



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Mecatrónica

Cuantificación de disturbios eléctricos a través de técnicas de
Inteligencia Artificial y Computación paralela

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctor en Mecatrónica

Presenta

Francisco José Solís Muñoz

Dirigido por:

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Santiago de Querétaro, Qro, México, Octubre 2020.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Mecatrónica

Cuantificación de disturbios eléctricos a través de técnicas de
Inteligencia Artificial y Computación paralela

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctor en Mecatrónica

Presenta
Francisco José Solís Muñoz

Dirigido por:
Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
Presidente

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Secretario

Dr. Luis Morales Velázquez
Vocal

Dr. René de Jesús Romero Troncoso
Suplente

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Octubre de 2020
México

Resumen

Las técnicas para el procesamiento de señales digitales son pilares fundamentales para el desarrollo de la ingeniería eléctrica. A través de este tipo de técnicas es posible realizar un estudio sobre los distintos datos que arrojan los sensores propios de cada dispositivo. De manera más específica, dentro de la industria las señales de voltaje y corriente en la alimentación eléctrica de los dispositivos son señales de gran relevancia, ya que un disturbio presentado dentro de estas puede provocar un fallo en el proceso de fabricación. El propósito de los sistemas de monitorio de la calidad de la energía eléctrica es el de ofrecer información sobre los distintos disturbios que se presentan en las señales eléctricas que alimentan a los dispositivos. A través de la detección, clasificación y cuantificación de los disturbios eléctricos es posible obtener una medida de qué tan sana es la señal eléctrica, reduciendo de esta forma el riesgo al monitorizar esta característica. La cuantificación de disturbios es un problema donde se desea obtener un ajuste de una señal real eléctrica sobre un modelo matemático, que sea capaz de representar los distintos posibles disturbios. Este problema puede ser resuelto a través de algoritmos de optimización meta-heurística que permitan optimizar la función de ajuste de error, maximizando la bondad del ajuste obtenido a través de los parámetros estimados. Debido a que el tipo de señales que se tratan en esta área son de alta frecuencia de adquisición, su procesamiento conlleva una alta carga computacional, es por ello que la arquitectura de cómputo en paralelo es útil en este caso. A través de la potencia de cómputo multinúcleo de la tarjeta gráfica es posible obtener resultados de manera más rápida, creando de esta manera un proceso en línea. El presente trabajo viene a aportar un método capaz de aunar métodos de optimización meta-heurística modernos implementados bajo una arquitectura de cómputo en paralelo para solucionar el problema de la cuantificación de disturbios eléctricos en línea, presentando una metodología que se defina por su capacidad de ajuste y tiempo de respuesta.

Palabras clave: Calidad de la energía, Inteligencia Artificial, Computación Paralela, Cuantificación de Disturbios, Detección de Disturbios, Clasificación de Disturbios.

Summary

Techniques for digital signal processing are fundamental pillars for the development of electrical engineering. Through these techniques, it is possible to carry out a study on the different data provided by the sensors of each device. Specifically, within the industry voltage and current signals present at the power supply of the devices are of great relevance, since a disturbance presented within it could cause a failure in the manufacturing process. The purpose of electrical energy quality monitoring systems is to offer information about the different disturbances that occur in the electrical signals that feed the devices. Through the detection, classification and quantification of electrical disturbances, it is possible to obtain a measure of how healthy the electrical signal is, thus reducing the risk by monitoring this characteristic. The quantification of disturbances is a problem where it is desired to get a fit of a real electrical signal on a mathematical model which is capable of representing the different disturbances. This problem could be solved through meta-heuristic optimization algorithms that allow optimizing the error function, maximizing the goodness of fit obtained through the estimated parameters. Because the type of signals that are processed in this area are of high acquisition sampling rate, their processing involves a high computational load, which is why the parallel computing architecture is useful in this case. Through the multi-core computing power of the graphics card it is possible to obtain results more quickly, thus creating an online process. The present work contributes a method capable of combining modern meta-heuristic optimization methods implemented under a parallel computing architecture to solve the problem of quantifying electrical disturbances online, presenting a methodology that stands out itself because of its ability to adjust and its response time.

Keywords: Power Quality, Artificial Intelligence, Parallel Computing, Disturbances Quantification, Disturbances Detection, Disturbances Classification.

