

APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET PARA DETECCIÓN DE AUSENCIA DE RED EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORM FOR GRID'S ABSENCE DETECTION IN DISTRIBUTED GENERATION

Mauricio E. Neiff^a y Guillermo D. Campomar^a

^aGrupo de Estudio de Sistemas de Control, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Colón 332, San Nicolás de Los Arroyos, Argentina, <http://www.frsn.utn.edu.ar>

Palabras clave: Transformada Wavelet, Modo-Isla, Energías Renovables, Generación Distribuida, Electrónica de Potencia, Inversor.

Resumen. El avance tecnológico y la preocupación medioambiental propiciaron la aparición de pequeñas plantas generadoras de energía a partir de fuentes renovables, distribuidas en áreas urbanas y trabajando en simultáneo con la red eléctrica. La propia existencia de estas plantas distribuidas, sobre las cuales virtualmente no se tiene control, compromete seriamente la seguridad eléctrica de la red de distribución. Más precisamente, el fenómeno conocido como modo-isla en el cual un generador distribuido (GD) continúa inyectando energía a la red aún cuando la misma ha salido de servicio, implica un importante riesgo eléctrico y es imperativa la desconexión automática del equipo. Para ciertos tipos de cargas resonantes, este evento puede resultar difícil de detectar. En este trabajo, se presentan los resultados de la aplicación de la transformada Wavelet para detectar la ausencia de red en casos reales. Los ensayos se llevaron a cabo en un conjunto de GD comerciales, a partir de los cuales se pudo establecer una comparativa entre los tiempos de respuesta de detección del modo-isla de los equipos, frente al método propuesto.

Keywords: Wavelet Transform, Islanding, Renewable Energies, Distributed Generation, Power Electronics, Inverter.

Abstract. Technological advance and environmental concerns have promoted the appearance of small renewable energy generation plants, distributed along urban areas and working in parallel with the electrical grid. The presence of these virtually-uncontrollable plants represents an electrical risk for the distribution lines. More precisely, the islanding phenomenon, in which a distributed generator (DG) continues to power a location even though electrical grid power is no longer present, represents a serious hazard and requires an automatic disconnection of the generators. For certain resonant loads, this event could be difficult to detect. In this work, the results of the Wavelet Transform application to detect grid's absence in real cases is presented. Tests were performed on commercial DGs, and an islanding time response comparison against the proposed method was also obtained.

1. INTRODUCCIÓN

Con la expansión de los sistemas de Generación Distribuida (GD), fue imperante definir las condiciones de operación de los equipos de generación para asegurar la calidad energética y la seguridad contra riesgo eléctrico. Precisamente, éstos deben funcionar sólo cuando la red de distribución primaria es saludable, y no deben tomar el control de la electrificación en ningún momento. En otras palabras, si la red de distribución queda inoperativa, los equipos deben cesar la inyección de energía. Si un equipo continua inyectando energía a la red cuando la misma ya ha salido de servicio, se dice que el equipo está funcionando en Modo Isla (MI). Ciertos equipos están específicamente diseñados para alimentar circuitos totalmente independiente de la red, por lo que naturalmente funcionan en MI, pero los equipos que generan energía en *paralelo* con la red, deben detenerse en ese caso.

Aunque resulte tentador creer que reconocer la presencia de la red es una tarea trivial, a veces puede ser complicado. De aquí en adelante la detección de ausencia de red será referida como la detección del Modo Isla. En el análisis de esta situación se establecen algunas suposiciones importantes:

1. La red está alimentada por una gran fuente de tensión, de potencia infinita.
2. La energía se distribuye por cables hacia un gran número de consumidores que alimentan sus cargas en un *circuito local*.
3. Algunos consumidores poseen, además, sistemas de GD de potencia notablemente inferior a la disponible en la red.
4. Los equipos de GD funcionan perfectamente sincronizados con la red. Pueden suplir las cargas del circuito local en forma: parcial, total, o en exceso, sin ningún problema.

A lo largo de este trabajo, se mostrarán las condiciones que hacen difícil el reconocimiento de la ausencia de red, y la aplicación de la Transformada Wavelet (TW) como una efectiva herramienta para la detección del Modo Isla.

2. DETECCIÓN DEL MODO ISLA

Existe un gran número de métodos para la detección del MI, cada uno con sus ventajas y desventajas. En general, se clasifican como: métodos *pasivos*, y método *activos*. Algunos autores también hacen mención de los métodos de telecomando; solo prácticos cuando el corte de suministro es intencional y/o conocido. [Sundar y Kumaran \(2015\)](#); [Raj y Praveen \(2017\)](#) relevaron los siguientes métodos.

