

DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DE POTENCIA UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET EMPÍRICA

Jesús Rubén Azor Montoya¹

Universidad de Mendoza, jesus.azor@um.edu.ar

Resumen: Con el objeto de garantizar un suministro eléctrico estable, seguro y eficiente, así como para mantener el funcionamiento óptimo de los equipos eléctricos y electrónicos en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y residenciales se ha dictado la norma IEEE Standard 1459-2000 que establece definiciones y métodos de medición para las cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones de operación. El presente trabajo establece una mecánica de trabajo que permite, a partir de una señal simulada compleja como las que se presentan en la práctica, descomponerla eficientemente mediante la Transformada Wavelet Empírica y desde allí calcular los citados índices. Dado que se cuenta con la señal original, es posible comparar los índices verdaderos con los obtenidos de la descomposición y así valorar los errores cometidos en su cálculo. Con esta propuesta se pretende desde las tareas de investigación en la Cátedra de Análisis de Señales, incorporar nuevas herramientas de procesamiento que permitan vincular los desarrollos teóricos con la realidad que el futuro profesional habrá de enfrentar. Además, se propone utilizar recursos disponibles en Internet y la utilización de softwares apropiados para internalizar los conceptos y promover aplicaciones, principalmente en trabajos de Tesis de Grado y Posgrado.

Palabras claves: Índices de Calidad de Potencia, Norma IEEE Standard 1459/2000, Transformada Wavelet Empírica

INTRODUCCIÓN

Los Índices de Calidad de Potencia (*Power Quality Indices*) son parámetros utilizados para medir y evaluar la calidad de la energía suministrada a un sistema eléctrico o a un equipo específico. Estos índices proporcionan información sobre la estabilidad, la eficiencia y la confiabilidad de la energía eléctrica en términos de su forma de onda, tensión, corriente y otros aspectos relacionados.

Ellos son herramientas importantes para identificar y cuantificar problemas y anomalías en la calidad de la energía, como armónicos, fluctuaciones de tensión, desequilibrios de fase, interrupciones momentáneas, caídas de tensión, sobretensiones, entre otros. Estos

problemas pueden afectar negativamente el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos sensibles, causando mal funcionamiento, daños o una vida útil reducida. Así mismo, proporcionan información valiosa a los operadores de sistemas eléctricos y a los usuarios finales para tomar medidas correctivas y mejorar la calidad de la energía eléctrica suministrada. La monitorización constante de estos índices ayuda a prevenir problemas y a mantener la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

Hay un estándar internacional llamado Norma IEEE Std. 1459-2000 promovida desde dicha institución que recibe su nombre desde el inglés como "*IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*" (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000; Mosquera, 2019).

La misma establece definiciones y métodos de medición para las cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones de operación, incluidas las condiciones no sinusoidales y desbalanceadas que a menudo se encuentran en sistemas eléctricos industriales y comerciales. La norma se centra en proporcionar una base común y precisa para la medición de energía eléctrica en estas condiciones más complejas. Algunos de los aspectos cubiertos por la norma IEEE Std. 1459-2000 incluyen:

- Definiciones de cantidades de energía eléctrica: La norma establece definiciones claras para términos relacionados con la medición de energía eléctrica, como potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia, distorsión armónica, etc.
- Métodos de medición: Proporciona directrices sobre cómo medir estas cantidades de energía eléctrica en diferentes condiciones, incluidas las no sinusoidales y desbalanceadas.
- Condiciones de operación: La norma aborda el funcionamiento de los sistemas eléctricos en condiciones balanceadas y desbalanceadas, y cómo medir la energía en estas situaciones.
- Definiciones de señales no sinusoidales: Se enfoca en la medición de energía en sistemas donde las formas de onda de tensión y corriente no son sinusoidales, lo que puede ser común en sistemas electrónicos de potencia.

En resumen, la norma IEEE Std. 1459-2000 proporciona una guía estándar para la medición precisa y coherente de cantidades de energía

eléctrica en diferentes condiciones operativas, lo que es esencial para comprender y evaluar el comportamiento de sistemas eléctricos complejos.

