

Localización de Fallas Mediante la Transformada Wavelet en Líneas de Transmisión

L. Cruz¹ D. Carrión¹ A. Riofrio²

¹Universidad Politécnica Salesiana, UPS

E-mail: lcruz@est.ups.edu.ec; dcarrion@ups.edu.ec

²Operador Nacional de Electricidad - CENACE

E-mail: ariofrio@cenace.org.ec

Resumen

De forma general, las fallas que afectan a los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) se caracterizan por ser de muy corta duración y tener grandes variaciones de magnitud. Razones por las cuales de no tomar acciones correctivas oportunas, podrían llevar a un colapso completo del sistema eléctrico. Las fallas en líneas de transmisión son ocasionadas en su mayoría por inconvenientes de origen técnico y medio ambiental. En este contexto, el presente trabajo busca brindar una aplicación práctica para la Transformada Wavelet enfocada en la localización de fallas en sistemas eléctricos y más concretamente en líneas de transmisión, empleando el método de onda viajera. Para este fin, se desarrolló un algoritmo en MatLab, el mismo que recrea y después determina la distancia en la cual se produjo la falla. Finalmente, el algoritmo propuesto fue probado en tres casos reales de fallas suscitadas en el sistema eléctrico ecuatoriano y los resultados obtenidos muestran que la herramienta posee un excelente grado de precisión con respecto a la localización de fallas con una exactitud promedio del 91% para los casos simulados.

Palabras clave— Capacitancia, inductancia, líneas de transmisión, localización de fallas, onda viajera, Transformada Wavelet.

Abstract

Generally, failures caused in Electrical Power Systems (EPS) are characterized to be short duration and have large magnitude variations, for this reason if do not take proper corrective actions, these failures could be able to lead an entire collapse of the electrical system. Failures in transmission lines are often produced by technical and environmental reasons. In this context, the present paper proposes a practical application for the wavelet transform with regard to locate faults in electrical systems, specially applied on transmission lines by using the principle of traveling wave. For that, an algorithm was developed in MatLab, which recreates and next determines the distance to the failure happened. Finally, this algorithm has been tested in three real failure events of the Ecuadorian electrical system, and the results show that this tool has an excellent accuracy rate to locate transmission lines failures, 91% in average for the simulations done.

Index terms— Capacitance, Failure location, Frequency, Inductance, Transmission line, Traveling wave, Wavelet Transform.

Recibido: 09-09-2016, Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: Cruz, L.; Carrión, D.; Riofrio J. (2017) “Localización de Fallas Mediante la Transformada Wavelet en Líneas de Transmisión”. Revista Técnica “energía”. No. 13, Pp. 79-89
ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

El inconveniente en la delimitación de fallas es tan antiguo como la industria de la energía. Al comienzo, la ubicación de fallas en sistemas de transmisión era hecha directamente, a través de una inspección visual en la(s) línea(s) [1] electrical vehicles, data centers, etc. Faulty EES elements, i.e., open-circuited or short-circuited EES elements, which result in a shortening of the system lifetime, are inevitable especially for long-term use of EES systems. Manual EES element fault detection and elimination incur significant overhead and require the EES system to stop operation during the fault detection process. Therefore, online fault detection and tolerance methods without manual intervention provide great benefit in operability of the EES system. Existing EES system diagnosis techniques have limitations in that (i[2]. Al momento de inspeccionar una línea visualmente, inmediatamente sea por tierra o por aire, resulta siempre en un proceso extremadamente demoroso ya que está sujeto a circunstancias de la ubicación en campo y a las condiciones medioambientales del momento. Adicionalmente, la inspección visual no siempre garantiza que la falla será encontrada debido a que en muchos casos las fallas no dejan una evidencia física del suceso. Los sistemas de transmisión mejor proyectados están sujetos a que ocurran acontecimientos impredecibles que pueden llevarlos fuera de los límites planeados [3]. Cuando uno de estos disturbios ocurre en una línea, es necesario que los sistemas de protección y control tomen acciones para prevenir la degradación del sistema y lo restauren a un estado estable en el menor periodo de tiempo posible [3][5][6].

Uno de los primeros pasos en el proceso de rectificación es la localización de la propia falla. Sin embargo, en varios de los acontecimientos es extremadamente difícil demarcar de una forma directa donde ocurrió la falla, debido a que las líneas de transmisión inevitablemente pasan por divisiones extensas o de difícil acceso, y operan bajo condiciones ambientales difíciles [7]. Por lo tanto, el plazo requerido para una inspección física es demasiado largo. Investigaciones sobre técnicas de delimitación de fallas demuestran que un método preciso y rápido se vuelve de gran utilidad y valor práctico en estos casos [8][9]. Además, la inclusión de métodos de localización de fallas ayuda a incrementar los índices de confiabilidad y por ende la calidad de la energía suministrada por el sistema bajo análisis, más aún si este cuenta con una alta participación de generación renovable o generación distribuida [10].

