

## ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA IMPEDANCIA DEL CAMINO DE RETORNO ANTE FALLAS MONOFÁSICAS EN LOS RELÉS DE DISTANCIA CONVENCIONALES

### Analysis of the return path impedance effect during single phase faults in conventional distance relays

#### RESUMEN

La protección con relés de distancia es una estrategia comúnmente utilizada en sistemas de potencia, lo que motiva el desarrollo de una alternativa para mejorar la determinación de la zona de los algoritmos convencionales. La alternativa propuesta se fundamenta en el análisis de la impedancia de falla y del camino de retorno, para mejorar la estimación de la distancia al nodo afectado. Los resultados en una línea de 500kV y 100km, muestran errores en la determinación de la distancia inferiores al 5%, aún en el caso de resistencias de falla de  $20\Omega$  y del camino de retorno de  $0,2\Omega/\text{km}$ .

**PALABRAS CLAVES:** Distancia de falla, relés de distancia, resistencia de falla, resistencia del camino de retorno.

#### ABSTRACT

*Power system protection using distance relays in one of the most common relaying practices. Considering the previously mentioned fact, in this paper an alternative to improve the performance of the distance estimation on the conventional algorithms is discussed. This alternative considers the analysis of the fault and return path impedances. The proposed method is tested in a 500kV, 100 km length power line, where the errors are lower than 5% even in case of fault resistance of  $20\Omega$  and return path resistance of  $0,2\Omega/\text{km}$ .*

**KEYWORDS:** Fault distance, distance relays, fault resistance, return path resistance.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La continuidad y por tanto la calidad del servicio de energía eléctrica en los sistemas de potencia se puede afectar por muchos factores, entre ellos las fallas. El proceso de restauración se puede acelerar si la localización de la falla es conocida o puede ser estimada con una exactitud razonable [1].

Ante una falla, existen elementos que la deben detectar e iniciar una secuencia de apertura de los interruptores, para aislar la sección afectada del sistema. Algunos de los dispositivos más utilizados para la protección de los sistemas de potencia son los relés de distancia, los cuales actúan como protección principal en las líneas de transmisión [2]. Estos dispositivos son de alto costo y gran importancia para el sistema de potencia debido a su papel preponderante en la protección de las líneas ante fallas de cortocircuito [3].

Normalmente, los fabricantes de los dispositivos de protección guardan celosamente los algoritmos utilizados para la localización de la falla y activación de la zona de disparo ante una perturbación en el sistema de potencia, lo que motiva el análisis y discusión de este problema [4]. Como propuesta para la prueba y validación de

#### JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ

Ingeniero Electricista, Ph.D.  
Profesor asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jjmora@utp.edu.co

#### RENÉ ALEXANDER BARRERA CÁRDEN

Ingeniero Electricista, M.Sc. (c)  
Investigador  
Universidad Industrial de Santander  
abarrera@uis.edu.co

#### SANDRA MILENA PÉREZ LONDOÑO

Ingeniera Electricista, M.Sc.  
Profesor asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
saperez@utp.edu.co

**Grupo de Investigación en Calidad de Energía Eléctrica y Estabilidad - ICE<sup>3</sup>**

algoritmos de fácil implementación, en este caso se aborda el problema de la estimación de la distancia de un relé convencional y se propone un algoritmo perfeccionado y de fácil implementación para el mejoramiento del cálculo de la distancia, ante circunstancias que consideran la impedancia del camino de retorno y la resistencia de la falla. La investigación aquí presentada, permite el futuro diseño de elementos de protección de software abierto y fácilmente adaptables a los sistemas de transmisión y algunas líneas del sistema de distribución.

Como contenido de este artículo, en la sección dos se presentan los fundamentos básicos de los relés de distancia. En la sección tres, se presenta un análisis de los efectos que puede tener la presencia de una resistencia de falla o en el camino de retorno, en la estimación de la distancia a la falla y por tanto en la activación de una de las zonas de protección. Adicionalmente y como parte importante del artículo, se propone en la sección tres, una alternativa para la estimación adecuada de la distancia de falla. En la sección cuatro se presenta el sistema de pruebas, se describen las diferentes circunstancias en las que se prueban los métodos y se analizan los resultados. Finalmente, en la última parte se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación.

