

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

Aplicación de la transformada ondita en estudios de calidad eléctrica

Guillermo R. Cocha^(1,2), Osvaldo Pascual^(1,2), Omar Rodríguez⁽²⁾, José Rapallini⁽²⁾, Carlos Bustos⁽¹⁾

Grupo de Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos TSSE

Dto. Electrotecnia, UTN, FRLP

CODAPLI UTN, FRLP

Avda. 60 y 124 S/N,

Ciudad de Berisso, Pcia. Buenos Aires, Argentina

Tel: +54-221-412-4393, gcocha@frlp.utn.edu.ar

Resumen – La transformada ondita (TO) se puede usar en el análisis de señales no periódicas, originadas en perturbaciones tales como sobretensiones, huecos, cambios de frecuencia, cortes, flicker, etc. En mediciones de la potencia, energía y valores eficaces de tensión y corriente, la TO presenta la ventaja de proporcionar una distribución de la potencia y energía con respecto a las bandas individuales de frecuencia asociadas a cada nivel del análisis ondita. A diferencia de la Transformada de Fourier con Ventana que mapea la señal en una representación de tiempo-escala fija, la banda de análisis de la TO puede ser ajustada de modo que se pueden detectar con precisión las componentes de alta y baja frecuencia preservando la información temporal de las señales analizadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas angostas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas. En este trabajo se presenta el uso de la TO para la medición de calidad de energía eléctrica en régimen estacionario o transitorio en un ambiente con perturbaciones eléctricas espurias y se lo compara con los resultados obtenidos con la transformada de Fourier.

TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019 OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía en las redes de distribución es un factor crítico frente al incremento de la electrónica de potencia y el empleo cada vez más frecuente de equipos controlados por procesadores inteligentes.

El análisis de las tensiones y o las formas de onda de la corriente ofrecen descripciones cuantitativas de la calidad de la energía, por ejemplo, los componentes armónicos dominantes y sus magnitudes asociadas, los puntos donde comienzan y terminan las perturbaciones y el bloque de datos donde diferentes fallas del sistema llevaron a las perturbaciones. Existen diferentes métodos de procesamiento de señales para el análisis de estos fenómenos. Los métodos más utilizados en la detección y clasificación de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica son el análisis r.m.s., el análisis de Fourier, el filtro de Kalman y la transformada wavelet que en castellano se denomina transformada ondita.

La transformada ondita ha demostrado ser una poderosa herramienta de procesamiento de señales en áreas tales como compresión de datos, eliminación de ruido, reconstrucción de imágenes de alta resolución y voz de alta calidad. En el área de sistemas de energía, también ha tenido éxito en la identificación de varias categorías de alteraciones del sistema eléctrico. La transformada ondita puede ser poco atractiva para el análisis armónico pero muy atractivo para encontrar transiciones en el tiempo. En este trabajo se presentan algunos de los conceptos básicos de la Transformada Ondita (TO) y se evalúa su aplicabilidad en el desarrollo de nuevos sistemas de medición de la calidad eléctrica.

Una función ondita es una señal oscilatoria de corta duración cuya energía es finita, concentrada en un determinado intervalo de tiempo, que sirve como herramienta para el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios y variantes en el tiempo. La transformada ondita reemplaza a la transformada sinusoidal de Fourier por medio de una familia generada por traslaciones dilataciones de una ventana llamada ondita.

El desarrollo de la teoría de la Transformada Ondita (TO) comenzó en 1984 cuando se publicó el trabajo de Goupillaud et. al. (Goupillaud, Grossmann, and Morlet 1984)

donde se lo presentaba como una alternativa al clásico análisis de Fourier por ventanas o localizado. Se puede decir que la teoría de TO surgió como respuesta a un problema de procesamiento de señales con ideas ya existentes en el contexto de la matemática pura (Serrano n.d.).

Usualmente representamos una señal física mediante una función del tiempo $f(t)$ o, alternativamente, en el dominio de la frecuencia por su Transformada de Fourier $F(\omega)$.

Las dos formas contienen exactamente la misma información sobre la señal, respondiendo a enfoques distintos y complementarios. Asumiendo que la señal es aperiódica y de energía finita, estas representaciones se relacionan mediante el par de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-j\omega t} d\omega \quad (2)$$

Donde t representa el tiempo y ω la frecuencia angular. Estas dos ecuaciones nos dicen que, en teoría, la información contenida en uno de los dominios puede recuperarse a partir de la información contenida en el otro. Nos dice también que un proceso temporal puede considerarse como la superposición integral de una colección de ondas de frecuencia definida que oscilan, cada una de ellas con amplitud constante.

Estas ondas, al interferirse entre sí conforman los distintos fenómenos y estructuras, localizadas en el tiempo.

Al procesar señales, es común encontrar fenómenos oscilantes, de frecuencia cuasi constante, localizados en el tiempo. También ondas persistentes, que con amplitudes casi estacionarias, exhiben patrones de frecuencia variables en el tiempo. Surge entonces, en forma natural, la noción de los fenómenos *localizados en tiempo y frecuencia*, es decir de fenómenos que para su descripción requieren la información conjunta de ambos dominios. Claramente, el par de Fourier no es la herramienta adecuada para expresar explícitamente este tipo de información conjunta, dado que las funciones elementales de representación son las ondas estacionarias y

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

de frecuencia constante $e^{-j\omega t}$. Para representar tales fenómenos requerimos de patrones elementales capaces de localizar conjuntamente la información de ambos dominios.

Esto plantea el problema de las representaciones tiempo-frecuencia. En principio, éste es un problema *antinatural* ya que, de acuerdo al *Principio de Incertidumbre de Heisemberg* no pueden existir señales a la vez casi monocromáticas y casi instantáneas. Se imponen, por tanto, soluciones de compromiso. Tratándose de fenómenos aislados en el tiempo, la cuestión es relativamente sencilla. Podemos analizarlos separadamente, y sobre sus respectivos dominios temporales extraer la información en frecuencia que nos provee la Transformada de Fourier. Análogamente podemos tratar el caso de ondas con patrones de frecuencia relativamente simples, moduladas por funciones relativamente largas.