2.1. Métodos pasivos

Son aquellos que se limitan a observar ciertos parámetros del sistema, y a actuar en base a su comportamiento para disparar los mecanismos de protección. Algunos consisten en detectar: *Sub/sobre-voltaje*; *sub/sobre-frecuencia*; *salto de fase*; *ritmo de cambio de potencia*; *ritmo de cambio de frecuencia*. Sus ventajas son la simplicidad y robustez. Mientras que su gran desventaja es una amplia Zona de No-Detección (NDZ), y deben calibrarse según el entorno de funcionamiento.

2.2. Métodos activos

Los activos se caracterizan por intentar reconocer la ausencia de red mediante perturbaciones intencionales en el lazo de control principal del equipo de GD. Debido a que la red es

virtualmente inamovible, estos métodos suponen que las perturbaciones no serán visibles mientras la red esté presente. Si las perturbaciones se detectan en los puntos de conexión a la red, el sistema reconoce que se encuentra en MI y debe desconectarse. Algunos métodos activos son: *Active Frequency Drift (AFD)*; *Sandia Voltage Shift (SVS)*; *medición de impedancia*; *inyección de armónicos*. La ventaja de estos métodos es que reducen drásticamente la NDZ, pero su inconveniente es un complejo diseño que impone alterar el sistema de control principal que además repercute como un aumento en la distorsión total introducida por el equipo y, en muy menor medida, pérdidas de eficiencia. Al igual que los métodos pasivos, generalmente deben calibrarse.

3. ZONA DE NO-DETECCIÓN (NDZ)

Sea cual fuera el motivo por el que ocurre una pérdida del suministro eléctrico, la complejidad de detección de dicho evento está directamente relacionada tanto a la naturaleza de la falla como a las características de las cargas locales. Ciertas cargas tienden a preservar los niveles de tensión y la frecuencia en el Punto de Conexión Común (PCC): un tanque resonante sintonizado a la frecuencia de la red y con un factor de calidad (Q_f) lo suficientemente alto puede engañar a gran parte de los métodos de detección de MI, principalmente a los pasivos. Al mismo tiempo, la propia red es un sistema imperfecto, que tiene variaciones en voltaje y frecuencia, dentro de un rango que se considera aceptable. Se conoce como *Zona de No-Detección* a los límites de voltaje y frecuencia entre los cuales se supone que una red opera, y en donde no es posible asumir una falla; esta zona está cuantificada como el rango de cargas locales (es decir, cargas dentro de una zona potencial de isla) para las cuales los métodos de prevención de modo isla en consideración *pueden hacerse fallar* (I.E.A. (2002)). Los límites entre los que variarán la frecuencia y la tensión en el PCC antes y después de una desconexión dependen de la diferencia entre la potencia activa (ΔP) y reactiva (ΔQ) entregada por el equipo (P_{INV} y Q_{INV} , respectivamente) respecto a la absorbida por la carga local (P_L y Q_L). Matemáticamente cuantificado por Kim et al. (2019) como:

$$\left(\frac{V}{V_{max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_L} \leq \left(\frac{V}{V_{min}}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$Q_f \left[1 - \left(\frac{f}{f_{min}}\right)^2\right] \leq \frac{\Delta Q}{Q_L} \leq Q_f \left[1 - \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^2\right] \quad (2)$$

4. GENERALIDADES DE LA TRANSFORMADA WAVELET

El método propuesto para la detección está basado en la Transformada Wavelet, el cual se trata de un método de detección pasivo de procesamiento de señales que muchos académicos califican como robusto y económico en términos de costo computacional, y con una NDZ nula. En esta sección se mencionan algunas generalidades importantes de dicha transformada; para un análisis más profundo, consulte los trabajos citados.

La TW es una transformada del tipo de ventana o tiempo corto, que se asemeja a la Transformada Rápida de Fourier (FFT) o a la Transformada de Gabor. En este sentido, el análisis en frecuencia está asociado a un periodo de tiempo de duración acotado (Δt) y centrado en un punto del tiempo para el cual se expresa el contenido armónico de la señal en dicho intervalo. El ancho de banda del análisis armónico en Δt (también llamado "ventana") está limitado y es

inversamente proporcional a la duración de la ventana. Más precisamente:

$$\Delta w_{(t)} \Delta w_{(f)} \geq \frac{1}{4\pi} \quad (3)$$

Donde $\Delta w_{(t)}$ y $\Delta w_{(f)}$ son el ancho de la ventana en el tiempo, y en frecuencia, respectivamente. Esto significa que cuanto más en detalle uno intenta observar en el tiempo, más difusa es será la información en frecuencia, y viceversa (*Principio de Incertidumbre Gabor-Heisenberg*, Soares et al. (2003)).