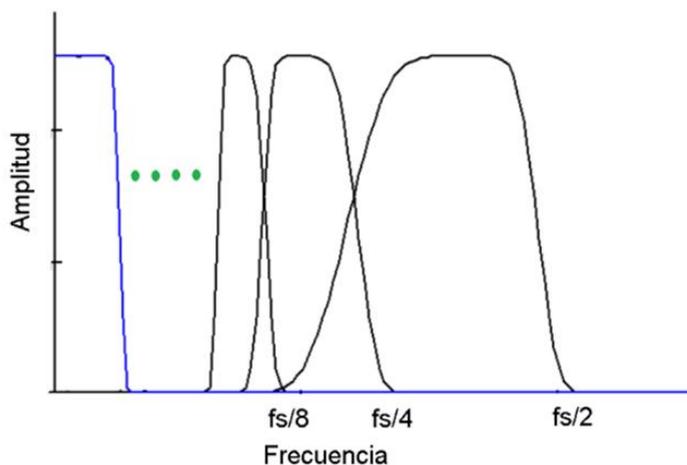
Materiales y métodos

EWT es un método de análisis de datos adaptivo que descompone una señal sin utilizar la “rigidez” de bases que proponen tanto la Transformada de Fourier (FT) como la Transformada Wavelet (WT). Esta transformada primero estima los componentes de frecuencia presentes en la señal dada, luego calcula los límites que encierran los más poderosos energéticamente y finalmente extrae los componentes oscilatorios conforme a los límites calculados (Azor, 2022; Giles, 2013;).

Al igual que la Transformada Wavelet (WT), se basa en la construcción de un conjunto de filtros pasa-banda, pero en este caso, circunscriptos a dónde se encuentre la información más relevante en el espectro de la señal. En la WT tradicional, los filtros pasa-banda presentan una respuesta en frecuencia como la mostrada en la Figura 1.

Figura 1

Respuesta en frecuencia del filtro pasa-banda (□, wavelets en negro) y paso-bajo (□ Escalante en azul) cubriendo la banda $[0 \text{ } fs/2]$ o equivalentemente $[0 \text{ } \square]$.

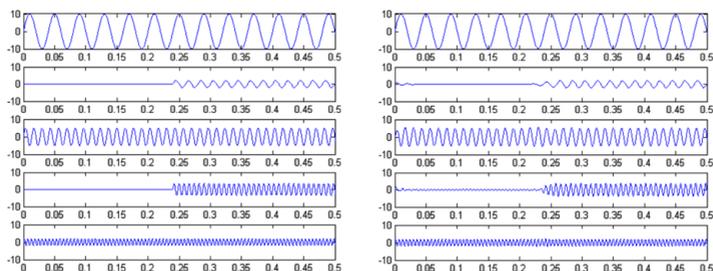


En cambio, en la EWT, se plantean filtros de Littlewood-Paley (Bahouri, 2019) asociados a los límites (*boundaries*) derivados de la Fast Fourier Transform (FFT) aplicada a la señal, más precisamente con los puntos de mayor energía de la misma. Esto se explicará más adelante.

De este modo, la EWT es una herramienta mucho más eficaz que la WT en la separación de modos en la señal en cuestión. Gilles, en su Toolbox (2019), suministra un paquete de funciones para el cálculo de la EWT y su análisis. En este trabajo se habrá de utilizar como entradas al algoritmo una señal de tensión y una de corriente que son simulaciones de casos posibles en un sistema de potencia monofásico, utilizada en el paper de Karthik, Umarikar, & Jain (2014) que se compone de cinco formas de onda, que se ven en la Figura 2, dadas a continuación:

Figura 2

A la derecha señal de tensión simulada, a la izquierda descomposición EWT de la misma.



Nota. Señal de tensión: 1) Senoide de 50 Hz, amplitud 10 V y fase 0° [0-0.50 s], 2.a) Senoide de 100 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.12-0.28 s], 2.b) Senoide de 100 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.37-0.50 s], 3) Senoide de 150 Hz, amplitud 5 V y fase 0° [0-0.37 s], 4) Senoide de 250 Hz, amplitud 3.5 V y fase 0° [0.12-0.50 s], 5.a) Senoide de 350 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0-0.28 s], 5.b) Senoide de 350 Hz, amplitud 2 V y fase 0° [0.37-0.50 s]. Señal de corriente: 1) Senoide de 50 Hz, amplitud 4 A y fase 30° [0-0.50 s], 2.a) Senoide de 100 Hz, amplitud 0.8 A y fase 60° [0.12-0.28 s], 2.b) Senoide de 100 Hz, amplitud 0.8 A y fase 60° [0.37-0.50 s], 3) Senoide de 150 Hz, amplitud 1.8 A y fase 48° [0-0.37 s], 4) Senoide de 250 Hz, amplitud 1.5 A y fase 86° [0.12-0.50 s], 5.a) Senoide de 350 Hz, amplitud 0.7 A y fase 75° [0-0.28 s], 5.b) Senoide de 350 Hz, amplitud 0.7 A y fase 75° [0.37-0.50 s]

