

## APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DEBIDOS A LA CONMUTACIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES

**Gabriel J. López<sup>\*†</sup>, Diana P. Jiménez, Jorge W. González<sup>\*</sup>, Andrés E. Díez<sup>\*</sup>, Idi A. Isaac<sup>\*</sup>, Hugo A. Cardona<sup>\*</sup>**

*\*Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-261, Medellín, Colombia.*

Recibido 26 Abril 2010; aceptado 12 Junio 2010  
Disponible en línea: 25 Junio 2010

**Resumen:** La creciente necesidad de suministrar energía de calidad a los usuarios, ha conducido a muchas investigaciones y debates sobre los aspectos técnicos que deben determinarla. Más aun, cuando los usuarios de la energía eléctrica tienen una percepción cada vez mayor de que parte de los problemas en el funcionamiento de sus equipos tienen que ver con la red eléctrica a la que están conectados. Existen varios métodos que permiten la detección y el análisis de los fenómenos que afectan la calidad del suministro eléctrico. Sin embargo, el método de la Transformada de Wavelet ha experimentado un gran auge en los últimos años y es una técnica que se puede aplicar con éxito, especialmente si la señal de suministro presenta ruido o transitorios de alta frecuencia. Este artículo presenta un programa basado en la transformada de Wavelet para análisis de transitorios generados por la conmutación de bancos de condensadores.

*Palabras clave:* Bancos de Condensadores, Calidad de Potencia, Transitorios, Transients, Transformada de Wavelet.

**Abstract:** The growing need to provide a better power quality to users, has led to many investigations and discussions on technical aspects to be determined. Moreover, when users of electricity have a growing perception that some of the problems in the functioning of their equipments have to do with the electricity grid to which they are connected.

There are several methods that allow the detection and analysis of the phenomena that affect the power quality. However, the method of the Wavelet Transform has boomed in recent years and is a technique that can be applied successfully, especially if the supply signal is noisy or high frequency transients. This paper presents a program based on the wavelet transform to analyze transients due to capacitor switching banks.

*Keywords:* Capacitor banks, Power Quality, Transients, Wavelet Transform.

---

<sup>†</sup> Autor al que se le dirige la correspondencia:  
Tel. (+574) 354 45 22 ext. 9525.  
E-mail: [gabriel.lopez@upb.edu.co](mailto:gabriel.lopez@upb.edu.co) (Gabriel López).

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes áreas de investigación que en los últimos tiempos está teniendo un gran auge en cuanto a desarrollo de métodos novedosos de análisis y a cantidad de publicaciones en revistas técnicas de impacto internacional, es la relacionada con la Calidad de la Potencia Eléctrica (CPE) tanto en sistemas de transporte en alta tensión como en sistemas de sub-transmisión y distribución.

Como ya es bien sabido, la CPE puede verse afectada por varios motivos: corto circuitos, energización de bancos de condensadores, conexión de equipos con características altamente no lineales, conexiones o desconexiones súbitas de carga, etc.

Una nueva herramienta de análisis de señales como la Transformada de Wavelet, ha permitido la detección y discriminación de eventos perturbadores de la CPE en un sistema de potencia. Es claro que para poder atacar convenientemente todas estas nuevas condiciones es indispensable el uso adecuado de técnicas modernas de análisis sin desvincularse de los avances en el campo del “hardware” para su efectiva y útil implementación.

En este trabajo se presenta un programa desarrollado en MATLAB por medio de la herramienta “*Wavelet Transform Toolbox*”, que con base en la Transformada de Wavelet, permite analizar los transitorios de maniobra debidos a la conmutación de bancos de condensadores.

## 2. SENSIBILIDAD DE LOS EQUIPOS DE UN SISTEMA INDUSTRIAL FRENTE A LAS PERTURBACIONES DE RED

El efecto más importante asociado a las caídas de tensión, las sobretensiones temporales y las interrupciones de la tensión de suministro es la desconexión o el mal funcionamiento de los equipos. En muchos procesos industriales con cargas críticas, variaciones muy cortas de tensión, incluso instantáneas, pueden producir la desconexión de los equipos de control que luego necesitan horas para su reinicio generando grandes pérdidas económicas. En este tipo de procesos, las variaciones de corta duración

producen el mismo efecto perjudicial que las perturbaciones de larga duración.

Las interrupciones de tensión, incluso las instantáneas, pueden producir el mal funcionamiento o la desconexión de equipos electrónicos o de los equipos de iluminación. Las interrupciones momentáneas o temporales producen casi siempre la parada de los controladores electrónicos, el mal funcionamiento de las fuentes de alimentación, computadores, equipos de control de máquinas eléctricas y pueden producir la desconexión de contactores en motores de inducción.

Las caídas de tensión por su parte, producen numerosas fallas en los equipos conectados a la red, dependiendo de la magnitud y duración de éstos y de la sensibilidad de los equipos a las variaciones de la tensión. Equipos como transformadores de potencia, transformadores de medida y cables, no se ven afectados en su funcionamiento por las caídas de tensión de corta duración. Pero equipos como motores de inducción pueden sufrir un ligero cambio de velocidad. Los bancos de condensadores por ejemplo, pueden disminuir ligeramente su capacidad de entregar energía reactiva al sistema durante la caída de tensión y algunos dispositivos de iluminación pueden experimentar una ligera disminución de la luminosidad.

En cuanto a las sobretensiones temporales, los aumentos de la tensión por encima de la tensión nominal de los equipos pueden producir la falla de sus componentes, dependiendo de la magnitud de la tensión y de la frecuencia con la que esta se produzca. Equipos electrónicos como controladores de velocidad, computadores y controladores electrónicos, pueden funcionar en modo de fallo de forma inmediata. Otros equipos, como transformadores de potencia, transformadores de medida, cables y máquinas eléctricas rotatorias, pueden experimentar una reducción importante en su tiempo de vida útil. Los aumentos temporales de tensión pueden producir funcionamientos inesperados en algunos relés de protección y, en cambio, no afectar en su funcionamiento a otros. Los dispositivos de protección contra sobretensiones, como varistores o diodos de avalancha, se pueden destruir por sobretensiones que excedan su capacidad máxima.

