

ESTIMACIÓN DE MODOS DE OSCILACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

ESTIMATION OF OSCILLATION MODES IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Johinner Mauricio Sanabria Villamizar

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
al2212801004@azc.uam.mx

Irvin López García

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
ilg@azc.uam.mx

Francisco Beltrán Carbajal

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
fbeltran@azc.uam.mx

Recepción: 29/noviembre/2022

Aceptación: 22/diciembre/2022

Resumen

Las señales no-lineales y no-estacionarias han venido penetrando los sistemas eléctricos de potencia debido a la aparición de nuevas tecnologías que llevan consigo la utilización de electrónica. Como consecuencia, el criterio de calidad de potencia se ha tenido que adaptar a las nuevas condiciones de los sistemas eléctricos y esto ha llevado a la necesidad de buscar nuevas metodologías de análisis de las señales adquiridas. En este documento se presenta una revisión sobre los métodos de análisis que se han venido implementando en el procesamiento de señales en sistemas eléctricos. Para este fin se exploró la aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang, exponiendo cada una de las cualidades de las técnicas. Para validar la metodología se propusieron señales sintéticas con características que describen de manera adecuada los comportamientos en estos sistemas. Además, se realizó el análisis para una señal de corriente proveniente de un sistema de potencia con estas características.

Palabras Clave: Armónicos, estimación, oscilaciones, transformada de Hilbert-Huang.

Abstract

Non-linear and non-stationary signals have been penetrating electrical power systems due to the appearance of new technologies that involve the use of electronics. Consequently, the power quality criterion has had to be adapted to the new conditions of electrical systems and this has led to the need to search for new methodologies for analyzing the signals obtained. This document presents a review of the analysis methods that have been implemented in signal processing in electrical systems. To this end, the application of the Hilbert-Huang Transform was explored, exposing each of the qualities of the techniques. To validate the methodology, synthetic signals with characteristics that adequately describe the behaviors in these systems were proposed. In addition, the analysis was carried out for a current signal from a power system with these characteristics.

Keywords: *Estimation, harmonics, Hilbert-Huang transform, oscillations.*

1. Introducción

En los sistemas eléctricos modernos, monitorear y controlar la calidad de la energía (PQ) son preocupaciones importantes tanto para las empresas de servicios públicos como para los usuarios [Bíscaro, 2015]. En los últimos años, el creciente número de cargas no lineales, las operaciones de conmutación aleatoria de grandes cargas eléctricas y el amplio uso de dispositivos electrónicos de potencia se han convertido en las principales fuentes de perturbaciones en la forma de onda transmitida, por ejemplo, transitorios, interrupciones, huecos, distorsión armónica e interarmónicos [Sanabria, 2019]. La estimación precisa de las perturbaciones en los sistemas de energía eléctrica puede ayudar a los diseñadores de sistemas a comprender las causas subyacentes de las perturbaciones para especificar el equipo adecuado para proteger los procesos críticos y conocer el estado del sistema de energía en el momento de la falla. Generalmente, la detección, localización y clasificación de las perturbaciones de PQ, así como la cuantificación de las distorsiones de potencia, se basan principalmente en la monitorización continua de tensión, corriente y potencia (índices de PQ, PQI) [Yu, 2021], [Sanabria, 2021]. Los eventos en los sistemas de energía eléctrica están asociados con transitorios, y las

técnicas de procesamiento de señales (SP) juegan un papel vital en la extracción de características asociadas con perturbaciones. Las características y parámetros extraídos después de aplicar técnicas de procesamiento de señales se utilizan para establecer umbrales para clasificar las fallas del sistema eléctrico y las diferentes perturbaciones del sistema eléctrico. Estos umbrales se establecen después de un estudio completo del sistema en consideración. Por lo tanto, cualquier variación en el sistema, como la variación de capacidad de las fuentes de energía renovable (FER), puede provocar un disparo falso [Shaik, 2022], [Li, 2020]. Claramente, estas situaciones exhiben fuertes propiedades no estacionarias en las formas de onda de voltaje y corriente, lo que hace que el análisis de PQ sea una tarea más difícil que en el pasado [Sanabria, 2022].