Agradecimientos

Todo el mérito del trabajo realizado tiene como base la educación que mis padres me otorgaron a través de los años, orientándome y guiándome en mi proceso educativo, tratando siempre de que fuese una persona culta, dándome la oportunidad de poder acceder a una formación superior. También, a mi esposa Engadi y su familia, mismos que me han hecho sentir como en casa en mi llegada a México y han ofrecido su disponibilidad para que pudiese centrarme en mi formación con el nivel de exigencia que requiere. En la universidad, agradecer principalmente al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, mismo que confió en mí desde los requisitos de acceso para la entrada a este programa y, junto a mi asesor el Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar y el Dr. René de Jesús Romero Troncoso, han tenido la paciencia y dedicación para aconsejarme y darme las herramientas necesarias para poder desenvolverme en el ámbito de la escritura científica, cuyo trabajo dentro del doctorado culmina con esta tesis. Agradecer también al Dr. David Alejandro Elvira Ortiz por su acompañamiento durante el proceso de diseño e implementación de ciertas partes concretas de este trabajo, así como su dedicación en el proceso de revisión de este mismo documento. No dejando atrás al Dr. Luis Morales Velázquez, mismo que con su gran experiencia en las cuestiones tecnológicas que rodean al proyecto ha sabido encaminarlo hacia una solución potente y moderna.

Índice general

Resumen.....	i
Summary	ii
Agradecimientos	iii
Índice general.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Antecedentes	3
I.2. Descripción del problema.....	12
I.3. Justificación.....	14
I.4. Hipótesis.....	16
I.5. Objetivo general	17
I.6. Objetivos particulares.....	17
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	18
II.1. La calidad de la energía.....	18
II.2. Técnicas de procesamiento de señales digitales.....	27
II.3. Técnicas de optimización meta-heurísticas.....	35
II.4. Estimación paramétrica	39
II.5. Computación de altas prestaciones	40
II.6. La metodología MGA-PQ.....	43
II.7. La metodología GA-PSO	44
III. METODOLOGÍA	46
III.1. Bloque de adquisición	48

III.2. Bloque de estimación paramétrica	53
III.3. Configuración 1. Estimación paramétrica basada en DE.....	53
III.4. Configuración 2. Estimación paramétrica basada en HHO.....	62
III.5. Configuración 3. Estimación paramétrica basada en SANN	67
III.6. Bloque de reconstrucción.....	72
III.7. Estrategia de implementación y optimización de rendimiento	74
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
IV.1. Metodología general.....	79
IV.2. Configuración 1. Estimación paramétrica basada en DE.....	83
IV.3. Configuración 2. Estimación paramétrica basada en HHO.....	97
IV.4. Configuración 3. Estimación paramétrica basada en SANN	101
V. CONCLUSIONES.....	110
V.1. Validación de la hipótesis y cumplimiento de objetivos.....	110
V.2. Aportes del trabajo	111
V.3. Prospectivas del trabajo.....	113
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
VII. Anexo A: Artículo publicado sobre configuración metodológica basada en DE en Journal JCR	122
VIII. Anexo B: Artículo publicado sobre configuración metodológica basada en HHO en Journal JCR.....	133
IX. Anexo C: Artículo en proceso de envío.....	139
X. Anexo D: Carta de registro de propiedad intelectual y cartas de usuario.....	162

Índice de figuras

Figura II.1. Señal sana, la cual no presenta ningún tipo de disturbio eléctrico, tan solo se percibe una señal senoidal con una componente fundamental según la norma, con variaciones despreciables las cuales no son detectadas como disturbios.....	20
Figura II.2. Señal con disturbio de tipo sag, el cual se corresponde con una reducción temporal de la amplitud de la onda senoidal fundamental mayor al 10%.	20
Figura II.3. Señal con disturbio de tipo swell, el cual se corresponde con un aumento temporal de la amplitud de la onda senoidal fundamental mayor al 10%.	21
Figura II.4. Señal con disturbio de tipo interrupción, el cual se corresponde con una amplitud pico de la señal fundamental menor al 10%.	22
Figura II.5. Señal con contenido armónico de tercer orden, donde se puede apreciar una aparente distorsión de onda a causa de la suma de varias componentes senoidales.	22
Figura II.6. Señal con disturbio de tipo transitorio de impulso, en el cual es posible percibir el pico de tensión producido, el cual se desvanece de manera casi instantánea.	23
Figura II.7. Señal con disturbio de tipo transitorio oscilatorio, donde se puede apreciar la forma alternante propia de este tipo de fenómenos mientras este va degradándose.	23
Figura II.8. Señal con disturbio de tipo flicker, donde es posible observar un comportamiento oscilante en el parámetro de amplitud de la onda fundamental.	24
Figura II.9. Señal sana con frecuencia estándar de 60 Hz junto a señal con una variación de frecuencia presente del -5% (57 Hz).....	24
Figura II.10. Respuesta de magnitud de un filtro Elíptico de paso bajo. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).	31
Figura II.11. Respuesta de magnitud de un filtro Butterworth paso alto. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).	31
Figura II.12. Respuesta de magnitud de un filtro Chebyshev I paso banda. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).	32
Figura II.13. Respuesta de magnitud de un filtro Chebyshev II elimina banda. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).....	32
Figura III.1. Diagrama general de un sistema PQD que implementa la metodología propuesta..	47
Figura III.2. Diagrama de conexión del sistema de adquisición digital sobre una red trifásica. ..	49