## 2. RELÉS DE DISTANCIA

### 2.1. Descripción básica

Los relés de distancia (ANSI 21), son utilizados principalmente para la protección de líneas de transmisión ante fallas de cortocircuito entre fases o entre fases y tierra [4]. Fundamentalmente, estos relés permiten hacer una comparación entre la señal de tensión ( $V$ ) y la de corriente ( $I$ ) medida en una subestación, para enviar una señal de disparo al interruptor del circuito de potencia cuando la función  $f \rightarrow (V/I)$  tenga un valor menor que una referencia predefinida. En la figura 1 se muestra esquemáticamente un diagrama unifilar de la conexión del relé 21, para una zona de protección que tiene un alcance de  $x$  unidades de longitud.

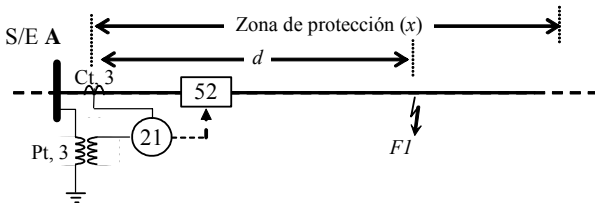


Fig. 1. Esquema unifilar del relé de distancia (21), en el cual se indica la zona uno de protección dada para una distancia  $x$ .

Para la conexión de los relés de distancia, tal como se muestra en la figura 1, se requieren tres transformadores de corriente (Ct) y tres transformadores de tensión (Pt). El relé actúa enviando la orden de disparo a tres disyuntores o interruptores de potencia (ANSI 52) [4].

Ante una falla sólida a tierra, la tensión de las fases afectadas es igual a cero; por lo tanto la impedancia de falla  $Z_f$  está dada por (1).

$$Z_f = \frac{V_{S/E}}{I_{S/E}} = \frac{I_{S/E} \times d \times z_L}{I_{S/E}} = d \times z_L \quad (1)$$

La impedancia de falla se calcula de manera general, a partir de la relación de la tensión y la corriente, y para el caso de una falla sólida a tierra (F1), está dada por el producto de la distancia a la falla ( $d$ ) y la impedancia de la línea unidad de longitud ( $z_L$ ).

Los principales tipos de relés de distancia son: a) impedancia, b) admitancia o mho, c) reactancia, y d) cuadrilateral. Cada uno de estos relés actúa a partir de la definición de las zonas de alcance, establecidas por un valor de impedancia de secuencia positiva [5]. Un esquema simple de las zonas se presenta en la figura 2, para el caso de un relé de distancia tipo mho.

En la figura 2 se presentan las cuatro zonas características del relé de distancia tipo mho. La zona uno que cubre la mayor parte de la línea entre las subestaciones A y B; la zona dos termina de proteger la línea AB y brinda respaldo a la zona uno del relé ubicado entre B y la siguiente subestación; la zona tres brinda respaldo a la siguiente zona dos. La zona reversa está encargada de brindar respaldo en caso de mal funcionamiento en las protecciones correspondientes al barraje en la subestación A.

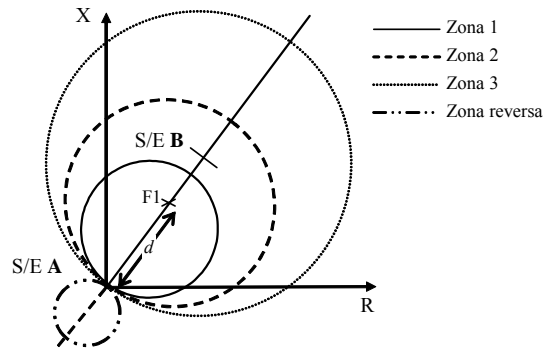


Fig. 2. Zonas características de un relé de distancia tipo mho ubicado en la subestación A.

### 2.2. Análisis del relé de distancia para fallas a tierra

Para el caso de fallas a tierra, el análisis de los relés comprende fundamentalmente el estudio de las componentes simétricas, para obtener la conexión básica que permita determinar la componente de secuencia positiva de la impedancia, vista desde la subestación donde se localiza el relé 21.