La TW expresada en forma discreta puede calcularse recursivamente para generar una mapa de información tiempo-frecuencia distribuido en bandas de frecuencia específicas a un costo de cálculo relativamente bajo. Esta técnica se conoce como *Análisis Multirresolución*, o MRA.

Sea una familia de funciones con la forma:

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

Donde a y b son valores discretos y positivos, que dilatan y trasladan la función en el tiempo. Si se define $a = a_0^j$ con $a_0 \neq 1$ y j positivo; y también $b = kb_0 a_0^j$, con k entero positivo (Daubechies (1992)), la Ec. 4 se vuelve:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (5)$$

Donde a_0 y b_0 dependen del tipo de Wavelet. $\psi(t)$ se conoce como *Wavelet Madre*. En este trabajo se utilizará una Wavelet diádica, lo que significa que $a_0 = 2$ y $b_0 = 1$, resultando en:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} t - k) \quad (6)$$

Como detalla Farge (1992), para ser llamada "Wavelet", una función tiene que ser *admisible*, lo cual para una función integrable significa que su valor medio debe ser nulo. En consecuencia, si operamos de la misma forma en que trabajan las transformadas de ventana, al multiplicar (o convolucionar) la señal a analizar y la Wavelet, suprimiríamos las componentes de baja frecuencia; comportándose como un filtro pasa alto, ya que el hecho de no tener valor medio cero implica una componente de continua nula, o inexistencia de componentes de frecuencia cero. Para evitar la pérdida de información, es necesaria una función adicional: La *función escala*.

Al igual que una Wavelet, obedece una ecuación de la siguiente forma:

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j} t - k) \quad (7)$$

Definimos a la *Transformada Wavelet Discreta* (TWD) de una señal $f(t)$ como:

$$DWT_{\psi_{j,k}}[f(t)] = a_0^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a_0^{-j} t - kb_0) dt \quad (8)$$

Para cada combinación de dilataciones y traslaciones con j (*nivel de detalle*) y k , se forma un conjunto de valores conocidos como *coeficientes de detalle* ($d_{j,k}$), los cuales contienen la información de alta frecuencia de la señal $f(t)$. Basta con observar la Ec. 8 para decir que se trata de un filtrado de la señal original mediante un filtro-pasa alto. El resto de la información de baja frecuencia se obtiene de la misma forma a partir de la función escala (Ec. 7), cuyo resultado conforma una secuencia de valores conocido como *coeficientes de aproximación* ($a_{j,k}$).

Mallat (2008) visualizó la conveniencia de tratar la TWD y el MRA como un *banco de filtros* donde la dilatación de las Wavelets y la función escala se podrían lograr por subsamplado a medida que se calculaban las aproximaciones de mayor nivel. Ya que cada aproximación reduce a la mitad el ancho de banda de la señal, sólo la mitad de las muestras es necesaria en cada nuevo nivel. Esto reduce el costo de cálculo de manera exponencial mientras se avanza en niveles más altos.

5. SELECCIÓN DE LA WAVELET MADRE

El análisis por Wavelet se basa en el uso de filtros espejo en cuadratura (QMF), que conocemos individualmente como "función Wavelet", y "función de escala"; las características de dicho filtro y cómo se comporta para diferentes anchos de bandas, es lo que asociamos a las características de la Wavelet Madre. Es decir que al definirla (quedando simultáneamente definida la función de escala), obtendremos una disposición particular de la información frecuencial en el MRA. A los fines prácticos, resulta entonces imperativo utilizar una Wavelet apropiada para el tipo de señal a analizar y la singularidad que deseamos detectar, para así obtener una información más clara, rápida, y contundente.

En este trabajo, la selección de la Wavelet Madre más apropiada para detectar el MI se fundamentó mediante herramientas estadístico-descriptivas. A continuación se detalla este proceso.

5.1. Wavelets a considerar

Existe una enorme cantidad de Wavelets utilizables para el MRA; y de hecho, es posible crear un nuevo tipo de Wavelet siempre que se cumplan con los requisitos matemáticos. Las Wavelets consideradas en nuestro estudio fueron: *bior1.1*, *bior1.3*, *bior1.5*, *bior2.2*, *bior2.4*, *bior2.6*, *bior2.8*, *bior3.1*, *bior3.3*, *bior3.5*, *bior3.7*, *bior4.4*, *bior5.5*, *bior6.8*, *coif1*, *coif2*, *coif3*, *coif4*, *coif5*, *db1*, *db2*, *db3*, *db4*, *db5*, *db6*, *db7*, *db8*, *sym1*, *sym2*, *sym3*, *sym4*, *sym5*, *sym6*, *sym7*, *sym8*.