Pero el problema es arduo cuando nos encontramos frente a señales donde conviven múltiples fenómenos localizados en el tiempo y en la frecuencia, superponiéndose bajo complejas estructuras.

Una clase de representaciones tiempo-frecuencia ampliamente difundida en el ámbito del procesamiento de señales se basa en el empleo de *ventanas temporales*, esto es de funciones suaves y bien localizadas en un intervalo.

La ventana $g(t)$ enmarca una porción de la señal y permite aplicar localmente la Transformada de Fourier. De este modo, se releva la información en frecuencia localizada temporalmente en el dominio efectivo de la ventana.

Desplazando temporalmente la ventana se cubre el dominio de la señal obteniéndose la información completa tiempo - frecuencia de la misma:

$$\hat{F}_g(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

La misma sintetiza la señal como la superposición integral de las funciones elementales $g(t - \tau)e^{j\omega t}$.

El mapeo sobre dominio tiempo-frecuencia, bajo las condiciones referidas, se conoce como la *transformada de Gabor* (Debnath and Shah

2015) y representa una generalización de la transformada de Fourier (Oppenheim et al. 1998). Esta transformada se puede reformular considerando ahora el par de ventanas moduladas reales $g(t - \tau)\cos(\omega t)$ y $g(t - \tau)\seno(\omega t)$.

Estos pares de ventanas moduladas actúan como *filtros pasa banda*, con definición de fase. De tal modo la Transformada de Gabor puede entenderse como un tratamiento localizado de la señal mediante filtros pasabanda deslizante, de ancho de banda constante.

La implementación de la Transformada de Gabor para el procesamiento de señales resulta eficiente cuando se trata de localizar y caracterizar eventos con patrones de frecuencia bien definida, no superpuestos y relativamente largos, respecto de la ventana de análisis. En contraposición, es totalmente inapropiada para detectar detalles de corta duración, oscilaciones largas asociados a las bajas frecuencias, o caracterizar patrones auto similares presentes en fenómenos a distintas escalas.

Una alternativa a la Transformada de Gabor es la de utilizar ventanas moduladas, pero de dimensión variable, ajustada a la frecuencia de oscilación. Más precisamente, que mantenga un mismo número de oscilaciones en el dominio de la ventana.

Esto sugiere, naturalmente, contar con una única ventana modulada y generar una completa familia de funciones elementales mediante sus dilataciones o contracciones y traslaciones en el tiempo:

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

El parámetro a es un factor de escalamiento y b es un factor de desplazamiento. La condición de normalización asegura que $\|\psi_a, b(t)\| = \|\psi(t)\|$. De manera muy general, la Transformada Ondita de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,\tau}(t)$, que forman una base.

La ondita madre debe satisfacer la siguiente condición de admisibilidad

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

donde $\Psi(\omega)$ es la transformada de Fourier de $\psi(t)$. En la práctica, ω tiene un decaimiento suficiente para que la condición de admisibilidad se reduzca a

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = \Psi(0)$$

Por lo tanto, la ondita tendrá un comportamiento de filtro pasabanda. Es decir, la transformación de la TO se realiza a través de una función llamada ondita madre, con la que se descompone una señal en diferentes componentes de frecuencia que conforman

una familia de funciones que son traslaciones y dilataciones de una función madre $\psi(t)$.

En la tabla 1 se puede observar un resumen de las familias onditas más comunes (Gómez-Luna, Silva, and Aponte 2013). Las condiciones de admisibilidad básicamente requieren que la función $\psi(t)$ esté bien localizada en tiempo, de media nula y que la transformada $\psi(\omega)$ sea un filtro continuo pasa-banda, con rápido decaimiento hacia el infinito y hacia $\omega = 0$. Toma en cuenta dos medidas, tiempo y escala como se puede observar en la figura 1.

	Haar	Mexican Hat	Morlet	Daubechies	Symplets	Coiflets	Gaussiana	Biorthogonal	Reverse Biorthogonal	Meyer	Discrete Meyer
Propiedades	(haar)	(mexh)	(morl)	(dbN)	(symN)	(coifN)	(gausN)	(biorNr.Nd)	(rbioNr.Nd)	(meyr)	(dmey)
Orden	---	---	---	1, 2, ..., 45 ²	1, 2, ..., 41 ²	1, 2, ..., 5 ²	1, 2, ..., 44 ²	1.1, 1.3, ..., 6.8 ²	1.1, 1.3, ..., 6.8 ²	---	---
Regularidad	No	Sí	Sí	Relativa ³	Relativa ³	Relativa ³	Sí	Relativa ³	Relativa ³	Sí	Sí
Tamaño del Soporte	1	[-5, 5]	[-4, 4]	2N-1	2N-1	6N-1	[-5, 5]	2Nd+1	2Nr+1	[-8, 8]	[-8, 8]
Longitud del Filtro	2	---	---	2N	2N	6N	---	---	6	---	6
Simetría	Sí	Sí	Sí	No	Aproximada	Aproximada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Momentos de Desvanecimiento	1	---	---	N	N	2N	---	Nr	Nd	---	---
Función de Escala	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
CWT	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
DWT	Posible	No Permite	No Permite	Posible	Posible	Posible	No Permite	Posible	Posible	No Permite	Posible
Expresión Explícita	Sí	Sí	Sí	No	No	No	Sí	No	No	Sí	Sí

Tabla 1: Características y propiedades de las onditas más comunes.