La técnica SP más común es la Transformada Rápida de Fourier de tiempo corto (FFT), que solo puede brindar resultados precisos en condiciones de estado estable, donde las magnitudes y frecuencias de los componentes espectrales de las señales de voltaje y corriente son estables dentro de un período determinado. Al analizar señales no estacionarias, pueden aparecer fugas espectrales graves en los espectros FFT [Silveira, 2009]. La transformada de Wavelet puede proporcionar un resultado de análisis PQ más preciso que FFT cuando se consideran señales no estacionarias. Sin embargo, los coeficientes (descomposición de la señal) se obtienen utilizando el WT en una ventana de tiempo de 0.2 s, lo que limita su aplicación para la detección rápida de transitorios de PQ. En general, las técnicas clásicas se basan en el supuesto de que la señal de interés puede expresarse precisamente en términos de la suma de varias funciones básicas cuya forma, por supuesto, debe definirse a priori de acuerdo con la información disponible sobre la señal [Antonino, 2009]. Como consecuencia, la señal está restringida estacionalmente para coincidir con la definición del modelo, lo que impide una descripción precisa de los transitorios y perturbaciones del sistema. La Transformada de Hilbert Huang (HHT) propone una solución a los problemas antes mencionados, teniendo la capacidad de analizar señales no lineales y no estacionarias de manera eficiente [Huang, 2014]. El análisis HHT permite descomponer la señal de interés en oscilaciones elementales que exhiben

diferentes frecuencias, intrínsecamente determinadas, siguiendo la evolución de la señal de entrada.

Este artículo tiene como objetivo mostrar los diferentes casos de estudio que permiten encontrar soluciones de estimación de parámetros oscilatorios utilizando la transformada de Hilbert Huang. Además, con la pretensión de desarrollar una estrategia y metodología de análisis capaz de describir las características de comportamiento de una señal transmitida en el dominio tiempo-frecuencia, basado en la HHT.

2. Métodos

La transformada de Hilbert-Huang de una función $x(t)$ es un concepto presentado por Norden E. Huang en [Huang, 1998]. El HHT se creó para lograr analizar señales de naturaleza no estacionaria y no lineal, esta característica ha logrado que su aplicación se ha extendido a muchos campos de la ingeniería. La HHT consta de dos partes importantes: Descomposición Empírica de Modos (EMD) y la Transformada de Hilbert (HT).

El objetivo del método de Descomposición Empírica Modal (EMD) es descomponer la señal no lineal y no estacionaria $x(t)$ en una suma finita de modos independientes llamados Función Intrínseca de Modos (IMF). Los IMFs se obtienen de la señal original y satisfacen dos condiciones [Wu, 2009]:

- El número de cruces extremos y el número de cruces por cero deben ser iguales o diferentes como máximo en uno.
- En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos locales y la envolvente definida por los mínimos locales es cero.

El algoritmo EMD (Tabla 1) para la señal $x(t)$ se puede resumir de esta manera [Huang, 1998], [Li, 2016]: La transformada de Hilbert nace como solución al problema de funciones holomórficas, desarrollada por David Hilbert en 1905. Esta transformada define la convolución de una señal $x(t)$ y $1/(\pi t)$. De otra manera, se puede definir como la respuesta de la señal $x(t)$ al impulso de $1/(\pi t)$ [Feldman, 2011].

Tabla 1 Algoritmo de Descomposición Empírica Modal (EMD).

Algoritmo 1
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar todos los extremos (máximos y mínimos) en $x(t)$. • Calcular la envolvente superior $e_u(t)$ y la envolvente inferior $e_l(t)$ por interpolación (splines cúbicos). • Determinar la media local como $m(t) = (e_u(t) + e_l(t))/2$. • Obtener el residuo $r(t) = x(t) - m(t)$. • Iterar hasta el número de extremos = número de cruce por cero ± 1. • Restar la función de modo intrínseco (IMF) obtenida de la señal original. • Iterar en el residuo hasta que $r(t)$ se vuelva monotónico.