### 3. CURVAS DE TOLERANCIA DE EQUIPOS FRENTE A LAS VARIACIONES DE TENSIÓN

La susceptibilidad de los equipos sensibles anteriormente mencionados, se ha presentado históricamente mediante las llamadas curvas de tolerancia, las cuales relacionando las variables tensión y duración, pretenden señalar el umbral para el adecuado funcionamiento de un equipo. Estas curvas establecen durante cuánto tiempo puede funcionar un equipo a determinado nivel de tensión, sin que se presente mal funcionamiento. Ejemplos de estas curvas son la presentada por la Asociación de Manufactureros de Equipos de Computación de Negocios (CBEMA), y su posterior versión revisada y adoptada por el Concejo de Información Tecnológica de la Industria (ITIC). Una evaluación y comparación de estas curvas de tolerancia, con la que lleva a la sorprendente conclusión, de que la mayoría de los equipos susceptibles, tienen una respuesta a las fluctuaciones de tensión muy similar a la que tiene el ser humano a las mismas a través del flicker, de hecho el ser humano es, al parecer, el equipo más sensible del sistema.

#### 3.1. Curva de tolerancia CBEMA

La primera curva de tolerancia, conocida como la curva CBEMA (ITIC (CBEMA), 2005), fue introducida por la Computer Business Equipment Manufacturers Association, (ver Fig. 1), se puede emplear para evaluar la calidad de la tensión de suministro en relación a las interrupciones, caídas y bajadas de tensión y las sobretensiones. Ésta curva se aplicó inicialmente como una guía para ayudar a los miembros de la CBEMA a diseñar las fuentes de alimentación de sus computadores y equipos electrónicos (IEEE STD, 1346-1998).

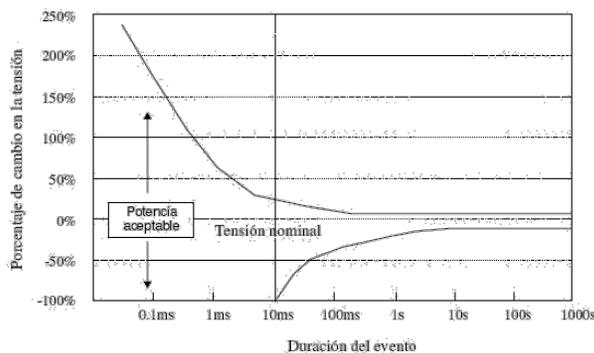


Fig. 1. Curva de Tolerancia CBEMA.

La curva CBEMA se construyó a partir de datos experimentales y de datos históricos obtenidos de grandes computadores. Estudios posteriores sobre la Calidad de la Potencia Eléctrica pusieron de manifiesto que había un gran número de eventos en la tensión de alimentación (caídas de tensión fundamentalmente) que no estaban incluidos dentro de la zona aceptable definida por la curva CBEMA (J.A. Oliver, 2002; D.S. Dorr, 1997). Esto llevó a una revisión de la curva CBEMA que incluyó unos requerimientos más estrictos para definir la zona de aceptabilidad. Esta curva CBEMA revisada ha sido adoptada por el Information Technology Industry Council (ITIC), se conoce como la curva ITIC (ITIC (CBEMA), 2005).

#### 3.2. Curva de Tolerancia ITIC

La curva ITIC describe la envolvente (el rango) de la tensión de suministro de corriente alterna que normalmente pueden tolerar, es decir, que no interrumpen su funcionamiento, una mayoría de equipos electrónicos denominados como equipos de la tecnología de la información. La curva se representa en la Fig. 2.

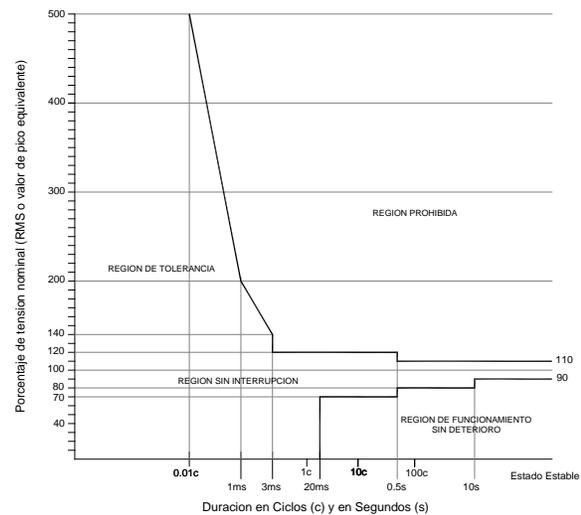


Fig. 2. Curva de Tolerancia ITIC.

La curva es aplicable solamente para tensiones monofásicas de 120 voltios nominales de valor eficaz y 60 Hz, obtenidos de sistemas de 208Y/120 V y 120/240V, y no está definida para servir como especificación en el diseño de equipos o de sistemas de distribución de corriente alterna. La curva define tanto condiciones

estacionarias como transitorias y su utilización para otras tensiones nominales y para otras frecuencias no está específicamente considerada. Fuera de esta región de tolerancia se definen dos regiones desfavorables. La región de funcionamiento sin deterioro, incluye caídas e interrupciones de tensión y que aplican tensiones inferiores al límite mínimo de la tolerancia en el estado estacionario. En esta región no se espera que los equipos funcionen correctamente, pero, en cambio, no es de esperar ningún daño sobre ellos. En la región restante, denominada región prohibida, incluye sobretensiones que superan el límite superior de la curva y es una región a evitar, ya que si se somete a los equipos a tensiones con estas condiciones se puede esperar que se produzca su avería.