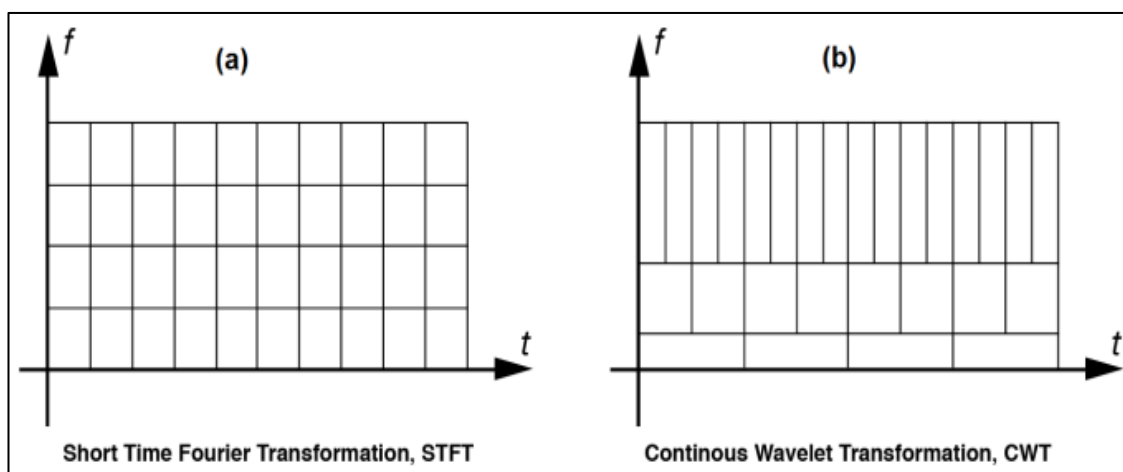


Fig. 1: relación tiempo-frecuencia para la transformada de Fourier por ventanas (a) y la Transformada Ondita (b).

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

Entonces, dada una señal $f(t)$, de energía finita la *Transformada Ondita Continua* de f se define cómo:

$$W_{\psi}f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (5)$$

para cada par de parámetros reales $(a; b)$, $a \neq 0$.

Si la ondita es real, la definición se restringe para valores positivos de a . La transformación así definida preserva la energía de la señal, y posee una fórmula integral de inversión. Si la ondita madre es real, la reconstrucción se realiza como:

$$f(t) = C_{\psi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\psi}f(a, b)\psi_{a,b}(t) \frac{dbda}{a^2} \quad (6)$$

Donde C_{ψ} es una constante positiva. La TO continua tiene como inconveniente la impracticabilidad en sistemas digitales. La implementación discreta de la transformada continua con una base de valor real se conoce como transformada de ondita discreta (TOD). Si bien es una herramienta poderosa para el análisis y procesamiento de señales e imágenes, tiene tres desventajas principales:

- (1) Sensibilidad al cambio.
- (2) Direccionalidad deficiente.
- (3) Falta de información de fase.

Básicamente, lo que hace la transformada Wavelet es filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso bajo y paso alto que eliminan ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal, el procedimiento se repite para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior. Por ejemplo, supóngase que se tiene una señal con frecuencias de hasta 300 Hz, en la primera etapa de filtrado la señal es dividida en dos partes haciéndola pasar a través de un filtro paso-bajo y un filtro paso-alto con lo cual se obtienen dos versiones diferentes de la misma señal: una que corresponde a las frecuencias entre 0 y 150 Hz. (paso bajo) y otra que corresponde a las frecuencias entre 150-300 Hz. (paso alto). Posteriormente, se toma cualquiera de las dos versiones y se hace nuevamente la misma

división. Esta operación se denomina descomposición.

LA TRANSFORMADA ONDITA COMPLEJA

No hay una extensión única de la DWT estándar en el plano complejo pero (Lawton 1993) y (Lina 2013) demostraron que las soluciones complejas de las onditas Daubechies son posibles.

Cualquier señal continua de energía finita $f(t)$ se puede representar en términos de la TO y funciones de escalado:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(n)\phi(t-n) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(j, n)2^{j/2} \psi(2^j t - n)$$

Los coeficientes de escalado $c(n)$ y los coeficientes onditas $d(j, n)$ se obtienen calculando los productos internos

$$c(n) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\phi(t-n)dt$$

$$d(j, n) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(2^j t - n)dt$$

Si nos basamos en valores complejos de la forma

$$e^{j\Omega t} = \cos(\Omega t) + j \sen(\Omega t)$$

Las componentes senos y cosenos forman un par de transformadas de Hilbert, desfasadas 90° una respecto de la otra. Juntas, constituyen una señal analítica cuyo soporte es solo la mitad del eje de frecuencia (Alavi-Sereshki 1972). Basado en la representación de Fourier, podemos desarrollar una ecuación con una función de escalado de valores complejos y ondita de valores complejos.

Se puede escribir entonces la transformada ondita compleja (TOC) como

$$\psi_c(t) = \psi_r(t) + j\psi_i(t)$$

Por analogía con la expresión anterior podemos decir que $\psi_r(t)$ es una función par y real y que $j\psi_i(t)$ es imaginaria e impar. Si $\psi_r(t)$ y $j\psi_i(t)$

TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019 OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

forman un par de transformadas de Hilbert, desfasadas 90° una respecto de la otra, entonces $\psi_c(t)$ es una función analítica cuyo soporte es solo la mitad del eje de frecuencia. Proyectando la señal sobre $2^{j/2}\psi_c(2^j t - n)$ obtenemos los coeficientes de la transformada ondita compleja:

$$d_c(j, n) = d_r(j, n) + j d_i(j, n)$$

Con magnitud

$$|d_c(j, n)| = \sqrt{|d_r(j, n)|^2 + |d_i(j, n)|^2}$$

Y fase

$$\angle d_c(j, n) = \arctg\left(\frac{d_i(j, n)}{d_r(j, n)}\right)$$

Cuando $|d_c(j, n)| > 0$.

Como en la transformada de Fourier, las transformadas onditas complejas se pueden usar para analizar y representar señales de variable real y señales de variable compleja en ambos casos, la TOC hace posible la generación de algoritmos multiescala que hacen uso de la magnitud y fase compleja.

APLICACIONES

El concepto de Calidad de Energía Eléctrica es un tema esencial que ha evolucionado en la última década a escala mundial. Está relacionado con las perturbaciones eléctricas que pueden afectar a las condiciones eléctricas de suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de equipos y procesos. En los últimos 50 años se han producido cambios importantes en los sistemas de energía eléctrica. El nuevo entorno está condicionado por los equipos de electrónica de potencia, tales como unidades de velocidad ajustable, rectificadores controlados, Lámparas electrónicas, hornos de arco y de inducción. También las computadoras representan grandes cargas no lineales que proliferan entre las industrias y los clientes comerciales. Estas cargas tienen el potencial de crear una serie de perturbaciones que perjudican al equipo del usuario final. Los principales

problemas provienen del flujo de energía no activa causada por armónicos.

