

## **Técnica para identificar faltas transitorias y permanentes en líneas de transmisión, utilizando la transformada *Wavelet***

### **Methodology for the identification of transient and permanent faults in overhead transmission lines, using wavelet transforms**

*Miguel Martínez\**

Departamento de Conversión y Transporte de Energía de la Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Baruta, 89000. Caracas, Venezuela

(Recibido el 6 de noviembre de 2007. Aceptado el 6 de noviembre de 2008)

#### **Resumen**

En el presente documento, se presenta un algoritmo que permite distinguir de forma clara y precisa, las faltas transitorias de las permanentes. Adicionalmente se determina el instante de extinción del arco secundario, para así evitar o controlar de forma efectiva y segura la operación de reconexión monofásica en sistemas de transporte de energía. El método de identificación se basa en la determinación de las características de alta frecuencia que posee la señal de tensión de la fase en falta antes del despeje y de la corriente en una fase sana y las relaciona de forma independiente mediante una auto-correlación cruzada. Para el análisis de la señal y extracción de los componentes de alta frecuencia, se ha utilizado la transformada *Wavelet*. El algoritmo propuesto se probó en un sistema base de 380 kV, funcionando de forma correcta en todos los escenarios planteados y logrando una identificación precisa en los primeros 25 ms de la falta.

----- *Palabras clave:* Fallas permanentes y transitorias, Reconexión Monofásica, ATP/EMTP, Transformada *Wavelet*.

#### **Abstract**

In this document an algorithm to detect and distinguish the transient and permanent faults, is developed. Also, the algorithm takes into account the determination of the secondary arc extinction time, to avoid effectively the monopolar reclosing onto faulty phase. The identification method is based

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 58 + 212 + 906 41 33, fax: + 58 + 212 + 9064133, correo electrónico: mmlozano@usb.ve (M. Martínez).

on the frequency spectrum characteristics of the voltage waveform of the faulty phase before the operation of the breaker and the current waveform of a healthy phase. Both spectrums are correlated independently using a cross correlation ship. For the signal analysis the wavelet transform are used. The proposed methodology was tested in a electrical system with a nominal voltage of 380 kV, working right in all scenarios studied, reaching the right identification of the permanent or transient fault within the 25 ms after faults occurs.

----- **Keywords:** Permanent and transitory faults, monopolar reclosing, ATP/EMTP, Wavelet Transform.

## Introducción

En los sistemas de transporte de energía modernos, se suele utilizar la posibilidad de reconexión monofásica para minimizar los efectos de la falta sobre la estabilidad del sistema, ya de por sí crítica, debido a los límites de la operación actual. Sin embargo, un alto porcentaje de las faltas monofásicas son transitorias y suelen desaparecer unos pocos ciclos después de despejada la fase afectada. Algunos problemas que se pueden atacar a este respecto, son por un lado la identificación precisa de la transitoriedad de la falta y así evitar la reconexión y por otro lado, establecer mediante el análisis digital de señales, el instante de extinción del arco secundario, para realizar la reconexión (en caso de faltas transitorias), de la forma más rápida posible [1-8]. Existen varias metodologías que han sido publicadas desde hace casi 20 años, como por ejemplo [1], en el cual por primera vez se ataca el problema de la distinción entre faltas transitorias y permanentes, haciendo uso de la estimación fasorial. La metodología se basa únicamente en la información suministrada por la señal de tensión de la fase fallada, después del despeje por parte de los elementos de protección, estimando la tensión presente en ese conductor, en las condiciones bajo estudio.

En [2], el problema se resuelve mediante la utilización de una red neuronal adecuadamente entrenada, la cual utiliza como información de entrada, las componentes de frecuencia de la señal de tensión obtenida después del despeje de la falta,

en específico seis bloques (DC, fundamental, tercer armónico, segundo con cuarto y sexto, quinto con séptimo y noveno y componentes entre 500 y 1000 Hz). Como tipo de arquitectura se utiliza una red del tipo “feedforward” con una capa oculta, seis de entrada y una de salida. Posteriormente, Bo et. al [7] plantean el problema basándose en las señales de corriente de las fases sanas, una vez despejada la falta desde los extremos de la línea. Específicamente, utilizan como criterio la energía espectral de los componentes de alta frecuencia de estas señales, para distinguir entre las faltas permanentes y las transitorias. Basados en los mismos criterios expuestos por Bo et. al [7], Jiang et al [6], plantean resolver el problema utilizando *Wavelets* como herramienta para obtener las componentes de alta frecuencia. Por último, Radojevic et. al [5] plantean la extracción del tercer armónico de la tensión y establecen un criterio comparativo entre esta magnitud obtenida y la estimación previa de la localización de la falta. La metodología se basa en la simplificación del modelo del arco mediante una señal cuadrada.

