



Revista MICA.
Volumen 2, No. 2.
ISSN: 2594-1933
Periodo: julio – diciembre 2018
Tepic, Nayarit. México
Pp. 6-27
Recibido: 14 de noviembre
Aprobado: 21 de diciembre

**Técnicas para el Análisis Espectral de Armónicos en Sistemas Eléctricos de
Potencia**

Spectral Analysis Techniques in Electrical Power Systems

Autores

Antonio Emanuel Saldaña González
Universidad Autónoma de Nayarit
antonios@uan.edu.mx

Diego Alberto Aguilar Ventura
Universidad Autónoma de Nayarit
diego.aguilar@uan.edu.mx

Marcial Arroyo Avena
Universidad Autónoma de Nayarit
marcial@nayar.uan.mx

Juan Luis Hernández Méndez
Universidad Autónoma de Nayarit
inmecanico@hotmail.com

Técnicas para el Análisis Espectral de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

Spectral Analysis Techniques in Electrical Power Systems

Autores

Antonio E. Saldaña González
Universidad Autónoma de Nayarit
antonios@uan.edu.mx

Diego Alberto Aguilar Ventura
Universidad Autónoma de Nayarit
diego.aguilar@uan.edu.mx

Marcial Arroyo Avena
Universidad Autónoma de Nayarit
marcial@nayar.uan.mx

Juan Luis Hernández Méndez
Universidad Autónoma de Nayarit
inmecanico@hotmail.com

Resumen

En este artículo se realizó una investigación bibliográfica sobre las técnicas más utilizadas en sistemas eléctricos de distribución e industriales para el análisis espectral de armónicos. Se elaboró una tabla comparativa de las técnicas encontradas de más de 40 artículos científicos de la IEEE de acuerdo a sus ventajas, desventajas y campo de aplicación en sistemas eléctricos de potencia.

El resultado de ésta investigación muestra la viabilidad de aplicación de cada una de estas técnicas para el análisis de armónicos según el régimen de operación (Estacionario, No-Estacionario, Transitorio) de la señal analizada en cargas no-lineales.

Palabras clave: Armónicos, Cargas no lineales, Análisis Espectral, Calidad de energía.

Abstract

The aim of this research is to review and classify the most important techniques for spectral analysis in distribution and industrial electrical systems. A comparative table was made of all the techniques found in 54 scientific articles in IEEE, according to their advantages, disadvantages and field of application in electrical power systems. The results shows the feasibility of applying each of these techniques for spectral analysis of harmonics varies according to the operating regime (Stationary, Non-Stationary, and Transitory) of the signal analyzed.

Keywords: Harmonics, Nonlinear Loads, Spectral Analysis, Power Quality.

Introducción

En los últimos años se ha observado una proliferación de las técnicas de procesamiento de datos utilizadas para el análisis espectral de armónicos en sistemas industriales y/o microredes de distribución, debido al aumento de los problemas de calidad de energía que se presentan [1,4].

Debido al creciente aumento de los dispositivos electrónicos de potencia, la incorporación de fuentes de energía renovables, la incorporación de estaciones de carga para autos eléctricos, las cargas industriales variables (variadores de velocidad de motores síncronos), el aumento en cargas domésticas variables (balastos, cargadores etc.) se han generado diversos problemas en las redes de distribución y/o microredes debido a los efectos de las componentes armónicas (corrientes y voltajes) que no se contemplaban anteriormente. Algunos de estos efectos por el alto contenido armónico son: el sobrecalentamiento en cables, transformadores y motores, problemas de operación en sistemas de protección, entre otros [22, 23]. Como consecuencia de esto, se genera un incremento en los costos de operación y el tiempo de vida en los equipos disminuye.

Método

En esta sección se hace una búsqueda bibliográfica de las técnicas utilizadas para el análisis espectral de armónicos en sistemas industriales y sistemas de distribución. Las técnicas se dividen de acuerdo al régimen de operación (Estacionario, No-Estacionario, Transitorio) de la señal.



Fig. 1.1 Técnicas para el Análisis Espectral de Armónicos en Sistemas Industriales/Distribución.

Resultados

Régimen Estacionario

Transformada Discreta de Fourier (DFT): En 2014, Jun Xiao et. al [37] aplicaron la transformada discreta de Fourier (DFT) para el análisis espectral de potencia en una microred con generadores eólicos, solares y diésel. Estos componentes están conectados a un bus principal a través de convertidores ac/dc o dc/dc. Se propuso una estrategia de despacho basada en DFT para asignar la potencia de equilibrio entre los generadores que generan menor fluctuación espectral y los bancos de batería. Primero, se asigna la potencia a un punto de equilibrio en el dominio de frecuencia, y luego se adquiere la asignación de potencia usando transformada discreta de Fourier Inversa. El objetivo es rastrear el contenido armónico o fluctuaciones de potencia para asignar y coordinar las cargas de forma óptima en la microred. La potencia asignada producida por la estrategia obtiene las capacidades mínimas de generación con la intención de cumplir la demanda global de la microred. Se introducen también algunos índices técnicos y económicos para la evaluación de los diferentes esquemas. Este método también se puede aplicar en la coordinación control y planificación de otras fuentes de generación, tales como micro turbinas, pilas de combustible, etc.

Transformada Rápida de Fourier (FFT): En 2008, G. W. Chang et. al [20] implementaron la Transformada Rápida de Fourier con métodos de interpolación en un hardware para analizar armónicos e interarmónicos de un sistema de distribución de potencia simulado en LabVIEW. Se muestra que el método propuesto produce mejores resultados (eficiencia computacional, resolución de ventana) que la DFT cuando el número de muestras es potencia base 2. Al incorporar el método polinomio de interpolación, la precisión de las mediciones basadas en la FFT tradicional puede mejorarse enormemente. El método de solución propuesto presenta notables ventajas para mediciones de corto o largo plazo de armónicos e interarmónicos en cualquier sistema de distribución o sistema industrial. En 2015, He Wen [33] aplicó FFT con una interpolación simétrica para la estimación de armónicos en un sistema de potencia. Para ilustrar la utilidad del método propuesto, se elabora una simulación con señales de voltaje y corriente con múltiples frecuencias, el método propuesto muestra resultados precisos y tanto el efecto de valla de

estacas como el ruido blanco gaussiano se pueden mitigar de manera efectiva debido al buen comportamiento esta técnica.