Aunque la curva ITIC (CBEMA) se ha definido para equipos de las denominadas tecnologías de la comunicación, también se emplea como un estándar en otros tipos de equipos.

La [Tabla 1](#), tomada del estándar IEEE Std. 1346-1998 ([J.A. Oliver, 2002](#)), da rangos de tolerancia de los equipos que se encuentran comúnmente en una planta industrial.

Tabla 1. Rangos de tolerancia de algunos equipos según IEEE Std. 1346-1998.

Equipo	Tolerancia a las variaciones de tensión		
	Rango superior	Promedio	Rango inferior
PLC	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
Tarjeta de entradas de un PLC	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Controlador motor AC de 5 C.V	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
Relé de control de alterna	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Arrancador de un motor	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
Computador personal	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

#### 4. MÉTODO PARA DEDUCIR DE FORMA TEÓRICA LAS CURVAS DE ACEPTABILIDAD PARA DISTINTOS TIPOS DE CARGAS

La mejor interpretación científica de la curva CBEMA se ha dado en términos de la tensión estándar aplicada a la barra de CD de una carga rectificadora. Se entiende como tensión estándar, a la mínima tensión de CD aceptada en la salida de un rectificador, por debajo de la cual se interrumpe el funcionamiento de la carga.

([J.Kyei, 2003](#)). La [Fig. 3](#) representa esta situación.

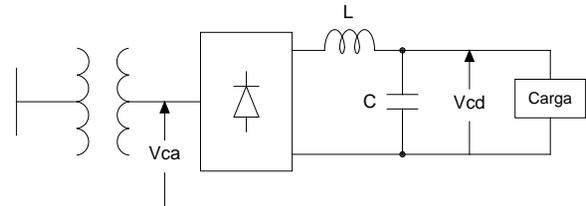


Fig. 3. Carga rectificadora.

Si se toma una carga RLC y se somete el rectificador a una condición de falla en la tensión de suministro de ca, la tensión de salida de cd versus la duración de esta falla, se representa en la [Fig. 4](#).

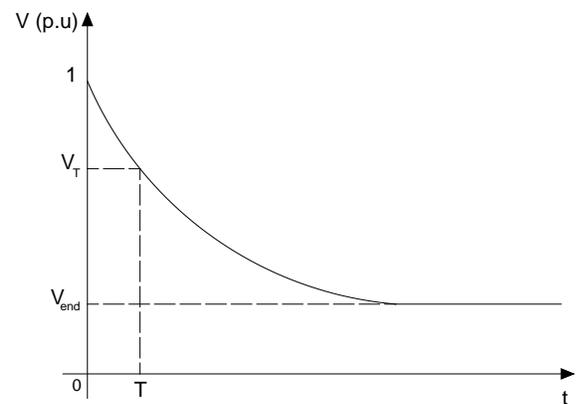


Fig. 4. Tensión  $V_{cd}(t)$  bajo condición de falla en  $(t=0)$  para un puente rectificador monofásico.

La ecuación que define esta tensión de salida de cd, se puede representar como una función exponencial doble de la forma:

$$V_{CD}(t) = V_{end} + Ae^{-at} + Be^{-bt} \quad (1)$$

El parámetro  $V_{end}$ , es la tensión final a la salida del rectificador cuando  $t \rightarrow \infty$  y es simplemente, la profundidad de la caída de tensión de suministro de ca, en  $t=0$ .

Realizando algunos procedimientos matemáticos básicos, se llega a la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{V_T + A(e^{-aT} - e^{-bT}) - 1}{1 - e^{-bT}} \quad (2)$$

El valor  $\Delta V$  se define entonces, como la tensión de cd mínima que la carga RLC puede tolerar

bajo condiciones de falla en la tensión de suministro de ca; es decir, es la tensión de cd mínima que puede tolerar la carga sin presentar interrupciones en su funcionamiento.

Los parámetros A y B, son las constantes de tiempo del filtro RLC.

Encontrando el parámetro A, se obtiene:

$$\Delta V = \frac{V_T + \frac{e^{-bT_x} - V_T}{e^{-bT_x} - e^{-aT_x}}(e^{-bT} - e^{-aT}) - 1}{1 - e^{-bT_x}} \quad (3)$$

La ecuación (3) representa la curva de aceptabilidad para una carga rectificadora RLC, dada una tensión estándar  $V_T$  y dos constantes de tiempo a y b.

#### 4.1. Índice de Aceptabilidad

Las curvas de aceptabilidad gráficamente representan la calidad de la potencia, pero no definen un índice que pueda ser utilizado para asegurar la aceptabilidad o no. La Fig. 5 representa este caso (J.Kyei, 2003).

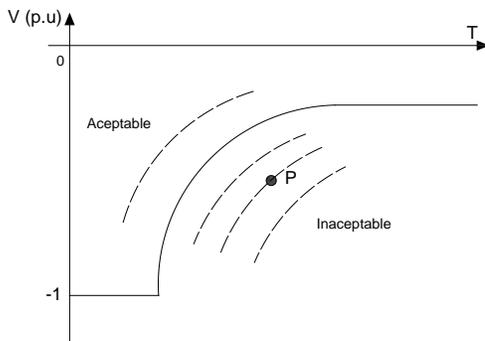


Fig. 5. Interpretación gráfica del índice de aceptabilidad para un evento P.

En la Fig. 5 se supone un evento P para ser analizado en la curva de aceptabilidad. Si se varía la tensión estándar  $V_T$  hasta alcanzar el punto P, donde  $V_T = V_{Tp}$ , y se reemplaza en la ecuación (2), se obtiene:

$$V_{Tp} = 1 + \Delta V(1 - e^{-bT_p}) + A(e^{-aT_p} - e^{-bT_p}) \quad (4)$$

Considérese el índice  $V_{Tp} / V_T$ . Si  $V_{Tp} / V_T \geq 1$ , el punto P representa un evento aceptable. Por lo tanto, el índice máximo de  $V_{Tp} / V_T$  será  $1 / V_T$ .