En este trabajo, se plantea el análisis de las señales de tensión e intensidad medidas en uno de los nudos cercanos al punto de falta, para tratar de establecer una metodología que permita determinar con rapidez y seguridad, la condición de transitoriedad o no de la falta (monofásica) y posteriormente, el instante de extinción del arco secundario, independientemente de la localización de la falta. De esta manera, se puede configurar un esquema de reconexión adaptativo (para faltas

monofásicas) que mejore la respuesta dinámica del sistema ante este tipo de eventualidades, logrando minimizar los tiempos de reconexión o de despeje completo y evitando reconexiones sobre falta. Para ello, se utiliza como herramienta de análisis, la transformada *Wavelet* [9-13] y en particular el espectro de alta frecuencia de las señales de tensión e intensidad. La frecuencia de muestreo, seleccionada es de 10 kHz, lo que hace que sea un planteamiento factible de ser implementado a corto plazo en microprocesadores para tareas en tiempo real, como se requiere en los sistemas de protección. Además, utiliza las señales más reales posibles, incluyendo en las simulaciones, los modelos adecuados de los transformadores de medida (tensión e intensidad). La metodología propuesta, fue validada para un sistema sencillo de dos barras a 380 kV, simulado mediante ATP/EMTPy analizado en Matlab.

### Modelación del arco

El análisis propuesto, se basa precisamente en la extracción de la información que incorpora a las señales de tensión e intensidad del sistema eléctrico, el arco eléctrico que puede o no estar presente en la falta monofásica estudiada. Si no hay arco, se estaría tratando de una falta con muy alta probabilidad de ser permanente, mientras que su presencia determina la transitoriedad de la falta, por formar parte de ella el canal ionizado de aire que hay entre el conductor energizado y otro posiblemente a tierra. Por tanto, el modelo que se tome del arco primario y secundario de falta, es crucial en la precisión de la metodología que se trabaje.

Existen diversos trabajos [14, 15, 16, 17, 18] donde se plantea el uso adecuado de modelos del arco de falta, para simular de una forma más real el comportamiento de las señales de tensión y corriente registradas en las barras de las subestaciones. El modelo seleccionado, es el de arco dinámico desarrollado por el Prof. Kizilcay [14, 16]. El modelo es relativamente sencillo de implementar en el ATP, específicamente en el lenguaje de programación MODELS [19]. La ecuación del arco derivada desde un punto de vista de sistemas de control, está basada en el balance de

energía en la columna del arco. Esta es escrita en la ecuación (1), como:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g) \quad (1)$$

Donde:

$g$ , es la conductancia variable con el tiempo.

$G$ , es la conductancia estacionaria del arco y

$\tau$ , es la constante de tiempo.

$G$ , es la conductancia que se mediría si la condición del arco primario fuera sostenida por un período largo de tiempo desde una fuente externa y puede ser representada mediante la función expuesta en la ecuación (2):

$$G = \frac{|i|}{(u_0 + R \cdot |i|) \cdot l} \quad (2)$$

Donde:

$u_0$  es una constante y es definida en por unidad de la longitud del arco.

$R$ , es la componente resistiva del arco, en por unidad de longitud.

$l$ , es la longitud del arco, la cual puede variar con el tiempo.

$i$ , es la corriente del arco.

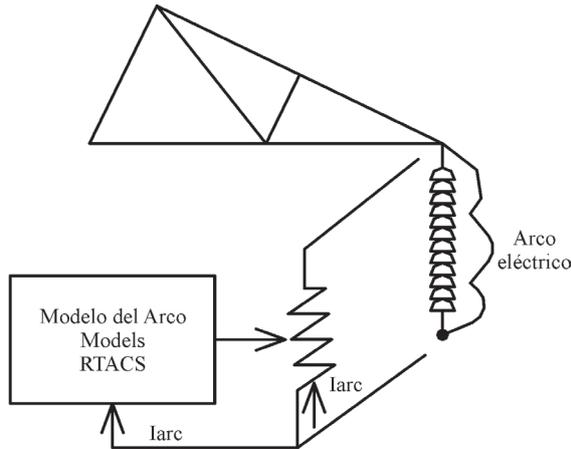
En general, para el arco primario, se asume que la longitud del arco es constante, dado el corto tiempo de interrupción. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 1 y se obtuvieron de [18], para un sistema de 380 kV, muy cercano al de la aplicación de este trabajo.

**Tabla 1** Parámetros del modelo de arco eléctrico

Parámetro	$u_0$ (V/cm)	$R$ (mΩ/ cm)	$\tau$ (ms)	$l$ (cm)
Valor	9,6	1	0,8	350

La solución de la ecuación diferencial, se ejecuta por medio de la instrucción LAPLACE disponi-

ble en el lenguaje MODELS de ATP, mediante la instrucción (LAPLACE(gp/G):= (1|s0) / (1|s0 + TAU|s1)). El modelo se incorpora al sistema como una resistencia variable controlada desde el lenguaje de programación (RTACS), tal como se muestra en la figura 1.