La estabilidad de la frecuencia y las variaciones de tensión son los factores clave en la calidad de la energía. Para ello es necesario cuantificar correctamente las distorsiones causadas por las cargas no lineales y paramétricas y aplicar una distribución justa de la carga financiera requerida para mantener la calidad de la electricidad. Los microprocesadores y minicomputadoras permiten a los fabricantes actuales de instrumentos eléctricos construir nuevos equipos de medición capaces de efectuar mediciones basadas en modelos matemáticos avanzados que pueden medir con precisión estos parámetros.

Las características críticas que sirven como referencia para clasificar las perturbaciones de acuerdo a su impacto en la calidad de la potencia:

- Variaciones de frecuencia y tensión
- Cambios rápidos de tensión.
- Severidad de parpadeos (Flicker).
- Huecos de tensión.
- Interrupciones cortas y prolongadas de tensión.
- Transitorios por sobretensión.
- Desequilibrio de tensión.
- Tensión armónica e inter-armónica.

El análisis espectral de una señal pretende analizar en detalle el comportamiento y aporte de sus componentes armónicas en el dominio de la frecuencia. La Transformada de Fourier (TF) entrega la información de frecuencia de la señal pero no muestra el instante de tiempo en el que ocurre información de importancia para señales no estacionarias, es decir, para señales cuyas componentes de frecuencia no se encuentran presentes en todo instante de tiempo. Esto se puede observar en las figuras 1, 2 y 3. Para tener una localización temporal de las componentes espectrales se requiere la utilización de otras transformadas, que proporcionen una representación tiempo-frecuencia de la señal no estacionaria. La Transformada Corta de Fourier (TCTF) y la TO permiten dicho análisis en tiempo frecuencia. La TO permite observar el comportamiento de diferentes eventos de la señal al descomponerla en funciones elementales derivadas de la misma señal, que pueden ser

TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019 OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

seleccionadas hasta el nivel deseado de detalle. A diferencia de la TCTF, la Transformada Wavelet analiza la señal con distintas resoluciones para las diferentes frecuencias.

Dado que las sub-bandas individuales para el voltaje y la corriente se registran tanto en tiempo como en frecuencia, cada sub-banda asociada al producto representa la contribución de esta banda al total de energía promedio del elemento o energía del ciclo. La suma de estas potencias de sub-banda firmadas da como resultado la potencia promedio total para este par de elementos. La energía se usaría normalmente en condiciones de estado estable, mientras que la distribución de frecuencia de energía sería importante en los transitorios.

De manera similar, el cuadrado de los puntos en las sub-bandas de tensión y corriente individuales representa las contribuciones cuadradas de estas sub-bandas individuales al valor eficaz total de la tensión o corriente. Es decir, debido a que las contribuciones de sub-banda son ortogonales, las contribuciones de la media al cuadrado de cada sub-banda se pueden agregar para formar el cuadrado medio de la tensión o corriente total. La raíz cuadrada de esta suma producirá el valor total de valor eficaz, mientras que la raíz cuadrada de cada cuadrado medio de sub-banda producirá la contribución respectiva de esta sub-banda a este valor total de valor eficaz.

En los sistemas de alimentación trifásicos, las contribuciones de potencia o energía de cada fase (o elemento en el caso de la medición de 3 hilos o 2 elementos) se pueden sumar en cada

nivel de sub-banda para determinar la contribución de las frecuencias dentro de este sub-banda a la potencia o energía total trifásica.

Para el análisis preciso de los datos del sistema de alimentación, se requiere una buena separación de frecuencia entre las versiones descompuestas del original. Las características de reducción de los pares de filtros de paso alto y paso bajo utilizados en el desarrollo de las transformadas de onditas influyen en gran medida en la precisión de las distribuciones de frecuencia de sub-banda resultantes. La separación de frecuencia en los distintos niveles de onditas se logra utilizando filtros IIR porque sus características de magnitud son mucho mejores que los filtros FIR típicos de complejidad equivalente. La estrategia de red polifásica IIR produce un diseño de banco de filtros ondita más simple. Utilizando el teorema de Parseval (Parameswariah and Cox 2002) se puede visualizar la respuesta en frecuencia de las onditas para evidenciar la información que comparten los anchos de banda en el proceso de filtrado. En este trabajo no tenemos espacio para desarrollar el banco de filtros que se requiere para disponer de la información en tiempo real. Las figuras 4 muestra la información en tiempo y frecuencia de una señal sin distorsión, en tanto que las figuras 5 y 6 muestran las señales con distorsión. Las figuras 7 y 8 muestran la construcción de una ondita compleja para una señal con distorsión y sus respectivos coeficientes.

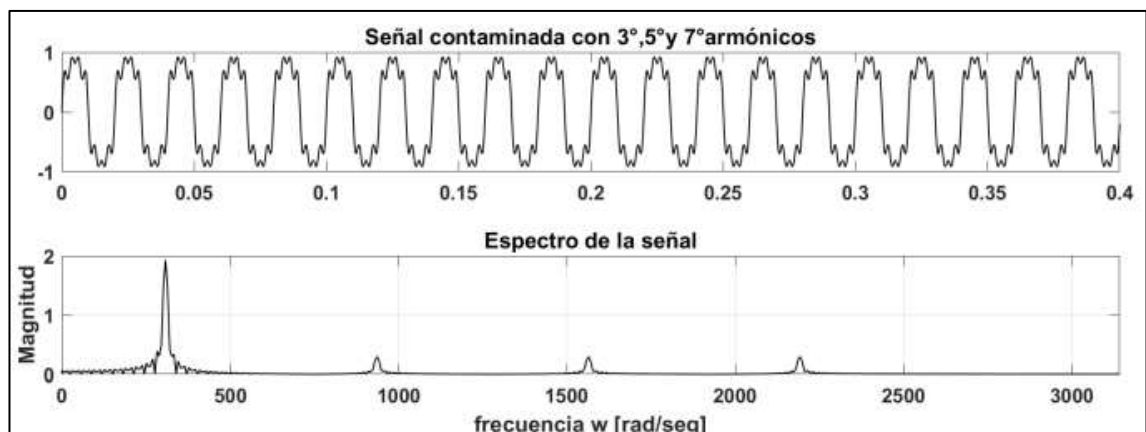


Fig. 1: Representación de Fourier de una señal contaminada con armónicos de 3, 5 y 7 orden.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