Evidentemente las señales que surgen de la suma de estas cinco componentes, son no-estacionarias y un análisis con la Transformada de Fourier tradicional sería equivocado. Tanto la señal de tensión como la de corriente son muestreadas con una $F_s=5000$ muestras/s y conformarán sendas matrices, que para este caso tendrán $N=5000$ filas

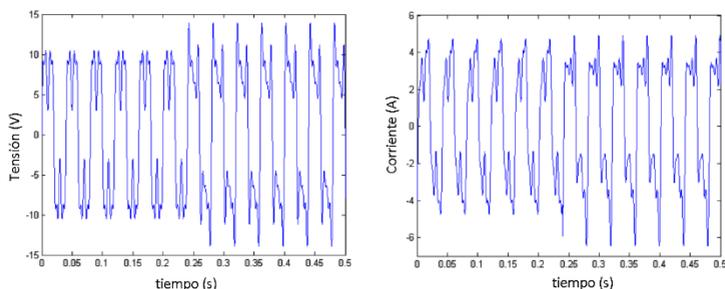
y $n=5$ columnas (cada una de ellas representa una de las 5 componentes).

Así estarán disponibles dos matrices $N \times n$, que se notarán como *corver* para las corrientes y *tenver* para las tensiones. Esto es para tener como referencia los valores de señal sin aplicar la descomposición EWT y de ese modo obtener los verdaderos indicadores de calidad de potencia para establecer errores cometidos con la utilización de la transformación.

Ahora, sumando las columnas de la matriz *tenver* se obtiene un vector de dimensión $N \times 1$ (que expresa la señal de tensión a analizar) que se incorporará como entrada al algoritmo EWT de Gilles (2013). Otro tanto se hace para hallar el vector de entrada correspondiente para la tensión a partir de la suma de las columnas de *corver*. Ambas señales se pueden ver en la Figura 3.

Figura 3

A la derecha señal de tensión simulada, a la izquierda descomposición EWT de la misma.



Con este procedimiento se logra la Transformación Wavelet Empírica de la señal de tensión en una nueva matriz que se notará con *tenewt*, donde cada columna es la descomposición EWT de la señal de tensión, del mismo modo se procede con la señal de corriente obteniendo la matriz *corewt*. Ambas matrices serán los insumos para obtener los indicadores de calidad de potencia.

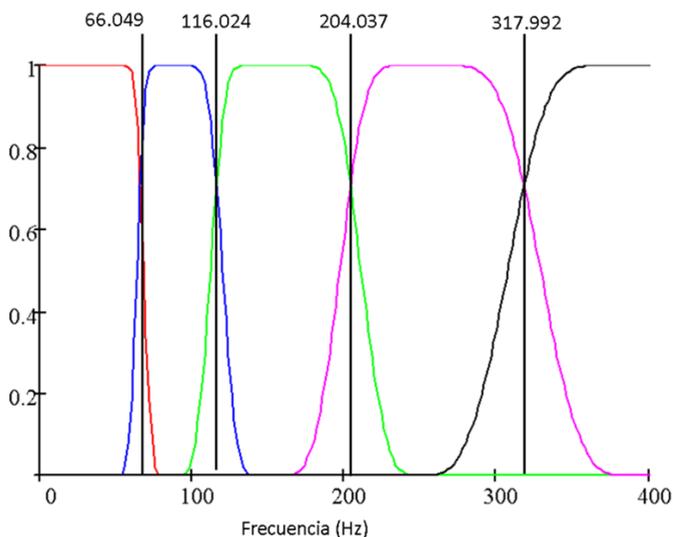
Ejecutado el algoritmo EWT de Gilles (2013), se podrá observar cómo forma los filtros de Littlewood-Paley a partir de la determinación de los

límites (boundaries) partiendo de la FFT de la señal para determinar las frecuencias en que son mayores energéticamente las señales (Figura 4).

A partir de este punto, mediante la utilización del Software Matlab™ (Mathwork) con el que está construido el Toolbox de Giles (2019), se determinan los Índices de Calidad de Potencia indicados por la norma IEEE Std. 1459-2000.

Figura 4

Respuesta en frecuencia de los filtros de Littlewood-Paley montados sobre las frecuencias de las componentes de las señales (50, 100, 150, 250 y 350 Hz).



RESULTADOS Y DISCUSIONES

Valor RMS de la corriente

Con el objeto de generalizar conceptos se definirán los índices $j=1\dots 5$ y $k=1\dots N$.