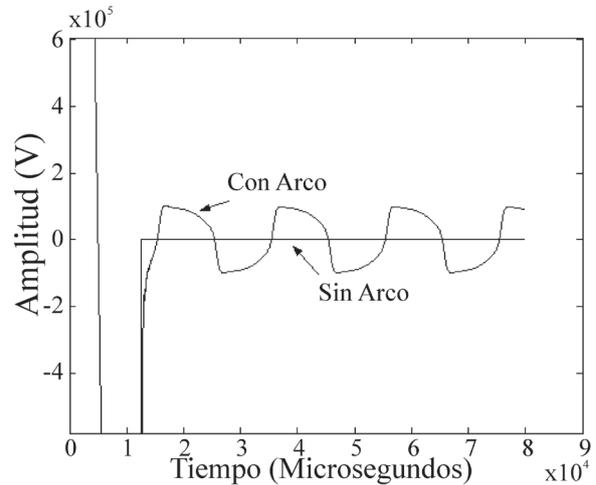
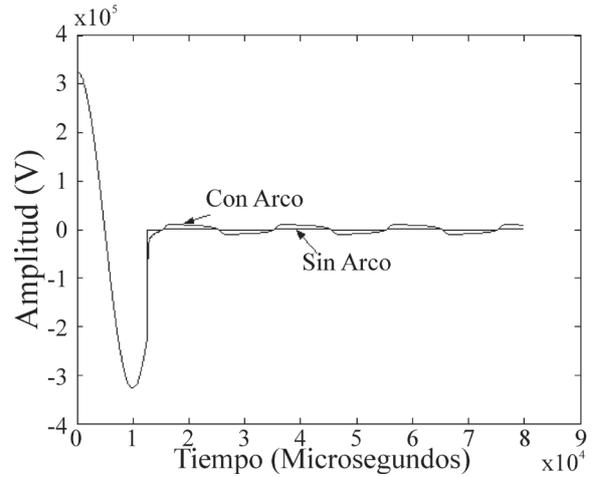
**Figura 1** Modelo del Arco Eléctrico, a través de una  $R$  variable, controlada desde MODELS

En la figura 2 se muestra la respuesta del voltaje registrado en el punto de falta, con y sin el modelo de arco primario anteriormente descrito. Como puede notarse, aunque la falta sea a salida a tierra como en el caso expuesto (voltaje nulo en el punto de falta), al incluir el modelo del arco, puede llegar a tener pico de hasta 15 kV (5% de la tensión pico base del sistema), lo cual favorece en cierta medida a la generación de ondas viajeras, aún ante bajos ángulos de inserción y será este hecho probado, parte fundamental del criterio para distinguir faltas permanentes de transitorias.

### Estudio del problema

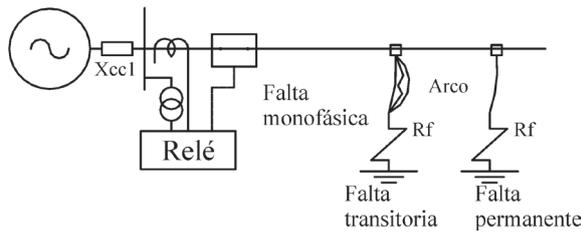
Al ocurrir una falta monofásica en una línea de transporte de energía en alta tensión (ver Figura 3), las señales de tensión e intensidad medidas en una de los nudos cercanos, se ven alteradas. El análisis de esas alteraciones puede permitir extraer conclusiones importantes acerca del tipo de falta, distancia, etc. Ese estudio se puede llevar a cabo, bien

sea mediante la estimación de las componentes de frecuencia fundamental o utilizando directamente la información en frecuencia, en tiempo o en tiempo-escala, para extraer las características más importantes de las componentes de alta frecuencia.



**Figura 2** Tensión en el punto de falta con y sin modelo del arco

En el presente trabajo, para extraer la información relevante de las señales, se va a trabajar con las componentes de alta frecuencia. Tal como lo muestran las siguientes figuras, con la información de alta frecuencia analizada adecuadamente, se puede tener información suficiente para: **Distinguir entre faltas transitorias y permanentes, utilizando:**



**Figura 3** Simulación de Faltas Permanentes y transitorias

La información de las señales de tensión de la fase en falta. Debe resaltarse que la información es relevante (después del período transitorio debido a la propia falta), tanto antes como después del despeje monofásico (Figura 4).

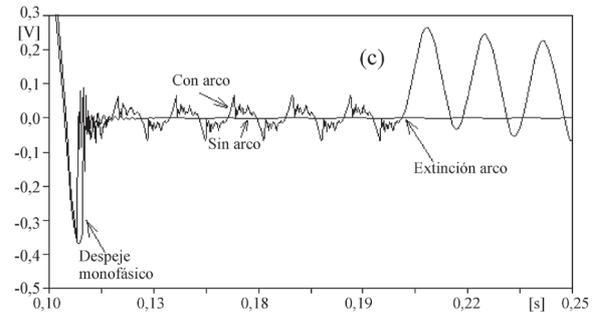
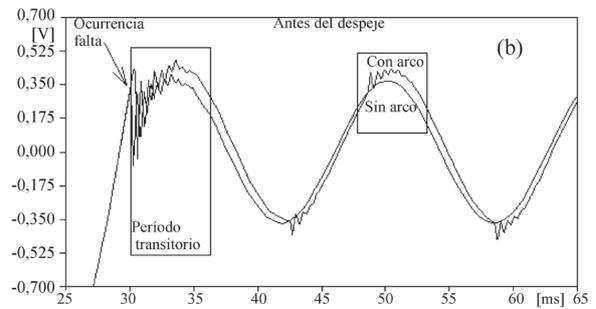
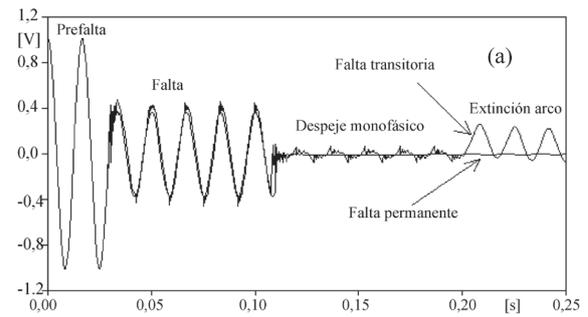
La información de las señales de intensidad de cualquiera de las fases no involucradas en la falta. Debe resaltarse que la información es relevante solo después del despeje monofásico (Figura 5 b). Está clara la distinción entre las dos condiciones de falta, en virtud de la distorsión de la señal de corriente en el caso de transitoriedad de la falta.