El análisis se realizó hasta el nivel de detalle **número 8**.

5.2. Método de ponderación

Para poder evaluar el mérito de uso de cada tipo de Wavelet en forma objetiva, se utilizó una medida estadística siguiendo la experiencia de [Quandt et al. \(2015\)](#). En concreto, se utilizó el Coeficiente de Correlación de Pearson (CCPe):

$$CCPe_{f_1, f_2} = \frac{COV(f_1, f_2)}{\sigma_{f_1} \sigma_{f_2}}$$

La técnica propuesta implica analizar la correlación entre los coeficientes de detalle producidos por el análisis Wavelet y una señal artificial que representa el resultado ideal esperado. La medida obtenida de este proceso indica cuál es el tipo de Wavelet que ofrece la mejor visibilidad del evento (en términos de las propiedades de forma de las señales). Dicho proceso comienza con la definición de una función *Regla* para evaluar a cada familia de Wavelet, y una *Señal Patrón* a analizar que corresponde a un evento de modo isla conocido.

5.2.1. La Señal Patrón

Una señal muestreada de un ensayo real de MI inducido se utilizó como señal patrón. Se seleccionó el evento de MI más desafiante ensayado: no puede detectarse por umbral de tensión, frecuencia, fase, o distorsión.

El ensayo fue realizado en el Departamento de Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (Centro Atómico Constituyentes) por el Ing. Daniel Raggio y el Dr. Ing. Hernán Socolovsky, bajo las siguientes condiciones de laboratorio:

- Frecuencia de red: $50Hz$
- Factor de calidad Q_f de la carga: 2 (según norma VDE-AR-N-4105)
- Potencia de ensayo: $2kW$ (controlada)
- Frecuencia de muestreo: $50kHz$

El resultado es la sig. señal de tensión en el PCC, con desconexión de la red en la muestra 5000:

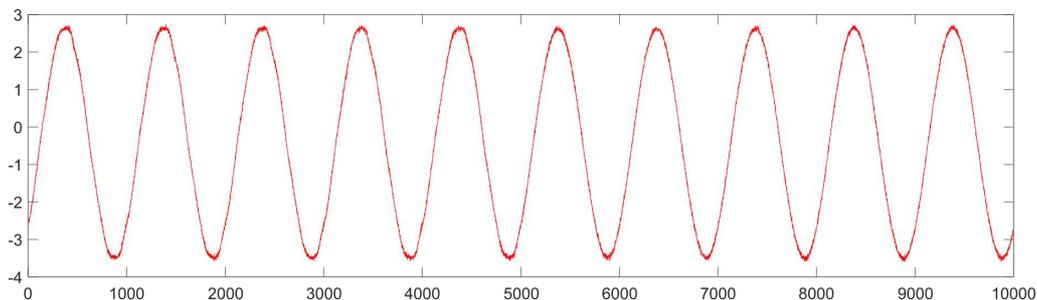


Figura 1: Señal Patrón.

5.2.2. La Señal Regla

Se trata de un pulso de amplitud unitaria, cuyo ciclo de trabajo es del 50 % como la ilustrada en la siguiente figura:

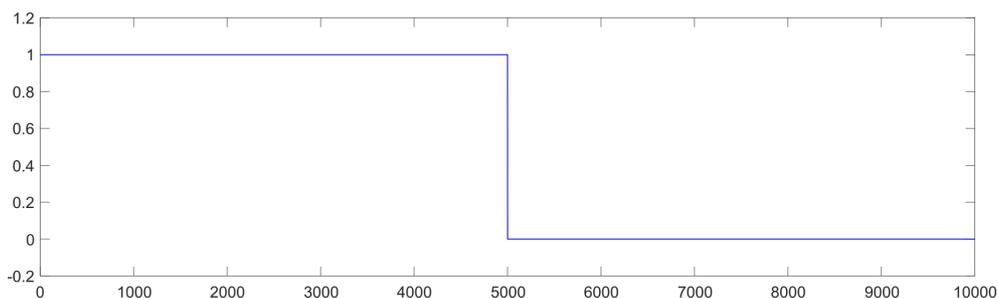


Figura 2: Señal Regla.