Este artículo busca brindar una alternativa que ayude a satisfacer las necesidades existentes de localización de fallas en líneas de transmisión considerando las características presentes en los

sistemas eléctricos modernos. Para ello, se dividió al artículo en dos secciones, una teórica y otra práctica o de simulación. La sección teórica muestra una definición general de la ubicación de fallas mediante la Transformada Wavelet, así como también un análisis crítico de los diferentes métodos existentes; mostrando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos con sus respectivas aplicaciones [11]current computational methods for the indicators have noticeable drawbacks with respect to the accuracy. Wavelet transform-based multiresolution analysis (WT-based MRA[12]. Mientras que en la sección práctica o de simulación, se presenta un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para la distancia de localización de fallas, el tiempo de duración del evento y la velocidad de propagación del mismo, al hacer uso del modelo propuesto y los valores medidos en tiempo real al suscitarse la falla, para esto se simuló el comportamiento de tres diferentes líneas de transmisión del sistema eléctrico ecuatoriano durante contingencias reales, buscando de esta forma comprobar la sensibilidad de los resultados obtenidos ante cambios en la frecuencia de muestreo de los registros, tal como se sugiere en [13].

2. FUNCIÓN WAVELET

Los orígenes de la función wavelet (FW) se remontan a 1930, donde ésta surge como una mejora a los estudios hechos por Joseph Fourier (Series y Transformada de Fourier) y Alfred Haar en cuanto a realizar análisis de funciones en más de un dominio. En este sentido, la FW corresponde a un grupo de funciones que presentan una buena localización de oscilaciones tanto en el dominio del tiempo $f(t)$ como en el de la frecuencia $F(s)$, lo que la hace una importante herramienta en el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios y variables en el tiempo (señales) así como también de aquellos que presenten discontinuidades. Razón por la cual se vuelve aplicable a varias ramas de la ingeniería. La Fig.1 muestra los campos de mayor importancia donde FW es actualmente utilizada.

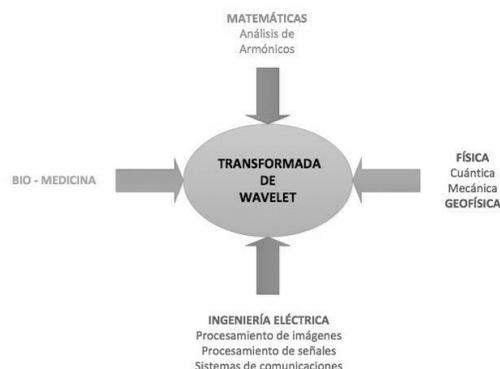


Figura 1: Áreas de aplicación de la función wavelet

2.1. Transformada Wavelet

Esta transformada fue desarrollada como una opción para pasar los problemas de resolución de la Transformada de Fourier en tiempo reducido (STFT), haciendo una buena imagen de una señal tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia de manera simultánea, por lo que el estudio wavelet representa el subsiguiente paso a la STFT que es una regla a través de ventanas con demarcaciones de tamaño variable [14].

Las funciones de la Transformada son generadas a partir de una representación wavelet básica como se indica en el esquema de la Fig.2, por medio de traslaciones (tiempo) y ampliaciones (frecuencia). Estas funciones son centrales para la reconstrucción de la función original por medio de la transformada inversa [14].



Figura 2: Esquema de la Transformada Wavelet

De la siguiente manera es bastante general la representación de la transformada, la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de interpretaciones $\psi_{s,\tau}(t)$, que forman una base y son llamadas “wavelets” como aparece en (1), definida como:

$$W_{f(s,\tau)} = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (1)$$

Las wavelets son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma representación wavelet $\psi(t)$, llamada “wavelet madre” [15]. Este renombre se deriva de dos importantes propiedades del estudio wavelet y se define en (2) como:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2)$$

En la cual, s corresponde al factor de escala y τ es el factor de traslación como se indica a continuación:

Traslación:

$$\psi(t-b) \quad (3)$$

Cambio de escala:

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (4)$$

Traslación y cambio de escala:

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

Existe también la familia denominada biortonormales, que es utilizada para la reconstrucción de señales por disponer de una propiedad de fase lineal, se usa una $\psi(t)$ para la descomposición y otra para la reconstrucción de cualquier señal propuesta [16].

2.1.1 Wavelet de Haar

Haar expresa en (6) que existen wavelets definidas por la función:

$$s_t = \begin{cases} 1, & 0 < t < 0,5 \\ -1, & 0,5 < t < 1 \\ 1, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

2.1.2 Wavelet Morlet

De igual forma existe la ecuación dada por Morlet que se expresa como una onda compuesta por una exponencial y consta en (7).

$$s_t = \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) \cos(5t) \quad (7)$$

2.1.3 Wavelet Sombrero Mexicano

La wavelet conocida como sombrero mexicano constituye la segunda derivada de la función de distribución Gaussiana definida en (8).

$$s_t = \frac{2}{\sqrt{3 \cdot \pi^4}} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) (1-t^2) \quad (8)$$

2.2. Tipos de Transformada Wavelet

Se encuentran definidos dos tipos de transformadas que se denominan: Transformada Wavelet Discreta (DWT) y la Transformada Wavelet Continua (CWT), que a continuación serán nombradas para identificar cada una de ellas [17].