Para una señal $x(t)$, la señal de análisis $z(t)$ se define en la ecuación 1.

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (1)$$

Donde $y(t)$ es la transformada de Hilbert de $x(t)$, donde P es el "valor principal de Cauchy", ecuación 2.

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

La noción de Frecuencia Instantánea (IF) se ha explorado previamente en [Messina, 2009]; porque en la práctica, las señales no son verdaderamente sinusoidales y el concepto de frecuencia debe analizarse con mayor profundidad. Se han realizado algunas investigaciones sobre este tema, sin embargo, muchos aspectos permanecen abiertos a discusión. En general, las señales procedentes del mundo físico se han analizado utilizando la transformada de Fourier, que proporciona valores de amplitud y frecuencia invariables en el tiempo. El principio de incertidumbre heredado asociado con la transformación de Fourier hace que el concepto de una frecuencia instantánea sea difícil de definir porque el principio de incertidumbre es una consecuencia de la transformación de Fourier (o cualquier otro tipo de transformación integral). Por lo tanto, si no se aplica una transformación integral en el cálculo de frecuencia, no estén limitados por el principio de incertidumbre [Wu, 2009].

Desde el punto de vista del análisis de Fourier, la frecuencia de una señal se derivaría de su período de tiempo, que es el tiempo necesario para completar un período de tiempo estacionario. Sin embargo, para una forma de onda no

estacionaria, la frecuencia sería difícil de definir. Otra forma de definir la frecuencia es como la velocidad angular que corresponde con la velocidad de cambio de su fase. Si es posible definir una fase única para una señal, será posible calcular su tasa de cambio y, por lo tanto, su frecuencia. La frecuencia obtenida de esta manera es única en cualquier instante en el tiempo y se llama frecuencia instantánea. Es posible definir solo una frecuencia instantánea para una señal en cualquier momento.

Este método tiene un problema con las señales de múltiples componentes y, por lo tanto, requiere una descomposición previa, donde se puede recurrir a EMD. Históricamente, la IF se calculó a partir de Señales Analíticas (AS) a través de la transformada de Hilbert. El HT, sin embargo, maneja mal las señales de múltiples componentes. HHT estima la frecuencia instantánea y la amplitud de una señal dada y para hacer esto, primero descompone cualquier señal en monocomponentes llamada función de modo intrínseco (IMF) mediante el uso de la descomposición en modo empírico (EMD). Con la función $x(t)$ definida en la ecuación 3.

$$x(t) = r(t) + \sum c_i(t) = r(t) + \sum a_i(t) \cos(\theta_i(t)) \quad (3)$$

Donde $c_i(t)$ es el número del IMF i , $a_i(t)$ y $\theta_i(t)$ son amplitud instantánea y fase respectivamente. El residual $r(t)$ es una función monótonica. De la ecuación 1 la amplitud y la fase se definen en las ecuaciones 4 y 5.

$$a(t) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (5)$$

La frecuencia instantánea $f_i(t)$ para cada IMF $c_i(t)$ se define en la ecuación 6.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (6)$$

El objetivo principal del desarrollo de HHT es tener una herramienta para gestionar el paradigma de datos de tiempo-frecuencia-energía. Una forma de expresar la no estacionariedad es encontrar la frecuencia y la amplitud instantáneas. Esta fue la razón por la cual el análisis del espectro de Hilbert se incluyó como parte de HHT.

El análisis espectral es una herramienta poderosa para analizar las características estadísticas de los datos estocásticos [Boashash, 1992]. Un espectro de Hilbert es una representación 3D de la amplitud y frecuencia instantáneas en función del tiempo para cada IMF. El HS se define en la ecuación 7.

$$H_i(f, t) = \begin{cases} a_i(t) & \text{para } f = f_i(t) \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (7)$$

Para una señal multicomponente general, el espectro de Hilbert se define como la suma de los espectros de Hilbert de todos los IMFs, como se indica en ecuación 8, donde N es el número total de IMFs.