A partir de la figura 1 y considerando que F1 es una falla monofásica sólida, a partir del análisis de componentes simétricas se obtiene el circuito que representa la interconexión de redes de secuencia presentado en la figura 3.

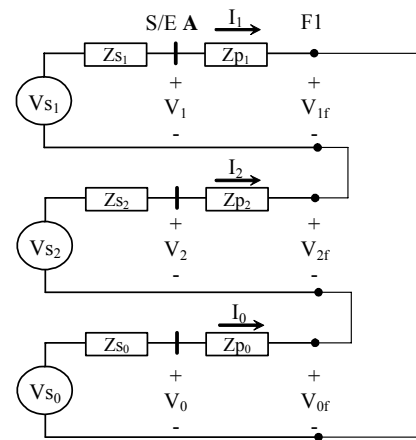


Fig. 3. Redes de secuencia para el caso de una falla monofásica en F1, para un relé de distancia ubicado en la subestación A.

De la figura 3,  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  y  $V_{s0}$  son las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero equivalentes del sistema;  $Z_{s1}$ ,  $Z_{s2}$  y  $Z_{s0}$  son las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero equivalentes del sistema;  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_0$  son las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero en la subestación; y  $Z_{p1}$ ,  $Z_{p2}$  y  $Z_{p0}$  son las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de la línea en falla.

A partir de la figura 3, se obtiene el conjunto de ecuaciones presentadas en (2), para cada una de las tensiones de secuencia en el nodo de falla ( $V_f$ ).

$$\begin{aligned} V_{1f} &= V_1 - I_1 \times Z_{p1} \\ V_{2f} &= V_2 - I_2 \times Z_{p2} \\ V_{0f} &= V_0 - I_0 \times Z_{p0} \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando la falla en la fase A, la expresión (3) es la representación en valores de secuencia de la tensión de fase en el punto de falla F1.

$$V_{Af} = V_{0f} + V_{1f} + V_{2f} \quad (3)$$

Si se considera que ante una falla sólida a tierra, la tensión en el punto de falla es igual a cero, y también que la impedancia de secuencia positiva y negativa se asumen iguales para el caso de líneas de transmisión, mediante las ecuaciones (2) y (3), se obtiene (4).

$$V_A - I_A \times Z_{p1} - I_0 \times (Z_{p1} - Z_{p0}) = 0 \quad (4)$$

Para obtener la impedancia de secuencia positiva hay que redefinir la corriente por la fase A, tal como se presenta en (5).

$$I'_A = I_A + I_0 \times \left( \frac{Z_{p0} - Z_{p1}}{Z_{p1}} \right) \quad (5)$$

La relación de impedancias de (5), considerando que la falla ocurrió a una distancia  $d$  desde la subestación, puede reescribirse como la razón de impedancias de secuencia en por unidad de longitud, tal como se presenta en (6).

$$\frac{Z_{p0} - Z_{p1}}{Z_{p1}} = \frac{d \times z_0 - d \times z_1}{d \times z_1} = \frac{z_0 - z_1}{z_1} = m \quad (6)$$

Para el caso de líneas de transmisión, un valor típico de  $m$  es de 2, ya que normalmente la impedancia de secuencia cero es aproximadamente tres veces la impedancia de secuencia positiva [3].

Finalmente, la ecuación que determina la impedancia de secuencia positiva se obtiene de (4), (5) y (6), como una función de valores de tensión y corriente medidos en la subestación y las impedancias de secuencia de la línea, tal como se presenta en (7).

$$Z_{p1} = \frac{V_A}{I_A + m \times I_0} \quad (7)$$

La conexión más frecuente para obtener la impedancia de secuencia positiva, para el caso de fallas monofásicas a tierra debe considerar que cada uno de los tres módulos del relé 21 se alimenta por la tensión de fase, mientras que la corriente corresponde a la suma de la corriente de fase y la corriente de secuencia cero, ponderada por el valor de  $m$ . Las tensiones y corrientes son aquellas medidas en la subestación.