2.2.1 Transformada Wavelet Continua (CWT)

La Transformada CWT está definida para una señal en la siguiente expresión (9).

$$CWT = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int w\left(\frac{x-b}{a}\right) s_{(x)} dx; \quad (9)$$

$a, b \in \mathbb{R} \neq 0$

En (9) se muestra que a es la escala y b es la traslación en ambos números reales y $s_{(x)}$ es la función

a analizar [18]. De igual manera se aprecia también que si el coeficiente de escalamiento se hace cero, la wavelet no existiría y el análisis sería indeterminado [19].

2.2.2 Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Sea la señal a analizar $f_{[n]}$ una función discreta, para este caso la Transformada Wavelet está definida por (10).

$$C_{[j,k]} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f_{[n]} \psi_{j,k}[n] \quad (10)$$

Donde $\psi_{j,k}$ representa una nueva wavelet discreta definida en (11) [18].

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-j/2} \psi[2^{-j}n - k] \quad (11)$$

3. LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La delimitación rápida de una falla en una línea de transmisión con una precisión aceptable permite proceder con las acciones necesarias para restituir el suministro de energía, disminuyendo de esta forma el periodo de indisponibilidad y mejorando la confiabilidad del sistema eléctrico.

3.1. Definición de localización de fallas

Tiempo atrás, la ubicación de fallas era realizada mediante una inspección visual de la línea en el sitio del evento. Pero, esta inspección visual se torna en un proceso complicado debido a la cantidad de recursos y tiempo necesarios para ello, especialmente para líneas con longitudes considerablemente largas. Además, esta búsqueda se encuentra condicionada al estado del terreno de las zonas de emplazamiento y a las condiciones medioambientales del momento. Por otro lado, la inspección visual no siempre asegura que la falla será encontrada debido a que, en muchos casos, las fallas no dejan una evidencia física [20].

Los métodos de ubicación de fallas son técnicas que buscan identificar con la mayor precisión posible, todas aquellas condiciones no comunes en el sistema, que desvíen la corriente de la línea de transmisión provocando fallas al sistema. En la actualidad, estas técnicas son usadas previo a la inspección visual, a fin de reducir el área de trabajo a una pequeña sección de la línea [21].

Según el tipo de dato usado para el análisis, los métodos de ubicación de fallas pueden ser clasificados en dos categorías: los que se basan en cálculo de impedancia y los que se basan en onda viajera. Este artículo abordará únicamente los métodos basados en

onda viajera, mismos que pueden sustentar su análisis en la Transformada Wavelet.

3.2. Localización de fallas por onda viajera

Los métodos utilizados para la ubicación de fallas basadas en ondas viajeras, sustentan su funcionamiento en evaluar el tiempo que le llevará al frente de onda en propagarse desde el punto de falla sobre la línea hasta el lugar donde se encuentra el equipo de medición, generalmente situado en uno o ambos extremos de la misma. Partiendo de esto, es posible determinar la distancia alcanzada por el frente de onda si se conoce la velocidad con la que ésta viaja [22]. Todos los métodos basados en onda viajera se caracterizan por tener una rápida respuesta y alta precisión. Sin embargo, existen también varios problemas técnicos insuperables como la precisión de los equipos de medición o la vulnerabilidad de éstos ante señales externas.

La precisión para ubicar fallas en un SEP depende en gran medida de la frecuencia de muestreo, ya que ésta es muy importante para determinar el lugar exacto del incidente. Debido a que la velocidad a la cuál viaja la onda sobre la línea es casi la velocidad de la luz, para alcanzar una alta precisión se vuelve necesario contar con una frecuencia de muestreo realmente alta. Por lo que se necesita de equipos complejos y costosos. Se encuentran varias dificultades para fallas ocurridas cerca del ángulo cero de la señal de voltaje debido a que si el voltaje es cero cuando la falla comienza, entonces no existirá un cambio abrupto en la continuidad del medio de propagación y será muy difícil su detección.

Los métodos de detección de fallas son muchos, sin embargo el método de onda viajera para ubicación de fallas en SEP presenta una mejor eficiencia y son aplicables a casos como el que presenta este estudio.

3.3. Análisis de fallas basado en Wavelet

La Transformada Wavelet ha encontrado aplicaciones diferentes en el área de la ingeniería como se mostró en la Fig.1 debido a su gran capacidad de analizar discontinuidades locales en las ondas. Para el caso puntual de la ingeniería eléctrica y en particular de los sistemas eléctricos, la Transformada Wavelet fue aprovechada inicialmente en el campo de los sistemas de potencia para las descomposiciones de transitorios electromagnéticos [23].

La aplicación ideal en SEP para esta transformada es detectar cuando llega el frente de onda al factor de proporción. Comparando dos de estos lapsos de llegada, es posible apreciar cuanto tiempo ha viajado el frente de onda, con lo que se puede saber la etapa a la falla [24].

4. MODELO DE DETECCIÓN DE FALLAS PROPUESTO

Al momento de suscitarse una falla en las líneas de transmisión de un SEP el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente sufren variaciones abruptas caracterizadas por la presencia de picos crecientes o decrecientes a lo largo de toda su extensión. Estas variaciones se llevan a cabo en tiempos muy cortos, generalmente del orden de los microsegundos o milisegundos [15].