**Determinar el instante de extinción del arco**

Esta condición es importante (solo en caso de faltas transitorias), ya que permite establecer en forma certera el instante en que el medio se ha desionizado y que por lo tanto la condición de reconexión será exitosa. En general existen muchos métodos para estimar el tiempo de extinción del arco secundario, pero la mayoría son del tipo probabilística (dada la naturaleza de las variables involucradas), por lo que siempre existirá un margen de error en la maniobra. De la forma propuesta (analizando en tiempo real las señales), se puede garantizar de forma adecuada, la maniobra de reconexión.

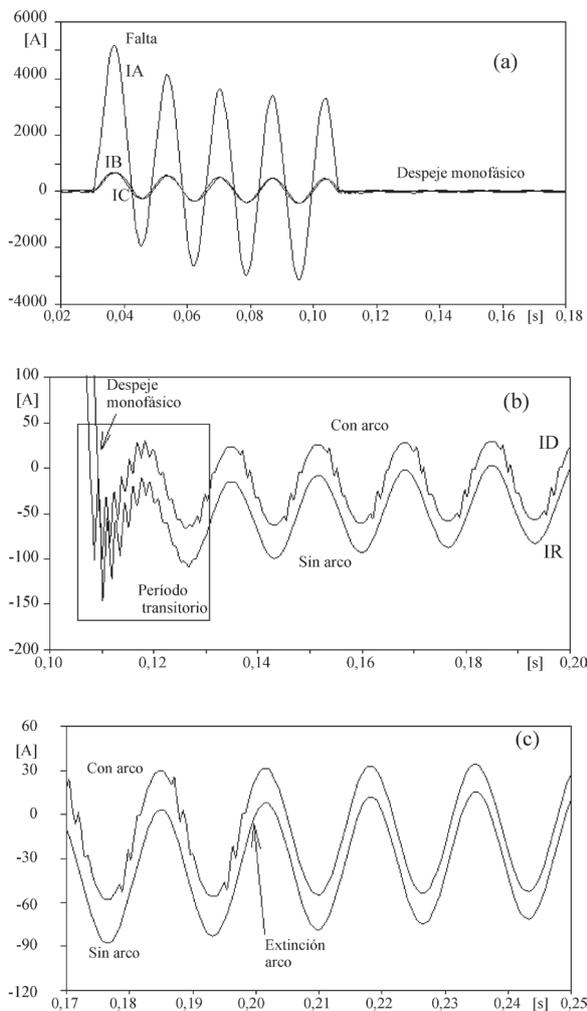
Al igual que en el punto anterior, esta información puede extraerse de:

La información de las señales de tensión de la fase en falta. Tras la desaparición de las componentes de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 4 c.



**Figura 4** Análisis de las señales de tensión en la fase en falla (con y sin Arco). (a) Visión general, (b) detalle del período de falla antes del despeje y (c) período después del despeje y hasta extinción del arco.

La información de las señales de intensidad de cualquiera de las fases no involucradas en la falta. Igual que en el caso anterior, la barrera que indica ese cambio de estado, viene determinada por la desaparición de los componentes de distorsión, tal como se evidencia en la Figura 5c.



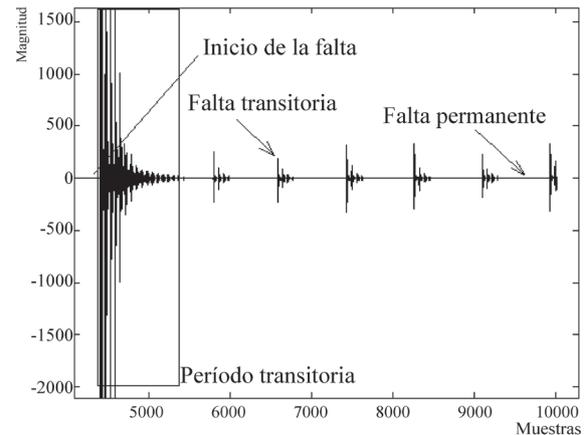
**Figura 5** Análisis de las señales de intensidad en la fase B, ante una falta Monofásica en la fase A (con y sin Arco). (a) Visión general, (b) detalle del período de falla antes del despeje y (c) período después del despeje y hasta extinción del arco

### Metodología Propuesta

El método propuesto en el siguiente trabajo, se basa en la extracción de los componentes de alta frecuencia de la señal de interés. Estos componentes son obtenidos mediante la Transformada Wavelet. Esta transformación tiempo – escala, ha sido descrita en [9-13]. En el caso particular tratado, se va a utilizar el detalle 1 (filtro pasa alto) de la función madre “daubechies 6”. Para la frecuencia de muestreo seleccionada de 10 kHz, implica

que la información contenida en el primer detalle está en el rango de (2,5 – 5 kHz).