Para hallar el valor RMS de la corriente, la primera columna ($corewt_{1,k}$) corresponde a la fundamental y las restantes a las armónicas (Ecuaciones 1 a 3).

$$I_j = \sqrt{1/N \cdot \sum_k corewt(k, j)^2} \quad (1)$$

$$I_j = \sqrt{1/N \cdot \sum_k corewt(k, j)^2} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{corewt(:,1)^2 + I_H^2} = \sqrt{corewt(:,1)^2 + \sum_{j>1} corewt(:, j)^2} \quad (3)$$

Para hallar los valores exactos (correspondientes a las señales sin transformar, en la matriz $corver$) se realizan los cálculos anteriores reemplazando $corewt$ por $corver$. La diferencia para todos los índices permite calcular el error relativo cometido (Ecuación 4).

$$e = \frac{|Indice_{Verdadero} - Indice_{Calculado}|}{Indice_{Verdadero}} \quad (4)$$

Los resultados para la corriente se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Resultados de Índice verdadero y calculado para las diversas corrientes

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_H	I_{rms}
I	2.8275	0.4211	1.0964	0.7420	0.4466	1.4592	3.1818
Calculado							
I	2.8284	0.4308	1.0949	0.7397	0.4482	1.4603	3.1832
Verdadero							
Error	0.0003	0.0226	0.0013	0.0031	0.0036	0.0007	0.0004

Valor RMS de la tensión

Del mismo modo que en el punto anterior, surgen las Ecuaciones 5, 6 y 7:

$$V_{\bar{j}} = \sqrt{1/N \cdot \sum_k \text{tenewt}(k, j)^2} \quad (5)$$

$$V_H = \sqrt{\sum_{j=2}^5 V_j} \quad (6)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\text{tenewt}(:,1)^2 + V_H^2} = \sqrt{\text{tenewt}(:,1)^2 + \sum_{j>1} \text{tenewt}(:, j)^2} \quad (7)$$

Los resultados para la tensión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Resultados de V verdadero y calculado para las diversas tensiones

	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V _H	V _{rms}
V Calculado	7.0736	1.0725	3.0367	2.1667	1.2658	4.0828	8.1673
V Verdadero	7.0711	1.0770	3.0414	2.1575	1.2806	4.0872	8.1673
Error	0.0004	0.0042	0.0015	0.0042	0.0116	0.0011	0.0000

Distorsión armónica total (THD)

La distorsión armónica total de corriente y tensión está dada por las Ecuaciones 8 y 9:

$$I_{thd} = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^5 I_j}}{\sqrt{1/N \cdot \text{corewt}(:,1)}} \quad (8)$$

$$V_{thd} = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^5 V_j}}{\sqrt{1/N \cdot \text{newt}(:,1)}} \quad (9)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados de distorsión armónica total de corriente y tensión verdadero y calculado

	I_{thd}	V_{thd}
Calculado	0.5161	0.5772
Verdadero	0.5163	0.5780
Error	$3.9589 \cdot 10^{-4}$	0.0014

Potencia aparente

La potencia aparente de cada componente se define a través de la Ecuación 10

$$S_j = I_j \cdot V_j \quad (10)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4*Resultados de distorsión armónica total de corriente y tensión verdadero y calculado*

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S _H	S _{Total}
S	20.0005	0.4516	3.3294	1.6077	0.5653	5.9541	25.9545
Calculado							
S	20.0000	0.4640	3.3300	1.5960	0.5740	5.9640	25.9640
Verdadero							
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0017	0.0004

Potencia activa

La potencia activa de cada componente se define a través de la Ecuación 11

$$P_j = S_j \cdot \cos(\varphi_j) \quad (11)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5*Resultados de potencia activa verdadera y calculada*

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P _H	P _{Total}
P	17.3209	0.2258	2.2278	0.1122	0.1463	2.7121	20.0330
Calculado							
P	17.3205	0.2320	2.2282	0.1113	0.1486	2.7201	20.0406
Verdadero							
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0030	0.0004

Potencia reactiva

La potencia reactiva de cada componente se define a través de la Ecuación 12

$$Q_j = S_j \cdot \sin(\varphi_j) \quad (12)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados de potencia reactiva verdadera y calculada

	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q _{Total}
Q	10.0002	0.3911	2.4742	1.6038	0.5460	15.0154
Calculado						
Q	10.0000	0.4018	2.4747	1.5921	0.5544	15.0231
Verdadero						
Error	0.0000	0.0267	0.0002	0.0074	0.0151	0.0005