Por lo que su análisis se complica y obliga a la utilización de herramientas de gran precisión para poder determinar los puntos exactos de variación. Como ya se detalló en el apartado anterior del presente trabajo, la Transformada Wavelet puede ser utilizada para el tratamiento exhaustivo de señales hasta llegar a conocer sus componentes fundamentales. En el campo específico del análisis de fallas, esta información resulta útil para la determinación exacta del tiempo de suceso de la falla y por ende de la distancia aproximada en dónde se pudo haber presentado esta. Tomando como base esto, se ha desarrollado un modelo de aplicación de fallas basado en la Transformada Wavelet que incluye una interfaz gráfica para la detección de fallas aleatorias en MatLab, mismo que va ser descrito con detalle a continuación.

4.1. Algoritmo de detección de fallas propuesto

Con la finalidad de facilitar la comprensión del modelo de ubicación de fallas propuesto, se ha dividido la explicación de las acciones que éste realiza en los pasos del siguiente algoritmo:

Paso 1: en esta sección, se busca parametrizar la línea de transmisión (L.T) a ser estudiada, para esto es importante considerar los parámetros mostrados en la Fig. 3, y que corresponde al circuito equivalente de una L.T.

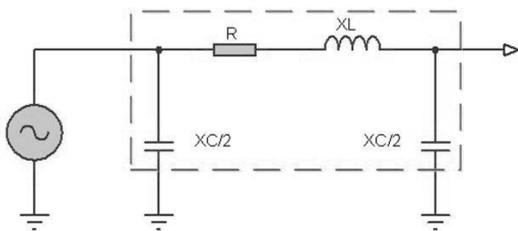


Figura 3: Circuito equivalente de una línea de transmisión

Donde R es la resistencia de la L.T, misma que se vuelve despreciable para longitudes largas como aquellas que serán analizadas a continuación, X_L corresponde a la inductancia y X_C a la capacitancia.

Los valores de capacitancia e inductancia son propios y característicos del tipo de línea a ser estudiada, adicional a éstos es necesario también conocer los valores de voltaje y frecuencia del SEP en el cual trabaja la L.T. Por esta razón, estos valores deben ser ingresados por teclado a través de una interfaz gráfica desarrollada especialmente para este modelo.

Paso 2: en esta parte del modelo propuesto, se busca emular el comportamiento de las señales de voltaje o corriente durante el suceso de una falla aleatoria, es decir, sin importar su origen (técnico o ambiental), y que afecta a un SEP. Para ello el algoritmo presenta dos opciones, la primera es ingresar directamente los datos al entorno de MatLab mediante una estructura matricial, esto será posible si se tiene acceso a los sistemas de medición. La segunda y la cual fue empleada para las simulaciones detalladas en el siguiente apartado es utilizar la herramienta de MatLab llamada "Grabit" que permite extraer los datos de cada uno de los puntos que conforman una curva. Adicionalmente, para la simulación de fallas aleatorias se considerado según lo expuesto en [25], que la frecuencia de muestreo debe ser de al menos 1 MHz y también que ésta pueda ser fácilmente modificada en el código de programación con la finalidad de adaptar el algoritmo propuesto a diferentes casos de estudio.

Paso 3: una vez construida la forma de la señal de voltaje o corriente que incluye a la falla transitoria producida en la L.T, utilizando la Transformada Wavelet para la ubicación de la misma, en base al cálculo de los tiempos de llegada de los frentes de onda según (12) [25].

$$d = \frac{1}{2}(T_2 - T_1) \left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \right) \quad (12)$$

Donde d es la distancia a la falla, L y C son inductancia y capacitancia respectivamente de la L.T, T_2 y T_1 son los tiempos de llegada de los dos primeros frentes de onda consecutivos dados para el mismo terminal de línea, también se calcula la velocidad de propagación de la onda (V) durante el evento de falla mediante la expresión (13) [26].

$$v = \left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \right) \quad (13)$$

En esta aplicación se utilizó el comando wavedec, mismo que permite un análisis unidimensional multinivel mediante la descomposición de la señal en altas y bajas frecuencias a través del uso de filtros pasa bajos y altos [27]. Este proceso es llevado a cabo un número finito de veces hasta llegar a encontrar la

perturbación en la señal, para el algoritmo propuesto se ha utilizado cuatro filtros. La Fig. 4 sintetiza el proceso realizado por esta herramienta.

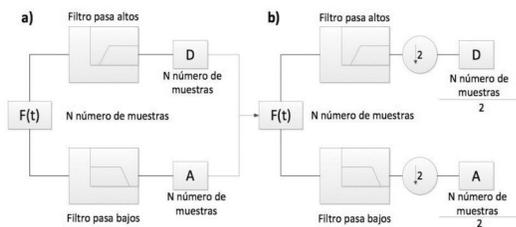


Figura 4: Descomposición de señales para análisis realizado por el comando wavedec, a) muestreo completo de señal y b) muestreo reducido con coeficientes wavelet

Paso 4: finalmente la interfaz gráfica muestra los resultados obtenidos, así como también las gráficas de la señal de voltaje o corriente con la falla aleatoria reconstruida y otra con el detalle de la magnitud de la falla y el tiempo total en el cual ésta ocurre, entre los extremos de la línea en análisis. La Tabla 1 contiene el algoritmo propuesto de manera detallada.

