3,1
8	37,014	37,063	-0,1	37,409	-1,1	38,090	-2,9
12	20,921	20,975	-0,3	21,011	-0,4	21,059	-0,7
18	32,508	33,031	-1,6	33,203	-2,1	33,424	-2,8
19	34,922	35,785	-2,5	35,935	-2,9	33,287	4,7
20	35,727	37,055	-3,7	37,273	-4,3	37,534	-5,1
21	38,946	41,638	-6,9	42,029	-7,9	42,483	-9,1

Tabla 1. Localización de falla monofásica con diferente resistencia de falla.

## 4. CONCLUSIONES

El algoritmo implementado estima la localización de fallas paralelas en sistemas de distribución con multiconductor, ramales laterales y cargas trifásicas y monofásicas. Los resultados obtenidos muestran que el método probado posee una precisión aceptable con relación a la distancia real de la falla, cuando la resistencia de falla es pequeña.

El método desarrollado puede ser implementado para la localización de fallas en sistemas de distribución reales, ya solo requiere de las medidas de tensión y corriente, tanto de prefalla como durante la falla, en la subestación.

Como desventajas del método se tiene la múltiple estimación del sitio de falla, ya que utiliza el principio de cálculo de impedancia. Asimismo, tiene alta dependencia del modelo del sistema

Como propuesta de trabajo futuro, se pretende reducir el número de estimaciones y la dependencia del modelo usando híbridos entre el algoritmo implementado y máquinas de aprendizaje.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Saha, M. Provoost, F and Rosolowski, E. "Fault Location method for MV Cable Network", DPSP, Amsterdam, The Netherlands, 9-12 April 2001, pp. 323- 326.
- [2] Das, R. "Determining the Locations of Faults in Distribution Systems", Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, Spring 1998.
- [3] Cortés, C. Gutiérrez, J, Mora J. "Algoritmo de Ratan Das para la localización de fallos en sistemas de distribución". Tesis de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [4] 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.
- [5] Mora, J. "Voltage Sag Characterization and Classification for Diagnosis in Electric Power Quality Domain". Master Thesis. University of Girona. 2003.
- [6] Järventausta, P. Verho, P. Partanen, J. "Using Fuzzy Sets to Model the Uncertainty in the Fault Location of Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 954 – 960.
- [7] Anderson, Paul M., "Analysis of Faulted Power Systems". IEEE Press. 1995.
- [8] Stevenson Jr. William D., "Elements of Power System Analysis", McGraw-Hill Book Company, Inc., 1975.