En la Fig. 6, se representa el índice de aceptabilidad.

$$I_{pa} = \frac{V_{Tp}}{V_T} \quad (5)$$

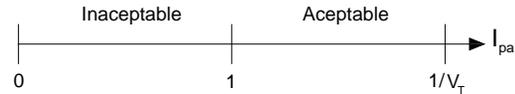


Fig. 6. Índice de aceptabilidad  $I_{pa}$ .

Si se utilizara entonces, la ecuación (4) para  $T = T_x$ , se obtendría una ecuación general para este índice:

$$I_{pa} = 1 + \Delta V_p(1 - e^{-bT_x}) + \frac{e^{-bT_x} - V_T}{e^{-bT_x} - e^{-aT_x}}(e^{-aT_p} - e^{-bT_p}) - 1 \quad (6)$$

Este es el índice de aceptabilidad para el evento P.

Se puede concluir entonces que las curvas de aceptabilidad pueden ser diseñadas para detectar complicaciones en la fuente de distribución y a partir de una tensión estándar. Si la carga es una carga rectificadora, la tensión estándar es la tensión de cd mínima permitida a la salida del rectificador. El proceso general de diseño de una curva de aceptabilidad, requiere además del conocimiento del modelo dinámico de la carga.

## 5. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE EVENTOS DE LA TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN

Los métodos más comúnmente utilizados en la detección y clasificación de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica son: el r.m.s., el análisis de Fourier, el filtro Kalman y la Transformada de Wavelet.

### 5.1. Valor eficaz RMS

Aunque el método r.m.s. no es una técnica de procesamiento de señal propiamente dicha, es la herramienta más utilizada debido a que proporciona una buena aproximación a la forma en la que varía la tensión durante el evento y es un algoritmo simple y rápido que requiere poca memoria. Es un método muy utilizado en

sistemas de potencia para analizar señales de tensión y corriente. Normalmente se define para señales periódicas, aunque también puede utilizarse para obtener información de señales no periódicas. Los instrumentos digitales de medida realizan el cálculo de esta cantidad a partir de las muestras de los valores instantáneos, eligiendo una ventana temporal en función de la periodicidad de la señal en estado estacionario. Si la señal cambia de un estado a otro, los valores r.m.s. variarán con el tiempo en esa transición. El tamaño de la ventana puede variar desde un mínimo de 1/2 ciclo de la frecuencia de red hasta cualquier múltiplo de 1/2 ciclo, aunque las más comunes son de 1/2 ciclo y 1 ciclo.

En caso de producirse una variación repentina en la magnitud de la tensión de alimentación, esta no se detectará de forma inmediata utilizando el cálculo del valor eficaz, ya que se necesita que el nuevo valor de la tensión después del cambio esté comprendido completamente dentro de la ventana de muestreo para que el valor r.m.s. proporcione su magnitud correcta. Mientras esta situación no se produzca, el valor r.m.s. calculado tendrá una magnitud comprendida entre la magnitud de la tensión antes del cambio y el nuevo valor después de la variación.

De esta forma, dependiendo de la longitud de la ventana de muestreo, del intervalo de actualización de los valores y del punto de la onda en el que comience el evento, se pueden obtener resultados muy diferentes de la magnitud y de la duración del evento.

### *5.2. La Transformada Discreta de Fourier*

El método estándar para el análisis espectral es la Transformada Discreta de Fourier (DFT), normalmente implementada utilizando el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La FFT es un algoritmo que computa de manera eficiente la DFT de una secuencia. Aprovecha la naturaleza periódica de las funciones base de Fourier para reducir considerablemente el número de operaciones necesarias para el cálculo de la DFT. La FFT es efectiva para secuencias de longitud potencia de 2. Para una secuencia de longitud N, el número de operaciones de la DFT es de  $N^2$  y el de la FFT es de  $N \log_2 N$ .

La Transformada Discreta de Fourier permite conocer el contenido frecuencial de una señal, es por ello que es un método adecuado para el análisis de señales estacionarias. Si la señal no es estacionaria, se necesita conocer la información temporal y frecuencial simultáneamente, lo que significa disponer de una representación tiempo-frecuencia de la señal.

Para resolver este problema, se introdujo la Short-Time Fourier Transform (STFT).

La STFT es una versión modificada de la Transformada Discreta de Fourier, en la que la señal no estacionaria es dividida en pequeños trozos en los que se supone que la señal es estacionaria. Esto se realiza utilizando una función ventana de una determinada anchura, que va siendo desplazada y multiplicada con la señal. La Transformada de Fourier se aplica a cada trozo obteniéndose una distribución tiempo-frecuencia de la señal, la cual representa la evolución del espectro de la señal a lo largo del tiempo.

### *5.3. El Método del Filtro de Kalman*

El filtro de Kalman, KF, es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporcionan un método eficiente para estimar on-line el estado de un proceso, minimizando además el error medio y cuadrático. El filtro de Kalman proporciona el filtrado máximo posible del ruido, respondiendo de forma óptima a los cambios en el estado del sistema. Ha sido diseñado para estimar el estado en un sistema lineal, dinámico y discreto en el tiempo, basándose en observaciones ruidosas y en un modelado del sistema. El filtro es muy potente en varios aspectos: proporciona estimaciones del pasado, presente y futuro, e incluso puedo hacerlo aunque no se conozca la naturaleza precisa del sistema modelado.

### *5.4. Método de la Transformada de Wavelet (TW)*

Éste es el método empleado en el presente trabajo para el análisis de la tensión de suministro ante la conmutación de un banco de condensadores.