Tabla 1: Algoritmo para Ubicación de Fallas con Transformada Wavelet

Inicio	
Paso 1: Parametrización de la L.T. a ser analizada.	
Paso 2: Datos de entrada para L.T. y sistema eléctrico.	
I_{LT} =Longitud de L.T. [km] L_{LT} =Inductancia de L.T. [H/km] C_{LT} =Capacitancia de L.T. [F/km]	Vsis=Voltaje del Sistema [V] fsis=Frecuencia del Sistema [Hz]
Paso 3: Salidas.	
Senal= Señal del sistema tiempo_falla= Tiempo de falla senal(tiempo_falla)= Señal de falla fo1 = frente de onda 1	fo2= frente de onda 2 v= Vel. Propagación onda tdon= Tiempo de propagación
Paso 4: Reconstrucción de la señal con falla transitoria.	
Si: hay acceso a datos [num,text]=xlsread(Archivo,Hoja,Rango) Plot(num,text)	
Caso contrario: function grabit(fname) Senal=[fname] Plot(senal)	
Fin si.	
Paso 5: Ubicación de falla con Transformada Wavelet.	
[c,1]=wavedec(senal,2,'db4') fo1=wrcoef('d',c,1,'db4',1) fo2=wrcoef('d',c,1,'db4',2)	
Paso 6: Detección del tiempo de falla.	
[valor,t1]= max(fo1) [valor,t2]= max(fo2)	
Paso 7: Calculo de la velocidad de falla.	
$v=1/(L_{LT} * C_{LT})^{1/2}$ $tdon=L_{LT}/v$	
Paso 8: Gráfica de resultados.	
Fin	

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalidad de verificar la precisión y la viabilidad de uso del modelo propuesto, se lo validó en la determinación de la distancia de falla para tres casos reales de contingencias suscitadas en líneas de transmisión que conforman el Sistema Nacional Interconectado (SNI) del Ecuador, para esto se tomó como referencia los datos de medición en tiempo real proporcionados por el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y que constan en los respectivos informes de falla de cada contingencia. En la Fig.5 se muestra la ubicación geográfica de las L. T utilizadas para la verificación.

Esta sección está dividida en tres apartados que corresponde a cada una de las simulaciones de las L.T. tomadas como base para el estudio. Es importante mencionar que las fallas replicadas a continuación son unifilares y por esta razón el análisis se lo ha hecho solo en la fase afectada.

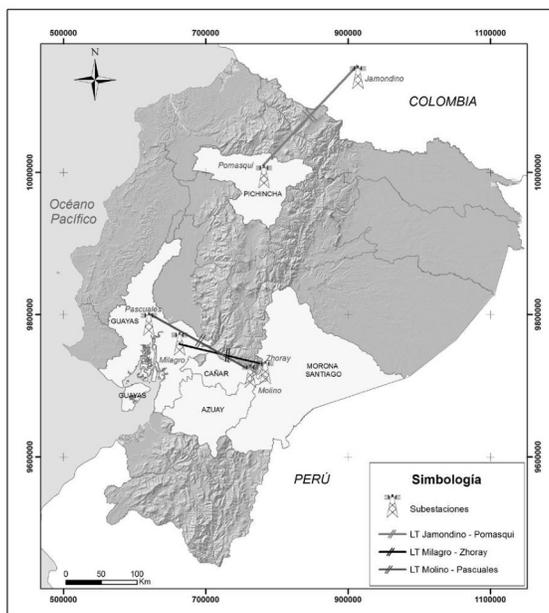


Figura 5: Emplazamiento geográfico de las líneas de transmisión a ser estudiadas

5.1. Caso 1

En este caso se consideró una falla presentada en la línea Milagro – Zhoray de 230 [kV], cuyo trayecto va desde el límite fronterizo de las provincias de Azuay y Morona Santiago hasta la provincia del Guayas con una distancia total de 120,8 km. La Tabla 2 muestra los datos propios de esta L.T.

Tabla 2: Datos eléctricos de la L.T. a ser modelada – Caso 1

Datos	Valores
Frecuencia [Hz]	60
Inductancia [H/km]	0,15e-3
Capacitancia [F/km]	6,29e-3
Longitud [km]	120,8

La reconstrucción de la señal de voltaje durante la contingencia para esta L.T. haciendo uso del paso 4 del algoritmo propuesto aparece en la Fig. 6. Mientras, que en la Fig. 7 se aprecia una ampliación de la falla aleatoria recreada para este caso. Aquí se ha marcado con una línea continua de color magenta el momento del despeje de la falla en el sistema analizado.

En la Tabla 3 se encuentran sintetizados los resultados obtenidos al aplicar la Transformada Wavelet para la localización de fallas, el tiempo de duración y la velocidad de propagación. De igual forma, se pueden apreciar los resultados medidos por los equipos de protección de esta línea en el instante de la falla, además del porcentaje de precisión entre los valores calculados gracias al modelo propuesto y los valores reales. Para este caso la herramienta presenta una precisión del 89,76% en cuanto a la localización de la falla y un 94,19% en relación a la duración de la misma.