La *potencia de distorsión de corriente* y la *potencia de distorsión de tensión* se pueden definir a través de las Ecuación 13 y 14 respectivamente

$$D_I = V \cdot I_H \quad (13)$$

$$D_V = V_H \cdot I_1 \quad (14)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Resultados de potencia de distorsión de corriente y la potencia de distorsión de tensión verdadera y calculada

	D_I	D_V
Calculado	10.3297	11.5439
Verdadero	10.3259	11.5603
Error	$3.6051 \cdot 10^{-4}$	0.0014

La *potencia aparente de armónicas* y la *potencia de distorsión de armónicas* se pueden definir a través de las Ecuación 15 y 16 respectivamente

$$S_{HH} = V_H \cdot I_H \quad (15)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (16)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de potencia aparente de armónicas y la potencia de distorsión de armónicas verdadera y calculada

	S_{HH}	D_H
Calculado	5.9577	5.3046
Verdadero	5.9685	5.3127

Error	0.0018	0.0015
-------	--------	--------

El *factor de potencia total* es la relación entre la potencia activa total y la potencia aparente total y queda definida por la Ecuación 17

$$PF = \frac{P}{S} \tag{17}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de factor de potencia total verdadero y calculado

	PF
Calculado	0.7718
Verdadero	0.7719
Error	$1.5419 \cdot 10^{-5}$

Para medir la *calidad de la potencia transmitida*, especialmente el comportamiento de oscilación, Willems (2004) propuso el uso del *factor de potencia de oscilación*, dado por la Ecuación 18

$$PF_{osc} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + 0.5 \cdot S^2}} = \frac{PF}{\sqrt{0.5 + PF^2}} \tag{18}$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados de factor de potencia de oscilación verdadero y calculado

	PF _{osc}
Calculado	0.7595
Verdadero	0.7595
Error	7.0358.10 ⁻⁶

Contaminación Armónica

La contaminación armónica se define como la relación entre la potencia aparente no fundamental y la potencia aparente fundamental. Queda definida por la Ecuación 19

$$HP = \frac{S_N}{S_1} \quad (19)$$

Los valores calculados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Resultados de contaminación armónica verdadera y calculada

	HP
Calculado	0.8256
Verdadero	0.8256

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se puede observar el grado de exactitud que tiene la Transformada Wavelet Empírica en descomponer las distintas armónicas de las señales de tensión y corriente para evaluar los Índices de Calidad de Potencia.

Del mismo modo, se puede apreciar que la eficiencia de cálculo respecto a la Transformada Wavelet tradicional está en la concentración de EWT en los segmentos de mayor energía y generando filtros ad hoc para ellos.

Además, a lo largo de la exposición se aprecia un mecanismo replicable que permite verificar todo lo calculado y contrastarlo con las herramientas propuestas.

Finalmente, el trabajar sobre estos conceptos permite complementar prácticamente el desarrollo teórico que promueve la comprensión significativa de la Transformada Wavelet Empírica en un curso de Análisis de Señales avanzado.

REFERENCIAS

- Azor, J. R. (2022). Recursos computacionales para la comprensión de la Transformada Wavelet Empírica (EWT). In J. E. Calderón, J. Huespe & E. Anzoise (Ed.) *Investigación y educación en ciencias de la ingeniería* (Vol. 3, 2da ed. ampliada), pp. 139-152. Universidad Tecnológica Nacional.
- Bahouri, H. (2019). The Littlewood-Paley theory: a common thread of many works in nonlinear analysis. *EMS Newsletter*, 112, 15-23. DOI 10.4171/NEWS/112/4.
- Gilles, J. (2013). Empirical Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(16), 3999-4010. DOI: 10.1109/TSP.2013.2265222
- Gilles, J. (2025). Empirical Wavelet Transforms Toolbox. *MATLAB Central File Exchange*. Recuperado 11 junio, 2025 de https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42141-empirical-wavelet-transforms?s_tid=prof_contriblnk
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2000). *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-*

- Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions* (Norma number IEEE Std. 1459-2000). Doi: 10.1109/IEEESTD.2000.93398.
- Karthik, T., Umarikar A. C., & Jain, T. (2014). Empirical wavelet transform based single phase power quality indices. *2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)* (pp. 1-6). Curran Associates. DOI: 10.1109/NPSC34096.2014.
- Mosquera, D. (2019). Análisis detallado del Standard IEEE 1459-2010 para sistemas eléctricos monofásicos lineales y no lineales. *Revista Vínculos*, 16(2), 327-332. DOI:10.14483/2322939X.16661
- Willems, J. L. (2004). Reflections on Apparent Power and Power Factor in Nonsinusoidal and Polyphase Situations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2), 835-840. Doi: 10.1109/TPWRD.2003.823182.

* * *