Algoritmo de Goertzel: En 2009, Joe Hyung Kim et. al [2] propusieron este algoritmo para el control de calidad de energía de un sistema fotovoltaico conectado a la red. El algoritmo de Goertzel se basa en la transformación de Fourier para extraer la magnitud y la fase de una señal estacionaria, con la mínima demanda computacional. El sistema presentado utiliza un convertidor DC/DC para energizar continuamente una microred en intervalos cortos de muestreo. En este trabajo se concluyó que la técnica propuesta trabaja de forma óptima para identificar y compensar los reactivos requeridos por una carga no-lineal en cada modo.

Variational Mode Decomposition (VMD): En 2016, Pankaj D. Achierkar et. al [38] presentaron un nuevo enfoque en el cual se utiliza la descomposición en modo de variación para la detección de armónicos en una microred conectado a la red principal. La precisión y la solidez del método se prueban y se comparan con otros métodos en distintos escenarios operativos del sistema. La aplicación de este enfoque en diversas señales generadas en tiempo real y en simulaciones, muestran la capacidad potencial de esta técnica para estimar con precisión las amplitudes, frecuencias y fases de los componentes fundamental, armónico e interarmónico, tanto en escenarios ruidosos como no ruidosos. Diversos estudios muestran que el enfoque propuesto es un método eficaz para la detección y clasificación de perturbaciones de calidad de energía individuales y mixtas en entornos ruidosos y libres de ruido.

Régimen No Estacionario

Se refiere a aquellas señales cuya magnitud y frecuencia están variando en el tiempo. Algunos ejemplos de mecanismos que generan este tipo de señales son las retroexcavadoras, las palas, martillo hidráulico entre otros.

Transformada de Fourier de tiempo corto: En 2002, Jurado F. et. al [5] aplicaron la transformada de Fourier de tiempo corto para el análisis espectral de armónicos en un sistema de 13 buses que representa a una planta mediana industrial. Debido a que las cargas en un sistema industrial por lo general son no estacionarias este enfoque logra un análisis

por bloques lo suficiente pequeño como para aproximarla a una señal cuasi estacionaria. Debido a que es una variante de Fourier utilizada comúnmente dado a su simplicidad en la implementación de equipos analizadores de calidad de energía. Las dificultades para medir las amplitudes armónicas en formas de onda no estacionarias han sido demostradas por los resultados de la simulación en [5]. Con este enfoque se demostró que se pueden hacer mejoras de la transformada rápida de Fourier convencional con solo ajustar correctamente la ventana de muestreo, para luego calcular una transformación de Fourier para cada ventana, es así como funciona la Transformación de Fourier de Tiempo-Corto.

Transformada de Chirp Z (CZT): En 2005, Massimo Aiello et. al [3] proponen un algoritmo para detectar las frecuencias dominantes en un sistema de distribución, se realizó una simulación en Labview y programaron el algoritmo en una tarjeta gráfica. Los resultados demuestran que este algoritmo permite mejorar la resolución espectral sin necesidad de incrementar la ventana de observación y sin aumentar la demanda computacional. Además, permite realizar mediciones precisas de la frecuencia fundamental por medio del análisis espectral de CZT de la señal de acuerdo con los estándares requeridos por IEC 61000-4-7 y 61000-4-30 [20-21]. No se requiere de la interpolación o del cruce por cero para su procedimiento. El CZT fue comparado con un interpolador basado en la FFT de forma de mostrar y comparar el desempeño de cada uno de ellos con señales con distorsión armónica e inter-armónica.

Distribución de Choi Williams: En 2010, I. Paraskevas et. al [35] proponen un método para el análisis espectral de señales sobre datos simulados en MATLAB. Se demostró que esta técnica presenta mejoras respecto a la FFT, cuando la señal es no-estacionaria. Además, se puede implementar para la localización de armónicos. La distribución de Choi-Williams (CDW) tiene la propiedad de suprimir términos cruzados, es decir, componentes a frecuencias no armónicas como la de la fundamental. De hecho, la CWD funciona mejor que la Transformada de Fourier de Corto Plazo (espectrograma) de la señal, para el caso experimental de una señal sintética donde los componentes armónicos aparecen y desaparecen en instancias de tiempo específicas. Los resultados del método propuesto sugieren nuevas investigaciones para la aplicación potencial del método en campo, así como para la implementación en línea de los mismos.

Transformada-S: En 2003, P.K. Dash et. al [14] proponen un nuevo enfoque para el análisis de la calidad de energía utilizando una transformada wavelet modificada conocida como transformada-S. La resolución de la transformada-S hace que sea un candidato atractivo para el análisis de señales no estacionarias. Además, se analizaron varios problemas de calidad de potencia utilizando tanto la transformada-S como la transformada discreta de wavelet, mostrando claramente la ventaja de la transformada-S en la detección, localización y clasificación de los problemas de calidad de energía. En 2004, Dash P.K. y Chilukuri M. V. et. al [19], presentaron el uso la transformada-S y el filtrado de Kalman como poderosas herramientas de análisis para clasificar y medir la respuesta del sistema a señales no estacionarias. Usando solo la transformada-S, uno puede detectar, localizar y clasificar visualmente los eventos de corta duración en la señal. El método se aplica a diferentes conjuntos de datos obtenidos de simulaciones por computadora y pruebas de laboratorio, y se obtienen resultados precisos en la mayoría de los estudios de caso. En 2010, Salem M.E. et. al [27] proponen el diseño y desarrollo de un sistema basado en reglas para la clasificación inteligente de perturbaciones de calidad de energía utilizando la transformada-S. Además, un sistema de hardware fue diseñado utilizando un avanzado procesador de señal digital para proporcionar una rápida captura de datos y procesamiento de señales utilizando este enfoque.