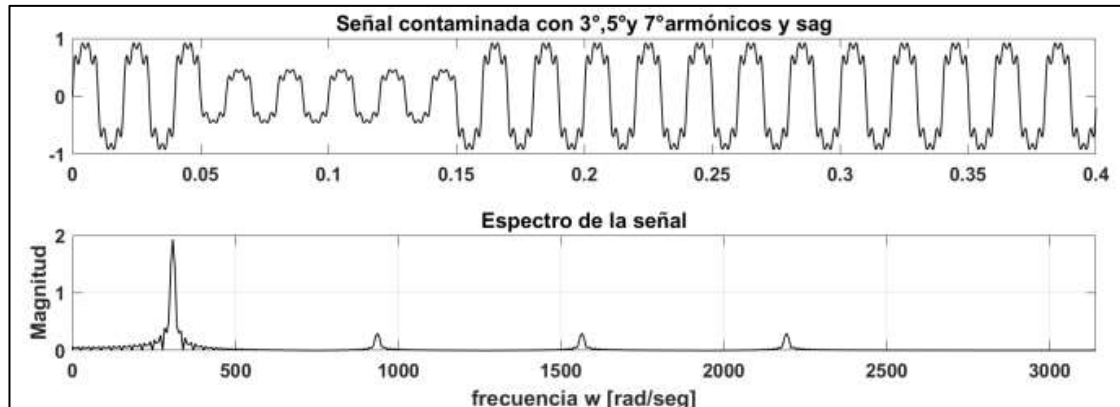


Fig. 2: Representación de Fourier de una señal contaminada con armónicos de 3,5 y 7 orden y sag.

CONCLUSIONES

Varios estándares y normas internacionales que regulan las características de la energía eléctrica suministrada, definen sus defectos, los procedimientos con que tienen que ser medidos y las características que deben reunir los dispositivos utilizados para tal fin. Este conjunto de conocimientos y técnicas es internacionalmente denominado Power Quality.

Uno de los problemas fundamentales de esta área de conocimiento es la correcta medición de los armónicos de tensión y corriente presentes en una línea eléctrica. El Comité Electrotécnico Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) define a la Calidad de la Potencia (Power Quality), como las características de la energía eléctrica (tensión, corriente y sus relaciones) en función del tiempo y de la frecuencia en un punto dado del sistema eléctrico de potencia (típicamente en el punto

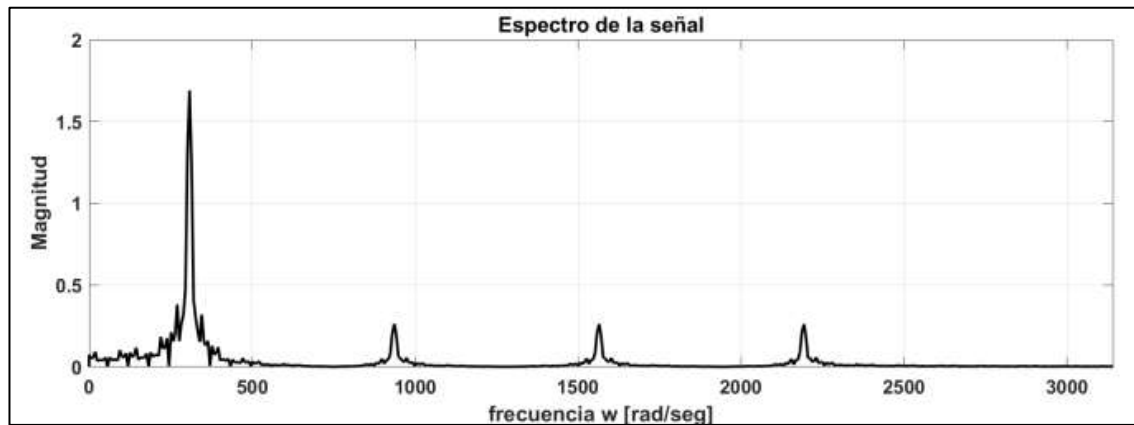
de acoplamiento común) que se evalúan contra un conjunto de parámetros técnicos de referencia.

El estándar internacional CEI 61000-4-7 establece para la toma de muestras de la señal de la línea eléctrica una ventana temporal de medida de una duración de diez veces el período de la componente fundamental presente en la línea eléctrica. Esta componente fundamental es una señal sinusoidal de frecuencia 50 Hz lo que equivale a un período de 20 milésimas de segundo y a una ventana de medida de 200 milésimas de segundo.

La ventana temporal de medida durante la que se toman las muestras debe contener diez ciclos de la componente fundamental, sin embargo cualquier pequeña alteración de la frecuencia fundamental o de la duración de la ventana de medida impide que esto se cumpla ocasionándose una pérdida de sincronía que va a producir un error en la medida.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata



. Fig. 3: Representación espectral de Fourier. No se observa la influencia del sag.

El estándar CEI 61000-4-7 propone la utilización de la transformada rápida de Fourier ó Fast Fourier Transform (FFT), basado en la Transformada Discreta de Fourier, para el análisis de la señal. Esta herramienta de análisis matemático permite, partiendo de las muestras, obtener la magnitud de cada componente del conjunto de componentes espectrales de frecuencia comprendidas entre 0 Hz y la mitad de la frecuencia de muestreo a que se tomaron las muestras durante la

ventana temporal de medida y separadas entre ellas por la resolución de la ventana de muestreo.

Este conjunto de componentes espectrales representan la señal que se ha medido suponiendo por una parte que no ha habido pérdida de sincronía y por otra que no existe ninguna componente espectral superior a la mitad de la frecuencia de muestreo.