Al contrario que la STFT, la Transformada Wavelet (TW) analiza la señal a diferentes frecuencias con diferentes resoluciones, es decir,

cada componente espectral no es analizada con la misma resolución. La TW utiliza ventanas estrechas en frecuencias altas y ventanas anchas en bajas frecuencias.

El resultado es un análisis multirresolución, en el cual la señal se analiza con diferentes resoluciones a diferentes frecuencias. De esta forma la resolución temporal y la resolución frecuencial varían en el plano tiempo-frecuencia sin violar el Principio de Incertidumbre de Heisenberg. En la Transformada Wavelet, cuando la frecuencia aumenta, la resolución temporal disminuye y cuando la frecuencia disminuye, la resolución temporal aumenta.

Debido a que la TW incluye información relacionada con el tiempo y la frecuencia, la representación gráfica de esta transformada se realiza en un plano denominado plano tiempo-frecuencia, como se muestra en la [Fig. 7](#).

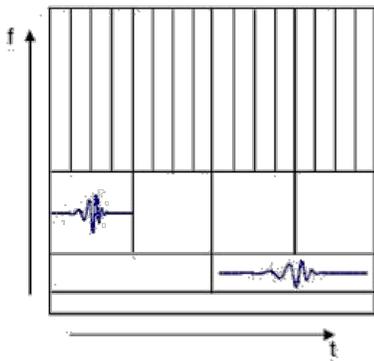


Fig. 7. Segmentación del plano tiempo-frecuencia con WT .

Cada celda en la Fig. 7 representa una porción igual del plano tiempo-frecuencia, pero dando diferentes proporciones al tiempo y a la frecuencia, aunque el área sea constante. A baja frecuencia, la altura del rectángulo es menor (lo que implica una mejor resolución frecuencia) pero la anchura es grande (lo que se corresponde con una pobre resolución temporal). A alta frecuencia la anchura del rectángulo decrece y la altura aumenta, i.e., la resolución frecuencial es menor y la resolución temporal es mayor. De esta forma se obtiene una resolución ‘fina’ en frecuencia y ‘gruesa’ en tiempo para señales de baja frecuencia y una resolución ‘fina’ en tiempo y ‘gruesa’ resolución en frecuencia para señales de alta frecuencia.

El análisis wavelet permite desvelar aspectos de una señal que las otras técnicas de análisis no revelan. Es un análisis apropiado para conocer tendencias, puntos de ruptura, discontinuidades, etc. de una señal. Debido a estas ventajas de la Transformada Wavelet en el análisis y procesado de señales no estacionarias, sus aplicaciones se han incrementado considerablemente en los últimos años a campos como el procesado de voz, procesado de imagen, compresión de datos, comunicaciones, procesado de señales sísmicas o geológicas, procesado de señales médicas etc.

En los sistemas de potencia, las señales pueden presentar variaciones temporales de frecuencia, caídas de tensión, sobretensiones, interrupciones, etc., y es por ello que la Transformada Wavelet es una herramienta muy apropiada para detectar los eventos que puedan producirse en dichas señales. De hecho, su utilización ha ido incrementándose progresivamente en los últimos años.

Las wavelets son apropiadas para el estudio de señales no periódicas que contengan impulsos de corta duración; es por este motivo que permiten la detección muy rápida de eventos en las formas de onda de tensión y de corriente.

La TW tiene una versión análoga, *Transformada de Wavelet Continua (CWT)* y una versión digital, *Transformada de Wavelet Discreta (DWT)*. La diferencia entre ellas radica en la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados. Sin embargo, la DWT es más empleada ya que permite hacer un análisis Multirresolución (MRA) de la señal de estudio.

### 5.5. La Transformada Wavelet Continua (CWT)

La Transformada Wavelet Continua CWT se define mediante la siguiente ecuación:

$$X_{WT}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi_{a,b}(t)dt \quad (7)$$

Donde  $\Psi_{a,b}$  es la wavelet madre o función básica.

$$\Psi_{a,b} = a^{-1/2}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (8)$$

La función  $\Psi$ , “wavelet madre”, es una función ventana de longitud finita corta y de naturaleza oscilatoria, lo que significa que su promedio es cero y decae rápidamente en ambos extremos. Esto asegura que la integral es finita, y da el nombre *wavelet* o *pequeña onda* a la transformada

La Transformada Wavelet Continua CWT proporciona una medida de la correlación o similitud entre la wavelet a diferentes escalas y la señal (con la escala, o frecuencia, como medida de similaridad entre ambas). La CWT se calcula cambiando la escala de la ventana de análisis, desplazándola en el tiempo, multiplicándola por la señal e integrando en el tiempo. Puesto que la transformación se consigue dilatando y trasladando la wavelet madre en forma continua, se genera información redundante (ver Fig. 8).

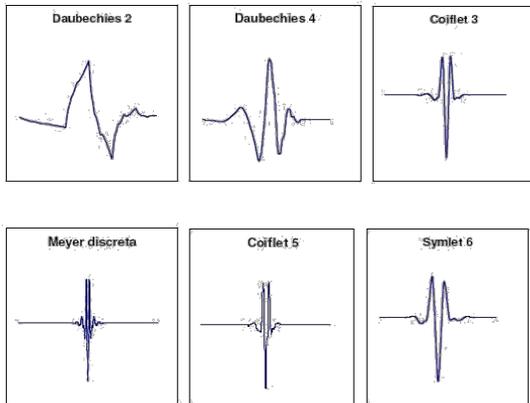


Fig. 8. Selección de algunas de las wavelets madre más utilizadas.