Un ejemplo de la señal resultante al aplicar la transformada Wavelet (detalle 1), se muestra en la figura 6.



**Figura 6** Detalle 1 de la Transformada Wavelet, de la señal de tensión de la figura 4b

Posteriormente, ésta información se compara mediante una función de correlación cruzada, con un segmento inicial de la propia señal (parte que contiene información transitoria (Figura 6) y el resto de la misma. La magnitud acumulada de la correlación, durante los primeros 25 ms, se comparará con un valor umbral ( $K_c$ ), definiendo de esta manera el tipo de falta de que se trata.

En principio, las tareas del algoritmo se han dividido en dos:

- Determinar si la falta es transitoria o permanente.* El objetivo es decidir acerca del bloqueo de la operación de reconexión en caso de falta permanente ó iniciar la tarea b.
- Determinar el instante de desaparición o extinción del arco secundario.* El objetivo es precisamente decidir el instante de tiempo a partir del cual se puede dar la orden de reconexión (de la forma más rápida y confiable posible).

A continuación, se van a desarrollar cada uno de esos puntos:

**Determinar si la falta es transitoria o permanente**

En este punto, se va a trabajar con la señal de tensión de la fase en falta. Para ello, es preciso tener como información el resultado previo de un algoritmo de clasificación de faltas e identificación de las fases involucradas. Es de hacer notar que este algoritmo solo se habilitará en caso de faltas monofásicas a tierra. La señal de referencia se toma en el primer ¼ de ciclo de la tensión (Figura 4b) y luego se correlaciona con la señal en ventanas de igual longitud. La función de correlación cruzada utilizada para el estudio, es la que se muestra en la ecuación (3).

$$\Phi_{Sr-Vm}(t) = \frac{\sum_{k=1}^N [Sr(k\Delta t)] \cdot [Vm(k\Delta t + t)]}{\left[ \sum_{k=1}^N Sr(k\Delta t)^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

Donde N es el número de muestras

Sr es una señal fija de referencia (1/4 de ciclo de la señal transitoria) y,

Vm es la señal analizada en una ventana del mismo tamaño que la referencia.

El valor de referencia de la correlación, se acumula en las evaluaciones sucesivas (hasta 25 ms desde el instante de detectada la falta) y el criterio de evaluación, se muestra en la ecuación (4):

$$\Phi_{acumulado}(k) = \Phi_{acumulado}(k-1) + \Phi_{Sr-Vm}(k) \quad (4)$$

Si  $\Phi_{acumulado} \xrightarrow{t \rightarrow 25ms} > Kc \rightarrow$  Falta Transitoria

Si  $\Phi_{acumulado} \xrightarrow{t \rightarrow 25ms} < Kc \rightarrow$  Falta Permanente

Kc es el umbral, determinado en principio de forma empírica, para el sistema analizado en particular.

**Determinar el instante de desaparición o extinción del arco secundario**

En este punto, se va a trabajar con la señal de intensidad de cualquiera de las fases no involucradas en la falta (sanas) y se comienza a ejecutar una vez efectuado el despeje monofásico y solo para faltas transitorias. Al igual que en el caso

anterior, se utilizará una correlación cruzada entre una señal de referencia (tomada del periodo transitorio del despeje) y la propia señal de intensidad (Figura 5b). El criterio se obtiene mediante la observación detallada de la figura 5c. Tal que, si la correlación acumulada no varía en un Kd por ciento durante ¼ de ciclo, entonces el arco se ha extinguido. Esto se debe a que una vez extinguido el arco, la señal deja de tener perturbaciones y por tanto, la correlación en esas nuevas ventanas, es prácticamente nula. Por tanto el valor de Kd, debe ser suficientemente bajo como para garantizar la decisión; en principio se ha fijado Kd = 10%.

**Algoritmo general de reconexión**

En la figura 7, se resume en forma general, el algoritmo planteado. Como se observa, la metodología no forma parte del algoritmo de protección de la línea, sino que empieza por una orden de este. Para ello, se necesita: a.- Condición de falta, b.- Falta Monofásica, c.- Identificación de la fase en falta, d.- Habilitación del procedimiento de despeje y reconexión monofásica.

A su vez, el algoritmo planteado debe tener posibilidad de enviar dos condicionantes binarios al esquema de reconexión: a.- Bloqueo o permiso de reconexión (falta permanente o transitoria), b.- Condicionante para iniciar reconexión.