### 3. EFECTO DE LA RESISTENCIA DEL SUELO EN EL DESEMPEÑO DE RELÉ DE DISTANCIA.

Como se puede apreciar, en el planteamiento convencional de los relés de distancia, no se considera la influencia de la resistencia del camino de retorno de la

corriente de falla a la fuente y de la resistencia de falla. En este numeral se presenta un análisis para determinar la influencia de estos valores en la estimación de la impedancia de secuencia positiva y por tanto, la distancia a la falla.

Un adecuado funcionamiento del relé de distancia conduce a una rápida localización de la falla y además a un correcto aislamiento de la línea.

#### 3.1. Análisis de la determinación de la zona ante fallas con resistencia a tierra y/o resistencia del camino de retorno.

En caso de una falla F1, con una impedancia a tierra igual a cero, la distancia a la falla es igual a  $d$  y la zona que se activa del relé de distancia es la zona 1, tal como se muestra en la figura 2. Sin embargo si una falla localizada en el mismo sitio tiene una impedancia diferente a cero (dada por el camino de retorno o la resistencia de falla), es muy probable que la zona en la que opere el relé sea una diferente. En la figura 4 se muestra un esquema en la cual se representa cómo por efecto de la resistencia de tierra, la zona que se activa es la dos, para el caso de la falla F1.

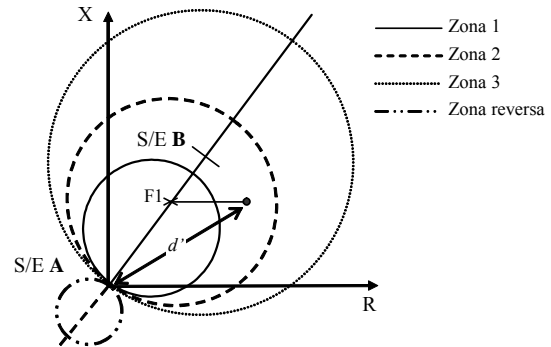


Fig. 4. Efecto de la resistencia de falla, en la activación de las zonas de disparo para un relé de distancia. Caso de la falla F1, vista por el relé a una distancia  $d' > d$ .

Como se aprecia en el ejemplo, existe un disparo no adecuado producido por el relé 21, el cual dispara por zona dos. El disparo por zona dos, es más lento que el producido por zona uno (zona en la que realmente está la falla F1). En el caso analizado, se observa que ante un disparo más lento del sistema de protecciones, es muy probable que se originen situaciones de inestabilidad del sistema de potencia.

#### 3.2. Análisis circuital para el caso de fallas no sólidas a tierra

Para considerar el efecto del retorno de tierra y de la resistencia de la falla, se propone el circuito de redes de secuencia presentado en la figura 5, en el cual se incluyen los nuevos parámetros que permiten modelar una falla no sólida a tierra.

De la figura 5,  $R_f$  es la resistencia de la falla mientras que  $Z_{rt}$  es la impedancia total del camino de retorno. A partir del circuito de redes de secuencia se aprecia que el conjunto de ecuaciones (2) sigue vigente, pero la tensión

de la fase afectada en el nodo de falla es diferente de cero, tal como se presenta en (8).

$$V_{Af} = V_{0f} + V_{1f} + V_{2f} = I_0 \times (3R_f + 3Z_{rt}) \quad (8)$$

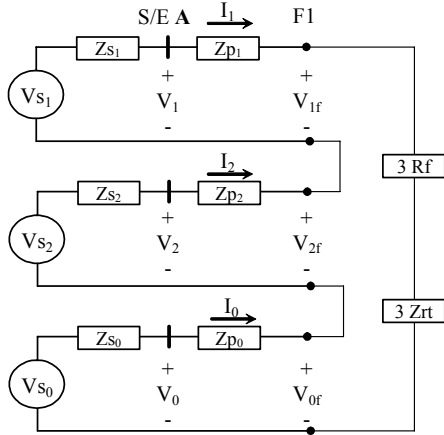


Fig. 5. Redes de secuencia para el caso de una falla monofásica en F1, para un relé de distancia ubicado en la subestación A. Circuito que consideran la impedancia de la falla y la del retorno.