$$H(f, t) = \sum_{i=1}^N H_i(f, t) \quad (8)$$

Con el objetivo de aclarar los conceptos presentados anteriormente, se presenta el análisis de estimación de parámetros basado en la HT, sobre los siguientes casos de estudio:

- Señal periódica con parámetros de amplitud, frecuencia y fase constantes. La señal presenta un fenómeno denominado mezcla de modos, para resolver este problema se utiliza la HT. La señal sintética se describe en la ecuación 9, Además, se muestra en la figura 1, con sus correspondientes modos de frecuencia.

$$x(t) = 5 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot t) + 5 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50t) + 10 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 5t) \quad (9)$$

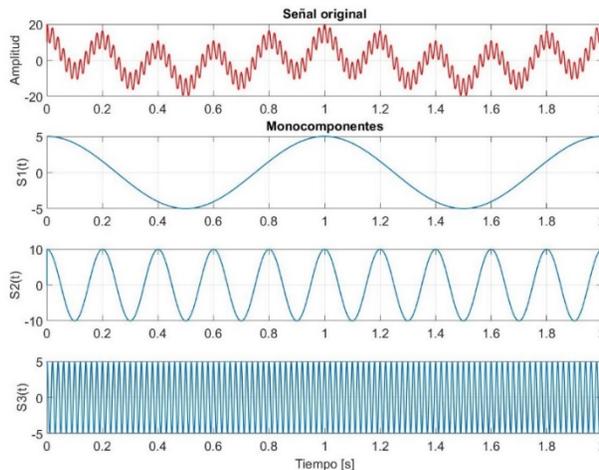


Figura 1 Señal sintética con sus respectivas frecuencias.

- Señal periódica con parámetros variantes con el tiempo. Esta sección propone una señal con amplitud y frecuencia variante en el tiempo, con el objetivo de mostrar la capacidad de descomponer una señal con estas características. La señal sintética con amplitud y frecuencia variantes en el tiempo se describe en la ecuación 10. Además, se muestra en la figura 2, con sus correspondientes modos de frecuencia.

$$x(t) = \begin{aligned} &1 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50t) \\ &+ 10 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot t) \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50t) \\ &+ 10 \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot 5 \cdot \text{sen}\left(\frac{5}{2}t\right) \cdot t\right) \end{aligned} \quad (10)$$

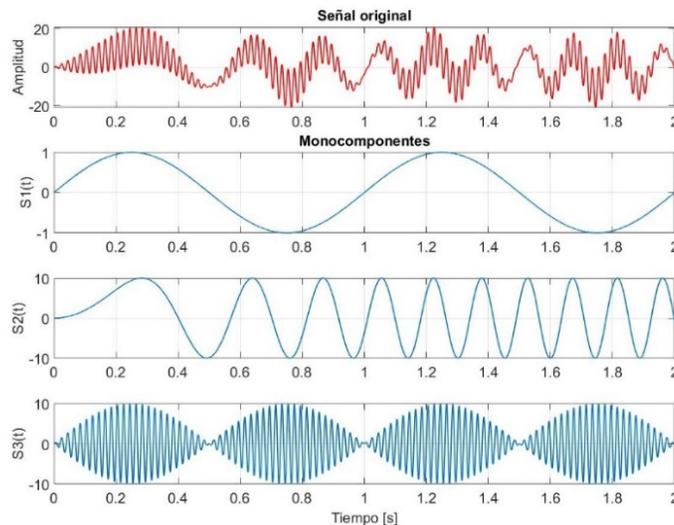


Figura 2 Señal sintética con parámetros oscilatorios variantes en el tiempo.

- Señal eléctrica y sus frecuencias asociadas a cada componente. El análisis basado en la HHT también es aplicado a señales provenientes de sistemas eléctricos, las cuales tienen características no lineales y no estacionarias. En este caso, se realiza el análisis a una señal de corriente con alto contenido armónico e interarmónico, provocado por las conmutaciones naturales de la electrónica de potencia. Los datos corresponden a la corriente de un sistema eléctrico a una frecuencia de muestreo de 11.1 kHz. Para efectos del estudio, se analiza 100 milisegundos de los datos, como lo muestra la figura 3.