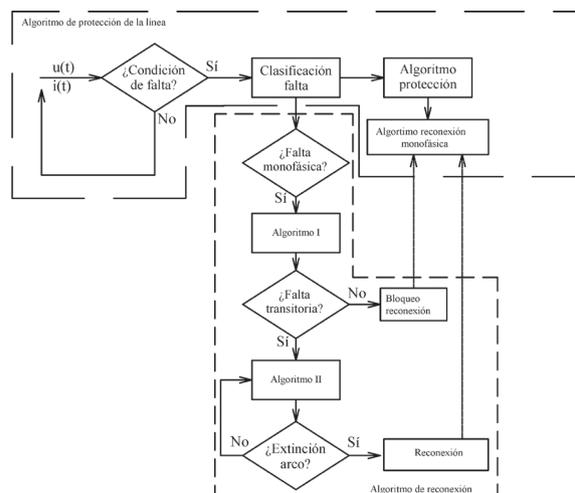


Figura 7 Diagrama de flujo general

### Planteamiento de casos

El caso base de análisis planteado para la revisión del algoritmo, se muestra en la figura 8. Tiene como datos generales: 380 kV de tensión nominal, 50 Hz.  $MVA_{cc3f}^{G1} = 5 \text{ GVA}$  y  $MVA_{cc3f}^{G2} = 2 \text{ GVA}$ . Y una diferencia angular de  $5^\circ$ .

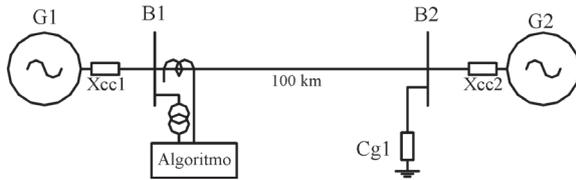


Figura 8 Esquema básico de estudio

El modelo se desarrolló en ATP/EMTP [19-23], tal como se muestra en la figura 9. Las líneas fueron modeladas con parámetros dependientes de la frecuencia, se incluyó un modelo completo de

los transformadores de medida, tal como se describen en [23].

Para validar la metodología propuesta, se plantearon los siguientes escenarios a estudiar sobre el caso base (Tabla 2).

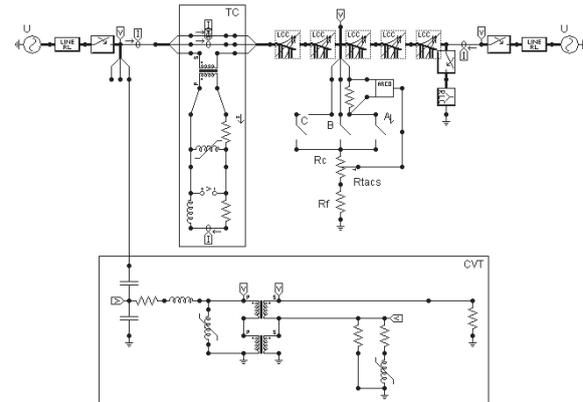


Figura 9 Sistema modelado en ATP

Tabla 2 Rango de parámetros a variar en el estudio

Parámetro	Unidades	Valores						
Rf	$\Omega$	0	10					
Tc	( $^\circ$ )	0	45	90	155	280	270	315
Localización ( $\Delta d$ )	Km	10						

### Resultados

En total, se han estudiado 144 escenarios para cada fase en falta, variando los parámetros más influyentes. En función de los resultados obtenidos, se puede establecer, el valor de los umbrales Kc y Kd, para las dos tareas de la metodología propuesta.

#### Determinar si la falta es transitoria o permanente

Como ejemplo, en la figura 10. se presenta la variación temporal del acumulado de la correlación cruzada de la señal de tensión en la fase A, para una falta monofásica A-T, tanto para el caso con arco, como sin arco, para una Rf de  $0 \Omega$  y un ángulo de inserción de  $315^\circ$ , a 10 Km. Se puede

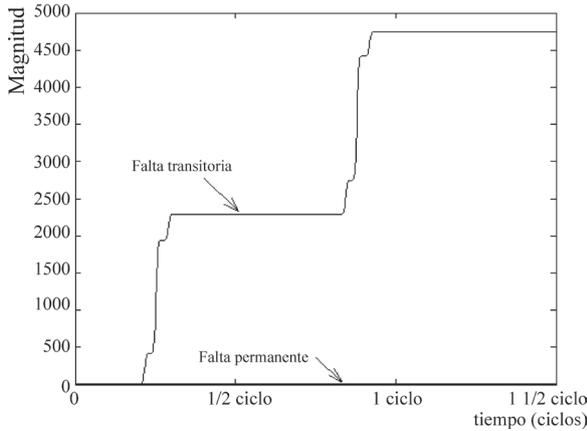
observar con claridad la distinción en este parámetro entre las dos condiciones planteadas. Lo mismo sucede en condiciones de falta lejana, con bajos ángulos de inserción, como se muestra en la figura 11.

Con los resultados mostrados en la figura 12, se puede obtener el valor del umbral Kc. Se observa que hay un margen suficiente de seguridad en todos los casos estudiados ( $Kc_{seleccionado} = 1800$ ).