La misma es una idealización **extrema** del resultado esperado de una análisis Wavelet, donde la existencia de red se corresponde al área de la señal regla donde su valor es 1, y la ausencia de red donde es 0. El punto de transición de 1 a 0 en la Fig. 2 (muestra 5000) simboliza el instante en que la red desaparece y acontece el MI.

5.2.3. El Proceso de Evaluación

Para entender el proceso en forma integral, a continuación se detalla el paso a paso en que se preparan las muestras y el análisis Wavelet, del que posteriormente se confecciona el estudio de mérito comparativo para cada familia de Wavelet propuesta.

1. Definición de la familia de Wavelets y sus coeficientes de filtros asociados.
2. Análisis Multirresolución.
3. Se aplica el valor absoluto a los coeficientes de detalle en todos los niveles y se recorta el 15 % de la punta y cola de los mismos. (Importante: tener en cuenta esto al interpretar los resultados de los experimentos) Esto limita la incidencia de los valores de frontera resultantes de una convolución.
4. Normalización a valor unitario de los coeficientes de detalle en todos los niveles.
5. Síntesis de la señal regla a utilizar para cada nivel de detalle (la señal regla debe coincidir en cantidad de muestras con la señal a correlacionar)
6. Cálculo del Coeficiente de Correlación de Pearson para cada nivel.
7. Repetir desde el punto 1 para otra Wavelet.

La siguiente imagen ilustra de forma simplificada los pasos anteriores:

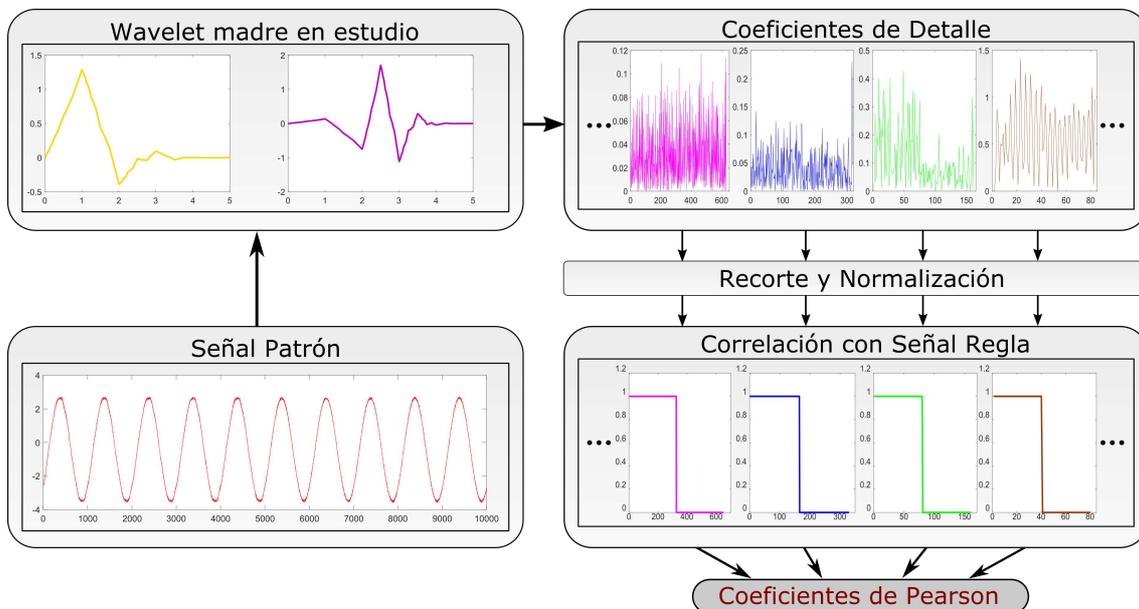


Figura 3: Secuencia de obtención de los CCPE.

5.3. Wavelet seleccionada

A partir del proceso explicado anteriormente se pudo confeccionar la Tabla 1, en la cual se visualizan los CCPE (valor absoluto) calculados para cada tipo de Wavelet y nivel de detalle.