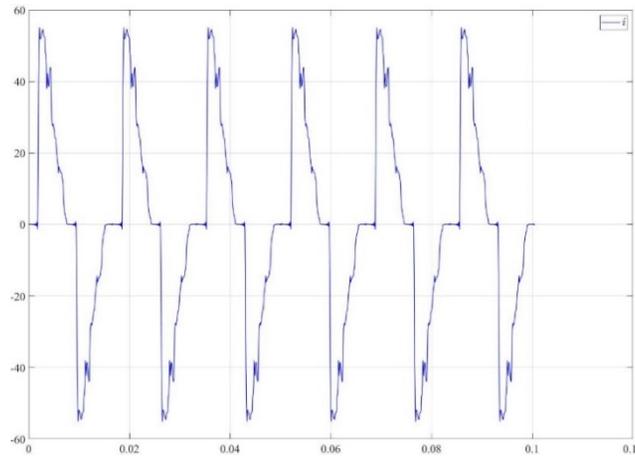
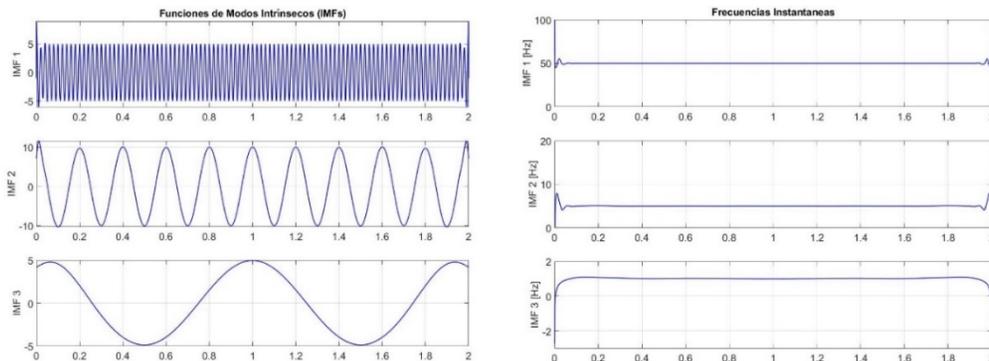


Figura 3 Señal de corriente de sistema eléctrico de potencia moderno.

3. Resultados y Discusión

Señal periódica con parámetros de amplitud, frecuencia y fase constantes

La descomposición empírica en modos se muestra en la figura 4a, donde se ilustra una clara descomposición de los modos frecuenciales, la primera IMF evidencia una oscilación monotónica de 50 Hz, la segunda de 5 Hz y la tercera de 1 Hz. De igual forma en la figura 4b se muestran las frecuencias instantáneas que corresponden a cada IMF.



a) Descomposición de señal sintética usando EMD

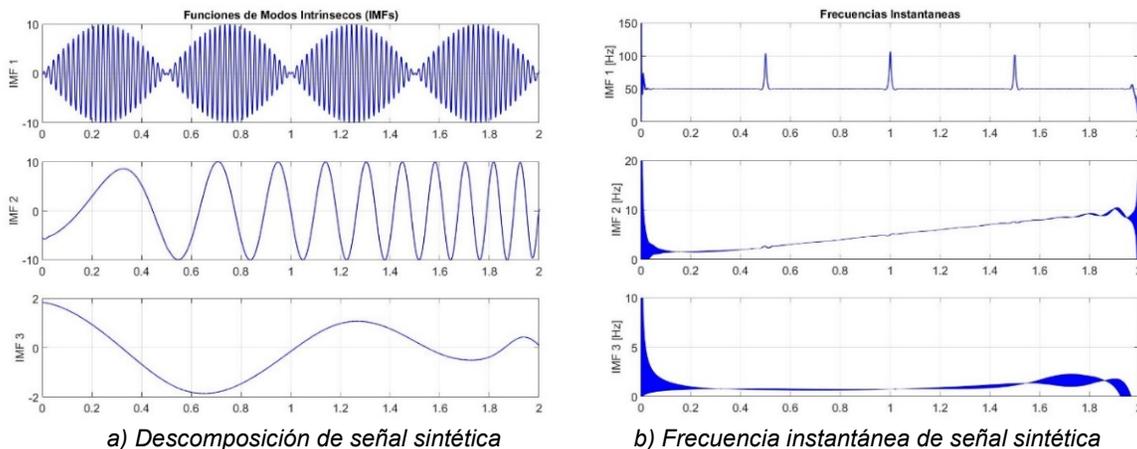
b) Frecuencia instantánea de señal sintética