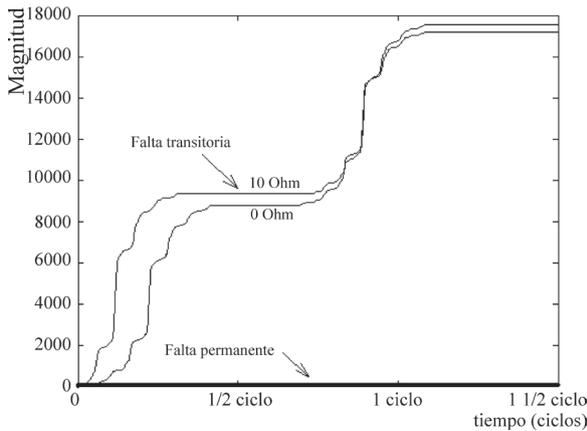
#### Determinar el instante de desaparición o extinción del arco secundario

La determinación del instante de extinción del arco secundario, tras el despeje monofásico, se realiza mediante una correlación cruzada de la señal de intensidad de alguna de las fases sanas

de la línea (la correlación es entre el período transitorio de los primeros instantes y el resto de la señal). Para ello, sólo se utilizan las componentes de alta frecuencia de la señal, que son extraídas mediante la transformada *Wavelet*, tal como se muestra en la figura 13.



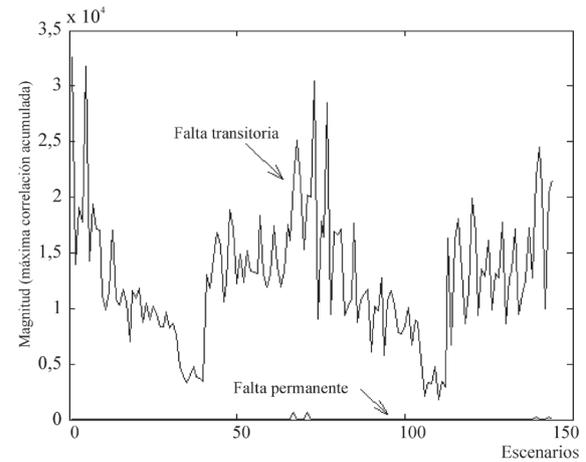
**Figura 10** Falta Monofásica en la fase A, a 10 Km de la barra de medición, 0  $\Omega$  de Rf y 315° de ángulo de inserción



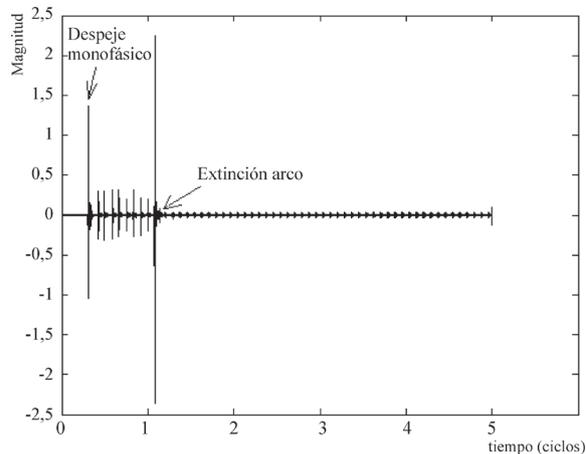
**Figura 11** Comparación entre escenarios de 0 y 10  $\Omega$  de Rf, para falta monofásica en la fase B a 90 Km y con ángulo de inserción de 0°

Una vez que se extingue el arco, la componente de alta frecuencia de la señal de intensidad, es despreciable, por lo que el valor del acumulado de la correlación cruzada se mantiene constante

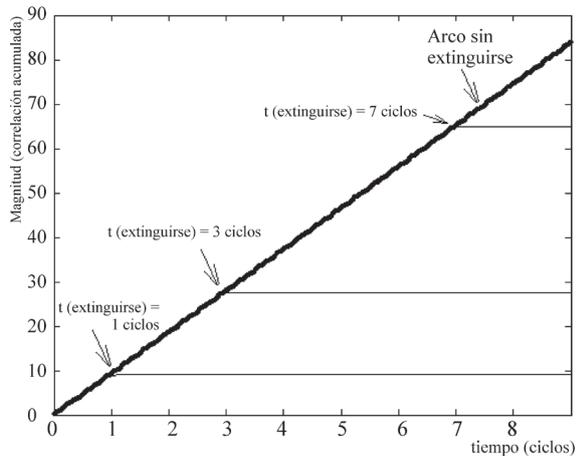
a partir de dicho instante de tiempo. Esto puede observarse en la figura 14, para varios instantes de extinción. Queda así claro, que la metodología planteada es válida y que el margen del 10% de variación (Kd) es suficiente para garantizar el envío de una orden de reconexión al sistema de protección asociado.



**Figura 12** Variación de los valores máximos de la correlación cruzada acumulada, para cada uno de los escenarios estudiados, para el caso de una falta monofásica en la fase A



**Figura 13** Transformada *Wavelet* de la señal de intensidad de la fase B, ante una falta monofásica en la fase A, a 40 Km, 0  $\Omega$  de Rf y 0° de ángulo de inserción



**Figura 14** Variación del valor acumulado de la correlación calculada en función del tiempo, para varias condiciones de extinción del arco secundario

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha planteado una metodología rápida y sencilla para mejorar la operación de la reconexión monofásica en sistemas de transmisión. Para ello, se han presentado dos algoritmos que buscan por un lado determinar si la falta presente en el sistema es transitoria o permanente y posteriormente, determinar el instante de extinción del arco secundario.