En primer lugar, los valores más altos se obtuvieron en los niveles de detalle 6 y 7. Esto quiere decir que la información de la pérdida de la tensión de red puede detectarse entre los 390Hz y los 1562Hz , aproximadamente. Sobre la Tabla 1, los diez valores más altos para el nivel de detalle 6 han sido marcados en diferentes tonos de azul (azul más oscuro significa un valor más alto); mientras que para el nivel de detalle 7 se utilizó el color naranja, siguiendo el mismo criterio. Esto nos permite visualizar fácilmente una concentración homogénea de buenos resultados para las familias de Coiflet y Daubechies. En segundo lugar, las familias con menores momentos de desvanecimiento poseen filtros de deconstrucción con menor cantidad de puntos (y aminoran la cantidad de cuentas), por lo que son preferibles Wavelets cuya correlación sea

Familia \ Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8
db2	0.0227	0.0129	0.0165	0.0037	0.1116	0.0945	0.0280	0.1640
db3	0.0169	0.0290	0.0294	0.0863	0.1815	0.4798	0.0988	0.0883
db4	0.0137	0.0186	0.0098	0.0641	0.1419	0.5508	0.2212	0.1055
db5	0.0172	0.0222	0.0191	0.0596	0.1385	0.6027	0.5258	0.2432
db6	0.0168	0.0386	0.0262	0.1067	0.0243	0.5634	0.6773	0.0330
db7	0.0166	0.0368	0.0126	0.0472	0.0084	0.4778	0.7261	0.2678
db8	0.0146	0.0248	0.0207	0.0787	0.0966	0.4761	0.7213	0.1016
coif1	0.0169	0.0181	0.0251	0.0665	0.1262	0.1180	0.0949	0.0204
coif2	0.0189	0.0252	0.0048	0.0641	0.0921	0.5476	0.3538	0.1115
coif3	0.0181	0.0269	0.0020	0.0441	0.0353	0.5517	0.6983	0.0459
coif4	0.0184	0.0286	0.0205	0.0549	0.0717	0.5324	0.7182	0.0160
coif5	0.0191	0.0309	0.0193	0.1152	0.1236	0.5211	0.7386	0.0567
sym1	0.0130	0.0377	0.0406	0.0249	0.0013	0.0016	0.0253	0.1162
sym2	0.0227	0.0129	0.0165	0.0037	0.1116	0.0945	0.0280	0.1640
sym3	0.0169	0.0290	0.0294	0.0863	0.1815	0.4798	0.0988	0.0883
sym4	0.0183	0.0238	0.0007	0.0743	0.1699	0.5594	0.3769	0.1955
sym5	0.0148	0.0157	0.0007	0.0983	0.0776	0.6212	0.5319	0.2097
sym6	0.0185	0.0236	0.0161	0.0441	0.0785	0.5222	0.7101	0.1583
sym7	0.0161	0.0147	0.0663	0.0463	0.0567	0.5268	0.6619	0.2906
sym8	0.0189	0.0339	0.0247	0.0681	0.0499	0.5078	0.7064	0.0255
bior3.1	0.0145	0.0159	0.0360	0.0259	0.1098	0.0915	0.4084	0.2856
bior3.3	0.0146	0.0202	0.0290	0.0667	0.0843	0.2765	0.5323	0.2971
bior3.5	0.0146	0.0162	0.0038	0.1042	0.1124	0.3521	0.5783	0.1940
bior3.7	0.0144	0.0102	0.0358	0.0601	0.0437	0.3844	0.5734	0.0590
bior4.4	0.0187	0.0327	0.0011	0.0353	0.0726	0.5365	0.4709	0.0352
bior5.5	0.0201	0.0125	0.0036	0.0412	0.0565	0.5409	0.6639	0.0364
bior6.8	0.0178	0.0315	0.0346	0.0754	0.0057	0.5168	0.7195	0.0326

Tabla 1: Comparativa de correlación para diferentes Wavelets.

alta en niveles de detalle bajos. Por ejemplo, frente similares desempeños, es preferible utilizar una Wavelet **db4** frente a una **db8**, ya que la primera conlleva una cantidad considerablemente menor de cuentas durante la convolución discreta implicada en el análisis de Wavelet.

A partir de estas apreciaciones, la **coif5** y **db6** fueron las utilizadas en el resto del análisis de este trabajo por presentar una buena relación entre el costo computacional y su desempeño de detección, de acuerdo a los criterios anteriormente explicados.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para comprobar la efectividad de la transformada Wavelet como herramienta de detección, se repitió el ensayo de MI con una marca diferente de inversor. Esta vez, el evento de modo isla sucede en la muestra 3000. La tensión en el PCC para este ensayo se ilustra en la Fig. 4:

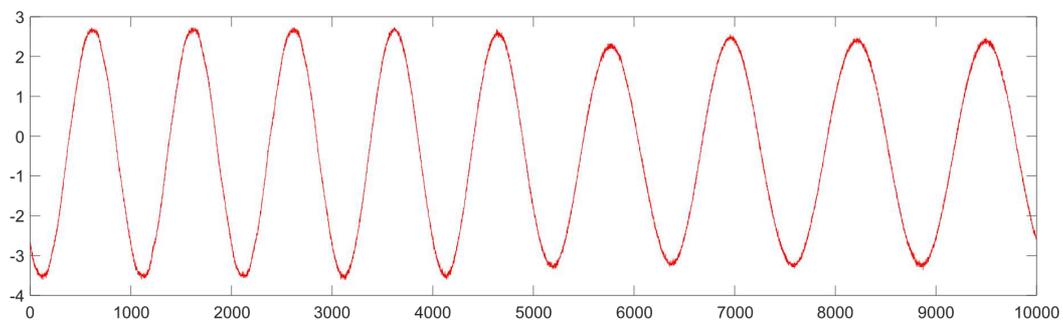


Figura 4: Tensión en el PCC para segunda experiencia de modo isla.

Los coeficientes de detalle obtenidos en el MRA para los niveles 6 y 7, se visualizan en la Fig. 5.

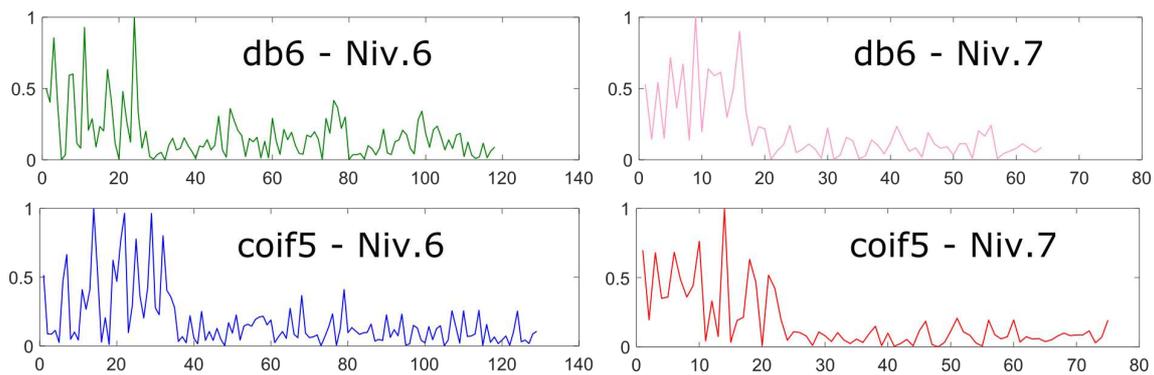


Figura 5: Coeficientes de detalle para *coif5* y *db6* para el segundo ensayo.

La Fig. 5 muestra con claridad el momento de la pérdida de la tensión de red. En este ensayo, el efecto del modo isla sobre el PCC fue más evidente, al punto de poder percibirse en forma visual una variación de la frecuencia. En rigor de verdad, la frecuencia pasa de $50,05\text{Hz}$ (previo a la desconexión) a $47,9\text{Hz}$ en el segundo ciclo y a $42,33\text{Hz}$ en el tercero; efecto que sería detectado por métodos convencionales (sub-frecuencia). Sin embargo, el método de Wavelet es de visualización instantánea y puede computarse en menos de un ciclo de la red. Adicionalmente, este desplazamiento de frecuencia demuestra una importante fortaleza del procesamiento por Wavelet: Es independiente de la frecuencia nominal de funcionamiento del sistema, y no se ve alterado por desplazamientos de frecuencia considerablemente rápidos. Los transitorios de tensión que también llegan a apreciarse en el PCC son virtualmente invisibles en los niveles de detalle observados, y demuestra la tolerancia del MRA ante variaciones suaves en la tensión de red sin perder capacidad de detección del MI.

Un tercer ensayo fue realizado para corroborar los resultados anteriores. En la Fig. 6 se muestra la señal de tensión en el PCC (rojo), corriente de inversor hacia la red (azul), y en verde la señal que desconecta al equipo de la red (inducido) a partir de la cual se considera el inicio del evento de modo isla (muestra 2747). También se puede apreciar un considerable periodo de tiempo hasta que actúan los mecanismos de desconexión del inversor (recién en la muestra 5050).