Figura 4 Descomposición de señal sintética usando EMD y frecuencia instantánea de señal sintética obtenida mediante EMD.

Señal periódica con parámetros variantes con el tiempo

El resultado mostrado anteriormente comprueba la capacidad que tiene la Transformada de Hilbert Huang de descomponer señales con parámetros de

amplitud, fase y frecuencia invariantes en el tiempo. La descomposición empírica en modos para la señal sintética con parámetros variantes en el tiempo se muestra en la figura 5a, la técnica muestra la eficiencia que tiene al poder descomponer los modos de oscilación a pesar de su variación en el tiempo. La primera IMF muestra el modo de oscilación asociado a la frecuencia de 50 Hz, la segunda IMF muestra el modo de oscilación donde varía el parámetro de frecuencia en la ventana de tiempo. Finalmente, la última IMF muestra el modo de oscilación asociado a la frecuencia de 1 Hz. Estos cambios en los parámetros de las oscilaciones se evidencian con mayor claridad en la figura 5b, la primera IMF asociada a la frecuencia instantánea muestra en forma de picos los cambios bruscos de la amplitud de la señal, la siguiente IMF muestra de que forma va aumentando la frecuencia a través del tiempo. Para finalizar la última IMF muestra la frecuencia constante asociada a 1 Hz.



a) Descomposición de señal sintética b) Frecuencia instantánea de señal sintética
Figura 5 Descomposición de señal sintética usando EMD y frecuencia instantánea de señal sintética obtenida mediante EMD.

Para evaluar la eficiencia de la técnica se realizan dos técnicas de validación: 1) Realizar la superposición gráfica, 2) Evaluar el Error Medio Cuadrático (EMS, por sus siglas en inglés) entre la señal sintética y la obtenida en la descomposición. La figura 6 muestra el método gráfico de evaluación, donde superpone cada IMF obtenida con las señales sintéticas construidas, estas diferencias se evalúan realizando el Error medio cuadrático como lo evidencia la tabla 2.

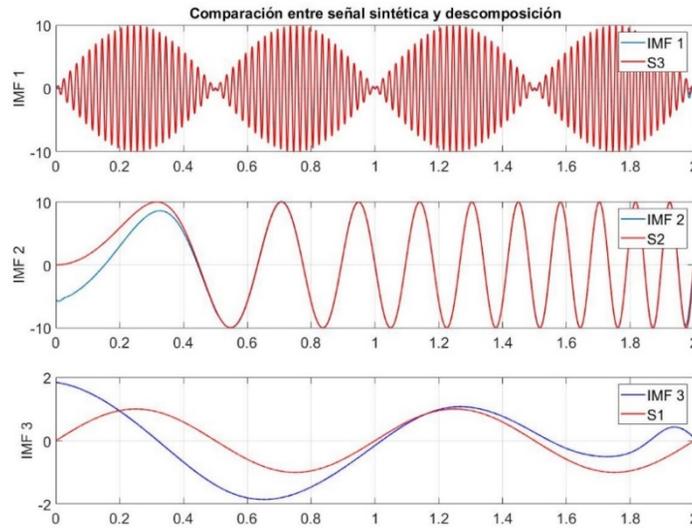


Figura 6 Comparación de cada componente oscilatoria de la señal sintética.