Filtros de Kalman (FK): En 2009, J. B. V. Reddy et. al [29] proponen los filtros de Kalman para el seguimiento de: amplitud, fase, frecuencia y el contenido armónico en señales no-estacionarias y con perturbación que se producen en un sistema de distribución. Esta técnica utiliza una transformación para superar las dificultades de linealización y los cálculos derivados de señales con una relación señal / ruido (SNR) baja. Además, se seleccionan las matrices Q y R de covarianza de error de modelo y de medición, utilizando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas modificado (PSO) para un seguimiento preciso de parámetros de señal. Para evitar el problema de la convergencia prematura y mínimos locales en PSO convencional, se utiliza una inercia ponderada dinámicamente basada en la varianza de la aptitud de los datos. Esto da lugar a una mejor capacidad de búsqueda local y global de las partículas, lo que mejora la convergencia de la velocidad, y con una mejor exactitud de los parámetros.

Régimen Transitorio

La operación en estado transitorio es cuando el sistema presenta un cambio súbito durante el funcionamiento. En donde se inicia después de que se ha aplicado una perturbación o se ha producido un fallo. Esta respuesta inducida por falla se caracteriza generalmente por una gran desviación en la frecuencia del sistema u otras mediciones del sistema, por ejemplo, flujo de potencia en una línea de transmisión.

Análisis de Prony (PA): En 2007, Li Qi y Lewei Qian et. al [10] implementaron el análisis de Prony para supervisar los armónicos durante la activación de un transformador y el arranque del motor de inducción en un sistema industrial. Con el análisis de Prony como método de generación de referencia armónica, el objetivo fue el diseño de filtros activos de armónicos para anular los armónicos de transición durante el arranque del motor y transformador. El filtro activo armónico basado en Prony cancela los armónicos transitorios más efectivamente durante el arranque del motor que el filtro activo armónico basado en la transformada de Fourier. Sin embargo, la velocidad computacional del algoritmo de Descomposición de Valores Singulares (SVD) no recursivo para Prony es lenta. Además, la falta de información en el análisis de Prony, afecta en la estimación armónica del análisis de Prony, ya que puede afectar negativamente a los controladores al comienzo de los periodos transitorios. En 2009, Andreotti A. et. al [28] proponen el método adaptativo de Prony para calcular índices de calidad de energía (por sus siglas en inglés “PQ”) basados en un análisis tiempo-frecuencia de formas de onda. También se presentan y discuten aplicaciones numéricas sobre un transitorio simulado debido a la conmutación de condensadores, un hundimiento de tensión medido y una forma de onda de prueba, con el fin de investigar la validez del método propuesto.

Transformada Wavelet (WT): A.M. Gouda y M.M.A. Salama et. al [6] proponen la transformada de wavelet como una poderosa herramienta para monitorear problemas de calidad de energía en plantas industriales. Ésta técnica de descomposición de señales tiene la capacidad de detectar y localizar eventos transitorios, además de clasificar diferentes perturbaciones de calidad de energía. Con esta técnica las perturbaciones más relevantes en los sistemas de energía eléctrica pueden ser estimadas automáticamente, incluso en un entorno ruidoso. En [6] se presentaron diversos casos de estudio, relacionados con las

perturbaciones más comunes en el análisis de la calidad de la energía eléctrica. En 2000, Poisson O. et. al [22] utilizaron la transformada de wavelet para detectar y analizar las caídas de tensión y transitorios. Se utiliza este algoritmo de forma recursiva y además se mejora el cálculo de las frecuencias temporales de perturbaciones eléctricas. La duración y la magnitud de las variaciones de tensión son analizadas, y la localización de los transitorios. En 2011, Ren J. y Kezunovic M. et. al [18] propusieron una transformación de wavelet recursiva (TWR) que permite la estimación en tiempo real de la frecuencia, magnitud y fase del sistema de potencia. El algoritmo ofrece una respuesta rápida y resultados precisos en una amplia gama de desviaciones de frecuencia. La velocidad de muestreo y el tamaño de la ventana de observación se pueden elegir para satisfacer los requisitos de las aplicaciones seleccionadas. El análisis de las características de convergencia del algoritmo indica que cuanto mayor es la velocidad de muestreo, más corta es la ventana de datos de cálculo. El rendimiento del algoritmo propuesto se evalúa bajo una variedad de condiciones incluyendo estado estático, estado dinámico y estado transitorio.

Filtro de Kalman: En [8], Adly A. Gergis et. al presentaron un nuevo esquema de medición recursiva digital para el monitoreo de armónicos para un conjunto de datos simulados y reales. Este nuevo esquema se basa en la teoría del filtrado de Kalman para la estimación óptima de los parámetros de los armónicos que varían en el tiempo. El esquema no requiere un número entero de muestras en un número entero de ciclos. No se limita a señales estacionarias, sino que puede realizar un seguimiento armónico con amplitudes que varían en el tiempo. Ésta técnica puede ser utilizada para resolver problemas de identificación de fuentes armónicas, la ubicación óptima de un número limitado de medidores armónicos, las estimaciones dinámicas óptimas de las inyecciones armónicas y sus localizaciones. Cada inyección armónica se trata como una variable de estado aleatoria. El análisis de covarianza de errores de la inyección armónica por el filtro de Kalman se utiliza para determinar las ubicaciones óptimas de medición en sistemas de potencia. En 2005, Yu K.K. et. al [28-29], presentaron una técnica basada en los filtros de Kalman adaptativo, la cual es robusta para la estimación del estado armónico dinámico y el seguimiento de la inyección armónica. A diferencia del filtro de Kalman tradicional, el filtro adaptativo de Kalman depende de la medición, en el que se permite una ganancia

adaptativa de Kalman para la estimación armónica dinámica. Además, el conocimiento exacto de la covarianza de ruido del proceso no es necesario para este método. Los resultados muestran una buena estabilidad y capacidad de seguimiento del contenido armónico en un sistema seleccionando el modelo como matriz de identidad o matriz cero.