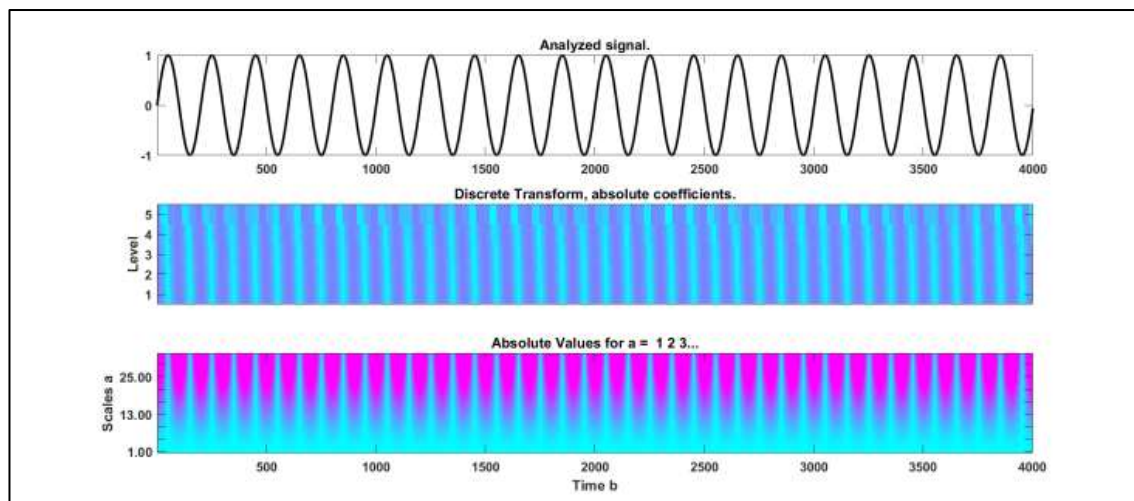


Fig. 4: Relación tiempo-frecuencia para la transformada Ondita discreta de una señal sinusoidal pura.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

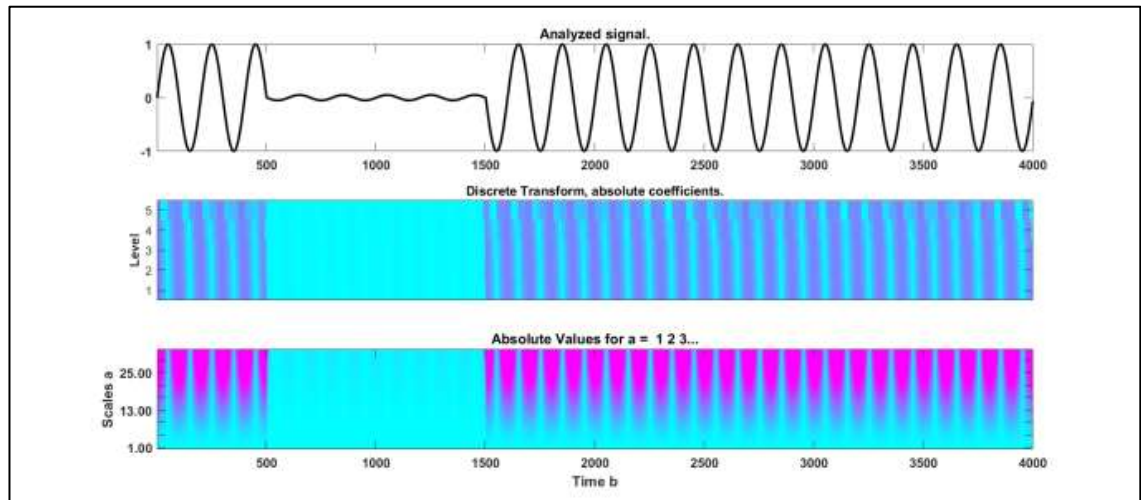


Fig. 5: Relación tiempo-frecuencia para la transformada Ondita discreta de una señal con hueco de tensión y distorsión armónica.

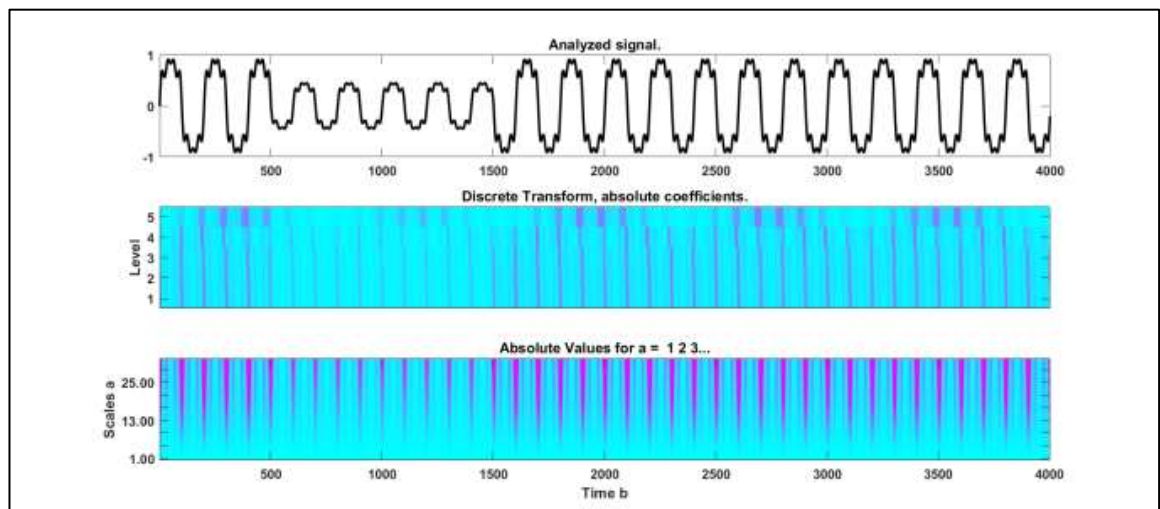


Fig. 6: Relación tiempo-frecuencia para la transformada Ondita discreta de una señal con hueco de tensión