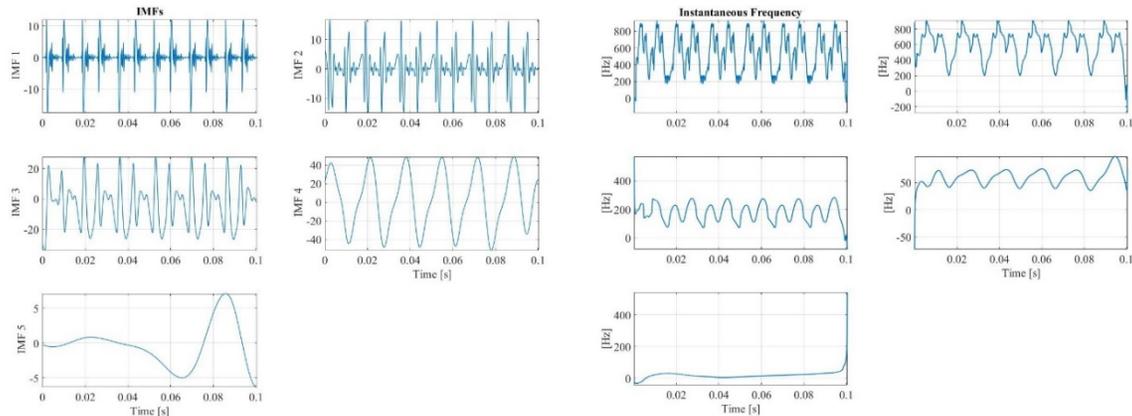
Tabla 2 Error medio cuadrático entre la EMD y señal sintética.

S3 – IMF 1	0.003
S2 – IMF 2	2.321
S1 – IMF 3	0.535

Señal eléctrica y sus frecuencias asociadas a cada componente

A diferencia de los casos con señales sintéticas mostrados anteriormente, no se conoce ninguna característica de la señal, figura 3. Detectar armónicos con la EMD Estándar en este tipo de señales es algo complejo, la descomposición de la señal en IMFs se muestra en la figura 7a. De manera general, esta descomposición los separa en diferentes modos de frecuencias, la cual permite identificar que tan predominante es ese modo de oscilación en la señal original. En la IMF 4 se observa la frecuencia fundamental del sistema (50 Hz), en las demás IMF está presente una mezcla de frecuencias, es decir, un rango de frecuencias a le nombra cómo modos de oscilación. La figura 7b muestra el comportamiento de la frecuencia en el tiempo de cada modo de oscilación de la señal obtenida con el EMD estándar, para la primera IMF se detecta una mezcla de modos entre las frecuencias de 850 Hz, 750 Hz, 550 Hz, 300 Hz y 250 Hz. La segunda IMF muestra el comportamiento entre las siguientes frecuencias: 850, 700, 500 y 200 Hz. La tercera IMF muestra una mezcla de modos de dos frecuencias: 250 y 100 Hz. Para terminar la cuarta IMF se presenta

la detección de una frecuencia cercana a los 50 Hz y una frecuencia próxima a los 70 Hz. Este análisis tiempo-frecuencia permite ver el comportamiento de estas oscilaciones que a futuro permitirá controlar en tiempo real la frecuencia para contrarrestar dichos modos.



a) Descomposición de señal de corriente

b) Frecuencia instantánea de señal de corriente

Figura 7 Descomposición de señal de corriente usando EMD y frecuencia instantánea de señal de corriente mediante EMD.

4. Conclusiones

En este documento se discutieron los conceptos de importancia cuando se implementan diferentes métodos de análisis de señales, con el objetivo de encontrar la estrategia más eficiente en términos de separación de frecuencia para señales con alto de oscilaciones, específicamente de armónicos e interarmónicos, característica de señales con alta penetración de fuentes no convencionales de energías renovables y cargas no lineales.