La transformada *Wavelet*, demostró ser una herramienta útil para la extracción de la información tiempo – escala, para las componentes de alta frecuencia. A su vez, la correlación cruzada, permite resaltar aquellas porciones de señal que se repiten periódicamente en una señal, por lo que es ideal para el análisis de arcos eléctricos. Se demostró la validez de la metodología para una cantidad apreciable de escenarios, incluyendo casos críticos con impedancia de falta, faltas lejanas y bajos ángulos de inserción. Con la metodología propuesta, se puede conseguir un esquema de reconexión rápido y seguro, pues garantiza dos aspectos fundamentales para esta maniobra: bloqueo de la reconexión en caso de faltas permanentes y la orden de reconexión ocurre una vez que se ha extinguido el arco secundario.

## Referencias

1. Y. Ge, F. Sui, Y. Xiao. "Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent faults". *IEEE Trans on Power Delivery*. Vol 4. 1989. pp. 114-121.
2. R. Aggarwal, A. T. Johns, Y. Song, R. Dunn, D. Fitton. "Neural network based adaptive single pole autoreclosure technique for EHV transmission systems". *IEE Proc. G. T & D*. Vol 141. 1994. pp. 155-160.
3. Z. Radojevic, V. Terzija, M. Duric. "Spectral domain arcing faults recognition and fault distance calculation on transmission lines". *Electric Power System Research*. Vol 37. 1996. pp. 106-113.
4. Z. Radojevic, M. Duric. "Arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines using least square technique". *International Journal of Power and Energy Systems*. Vol. 18. 1998. pp. 106-113.
5. Z. Radojevic, J. Shin, K. Park, S. Kang, J. Park. "A novel approach to the distance protection, fault location and arcing faults recognition". *IEEE Power Systems Conference and Exposition*. Vol. 2. 2004. pp. 628-634.
6. F. Jiang, Z. Bo, Q. Yang. "The wavelet transform applied to distinguish between transient and permanent faults". *International Conference on Power System Technology*. 1998. Vol 2. 1998. pp. 1116 – 1120.
7. Z. Bo, R. Aggarwal, A. Johns. "A novel technique to distinguish between transient and permanent faults based on the detection of current transients". *Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*. Vol. 1. 1997. pp. 216 – 220.
8. Z. Chen, B. Zhang, Z. Bo, M. Redfern. "Adaptive optimal reclosure based on analysis of fault current transients". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Vol. 4. 2003. pp. 13-17.
9. C. Sidney Burrus, R. A. Gonipath, H. Guo. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*. Prentice Hall. New York. 1998. pp. 268.
10. M. Domínguez Jiménez, G. Sansigre Vidal. *La transformada wavelet: una introducción*. Apuntes de la Asignatura: Transformada wavelet y aplicaciones en Ingeniería del Doctorado en Matemáticas Aplicadas. Universidad Politécnica de Madrid. Abril 2005.
11. R. M. de Castro, H. Díaz, J. Martínez, M. Martínez. "Introducción a la Transformada Wavelet para ingenieros: un enfoque didáctico". *2<sup>do</sup> Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*. México. 2004. pp. 7 -14.

12. R. de Castro, M. López, J. Martínez, H. Díaz, M. Martínez. "Introducción al análisis wavelet para la protección de redes eléctricas: técnicas y criterios de discriminación". *VII Simposio Iberoamericano sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia*. México. Noviembre 2004. pp. 1-6.
13. M. Martínez, J. Martínez. "Clasificación y Localización de Faltas, utilizando Wavelets y Redes Neuronales". *Novenas Jornadas Hispano Lusas de Ingeniería Eléctrica*, Marbella. 2005.
14. M. Kizilcay. "Dynamic arc modeling in EMTP". *EMTP Newsletter*. Vol 5. 1985. pp.18-25.
15. W. Rogers. *Modeling of free-air arcs*. Disponible para usuarios con licencia en el website de EEUG.
16. M. Kizilcay. *A survey on Numerical Modelling of Fault Arcs*. Disponible para usuarios con licencia en el website de EEUG.
17. T. Funabashi, T.Otoguro, L. Dubé, M. Kizilcay, A. Ametani. "A Study on fault arc and its influence on digital fault locator performance". *Conference of Developments in Power System Protection*. IEEE. 2001. pp. 418 – 421.
18. M. Kizilcay, T. Pniok. "Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems". *European transactions on Electric Power ETEP*. Vol. 1. 1991. pp.113-119.
19. *EMTP/ATP Rule Book*. Leuven University Press. 1981.
20. IEEE Working Group 15.08.09. "Modeling and analysis of system transients using digital programs". *Special Publication – Tutorial Course*. IEEE Press. 1998.
21. IEEE Tutorial course No. 97TP120-0. *Advancements in Microprocessor based protection and communication*. 1997.
22. A. Chaudhari, K. Tam, A. Phadke. "Protection Systems representation in the electromagnetic transients program". *IEEE Trans. Power Delivery*. Vol. 9. 1994. pp. 700-711.
23. M. Martínez Lozano. *Modelado de los instrumentos de medida (voltaje y corriente), en estudios de protecciones*. Avance parcial trabajo doctoral. Prof. Antonio Pastor G. UPM. 2005.