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

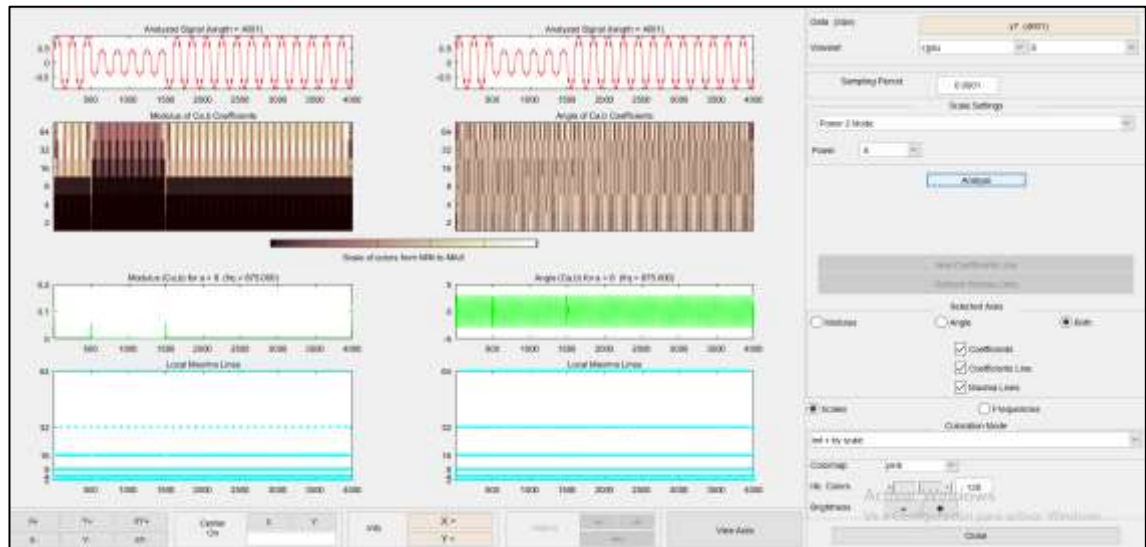


Fig. 7: Diseño de Ondita compleja y comportamiento frente a una señal con hueco de tensión.

En caso de no cumplirse alguna de estas dos condiciones se produce una alteración de la magnitud de las componentes espectrales entre las que se encuentran las componentes armónicas de la frecuencia fundamental de la línea eléctrica.

Si en la señal muestreada existe alguna componente espectral cuya frecuencia no coincida con un múltiplo de 5 Hz esto ocasiona alteraciones en los valores obtenidos con la FFT para el resto de las componentes espectrales; este fenómeno se denomina dispersión espectral.

El enorme aumento del número de cargas no lineales conectadas a la red de distribución eléctrica y el uso cada vez mayor de cargas pulsantes no síncronas con la frecuencia fundamental de la red eléctrica, generan componentes espectrales inter armónicas que se extienden por todo el espectro de las señales eléctricas. Estas nuevas componentes de frecuencia no se pueden calcular correctamente con los métodos actuales de procesado. Para tener en cuenta esta nueva situación, el estándar CEI 61000-4-7 (Bollen and Gu 2006) define el concepto de Grupos Armónicos donde se calculan diferentes componentes de frecuencia como una única

magnitud. De esta forma se obtiene una mejor representación de la distorsión armónica existente en un punto determinado de la red eléctrica que la obtenida calculando únicamente los valores de las componentes armónicas como frecuencias individuales.

Para cada armónico de la componente fundamental, el valor eficaz de un Grupo Armónico se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de ese armónico y de las componentes espectrales adyacentes a él dentro de la ventana temporal, sumando así el contenido energético de las líneas espectrales vecinas a la del propio armónico. En (Gudaru and Waje 2012) se investiga el uso del análisis de onditas en el estudio de la distorsión armónica en sistemas de suministro de energía y se propone un nuevo método para reducir la fuga espectral debido a la respuesta de frecuencia imperfecta de los bancos de filtros de onditas usados. El rendimiento del nuevo método propuesto se estudia en diferentes condiciones de medición, y los resultados obtenidos se comparan con los resultados del análisis de Fourier utilizado en el enfoque IEC. También se puede consultar (Barros, Diego, and de Apraiz 2012) para una revisión de la TO en sistemas de potencia.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

1	2	0,0192	0,0575	0,0528	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,060620871	0	0,088824737	0	11,25812507
1	3	0,0452	0,1652	0,0408	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,171271947	0	0,250956238	0	3,984758494
2	4	0,057	0,1737	0,0368	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,182813265	0	0,267867155	0	3,733193793
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,040132904	0	0,058804742	0	17,00543136
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,203839962	0	0,298676524	0	3,348103786
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,185626776	0	0,271989652	0	3,676610465
4	6	0,0119	0,0414	0,009	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,043076328	0	0,063117593	0	15,84344315
5	7	0,046	0,116	0,0204	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,12478782	0	0,182845365	0	5,469102257
6	7	0,0267	0,082	0,017	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,086237405	0	0,126359366	0	7,913936517
6	8	0,012	0,042	0,009	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,043680659	0	0,06400309	0	15,62424556
6	9	0	0,208	0	0	0	0	0,978	0	1	-360	360	0	0,208	0	0,30477202	0	3,281141094
6	10	0	0,556	0	0	0	0	0,969	0	1	-360	360	0	0,556	0	0,814679054	0	1,227477244
9	11	0	0,208	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,208	0	0,30477202	0	3,281141094
9	10	0	0,11	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,11	0	0,161177511	0	6,204339524
4	12	0	0,256	0	0	0	0	0,932	0	1	-360	360	0	0,256	0	0,375104025	0	2,665927139
12	13	0	0,14	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,14	0	0,205135014	0	4,874838197
12	14	0,1231	0,2559	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,283969048	0	0,416085675	0	2,403351187
12	15	0,0662	0,1304	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,146241581	0	0,214280491	0	4,666780427
12	16	0,0945	0,1987	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,220027135	0	0,322394781	0	3,101787189
14	15	0,221	0,1997	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,297860857	0	0,436440649	0	2,291262286
16	17	0,0524	0,1923	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,19931144	0	0,292041106	0	3,424175494
15	18	0,1073	0,2185	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,243424608	0	0,356677931	0	2,80364977
18	19	0,0639	0,1292	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,144138302	0	0,211198661	0	4,734878515
19	20	0,034	0,068	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,076026311	0	0,11139756	0	8,976857308
10	20	0,0936	0,209	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,229002096	0	0,335545344	0	2,980223148
10	17	0,0324	0,0845	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,090498674	0	0,132603191	0	7,541296654
10	21	0,0348	0,0749	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,082589648	0	0,12101449	0	8,263473231
10	22	0,0727	0,1499	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,16659922	0	0,244109523	0	4,096521874
21	22	0,0116	0,0236	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,026296768	0	0,038531342	0	25,95289852
15	23	0,1	0,202	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,225397427	0	0,330263602	0	3,027884379
22	24	0,115	0,179	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,212758079	0	0,311743795	0	3,207762319
23	24	0,132	0,27	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,300539515	0	0,440365553	0	2,270840651
24	25	0,1885	0,3292	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,37934798	0	0,555839665	0	1,799079957
25	26	0,2544	0,38	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,457295703	0	0,670052573	0	1,492420207
25	27	0,1093	0,2087	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,235589007	0	0,345196815	0	2,896898109
28	27	0	0,396	0	0	0	0	0,968	0	1	-360	360	0	0,396	0	0,580239039	0	1,723427645
27	29	0,2198	0,4153	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,469878846	0	0,688490025	0	1,452453868
27	30	0,3202	0,6027	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,682477348	0	1	0	1
29	30	0,2399	0,4533	0	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,512867332	0	0,751478908	0	1,330709338
8	28	0,0636	0,2	0,0428	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,209868911	0	0,307510443	0	3,251922082
6	28	0,0169	0,0599	0,013	0	0	0	0	0	1	-360	360	0	0,062238413	0	0,09119484	0	10,96553269