### 5.6. La Transformada Wavelet Discreta (TDW)

La DWT es una versión muestreada de la CWT, y en su cálculo se reducen significativamente el tiempo y los recursos empleados por la CWT, además es sencilla de implementar y proporciona suficiente información para el análisis y síntesis de una señal. Su ecuación es:

$$DWT_{\psi} X[m,n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] \Psi \left[ \frac{n - ka_0^m}{a_0^m} \right] \quad a = a_0^m \quad b = ka_0^m \quad (9)$$

Donde  $\Psi$  es la wavelet madre,  $x$  es la señal a analizar y  $a$  y  $b$  son los parámetros de escalado y translación.

Seleccionando  $a$  y  $b$  adecuadamente la familia de wavelets constituye una base ortonormal de  $L^2(R)$  y con ello se consigue información no redundante y salida única.

## 6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DESARROLLADA

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario mediante el software MATLAB 7.0. y con la utilización de la *Wavelet Toolbox*. El objetivo del programa es analizar transitorios de conmutación y ubicarlos en la curva de tolerancia ITIC.

Los datos de entrada del programa son: tiempo de muestreo de la señal, tensión fase-neutro del sistema, número del transitorio que se desea analizar, wavelet madre y nivel de descomposición. Los datos de salida son: cantidad de transitorios presentes en la señal, tiempo de ocurrencia y pico de tensión correspondiente, detalles de alta frecuencia por nivel de descomposición y ubicación en la curva de tolerancia ITIC.

La señal empleada para el análisis fue tomada por un analizador de redes clase A. El tiempo de muestreo de la señal es 111 micro segundos y la tensión línea-neutro es 177 Voltios. La interfaz grafica de usuario se puede observar en la Fig. 9.

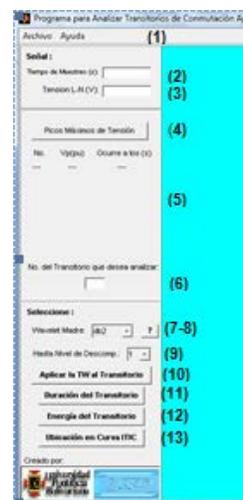


Fig. 9. Interfaz gráfica de usuario.

(1) Barra de menú.

- (2) Entrada del tiempo de muestreo. En segundos.
- (3) Entrada de la tensión línea-neutro del sistema. En voltios.
- (4) Botón Picos Máximos de Tensión. Detecta los transitorios presentes en la señal cargada.
- (5) Tabla de Datos. Muestra el valor de la tensión pico y el instante de tiempo de ocurrencia de cada transitorio detectado.
- (6) Entrada del número del transitorio que el usuario desea analizar.
- (7) Selección de la wavelet madre.
- (8) Botón "?". Permite visualizar la forma de onda de wavelets madre.
- (9) Selección del nivel de descomposición.
- (10) Botón Aplicar la Transformada de Wavelet.
- (11) Botón Duración del Transitorio.
- (12) Botón Energía del Transitorio.
- (13) Botón Ubicación en la curva ITIC.

### 6.1. Resultados

Los transitorios son generados por la conmutación de un banco de condensadores de 1.5 kvar. La [Fig. 10](#) muestra el montaje del sistema.

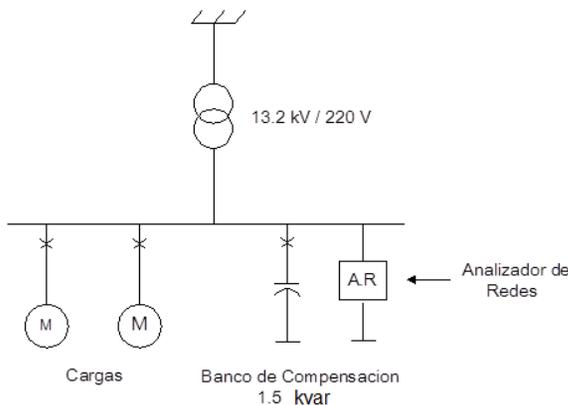


Fig. 10. Medida del transitorio ante la conmutación del banco de condensadores.

Los datos iniciales (de entrada) son los siguientes:

- Tiempo de Muestreo = 111  $\mu$ s

- Tensión (L-N, pico) = 177 V
- La forma de onda de la señal de tensión (Trans1), es la siguiente:

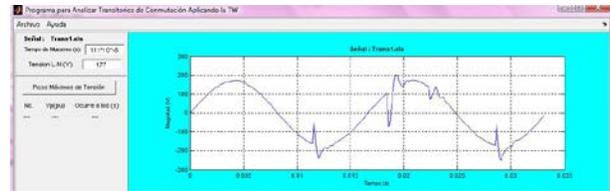


Fig. 11. Forma de onda de la señal de tensión.

Mediante el botón “Picos Máximos de Tensión”, se detectan los siguientes transitorios y se ilustran en la [Fig. 12](#).

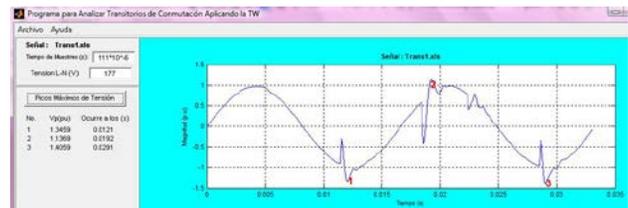


Fig. 12. Transitorios presentes en la señal de tensión (p.u).

En la [Tabla 2](#) se aprecian con un mejor detalle la magnitud y duración de los transitorios registrados.

Tabla 2. Magnitud y tiempo de ocurrencia de los transitorios registrados.

Transitorio No.	Vpico (pu)	Tiempo de ocurrencia (s)
1	1.3459	0.0121
2	1.1369	0.0192
3	1.4059	0.0291

De los tres transitorios encontrados, se selecciona el número dos para el análisis. Los dos restantes pueden ser analizados de igual manera cambiando en la entrada “No. del transitorio que desea analizar”, el número correspondiente en la tabla anterior.