Adicionalmente, si se tiene en cuenta la relación entre la distancia  $d$  al nodo de falla presentada en (6), y considerando la igualdad entre las impedancias de secuencia positiva y negativa para las líneas de transmisión, se obtiene (9) para la tensión de la fase afectada y medida en la subestación.

$$V_A = I_A \times z_1 \times d + I_0 \times (z_0 \times d - z_1 \times d + 3R_f + 3z_r \times d) \quad (9)$$

De (9),  $z_r$  es la impedancia por unidad de longitud del camino de retorno.

### 3.3. Alternativa de perfeccionamiento del relé de distancia considerar el camino de retorno a tierra.

La alternativa propuesta incluye el análisis de los circuitos de secuencia que permite obtener un algoritmo para la estimación de la distancia en la cual ocurre la falla y por tanto de la zona de disparo del relé de distancia.

A partir de (9), se utilizan los valores conocidos para solucionar sus dos incógnitas ( $R_f$  y  $d$ ). Considerando que la distancia  $d$  tiene únicamente parte real, la parte imaginaria es igual a cero que permite obtener una expresión para  $R_f$ , tal como se muestra en (10).

$$R_f = \frac{\left| \frac{V_A}{V} \right| \times \sin(\theta_{VA} - \theta_V)}{\left| \frac{3 \times I_0}{V} \right| \times \sin(\theta_{I_0} - \theta_V)} \quad (10)$$

Donde  $V$  está dada por (11).  $\theta_V$  es el ángulo de  $V$ .

$$V = I_A \times z_1 + I_0 \times (z_0 + 3z_r - z_1) \quad (11)$$

A partir de (9) y (10) se obtiene una expresión para la distancia a la falla  $d$ , considerando la impedancia del

camino de retorno y la impedancia de la falla, tal como se presenta en (12).

$$d = \left| \frac{V_A}{V} \right| \times \cos(\theta_{VA} - \theta_V) - \left| \frac{3I_0 R_f}{V} \right| \times \cos(\theta_{I_0} - \theta_V) \quad (12)$$

A partir de (12) se obtiene la distancia a la falla, la cual se compara con la distancia de ajuste de la zona, para determinar la zona de disparo del relé de distancia.

## 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1. Sistema de pruebas

La propuesta de mejoramiento de los relés de distancia para considerar el camino de retorno se prueba en una línea de transmisión de 500 kV, 100 km, cuyos parámetros son  $z_0=28+j144 \Omega$  y  $z_1=z_2=2,5+j34 \Omega$ . El sistema alimenta una carga de 100 MVA,  $fp=0,9$  [6].

Los tres conductores son 954 MCM, ACSR de radio 1,519 cm,  $gmr=1,228$  cm y resistencia de  $0.0701 \Omega/km$ . La configuración de la línea utilizada como sistema de prueba se presenta en la figura 6.

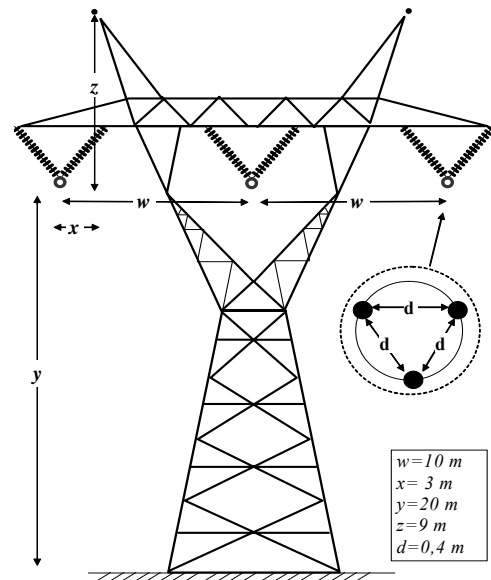


Fig. 6. Configuración básica de las torres de la línea de transmisión de 500 kV, 100 km, utilizada como sistema de prueba.

### 4.2. Descripción de las pruebas

Las pruebas desarrolladas contemplan la estimación de la distancia ante fallas a lo largo de la línea (25%, 50%, 75% y 100% de longitud de la línea), para tres casos diferentes: a) un sistema con una impedancia del camino de retorno igual a cero y con fallas sólidas a tierra; b) Un sistema con impedancia de retorno diferente de cero ( $z_r=0.2 \Omega/km$ ) y fallas sólidas a tierra; y c) un sistema con impedancia de retorno diferente de cero ( $z_r=0.2 \Omega/km$ ) y fallas no sólidas a tierra ( $R_f=20 \Omega$ ) [7].