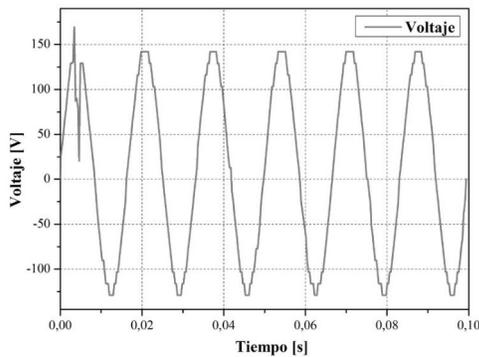


Figura 6: Reconstrucción señal de voltaje durante falla aleatoria – Caso 1

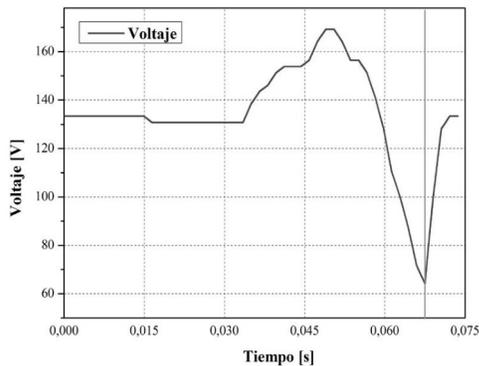


Figura 7: Detalle de falla aleatoria – Caso 1

Tabla 3: Resultados localización de falla – Caso 1

	Resultados calculados	Valores medidos por CENACE	% de exactitud
Distancia detección de falla [km]	18,79	20,93	89,76%
Tiempo de falla [s]	0,06902	0,07335	94,10%
Velocidad propagación [km/s]	1 029,51	-	-

5.2. Caso 2

Para este caso se replicó una falla transitoria generada en la L.T. Molino - Pascuales con un nivel de voltaje de 230 kV y una longitud de 188,5 km, comprendida desde la provincia del Azuay hasta la provincia del Guayas. En la Tabla 4 se presentan los datos característicos utilizados para ésta línea.

Tabla 4: Datos eléctricos de la L.T. a ser modelada – Caso 2.

Datos	Valores
Frecuencia [Hz]	60
Inductancia [H/km]	0,24e-3
Capacitancia [F/km]	4,16e-3
Longitud [km]	188,5

Las Fig. 8 y Fig. 9 muestran la simulación y reconstrucción de la señal de voltaje con la inclusión de la falla y el detalle de esta respectivamente. Al igual que en el caso simulado anteriormente, se utilizó una línea de color magenta para identificar el momento de finalización de la falla.

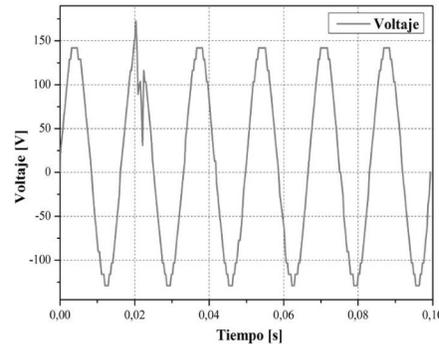


Figura 8: Reconstrucción señal de voltaje durante falla aleatoria – Caso 2

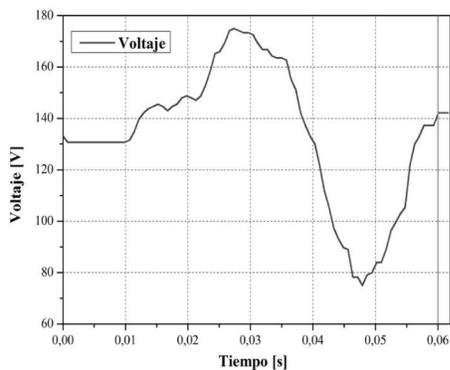


Figura 9: Detalle de falla aleatoria – Caso 2

Para este caso, los resultados obtenidos indican que en cuanto a la detección de la distancia de falla la herramienta diseñada tuvo una precisión del 90,92 % y un 95,71 % en relación al tiempo. Los resultados para este caso de simulación se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados localización de falla – Caso 2

	Resultados calculados	Valores medidos por CENACE	% de exactitud
Distancia detección de falla [km]	18,73	20,60	90,92%
Tiempo de falla [s]	0,06007	0,06276	95,71%
Velocidad propagación [km/s]	1 000,80	-	-

5.3. Caso 3

Para el último caso de simulación, se analizó una falla transitoria generada en el circuito número cuatro de la L.T. Pomasqui – Jamondino, la cual tiene un voltaje nominal de 230 kV y recorre una distancia total de 212,2 km desde la provincia de Pichincha en Ecuador hasta el departamento de Nariño en Colombia, distancia que se encuentra bajo concesión y supervisión de las entidades eléctricas ecuatorianas. Esta línea se caracteriza por ser una de las más largas del sistema eléctrico ecuatoriano y de vital importancia dentro de las transacciones internacionales de energía eléctrica (TIE).

Para el caso puntual de esta simulación y considerando que la falla recreada tuvo su origen en el sistema eléctrico colombiano, se decidió extender la longitud de la L.T. aproximadamente a 300 km para mejorar el grado de exactitud en la localización del percance. Considerando este particular, los

parámetros eléctricos utilizados para la simulación de esta línea aparecen resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6: Datos eléctricos de la L.T. a ser modelada – Caso 3

Datos	Valores
Frecuencia [Hz]	60
Inductancia [H/km]	0,27e-3
Capacitancia [F/km]	3,73e-3
Longitud [km]	≈ 300

En la Fig. 10 se muestra el comportamiento de la señal de voltaje reconstruida durante el estado de falla. Mientras que la Fig. 11 muestra una ampliación del suceso recreado y al igual que en los casos anteriores se han marcado con la línea continua de color magenta el fin de la contingencia bajo análisis.