Filtrado Digital: En 2001, Z. Chen et. al [12] presentaron una técnica de filtrado digital para la detección de disturbios en un sistema de distribución. Este enfoque hace una descomposición espectral de la señal perturbada o distorsionada utilizando un banco de filtros multicanal. Además, tiene el potencial de evaluar diversas perturbaciones de la calidad de energía, tales como interrupciones, caídas y distorsiones en estado estacionario. La eficacia del método propuesto ha sido demostrada bajo perturbaciones de potencia típicas simuladas. En 2005, Tao Lin et. al [16] analizaron un nuevo filtro complejo recursivo que logra una alta precisión de medición de perturbaciones de potencia claves para la protección, control, diagnóstico de fallas, control de calidad de potencia y medición de potencia en sistemas de energía eléctrica. Además, este artículo propone tres criterios para seleccionar o desarrollar una técnica de medición apropiada.

Transformada de Gabor: En [13,17], Z. Chen Huang, S. et. al, proponen un nuevo enfoque para visualizar las tendencias armónicas del sistema eléctrico. La técnica de transformación de Gabor, incorporada con una función de ventana de tipo gaussiano, se aplica para ayudar a supervisar las variaciones armónicas en la dimensión temporal. Utilizando el esquema propuesto, se pueden observar estrechamente los armónicos transitorios del sistema de potencia. Además, se probó este método para la inspección de armónicos de corriente de arranque de transformadores y perturbaciones industriales de hornos de arco. En 2007, Abdul R. et. al [17] implementaron esta técnica para analizar alteraciones de la calidad de energía. Los parámetros analizados fueron en términos de las mediciones de corrección de los valores de la media cuadrática (RMS), la distorsión armónica total (THD). Los eventos de calidad de energía que se analizaron son los picos, interrupciones, armónicos, interarmónicos, transitorios y hundimientos de voltaje nominal. Los resultados muestran un buen rendimiento en términos de corrección de la medición de parámetros, de la longitud de la ventana, la resolución de frecuencia y el tamaño de la memoria.

Transformada de Gabor-Wigner: En 2010, Soo-Hwan Cho y Gilsoo Jang [15] aplicaron la transformación de Gabor-Wigner (TGW), para detectar e identificar disturbios en el sistema de potencia. Dado que TGW es una combinación operativa de la transformada de Gabor (TG) y la función de distribución de Wigner (FDW), puede superar las desventajas de ambos. TGW tiene dos ventajas, tiene menos problemas de transcurso que el FDW y mayor claridad que TG. En [15] estudiaron diversos casos considerando diversos tipos de perturbaciones tales como transitorios de voltaje, armónicos, interarmónicos, cambios de voltaje con frecuencias múltiples y fluctuaciones de voltaje, utilizando este nuevo método de análisis.

Descomposición Modal Dinámica (DMD): En 2017, A. E. Saldaña y E. Barocio [41] proponen una nueva técnica para el análisis espectral de señales, basado en un enfoque espacio-temporal. Las señales fueron obtenidas de una microred de prueba desarrollada en PSCAD con diversas fuentes de armónicos. La técnica propuesta extrae los modos dominantes a partir de los cuales pueden determinarse los componentes de frecuencia, la energía modal y factores de participación. Este método es muy adecuado para el análisis y la supervisión de fuentes emisoras de armónicos en sistemas complejos de microred. Además, esta técnica es capaz de analizar señales en régimen estable y transitorio.

A continuación, se revisan las ventajas y las desventajas de cada una de las técnicas utilizadas para diferentes sistemas industriales, microredes y de distribución.

Tabla Comparativa

Técnica/ Ref.	Sistema	Ventajas	Desventajas	Descripción del Sistema
Filtro de Kalman [8]	Sistema Industrial	Esta técnica puede calcular las magnitudes espectrales variables en el tiempo. Se aplica a cualquier cantidad de muestras cada medio ciclo.	Las ecuaciones de estado, las ecuaciones de medición y las matrices de covarianza deben definirse correctamente para tener buenos resultados. El enfoque presentado analiza una señal a la vez.	La carga consiste en cuatro líneas de producción de calentamiento por inducción con dos hornos conectados por cada línea, abastecida con dos transformadores paralelos que suman 7500 KVA.

Filtro de Kalman [9]	Sistema de Distribución 44kV	El análisis de covarianza de error se usa para determinar las ubicaciones óptimas de medición en los sistemas de potencia. El filtro de Kalman puede estimar y rastrear cada inyección de armónicos en los sistemas de potencia.	El ruido de medición armónica, tiene un efecto sobre la estimación de la fuente de inyección armónica y su error de covarianza.	El sistema cuenta con un puente rectificador de 6 impulsos y un horno de arco de fundición, que son posibles fuentes de inyecciones armónicas.
Transformada de Gabor [13]	Sistema Industrial	Se adapta a una ventana reducida de muestreo para una mejor visualización de las características de la señal. El enfoque necesita menos recursos computacionales que los métodos basados en la transformada de Fourier.	El cálculo de las magnitudes en dominio de frecuencia no es precisa en señales no-periódicas. Este enfoque analiza solamente una señal a la vez.	Se analizan las variaciones armónicas de la corriente al energizar un transformador de 3KVA monofásico. También, se determina el contenido espectral armónico de un horno de arco de fundición de acero, durante las etapas de ataque de arco y fusión.
Transformada de Wavelet [7]	Señales simuladas	Con esta técnica se pueden detectar, localizar y estimar perturbaciones de señales en un entorno ruidoso. Es posible clasificar el tipo de perturbación utilizando menos parámetros en comparación con otros métodos propuestos.	La extracción puede ser inexacta en presencia de ruido superpuesto a la señal a procesar, ya que la duración del tiempo de perturbación se evalúa con una resolución muy corta de tiempo.	Las perturbaciones se han simulado numéricamente. Toda la señal (fundamental más perturbaciones) ha sido corrompida por ruido considerado es Gaussiano blanco.
Transformada de Wavelet [6]	Sistema Industrial	Se presenta una curva de desviación estándar para diferentes niveles de resolución como una nueva característica para clasificar diferentes problemas de calidad de energía.	No presenta ningún caso que localice la fuente emisora de armónicos. No analiza las fases de las señales ni el desbalance del sistema.	Una aplicación industrial importante del análisis multi-resolución es para monitorear problemas de calidad de energía debido al desempeño dinámico de las plantas industriales.
Transformada Rápida de Fourier [20]	Sistema de Distribución	La ventana puede reducirse para enfocarse en una región problemática específica de una señal. La ventana puede ampliarse cuando no se detecta un problema de calidad de energía.	Existen problemas de aliasing y ruido. Hay un error introducido por las ventanas, este error se rige por un multiplicador de función del espectro de señal.	El sistema de distribución de medición desarrollado evalúa el número de formas de onda reales sobre el entorno en LabVIEW con la tarjeta de adquisición de datos (NI PCI-6036E con dieciséis entradas analógicas de 16 bits).
Transformada de Wavelet [22]	Sistema Industrial	Este algoritmo permite mediciones de magnitud y ubicación de tiempo muy precisas de huecos de tensión e identificaciones transitorias significativas.	Presenta debilidades para la detección y caracterización de distorsiones armónicas significativas. Analiza de forma individual los componentes espectrales en el sistema.	El método se ha evaluado utilizando una base de datos de perturbaciones de potencia que contiene más de 1500 registros reales de sistemas eléctricos que constan de puntos de medición de clientes industriales.