La técnica EMD tiene múltiples aplicaciones en diferentes campos y ha proporcionado resultados adecuados en la literatura. Es importante notar, que la técnica es precisa ante señales sintéticas y con un bajo contenido armónico como lo evidencias los casos de estudios presentados anteriormente. Sin embargo, el problema de mezcla de modos es evidente en EMD cuando la señal bajo análisis tiene múltiples armónicos como la señal de corriente del sistema eléctrico mostrada en la figura 3. Una solución a esta inquietud es el uso de las técnicas Descomposición de Modo Empírico de Conjunto (EEMD, por sus siglas en ingles) y

Descomposición Completa del Modo Empírico de Conjunto con Ruido Adaptativo (CEEMDAN, por sus siglas en inglés). Después de revisar la literatura, se encontró que estas técnicas aún no han sido estudiadas en profundidad debido a su alto costo computacional.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Antonino-Daviu, J. A., Riera-Guasp, M., Pineda-Sanchez, M., & Perez, R. B. (2009). A critical comparison between DWT and Hilbert–Huang-based methods for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(5), 1794-1803.
- [2] Bísvaro, A. A. P., Pereira, R. A. F., Kezunovic, M., & Mantovani, J. R. S. (2015). Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. *IEEE Transactions on power delivery*, 31(2), 428-436.
- [3] Boashash, B. (1992). Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. I. Fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 80(4), 520-538.
- [4] Feldman, M. (2011). Hilbert transform in vibration analysis. *Mechanical systems and signal processing*, 25(3), 735-802.
- [5] Fosso, O. B., & Molinas, M. (2018). EMD mode mixing separation of signals with close spectral proximity in smart grids. In *2018 IEEE PES innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Gasca, M. V., Bueno-López, M., Molinas, M., & Fosso, O. B. (2018). Time-Frequency analysis for nonlinear and non-stationary signals using HHT: A mode mixing separation technique. *IEEE Latin America Transactions*, 16(4), 1091-1098.
- [7] Huang, N. E. (2014). *Hilbert-Huang transform and its applications* (Vol. 16). World Scientific.
- [8] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995.

- [9] Kulia, G., Molinas, M., Lundheim, L., & Larsen, B. B. (2016). Towards a real-time measurement platform for microgrids in isolated communities. *Procedia engineering*, 159, 94-103.
- [10] Li, D., Ukil, A., Satpathi, K., & Yeap, Y. M. (2020). Hilbert–Huang Transform Based Transient Analysis in Voltage Source Converter Interfaced Direct Current System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(11), 11014-11025.
- [11] Li, Y., Yang, D., Liu, F., Cao, Y., & Rehtanz, C. (2016). *Interconnected power systems*. Berlin: Springer.
- [12] Messina, A. R. (Ed.). (2009). *Inter-area oscillations in power systems: a nonlinear and nonstationary perspective*. Springer Science & Business Media.
- [13] Messina, A. R., Vittal, V., Heydt, G. T., & Browne, T. J. (2009). Nonstationary approaches to trend identification and denoising of measured power system oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(4), 1798-1807.
- [14] Rilling, G., & Flandrin, P. (2007). One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers. *IEEE transactions on signal processing*, 56(1), 85-95.
- [15] Sanabria-Villamizar, J. M., Bueno-López, M., & Bernal Alzate, E. (2019). Signal analysis in power systems with high penetration of non-conventional energy sources. In *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications* (pp. 145-154). Springer, Cham.
- [16] Sanabria-Villamizar, M., Bueno-López, M., & Salazar-Caceres, F. (2021). A New Hybrid Signal Analysis Method for the Evaluation of Power Quality Disturbances. In *2021 IEEE Madrid PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.
- [17] Sanabria-Villamizar, M., Bueno-López, M., Hernández, J. C., & Vera, D. (2022). Characterization of household-consumption load profiles in the time and frequency domain. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 107756.
- [18] Shaik, M., Shaik, A. G., & Yadav, S. K. (2022). Hilbert–Huang transform and decision tree based islanding and fault recognition in renewable energy

- penetrated distribution system. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 30, 100606.
- [19] Silveira, P. M., Duque, C., Baldwin, T., & Ribeiro, P. F. (2009). Sliding window recursive DFT with dyadic downsampling—A new strategy for time-varying power harmonic decomposition. In 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Wu, Z., & Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1-41.
- [21] Yu, Y., Zhao, W., Li, S., & Huang, S. (2021). A two-stage wavelet decomposition method for instantaneous power quality indices estimation considering interharmonics and transient disturbances. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-13.