En ([S. Chen, 2007](#)) consideran que las funciones wavelet Daubechies se comportan adecuadamente en la detección de la mayoría de los tipos de perturbaciones y la dB4 es la wavelet madre más utilizada para aplicaciones sobre calidad de la potencia eléctrica. Acerca del nivel de

descomposición, consideran que la selección es arbitraria y que algunas veces, se realiza de acuerdo a la frecuencia central de la wavelet madre utilizada. La Fig. 13 ilustra el valor de frecuencia por nivel de descomposición.

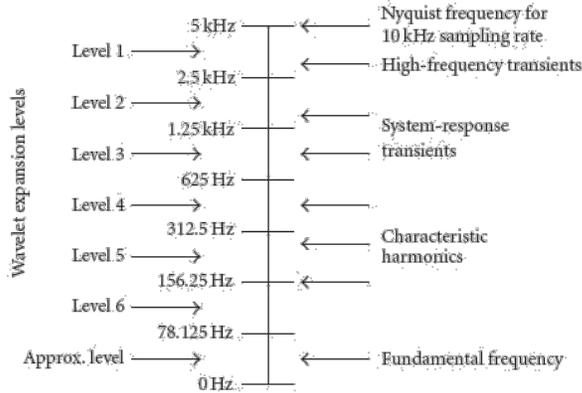


Fig. 13. Frecuencia asociada a cada nivel de descomposición.

Por lo anterior, se selecciona la wavelet madre 'db4' y el nivel de descomposición 3 para el análisis del transitorio dos de la señal de tensión.

Se aplica la transformada de wavelet al transitorio por medio del botón "Aplicar la TW al transitorio" y con los botones siguientes, se obtiene su duración, frecuencia y aportes de energía correspondientes a cada nivel de descomposición. La Fig. 14 ilustra las formas de onda y los resultados se resumen en la Tabla 3.

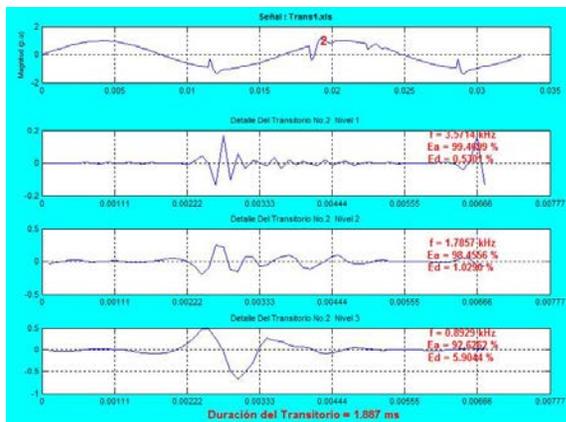


Fig. 14. Aplicación de la transformada de wavelet al transitorio dos de la señal de tensión.

**Resultados para el transitorio dos:**

Wavelet Madre: 'db4'

Nivel de descomposición: 3

Duración del transitorio: 1.887 ms

Tensión pico (pu): 1.1369 V

Ocurre a los: 0.0192 s

Tabla 3. Resultados del análisis del transitorio dos de la señal de tensión.

Nivel de descomposición No.	Frecuencia Asociada	Aporte de Energía (Ed)	Aporte de Energía (Ea) @ 60 Hz
1	3.5714 kHz	0.5301%	99.4699 %
2	1.7857 kHz	1.0290 %	98.4556 %
3	0.8929 kHz	5.9044 %	92.6262 %

El análisis multirresolución de la DWT descompone el transitorio en dos bandas frecuenciales, baja y alta frecuencia. Cada banda frecuencial se puede interpretar como una distribución desigual de energía. El transitorio dos tiene una componente de alta frecuencia de 3.5 kHz que aporta un 0.5% de energía y un 99.46% en la componente de 60 Hz.

Por medio del botón "Ubicación en curva ITIC" se puede visualizar la ubicación de los tres transitorios en la curva de tolerancia, además permite conocer la duración y magnitud de cada uno de ellos (ver Fig. 15).

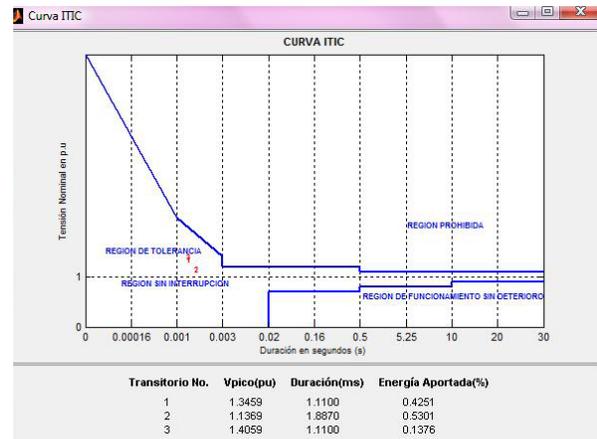


Fig. 15. Ubicación de los transitorios en la curva de tolerancia ITIC.

Los tres transitorios se ubican en la región de tolerancia de la curva ITIC.

## 6.2. Análisis de Resultados

En la señal de tensión registrada, se detectan tres transitorios con magnitudes pico que superan los 1.1 en p.u.

El transitorio dos tiene las siguientes características:

- Tiene un tiempo de duración de 1.88 ms y un pico de tensión de 1.369 voltios en p.u.
- Presenta una componente de alta frecuencia de 3.5714 kHz y una componente fundamental de 892.9 Hz.
- Entrega el 0.5301 % de energía en alta frecuencia y a 60 Hz, entrega el 99.46 % de energía.
- Presenta mayor energía distribuida a medida que disminuye la frecuencia o el nivel de descomposición. En cuanto al aporte energético en la componente de baja tensión (@ 60 Hz), este disminuye a medida que se acerca a la componente fundamental del sistema.

La ubicación de los tres transitorios en la curva ITIC, revela que no generan ningún daño a los equipos aledaños a la barra de 220V y tampoco, generan interrupciones en su funcionamiento.