Transformada de Fourier-Wavelet [23]	Sistema de Distribución	La implementación de estas técnicas permite la identificación de magnitudes, frecuencias y fases ante eventos transitorios que comúnmente se presentan en sistemas industriales.	No presentan casos de identificación de fuentes armónicas. No presentan los efectos de resonancias cuando se energiza un capacitor.	Se analizan los armónicos del transitorio con la energización del transformador y la energización del condensador.
Filtros Digitales [12]	Sistema de Distribución	El método propuesto tiene el potencial de evaluar y clasificar diversas perturbaciones en la calidad de la energía, como interrupciones, caídas y distorsiones de estado estacionario.	El enfoque presentado por el autor analiza únicamente perturbaciones. No se presenta algún análisis espectral con señales reales.	Se simularon diversas perturbaciones típicas en un sistema de distribución como son: (a) caídas de tensión (b) interrupciones para evaluar el método de filtros digitales en la detección.
Transformada S [14]	Microred	La resolución dependiente de la frecuencia de la transformada S permite la detección de picos de tensión y muestra una buena resolución de frecuencia en la señal.	No se consideraron los efectos de ruido gaussiano en la experimentación.	Se simularon en Matlab diversas perturbaciones típicas en un sistema de distribución y se analizaron problemas de calidad de energía.
Transformada S [24]	Sistema de Distribución	La transformada S detecta y clasifica señales no estacionarias. Esta técnica es similar a la transformada wavelet, pero con una corrección de fase.	No se analiza de forma trifásica las perturbaciones y/o armónicos. La transformación S requiere un cálculo de alta complejidad.	Para la obtención de la señales se utilizaron rutinas de software MATLAB y cajas de herramientas
Transformada de Chirp Z [3]	Simulación de Señales	Permite realizar una medición precisa de la frecuencia fundamental mediante el análisis espectral de la señal de acuerdo con los requisitos de las normas IEC 61000-4-7 y 61000-4-30.	Los resultados obtenidos muestran el espectro solo contiene la frecuencia fundamental.	La simulación se desarrolló en entorno Labview por medio de una computadora personal y una placa de adquisición de datos.
Filtro de Kalman [21]	Microred Nueva Zelanda	El método modela el sistema como un modelo de estado independiente de frecuencia lineal y no requiere un conocimiento exacto de la matriz de covarianza de ruido Q.	El filtro de Kalman no es susceptible al ruido de medición, pero puede sufrir problemas de divergencia causados por el efecto de "caída" del filtro.	La microred de prueba es la parte inferior de la Isla Sur de Nueva Zelanda. La inyección de una corriente armónica de un convertidor de 6 impulsos en Invercargill 33 kV (3 fases) es considerado.
Análisis de Prony [10]	Sistema Industrial	La capacidad de identificar factores de amortiguación. Identifica armónicos durante la energización del transformador con mayor precisión la transformada de Fourier.	La velocidad computacional del algoritmo no recursivo para Prony es deficiente. La entrada de información insuficiente en el análisis de Prony origina una estimación armónica imprecisa en	El análisis espectral con la técnica de Prony se realizó durante la activación del transformador y el arranque del motor de inducción en un sistema industrial. Se utilizó para la supervisión y cancelación de armónicos transitorios del sistema industrial de potencia.

el análisis.

Transformada de Gabor [17]	Sistema de Distribución	La transformación de Gabor proporciona una longitud de ventana adecuada para determinar correctamente los componentes espectrales y además puede clasificar los eventos de perturbación según su intensidad.	No se presenta algún análisis espectral con señales reales. No analiza el sistema de forma trifásica.	Se simularon diversas perturbaciones típicas en un sistema de distribución como son: (a) caídas de tensión (b) interrupciones en un sistema de distribución.
Transformada-S [25]	Sistema de distribución	Esta técnica tiene el potencial de analizar datos en condiciones de ruido y tiene la capacidad de detectar la perturbación correctamente.	Debido a que involucra un algoritmo de redes neuronales para clasificar los eventos, si no se entrena bien el algoritmo pueden surgir errores. No se puede aplicar en tiempo real, debido a la complejidad de cómputo.	Las señales se simulan usando MATLAB de un sistema de distribución. La componente de frecuencia más alta considerada en la señal es 1 kHz (durante la perturbación transitoria).
Goertzel [2]	Microred Panel Fotovoltaico	Puede tomar secciones cortas de la señal (las ventanas son fijas) o desde la perspectiva de una operación de filtrado a una frecuencia dada (la frecuencia es fija).	Los resultados no demuestran un análisis en una microred más extensa, únicamente se analiza desde punto de vista del control de activos y reactivos de un panel fotovoltaico.	Se utilizó un simulador para verificar el rendimiento del sistema propuesto. La potencia nominal del sistema es de 3 kVA.
Análisis de Prony [11]	Sistema de Distribución	Proporciona una ventana de muestreo flexible en lugar de la ventana de muestreo fijo tradicional, esto se logra variando la longitud de la ventana según las condiciones reales del sistema.	El enfoque presentado analiza señales en modo off-line, debido a su complejidad computacional.	Una red de distribución de dos áreas con un capacitor en serie controlado por tiristores se usa para ilustrar el rendimiento del esquema de muestreo adaptativo propuesto.
Transformada S-SVM [26]	Sistema de Distribución	La principal característica de esta técnica es la resolución de la frecuencia en el tiempo para el análisis de las señales transitorias o perturbadas en una red de distribución. El número de elementos requeridos en el enfoque propuesto es menor que el de la transformada wavelet (WT).	El uso de clasificadores en este tipo de técnicas dificulta el monitorear en tiempo real.	Para demostrar el potencial de esta técnica en la extracción de la magnitud, fase y frecuencia, se realizó una simulación de una señal transitoria.