Para el modelado del sistema de transmisión se utilizó el software Alternative Transient Program (ATP) [8].

### 4.3. Resultados de las pruebas

Los resultados de la estimación de la distancia de la falla, para cada una de las dos alternativas (método convencional y el propuesto), se presentan en la tabla 1.

| Distancia real a la falla [km] | Distancia estimada a la falla [km]         |                  |  |                  |   |                  |
|--------------------------------|--|------------------|--|------------------|---|------------------|
|                                | $R_f=0 \Omega$<br>$z_r=0 \Omega/\text{km}$ |                  | $R_f=0 \Omega$<br>$z_r=0.2 \Omega/\text{km}$ |                  | $R_f=20 \Omega$<br>$z_r=0.2 \Omega/\text{km}$ |                  |
|                                | Método Convencional                        | Método Propuesto | Método Convencional                          | Método Propuesto | Método Convencional                           | Método Propuesto |
| 25                             | 25.2                                       | 25.2             | 27.2   | 25.6             | 28.7  | 25.9             |
| 50                             | 50.5                                       | 50.5             | 54.9   | 51.3             | 58.3  | 52.1             |
| 75                             | 75.9                                       | 75.9             | 82.6   | 77.1             | 89.2  | 78.2             |
| 100                            | 101.5                                      | 101.5            | 113.2  | 103.7            | 120.4   | 104.6            |

Tabla 1. Resultados de la estimación de la distancia al sitio de falla

Un análisis del error se presenta en los tres gráficos mostrados en la figura 7. El error se estima a partir de la ponderación de la distancia estimada con la distancia real, tal como se presenta en la ecuación (13).

$$Error = \frac{\text{distancia estimada} - \text{distancia real}}{\text{distancia real}} \quad (13)$$

A partir de los resultados, se aprecia que cuando no existe una resistencia a la falla y se considera simultáneamente que la resistencia de camino de retorno es igual a cero, la estimación del método propuesto y del método convencional es igual, tal como se presenta en la primera subfigura. Sin embargo se aprecia que hay un error asociado a la estimación de la distancia de falla, debido principalmente porque el método no tiene en cuenta los efectos mutuos de la línea de transmisión, así como el efecto de la corriente de carga.

Para el siguiente conjunto de pruebas en las cuales se involucra una resistencia del camino de retorno de 0,2  $\Omega/\text{km}$ , el error aumenta considerablemente para el caso del método convencional (hasta un 13.2%), mientras que para el caso del método propuesto los errores, son considerablemente más bajos (inferiores a 3.7%). Existen sin embargo errores al igual que se explicó para el caso anterior, debidos al efecto mutuo y a la corriente de carga. Se aprecia adicionalmente, que siempre se presenta una sobrestimación de la distancia de falla, asociada a valores inferiores de la corriente en comparación los que se medirían ante la misma falla en una línea sin efectos mutuos y resistencia del camino de retorno.

Finalmente, para el caso de la estimación de la distancia con una resistencia de falla de 20  $\Omega$  y una resistencia del camino de retorno de 0,2  $\Omega/\text{km}$ , se aprecia que los errores son mayores en los dos métodos a los obtenidos en el

caso anterior. Sin embargo, el error para el caso del método propuesto no supera el 5%, mientras que para el caso de la estimación convencional de la distancia a la falla, los errores alcanzan el 20.4%.