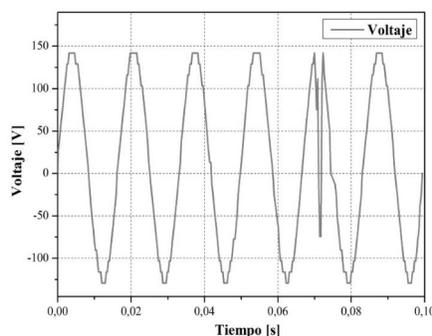


Figura 10: Reconstrucción señal de voltaje durante falla aleatoria – Caso 3

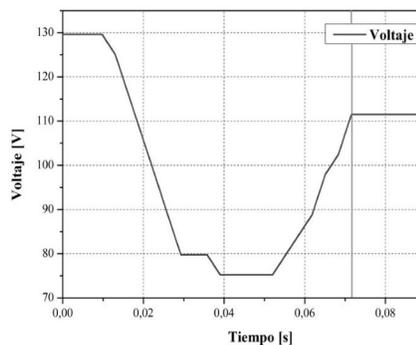


Figura 11: Detalle de falla aleatoria – Caso 3

Los resultados obtenidos para este caso de simulación aparecen en la Tabla 7, donde se observa que la herramienta calculó la distancia del evento con un 92,47 % de precisión, mientras que en cuanto al tiempo de duración de la falla lo hizo con un 93,95 % de exactitud.

Tabla 7: Resultados localización de falla – Caso 3

	Resultados calculados	Valores medidos por CENACE	% de exactitud
Distancia detección de falla [km]	228,31	246,90	92,47%
Tiempo de falla [s]	0,07480	0,07962	93,95%
Velocidad propagación [km/s]	996,47	-	-

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo presenta una aplicación práctica de la Transformada Wavelet, aplicándola en la localización de fallas en líneas de transmisión, buscando de esta forma brindar una nueva herramienta para el análisis de contingencias.

Herramientas como las propuestas en el presente trabajo se presentan como una gran ayuda y brindan una opción extra de verificación. Que pueden ser utilizadas como un complemento a las herramientas de análisis que poseen los sistemas de protección, con los que cuentan las empresas del sector eléctrico, especialmente en las etapas de análisis post operativo.

De los casos de estudio planteados, se puede concluir que el algoritmo propuesto alcanza una mayor precisión en L.T. de mayor longitud, por lo que se recomienda su aplicación en aquellas que tengan una distancia mayor o igual a los 180 km.

Si bien la herramienta propuesta tiene una precisión promedio igual al 91,05% en cuanto a la localización de fallas para los casos simulados, es importante mencionar que estos resultados no pueden ser tomados como definitivos, razón por la cual es recomendable realizar una comparación de estos con otros software de análisis de contingencias y para casos prácticos lo ideal sería confirmar los resultados obtenidos con visitas de personal técnico especializado al lugar del evento.

Por otro lado, se ha podido demostrar que la Transformada Wavelet constituye una herramienta interesante en cuanto al análisis y reconstrucción de señales eléctricas. Además, como se mostró en este trabajo es conveniente realizar un análisis utilizando un número igual o superior a 4 filtros pasa altos y bajos con la finalidad de tener una buena resolución de análisis.

En cuanto a trabajos futuros, sería interesante estudiar la aplicación el desempeño de la herramienta wavelet aplicada en otro tipo de contingencias que pueden presentarse en sistemas eléctricos, así como también su aplicación en sistemas de monitoreo en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean manifestar su más sincero y profundo agradecimiento al Operador Nacional de Electricidad (CENACE), en especial a la Unidad de Análisis de Eventos por la información facilitada para su desarrollo y de igual forma a la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) por las facilidades prestadas durante su ejecución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. Wang, L. Xue, M. Pedram, and C. Naehyuck, "Online Fault Detection and Fault Tolerance in Electrical Energy Storage Systems," PES Gen. Meet. | Conf. Expo. 2014 IEEE, pp. 1–5, 2014.
- [2] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [3] R. A. Keswani, "Identification of fault in HVDC converters using wavelet based multi-resolution analysis," Proc. - 1st Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol. ICETET 2008, vol. 16, no. 4, pp. 954–959, 2008.
- [4] P. F. Gale, J. Stokoe, and P. A. Crossley, "Practical Experience With Travelling Wave Fault Locators on Scottish power's 275 & 400 kv transmission system," pp. 192–196, 1993.
- [5] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, "Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm," IEE Lat. Am. Trans., vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [6] D. Carrión, E. Inga, J. W. Gonzalez, and R. Hincapié, "Optimal Geographical Placement of Phasor Measurement Units based on Clustering Techniques," in 51st International Universities' Power Engineering Conference, 2016.
- [7] J. Da Silva, F. Costa, and E. Santos, "High Impedance Fault Location – Case Study Using Wavelet Transform And Artificial Neural Networks," 22nd Int. Conf. Electr. Distrib., vol. 5, no. 663, pp. 10–13, 2013.
- [8] L. J. Lewis, "Traveing Wave Relations Power-System Fault Locators," IEEE Journals Mag., vol. 70, no. 2, pp. 1671–1680, 1951.
- [9] C. Cueva and D. Carrión, "Modelación para la localización de fallas en líneas de transmisión de doble circuito," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.