Análisis de Prony [28]	Sistema Industrial	Esta técnica obtiene las fases iniciales de cada componente espectral. El método propuesto proporciona una evaluación precisa de todos los índices en presencia de una frecuencia fundamental fluctuante.	Este enfoque no identifica fuentes emisoras de armónicos. Analiza únicamente un espectro a la vez. No es posible aplicar esta técnica en tiempo real.	Se trata de un transitorio simulado debido a la energización de un capacitor, una caída temporal de tensión y una forma de onda de con perturbaciones no estacionarias continuas y discretas. La simulación se realizó en Matlab utilizando Power System Toolbox.
Filtro de Kalman-Enjambre de Partículas [29]	Señales sintéticas	Esta técnica es capaz de analizar señales no estacionarias con amplitudes, fases y frecuencias variables. Además, puede trabajar con precisión con señales con ruido aditivo blanco.	La inestabilidad debido a la linealización y los parámetros erróneos. Los costosos de los cálculos de las matrices jacobinas.	La simulación de una señal sintética armónicamente variable en el tiempo incrustada en ruido aleatorio y sin componente de CC en descomposición, se usa para la estimación armónica.
Transformada Gabor-Wigner [15]	Señales de Distribución	Puede utilizar diferentes ventana de tiempo detectar cambios lentos se recomienda una ventana amplia y una ventana de tiempo más estrecha para detectar cambios rápidos	El enfoque presentado no analiza los coeficientes de amortiguación en señales transitorias. No se presentan ejemplos de monitoreo de fases en el sistema de distribución.	Los eventos de PQ investigados son el aumento de voltaje, la caída de tensión, los armónicos, los interarmónicos, los transitorios, los parpadeos y el cambio de voltaje con múltiples frecuencias mediante la simulación de MATLAB.
Transformada-S [27]	Señales de Distribución	Este enfoque puede detectar relacionados a disturbios de calidad de energía en tiempo real. Además se diseña y desarrolla un criterio para la clasificación inteligente de disturbio de calidad usando la transformada S.	Este enfoque no analiza múltiples señales al mismo tiempo, depende de una sola señal. No analiza los coeficientes de amortiguación.	Las señales analizadas fueron extraídas a partir de una base de datos de múltiples eventos transitorios.
Wavelet-SVM [30]	Sistema de Distribución	Se obtiene una clasificación de alta precisión. El intervalo de tiempo de muestreo es solo un ciclo.	La detección y localización de las perturbaciones de PQ por la técnica de wavelet depende completamente de qué wavelet madre se elija.	En este sistema de prueba se abordan diversos eventos transitorios, como caídas de tensión, interrupción, armónicos, transitorios, aumento de armónicos y picos de tensión.
DMD [41]	Microred 13.8 kV	La estructura espacio – temporal permite identificar los modos dominantes en un sistema. El cálculo de coeficientes de amortiguación. La estructura DMD-POD jerarquiza modos con mayor energía.	Las muestras no deben estar dañadas o corrompidas.	La microred de prueba se basa en 3 unidades de generación distribuida, y 4 buses. Donde se asumen fuente generadoras de armónicos y efectos de resonancia.
Transformada de Wavelet [18]	Sistema de Distribución	Este algoritmo es capaz de estimar los parámetros del fasor en un cuarto de ciclo de una señal de entrada.	Se requieren altos niveles de descomposición cuando la señal está influenciado por el ruido superpuesto en la señal.	Los resultados de la simulación demuestran que los métodos propuestos logran un buen rendimiento.

Transformada de Wavelet [40]	Microred	Los resultados cualitativos y cuantitativos muestran los méritos de la Transformada S sobre la transformación de Wavelet en la detección y localización de eventos y perturbaciones.	Wavelet se degrada significativamente bajo señales ruidosas	El estudio se basa en el tipo de generador síncrono que se considera equivalente a un sistema de conversión de energía eólica conectado a la red.
Wavelet-Redes neuronales [36]	Microred Opal-RT	El método trabaja con un tamaño de ventana de medio ciclo. Estima los armónicos de bajo orden dominantes en situaciones pragmáticas de desviación de frecuencia fundamental, presencia de interarmónicos, baja relación señal / ruido.	Estima solamente los armónicos de bajo orden. El enfoque no realiza un análisis trifásico del sistema.	En el simulador digital en tiempo real (Opal-RT) se ha simulado un microred de potencia que consta de una fuente, un transformador, líneas de distribución y un par de cargas representativas con interruptores automáticos (CB).
Transformada Discreta de Fourier [32,33]	Microred	El método puede rastrear las variaciones en las características de la señal de potencia, como las variaciones de tiempo de las amplitudes armónicas y la frecuencia fundamental.	Analiza señales estacionarias. Analiza una señal a la vez. No se analizan interarmónicos.	La microred consiste en paneles fotovoltaicos, generadores diésel, un sistema de almacenamiento de energía y cagas de CA.
Transformada Rápida de Fourier [33]	Sistema de Distribución	Alto rendimiento computacional. El cálculo de los coeficientes de magnitud, fase y frecuencia es preciso.	El número de Muestras debe ser potencia 2.	Como el Fluke 6100A puede generar señales de voltaje y corriente comparables a los de un sistema de distribución con una precisión de 100 ppm (0.01%), donde los armónicos reales están determinados por este equipo.
Transformada-S hiperbólica [39]	Microred	La detección oportuna de eventos transitorios a la microred de la red principal en entornos ruidosos.	El enfoque propuesto no localiza las zonas afectadas por los eventos transitorios.	El sistema con Generación Distribuida híbrido el cual consiste en sistemas fotovoltaicos y sistemas eólicos conectados a la red dentro del sistema IEEE 30-bus.
Transformada de Wavelet [31]	Sistema de Distribución	Cumple con los requisitos de tiempo para la implementación en tiempo real y ahorra recursos de hardware significativos en la implementación de FPGA.	Problemas con el ruido superpuesto en la señal por lo que aumenta significativamente la carga computacional y restringen sus aplicaciones al propósito de análisis online.	Se han utilizado señales de prueba sintéticas y mediciones con simulación/hardware, que consiste en la plataforma de software MATLAB / Simulink) y las placas Xilinx Artix-7 y FPGA AC701 están interconectadas a través de JTAG.
Transformada Rápida de Fourier [32]	Sistema Distribución	El algoritmo propuesto funciona en un rendimiento bueno y preciso con el tiempo de establecimiento dentro de medio ciclo.	Analiza solo señales estacionarias de manera efectiva. Analiza una señal a la vez. No se analizan interarmónicos.	El método propuesto es simulada por MATLAB Simulink