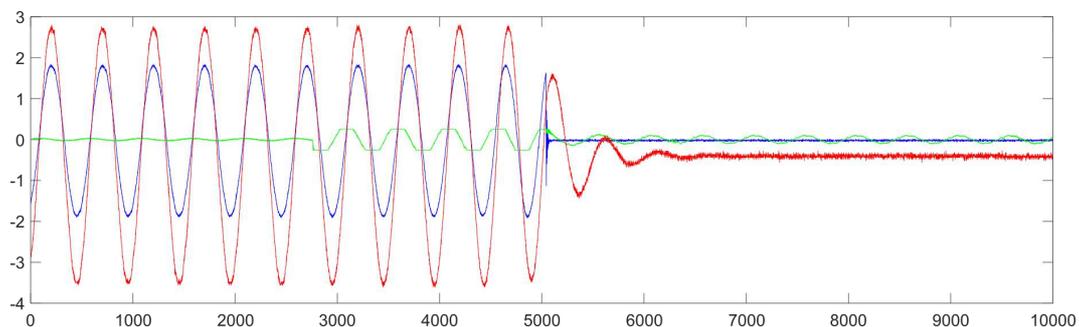


Figura 6: Tercer ensayo de modo isla.

Para aumentar el span de tiempo de registro del equipo, este ensayo se muestreó a 25kHz . Por lo tanto los niveles de detalle que nos interesan ahora son el nivel 5 y 6. La Fig. 7 muestra los resultados del MRA. En esta figura, se aprecia el cambio de energía en los coeficientes de detalle antes y después del evento de MI, y un pico central angosto que denota la caída abrupta de la tensión en el PCC.

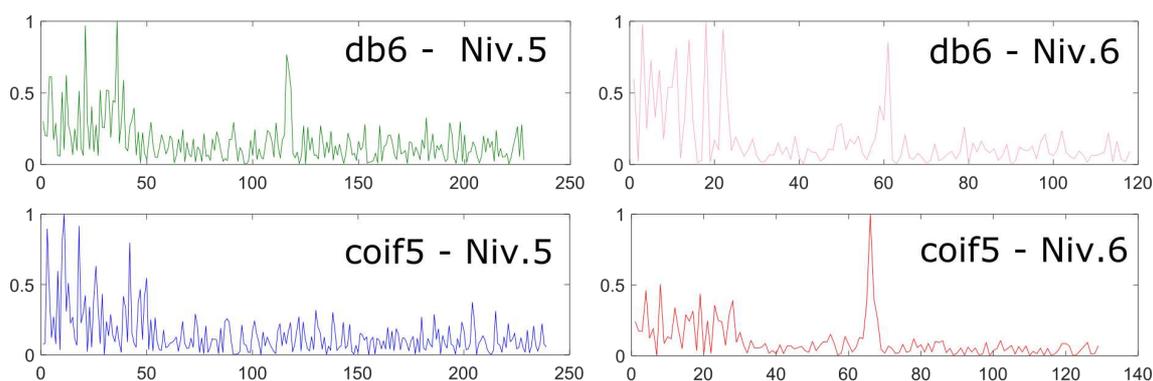


Figura 7: Coeficientes de detalle para *coif5* y *db6* del tercer ensayo.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A partir de la experiencia de este trabajo, pudieron apreciarse las potencialidades de la Transformada Wavelet aplicada con una visión práctica. De esto podemos destacar una muy compleja teoría que deriva en cálculos de simple implementación y con resultados altamente satisfactorios. Las alternativas de aplicación de Wavelet para la problemática planteada son muy variadas y pueden combinarse con otros métodos.

Los próximos pasos en el desarrollo de esta técnica consisten en producir herramientas robustas para la evaluación de los coeficientes de detalle que el MRA ofrece; es decir, métodos matemáticos descriptivos que permitan implementar una correcta y veloz interpretación de la información que los coeficientes de detalle proyectan.

REFERENCIAS

- Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. SIAM, 1992.
- Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 24:395–458, 1992.
- I.E.A. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems. *International Energy Agency (Task V - Report IEA-PVPS T5-09)*, 2002.
- Kim M.S., Haider R., Cho G.J., Kim C.H., Won C.Y., y Chai J.S. Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems. *Energies - Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2019.
- Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 2008.
- Quandt V.I., Pacola E.R., Pichorim S.F., Gamba H.R., y Sovierzoski M.A. Pulmonary crackle characterization: approaches in the use of discrete wavelet transform regarding border effect, mother-wavelet selection, and subband reduction. *Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica*, 31, 2015.
- Raj R. y Praveen M. Survey of islanding detection techniques for grid connected photovoltaic inverters. *International Journal of Computer Science and Network*, 6, 2017.
- Soares L., de Oliveira H., Cintra R., y de Souza R.C. Uncertainty gabor principle and isoresolution wavelets. *XX Simpósio Bras. de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brazil*, 2003.
- Sundar D. y Kumaran M. A comparative review of islanding detection schemes in distributed generation systems. *International Journal or Renewable Energy Research*, 5, 2015.