Fig. 8: coeficientes de la construcción ondita compleja de la figura 7.

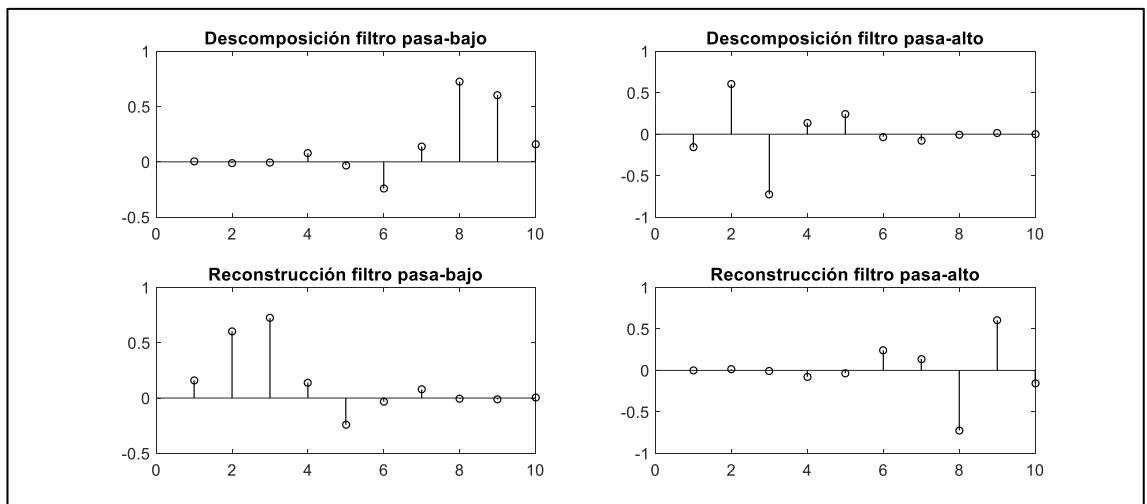


Fig. 9: coeficientes de la construcción ondita compleja de la figura 7.

**TERCER CONGRESO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA
TECNOLÓGICA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA CITTIE 2019
OCTAVO SEMINARIO NACIONAL DE ENERGÍA SENE 2019.**

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

REFERENCIAS

- Alavi-Sereshki, M. M. 1972. *Analytic Signals and Hilbert Transforms*. Texas Tech University.
- Barros, Julio, Ramón I. Diego, and Matilde de Apraiz. 2012. "Applications of Wavelet Transform for Analysis of Harmonic Distortion in Power Systems: A Review." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61(10):2604–11.
- Bollen, Math H. J. and Irene Yu-Hua. Gu. 2006. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. IEEE Press.
- Debnath, Lokenath and Firdous Ahmad Shah. 2015. "The Gabor Transform and Time–Frequency Signal Analysis." Pp. 243–86 in *Wavelet Transforms and Their Applications*. Boston, MA: Birkhäuser Boston.
- Gómez-Luna, E., D. Silva, and G. Aponte. 2013. "Selección de Una Wavelet Madre Para El Análisis Frecuencial de Señales Eléctricas Transitorias Usando WPD." *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*.
- Goupillaud, P., A. Grossmann, and J. Morlet. 1984. "Cycle-Octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis." *Geoexploration* 23(1):85–102.
- Gudaru, U. and Vishal B. Waje. 2012. "Analysis of Harmonics in Power System Using Wavelet Transform." Pp. 1–5 in *2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*. IEEE.
- Lawton, Wayne. 1993. "Applications of Complex Valued Wavelet Transforms to Subband Decomposition." *IEEE Transactions on Signal Processing*.
- Lina, J. M. 2013. "Complex Daubechies Wavelets: Filters Design and Applications." in *Inverse Problems, Tomography, and Image Processing*.
- Oppenheim, Alan V., Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab, Gloria Mata Hernández, and Agustín Suárez Fernández. 1998. *Señales y Sistemas*. Prentice Hall.
- Parameswariah, C. and M. Cox. 2002. "Frequency Characteristics of Wavelets." *IEEE Transactions on Power Delivery* 17(3):800–804.
- Serrano, Eduardo. n.d. *Introducción a La Transformada Wavelet y Sus Aplicaciones Al Procesamiento de Señales de Emisión Acústica*.