Filtro de Kalman [34]	Microred de prueba	Esta técnica proporciona las ubicaciones óptimas de medición en los sistemas de potencia. El filtro de Kalman puede estimar y rastrear cada inyección de armónicos en los sistemas de potencia a partir de un número limitado de sensores.	El ruido de medición armónica, tiene un efecto sobre la estimación de la fuente de inyección armónica y su error de covarianza.	Se considera el modelo de microred y se aplican los algoritmos y se obtuvieron resultados efectivos y se comparan mediante el programa MATLAB y Simulink.
Variational Mode Decomposition [38]	Microred 33kv	Esta técnica estima con precisión las amplitudes, frecuencias y fases del armónico e interarmónico. Trabaja en escenarios ruidosos.	Es necesario conocer los armónicos en la microred antes de implementarlo, para poder ajustarlo adecuadamente para una descomposición precisa de los modos que representan a la señal.	La microred consiste de un sistema fotovoltaico conectado a la red y tres generadores de inducción doblemente alimentados basados en una turbina eólica.

Conclusiones

De acuerdo con la revisión desarrollada, se puede concluir que las técnicas para el análisis espectral de señales en sistemas de distribución y en sistemas industriales varían de acuerdo a la aplicación. Para operaciones en régimen estacionario, la técnica más utilizada es la transformada rápida de Fourier, debido a que esta técnica es eficiente para calcular los índices de calidad de energía y requiere de un tiempo de cálculo bajo; sin embargo, el número de muestra debe ser potencia 2 para poder ser utilizada y presenta inexactitudes cuando se trabaja con señales en régimen no-estacionario.

Para las señales en régimen no-estacionario, la transformada S es comúnmente utilizada, debido a la extraordinaria capacidad de calcular las magnitudes, frecuencias y fases de las señales en entornos ruidosos; sin embargo, solo se aplica para el análisis de una sola fase, por lo tanto, no es posible observar el comportamiento global del sistema de manera trifásica.

Para el análisis de señales en régimen transitorio, la transformada discreta de Wavelet es la más utilizada, debido a su capacidad en la detección de picos de tensión en la energización de equipos industriales, o en la reconexión de microredes al sistema eléctrico de potencia. Este enfoque muestra una buena resolución de frecuencia en señales perturbadas. Sin embargo, su implementación de hardware se enfrenta a muchos

problemas, tales como la complejidad computacional, el tiempo de respuesta y el alto requerimiento de recursos de hardware. Además, esta técnica no extrae los coeficientes de amortiguación en señales en régimen transitorio, los cuales pueden ser útiles para el diseño óptimo de filtros para motores variables industriales.

Referencias

- [1] V. Khadkikar, D. Xu y C. Cecati, "Emerging Power Quality Problems and State-of-the-Art Solutions", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 761-763, Jan. 2017.
- [2] J. H. Kim, S. W. Lee, S. R. Lee, T. W. Lee y C. Y. Won, "Power quality control using the Goertzel algorithm for grid-connected system", *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1-3, Incheon, 2009.
- [3] M. Aiello, A. Cataliotti y S. Nuccio, "A chirp-z transform-based synchronizer for power system measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 3, pp. 1025-1032, June 2005.
- [4] W. Xu, "Component Modeling Issues for Power Quality Assessment," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 11, pp. 12-17, Nov. 2001.
- [5] Jurado, F. y Saenz, J. R, "Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events", *Electric Power Systems Research*, vol. 62, no.3, pp. 183-190, Nov. 2002.
- [6] A. M. Gaouda, M. M. A. Salama, M. R. Sultan y A. Y. Chikhani, "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1469-1476, Oct 1999.
- [7] L. Angrisani, P. Daponte, M. D'Apuzzo y A. Testa, "A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 990-998, Oct 1998.
- [8] A. A. Girgis, W. B. Chang y E. B. Makram, "A digital recursive measurement scheme for online tracking of power system harmonics," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1153-1160, Jul 1991.
- [9] Haili Ma y A. A. Girgis, "Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1659-1665, Jul 1996.
- [10] QI, Li, et al, "Prony analysis for power system transient harmonics", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2007, no 1, pp. 170-171, 2007.