- [10] A. Riofrio, D. Carrión, and D. Vaca, "Propuesta de Modelo de Operación Aplicado a Micro Redes Fotovoltaicas en Generación Distribuida," *Rev. Técnica Energía*, vol. 12, no. ISSN 1390-5074, pp. 216–229, 2016.
- [11] W. Gao and J. Ning, "Wavelet-Based Disturbance Analysis For Power System Wide-Area Monitoring," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 121–130, 2011.
- [12] L. Cruz and D. Carrión, "Aplicación de la Transformada de Wavelet para ubicación de fallas en sistemas eléctricos de potencia," Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [13] H. Livani, S. Member, and C. Y. Evrenosoglu, "A Traveling Wave Based Single-Ended Fault Location Algorithm using DWT for Overhead Lines Combined with Underground Cables," *IEEE PES Gen. Meet.*, pp. 4–9, 2010.
- [14] F. B. Costa, B. A. Souza, S. Member, and N. S. D. Brito, "Real-Time Classification of Transmission Line Faults Based on Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform," pp. 1–8, 2012.
- [15] E. Bashier, M. T. Orner, and A. I. Aziz, "Transmission Line Faults Detection, Classification and Location using Artificial Neural Network," pp. 1–5, 2012.
- [16] N. Moslemi and D. JALALI, "Fault Location for Radial Distribution Systems Using Fault Generated High-Frequency Transients and Wavelet Analysis," *18th Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. June, pp. 1–4, 2005.
- [17] T. Patcharoen, A. Ngaopitakkul, and A. Kunakorn, "Identification of fault types for a three-bus transmission network using discrete Wavelet Transform and Probabilistic Neural Networks," pp. 1579–1584, 2007.
- [18] X. Gu, "Wavelet Transform Based Approach to Harmonic Analysis," 2011.
- [19] S. Yunhui and R. Qiuqi, "Continuous Wavelet Transforms," *Proc. 7th Int. Conf. Signal Process. 2004. Proceedings. ICSP '04. 2004.*, vol. 1, pp. 207–210, 2005.
- [20] P. Jun, S. Wenxia, T. Jun, and Z. Jun, "Fault location for transmission line based on traveling waves using correlation analysis method," *2008 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, pp. 681–684, 2008.
- [21] M. B. Dewe, S. Sankar, and J. Arrillaga, "Application of satellite time references to HVDC fault location," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, pp. 1295–1302, 1993.
- [22] L. Zewen, H. Huanhuan, D. Feng, Z. Xiangjun, and Y. Kun, "Power grid fault traveling wave network location method," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, pp. 1–6, 2013.
- [23] O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, "Wavelets And Electromagnetic Power System Transients," vol. 11, no. 2, pp. 1050–1058, 1996.
- [24] P. K. Murthy, J. Amarnath, S. Kamakshiah, and B. P. Singh, "Wavelet Transform Approach for Detection and Location of Faults in HVDC System," *IEEE Reg. 10 Colloq. 3rd Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIS 2008*, pp. 6–11, 2008.
- [25] L. De Andrade and T. P. De Leão, "Fault Location for Transmission Lines Using Wavelet," vol. 12, no. 6, pp. 1043–1048, 2014.
- [26] V. K. Gupta and D. N. Vishwakarma, "Transmission Line Fault Location using Traveling Wave," *Int. J. Invent. Research, Eng. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 24–28, 2014.
- [27] S. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, 1989.



Luis Rubén Cruz Andaluz.-

Nació en Quito en 1988. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) en 2016. Al momento, se desempeña como Ingeniero de diseño en Grupo Synergy E&P Ecuador. Sus campos

de investigación están relacionados con el diseño de circuitos para la Industria Petrolera y el estudio de estabilidad de sistemas eléctricos.



Diego Francisco Carrión

Galarza.- Nació en Quito en 1981. Sus estudios superiores los realizó en la Universidad Politécnica Salesiana, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico en 2010. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Doctorado en la

Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín, Colombia. Su campo de investigación se encuentra relacionado con

el análisis de Sistemas de Transmisión de Electricidad en Alto Voltaje y las Redes Inteligentes. Es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito y miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – GIREI.



Augusto Jonathan Riofrio

Trujillo.- Nació en Quito D.M en 1990. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) en 2015. Se ha desempeñado como Analista Técnico en el Instituto Nacional

de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) y actualmente ejerce el cargo de Ingeniero de Liquidación y Facturación de energía eléctrica en la Gerencia Nacional de Transacciones Comerciales del Operador Nacional de Electricidad (CENACE). Sus intereses investigativos están relacionados con el desarrollo de herramientas para la seguridad de Sistemas Eléctricos de Potencia, pérdidas en Sistemas de Trasmisión de Electricidad, Energías Renovables especialmente Fotovoltaica, Micro redes de generación e inclusión de fuentes renovables para generación de electricidad en sistemas eléctricos convencionales.