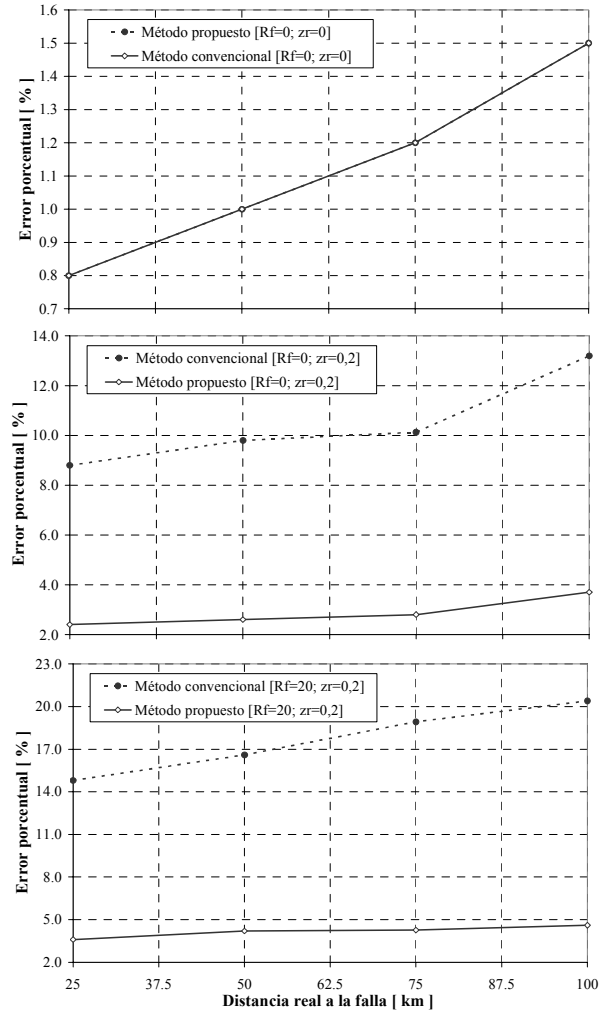


Fig. 7. Estimación de la distancia a la falla a lo largo de la línea de transmisión, con diferentes valores de resistencia de falla y del camino de retorno.

A partir de las pruebas presentadas se muestra la validez de la alternativa propuesta y probada en un sistema real de transmisión de energía eléctrica. Una de las posibles alternativas de mejoramiento del método aquí propuesto consiste en considerar los valores de prefalla para determinar el efecto de la corriente de carga. Adicionalmente, con un mejor modelado que incluya los efectos mutuos de la línea se puede considerar esta variable, de tal manera que los errores sean aun más pequeños que los presentados en este artículo.

A pesar de lo anterior, se demuestra como con la implementación del algoritmo propuesto se pueden alcanzar resultados valederos desde el punto de vista práctico, para una rápida localización del sitio de falla y restauración del sistema de potencia.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un método para la estimación de la distancia a la falla, aplicable a los relés de distancia (ANSI 21), comúnmente utilizados en la protección de líneas de transmisión. La estrategia propuesta se ha probado en una línea de transmisión real, para la cual los errores en la estimación de la distancia son inferiores al 5%, considerando diferentes escenarios de prueba.

Se aprecia adicionalmente, cómo el método propuesto es muy superior al utilizado para la estimación de la distancia mediante el criterio de la impedancia de secuencia positiva, principalmente en aquellos casos donde no existe un camino de retorno de baja impedancia o en los cuales la resistencia de falla sea de un valor considerable.

El método de estimación de la distancia al sitio de falla analizado es de bajo costo económico y de fácil implementación. Su aplicación permite reducir considerablemente el tiempo de restauración del sistema, aumentando así los índices de continuidad del servicio de energía eléctrica y reduciendo, por consiguiente, los pagos de compensación por la baja calidad del servicio.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Std 37.114, "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines", *Power System Relaying Committee* 2004.
- [2] J. Lewis, "Protective relaying. Principles and Applications". Marcel Dekker Inc. 1996
- [3] A. Phadke y S. Horowitz. "Power System relaying". Research studies press, Second Edition, Prentice Hall, 1995.
- [4] J. Mora, G. Carrillo, B. Barrera. "Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis". *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, July 2007, pp 1736-1741.
- [5] A. Warrington and C. Van, "Protective relays. Their theory and practice". Chapman and Hall, London, 1968.
- [6] C. Gross, "Power system analysis", John Willey and Sons, Auburn University, 1979.
- [7] J. B. Dagenhart. "The 40-Ground-Fault Phenomenon" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp 30-32, 2000.
- [8] J. Mora, J. Melendez, J. Bedoya. "Extensive Events Database Development using ATP and Matlab to Fault Location in Power distribution Systems" *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Caracas. 2006.*
- [1] IEEE Std 37.114, "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and