Los resultados de la aplicación de la transformada de wavelet dependen de la wavelet madre seleccionada. Por este motivo, se realizó el análisis para el transitorio número dos pero con diferentes wavelets madre. El objetivo es, identificar cuál de ellas se ajusta mejor para analizar transitorios debidos a conmutación de bancos de condensadores. La [Tabla 4](#) recoge los datos obtenidos.

Tabla 4. Duración del transitorio dos utilizando diferentes wavelets madre para el análisis.

Wavelet Madre	Duración del transitorio dos (ms)
db3	2.22
db4	1.887
db5	2.22
db6	2.109
db7	1.665
bior1.3	1.11
bior1.5	1.12
bior2.2	1.332
bior2.4	1.221
bior3.1	1.998
bior3.3	1.887
bior4.4	1.22
coif1	1.332
coif2	2.22
coif3	1.221
coif4	1.221
sym3	2.22
sym4	2.22
haar	1.1

De acuerdo a lo anterior, las wavelets madre que permiten hallar un valor cercano a 1.71 ms, son la db4, db7 y la bior3.3 con tiempos de 1.887, 1.665 y 1.887 respectivamente. El porcentaje de error del cálculo es entonces:

$$%E = \frac{1.887 - 1.71}{1.887} * 100 = 9.37\%$$

$$%E = \frac{1.71 - 1.665}{1.71} * 100 = 2.66\%$$

Por lo anterior, se puede concluir que la wavelet madre más adecuada para el análisis de los transitorios de conmutación según la forma de onda del transitorio analizado es la wavelet madre db7. Sin embargo siguen siendo la familia de las daubechies, las más adecuadas para el análisis de Calidad de la Potencia Eléctrica ([A.C. Parsons, 1999](#)).

## 7. CONCLUSIONES

La aplicación de la Transformada de Wavelet resulta en un algoritmo simple y muy eficiente a la hora de detección de eventos en la CPE. Permite la ubicación rápida y precisa de eventos en el tiempo y su correspondiente magnitud.

El empleo de las wavelets permite evaluar los eventos en la tensión de alimentación en el espacio tiempo – frecuencia. Esta técnica descompone la señal en diferentes sub-bandas de frecuencia y estudia separadamente sus características. Las wavelets son apropiadas para el estudio de señales no periódicas que contengan impulsos de corta duración; es por este motivo que permiten la detección muy rápida de eventos en las formas de onda de la tensión y de la corriente. Es el método más rápido para detectar eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica.

La detección de transitorios mediante el análisis con TW es un método que depende de la función wavelet madre utilizada, siendo necesario escoger la más adecuada para el tipo de evento que se quiere analizar. Con este fin, se han realizado distintos estudios que demuestran que no existe una conformidad clara en cuanto a la función wavelet más adecuada en función del tipo de perturbación, aunque como norma general las funciones wavelet con menor número de coeficientes son las más adecuadas para el procesamiento de transitorios rápidos, mientras que transitorios lentos se detectan mejor empleando funciones wavelet con mayor número de coeficientes.

La Transformada de Wavelet, se convierte en una herramienta poderosa, tanto para la detección de singularidades en señales y como filtro para extraer bien sean las componentes de alta frecuencia o la componente a frecuencia fundamental.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen las contribuciones realizadas por todos los miembros del Grupo TyD y el constante apoyo de la estudiante de Ingeniería Eléctrica de la UPB Manuela Gómez.

## REFERENCIAS

A.C. Parsons, W.M. Grady, E.J. Powers, “A wavelet-based procedure for automatically determining the beginning and end of transmission system voltage sags”, Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, January-February 1999, pp. 1310 – 1315.

D.S. Dorr, M.B. Hughes, T.M. Gruz, R.E. Jurewicz, J.L. McClaine, “Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No.6, Nov.-Dec. 1997, pp. 1480 – 1487.

IEEE STD 1346-1998. IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power Compatibility with Electronic Process Equipment. New York: IEEE, 1998.

ITIC (CBEMA) Curve Application Note, Information Technology Industry Council (ITIC). Washington: CBEMA, 2005.

J.A. Oliver, R. Lawrence, B.B. Banerjee, “Power Quality: How to Specify Power Quality Tolerance Process Equipment”, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, No. 5, Septiembre/October 2002, pp. 21 - 30.

J. Kyei, R. Ayyanar, G. Heydt, R. Thallam, J. Blevins. The Design of Power Acceptability Curves, IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 828-833, vol. 17, no.3, Jul. 2003.

S. Chen, H. Y. Zhu, “Wavelet Transform for Processing Power Quality Disturbances”, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2007, article ID 47695, 20 pp.

S. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No.7, pp. 674-693, July 1989.

The MathWorks, “Wavelet Toolbox”. [Online]. Disponible:  
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet>.

## SOBRE LOS AUTORES

### **Gabriel J. López**

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. [gabriel.lopez@upb.edu.co](mailto:gabriel.lopez@upb.edu.co)

### **Diana P. Jiménez**

Ingeniera Eléctrica y Electrónica de la UPB. Actualmente se encuentra en primer año de Maestría. [dpjmarin@live.com](mailto:dpjmarin@live.com)

### **Jorge W. González**

Ingeniero Electricista, PhD. Es profesor de tiempo completo de UPB y miembro del Grupo TyD de la misma universidad. [jorgew.gonzalez@upb.edu.co](mailto:jorgew.gonzalez@upb.edu.co)

### **Andres E. Díez**

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. [andresediez@yahoo.com](mailto:andresediez@yahoo.com)

### **Idi A. Isaac**

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. [idi.isaac@upb.edu.co](mailto:idi.isaac@upb.edu.co)

### **Hugo A. Cardona**

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. [hugo.cardona@upb.edu.co](mailto:hugo.cardona@upb.edu.co)