- [11] J. C. H. Peng y N. K. C. Nair, "Adaptive sampling scheme for monitoring oscillations using Prony analysis," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 12, pp. 1052-1060, December 2009.
- [12] Z. Chen y P. Urwin, "Power quality detection and classification using digital filters," *IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, vol.1, pp. 6, Porto, 2001.
- [13] S. J. Huang, C. L. Huang y C. T. Hsieh, "Application of Gabor transform technique to supervise power system transient harmonics," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 5, pp. 461-466, Sep 1996.
- [14] P. K. Dash, B. K. Panigrahi y G. Panda, "Power quality analysis using S-transform," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 406-411, April 2003.
- [15] S. H. Cho, G. Jang y S. H. Kwon, "Time-Frequency Analysis of Power-Quality Disturbances via the Gabor–Wigner Transform," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 494-499, Jan. 2010.
- [16] LIN, Tao y DOMIJAN, Alexander, "Real time measurement of power disturbances: Part 1. Survey and a novel complex filter approach," in *Electric power systems research*, vol. 76, no 12, pp. 1027-1032, 2006.
- [17] A. R. Abdullah, A. Z. Sha'ameri y N. M. Saad, "Power quality analysis using spectrogram and gabor transformation," *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, pp. 1-5. Melaka, 2007.
- [18] J. Ren y M. Kezunovic, "Real-Time Power System Frequency and Phasors Estimation Using Recursive Wavelet Transform," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1392-1402, July 2011.
- [19] P. K. Dash y M. V. Chilukuri, "Hybrid S-transform and Kalman filtering approach for detection and measurement of short duration disturbances in power networks," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 2, pp. 588-596, April 2004.
- [20] G. W. Chang, C. I. Chen, Y. J. Liu y M. C. Wu, "Measuring power system harmonics and interharmonics by an improved fast Fourier transform-based algorithm," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, no. 2, pp. 193-201, March 2008.
- [21] K. K. C. Yu, N. R. Watson y J. Arrillaga, "An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1577-1584, April 2005.
- [22] O. Poisson, P. Rioual y M. Meunier, "Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform," *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*, pp. 1125-1130 vol.2, Athens, 1998.
- [23] S. Santoso, W. M. Grady, E. J. Powers, J. Lamoree y S. C. Bhatt, "Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 247-254, Jan 2000.

- [24] I. W. C. Lee y P. K. Dash, "S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 4, pp. 800-805, Aug. 2003.
- [25] S. Mishra, "Detection and classification of power quality disturbances using S-Transform and probabilistic neural network," 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1-1, Seattle, WA, 2009.
- [26] Panigrahi, B. K., Dash, P. K. y Reddy, J. B. V. "Hybrid signal processing and machine intelligence techniques for detection, quantification and classification of power quality disturbances," in Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.12, no. 5, pp. 102-104, 2009.
- [27] Salem, M. E., Mohamed, A. y Samad, S. A. "Rule based system for power quality disturbance classification incorporating S-transform features", in Expert Systems with Applications, vol.12, no.2, pp. 13-45, 2010.
- [28] A. Andreotti, A. Bracale, P. Caramia y G. Carpinelli, "Adaptive Prony Method for the Calculation of Power-Quality Indices in the Presence of Nonstationary Disturbance Waveforms," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 874-883, April 2009.
- [29] J. B. V. Reddy, P. K. Dash, R. Samantaray y A. K. Moharana, "Fast Tracking of Power Quality Disturbance Signals Using an Optimized Unscented Filter," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 12, pp. 3943-3952, Dec. 2009.
- [30] Moravej, Z., Abdoos, A. A. y Pazoki, M. "Detection and classification of power quality disturbances using wavelet transform and support vector machines", in Electric Power Components and Systems, vol. 13, no. 45, pp. 205-209, 2009.
- [31] V. K. Tiwari y S. K. Jain, "Hardware Implementation of Polyphase-Decomposition-Based Wavelet Filters for Power System Harmonics Estimation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 7, pp. 1585-1595, July 2016.
- [32] Goh, Z. P., Radzi, M. A. M., Von Thien, Y., Hizam, H. y Wahab, N. I. A. "Hybrid FFT-ADALINE algorithm with fast estimation of harmonics in power system," in IET Signal Processing, vol. 10, no 8, pp. 855-864, 2016.
- [33] H. Wen, J. Zhang, Z. Meng, S. Guo, F. Li y Y. Yang, "Harmonic Estimation Using Symmetrical Interpolation FFT Based on Triangular Self-Convolution Window," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, no. 1, pp. 16-26, Feb. 2015.
- [34] NAYAK, Pravati, et al. "Comparative study of harmonics estimation in micro grid using adaptive extended Kalman filter" in Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference on IEEE, p. 434-438, 2016.
- [35] Paraskevas, I., Prekas, K., Potirakis, S. M. y Rangoussi, M. "On the use of time-frequency distributions for the power quality problem of harmonics," pp. 122-122, 2010.

- [36] Jain, S. K. y Singh, S. N. "Low-order dominant harmonic estimation using adaptive wavelet neural network," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no 1, pp. 428-435, 2014.
- [37] J. Xiao, L. Bai, F. Li, H. Liang y C. Wang, "Sizing of Energy Storage and Diesel Generators in an Isolated Microgrid Using Discrete Fourier Transform (DFT)," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 3, pp. 907-916, July 2014.
- [38] P. D. Achlerkar, S. R. Samantaray y M. S. Manikandan, "Variational Mode Decomposition and Decision Tree Based Detection and Classification of PowerQuality Disturbances in Grid-Connected Distributed Generation System," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [39] S. R. Mohanty, N. Kishor, P. K. Ray y J. P. S. Catalo, "Comparative Study of Advanced Signal Processing Techniques for Islanding Detection in a Hybrid Distributed Generation System," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 1, pp. 122-131, Jan. 2015.
- [40] P. K. Ray, N. Kishor y S. R. Mohanty, "Islanding and Power Quality Disturbance Detection in Grid-Connected Hybrid Power System Using Wavelet and S-Transform," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1082-1094, Sept. 2012.
- [41] A. E. Saldaña, E. Barocio, A. R. Messina, J. J. Ramos, Juan Segundo y G. A. Tinajero, "Monitoring Harmonic Distortion in Microgrids using Dynamic Mode Decomposition" in IEEE General Meeting, Chicago, Illinois, 2017.
- [42] J. A. de la O Serna, J. M. Ramirez, A. Zamora Mendez y M. R. A. Paternina, "Identification of Electromechanical Modes Based on the Digital Taylor-Fourier Transform," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 1, pp. 206-215, Jan. 2016.
- [43] Platas-Garza, M. A. y de la O Serna, J. A. "Polynomial implementation of the Taylor-Fourier transform for harmonic analysis," in IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 63, no 12, pp. 2846-2854, 2014.