Figura III.3. Señales reales. Del ámbito industrial se encuentran las distintas fases de una señal trifásica que muestran disturbios: transitorio (U1, U2 y U3), flicker (U4) y sag (U5). Del hospital se muestra una señal con sag (U6).....	52
Figura III.4. Diagrama general de la metodología basada en evolución diferencial.	54
Figura III.5. Diagrama de flujo del proceso de estimación paramétrica basado en evolución diferencial.	55
Figura III.6. Diagrama general de la metodología basada en HHO.....	62
Figura III.7. Señal sintética con transitorio de tipo impulsivo (izquierda) y transitorio de tipo impulsivo aislado con comportamiento de este señalado (derecha).	64
Figura III.8. Señal sintética con transitorio de tipo oscilatorio (izquierda) y transitorio de tipo oscilatorio aislado con comportamiento de este señalado (derecha).	65
Figura III.9. Detalle del módulo de detección y clasificación de disturbios de tipo transitorio de la metodología propuesta basada en el algoritmo de optimización del águila Harris.....	66
Figura III.10. Diagrama general de la metodología basada en SANN.	67
Figura III.11. Diseño de la estructura SANN estacionaria.	69
Figura III.12. Diseño de la estructura SANN transitoria.	69
Figura III.13. Diagrama del proceso de integración continua y desarrollo continuo basado en tecnologías en la nube y manejo de repositorios.	77
Figura IV.1. Gráfica de error de ajuste relativo sobre una señal senoidal utilizando una metodología basada en frecuencia fija.	81
Figura IV.2. Diagrama de contornos de la función del error cuadrático medio en la búsqueda por rejilla del par de parámetros de frecuencia y fase (2D).	82
Figura IV.3. Diagrama de contornos de la función del error cuadrático medio en la búsqueda por rejilla del par de parámetros de frecuencia y fase (3D).	82
Figura IV.4. Gráfica de área de evolución del error de ajuste por distintos tipos de estrategia en la metodología basada en evolución diferencial.	85
Figura IV.5. Gráfico de tiempo de ejecución por tamaño de población y puntos de muestra de la señal a través de CPU en esquema de procesamiento secuencial.	88
Figura IV.6. Gráfico de tiempo de ejecución por tamaño de población y puntos de muestra de la señal a través de GPU en esquema de procesamiento paralelo.	89

Figura IV.7. Gráfica de ajuste de una señal compleja que contiene flicker, sag y contenido armónico de quinto orden utilizando la metodología propuesta basada en evolución diferencial.	93
Figura IV.8. Gráfica comparativa de error de ajuste (valor real) sobre una señal compleja utilizando la metodología basada en evolución diferencial y MGA-PQA.	94
Figura IV.9. Gráfica de ajuste usando la metodología propuesta basada en evolución diferencial sobre la señal U6 referente a un centro sanitario, donde se puede apreciar un sag leve entre los segundos 0.15 y 0.25.....	95
Figura IV.10. Gráfica comparativa de error de ajuste (valor real) sobre la señal U6 utilizando la metodología basada en evolución diferencial y MGA-PQA.	96
Figura IV.11. Señal senoidal con disturbio transitorio de tipo impulsivo (izquierda) junto a salida del algoritmo DWT (derecha).....	99
Figura IV.12. Señal senoidal con disturbio transitorio de tipo oscilatorio (izquierda) junto a salida del algoritmo DWT (derecha).....	100
Figura IV.13. Muestras de tipos de caso por categoría para el test sobre el banco de señales sintéticas, incluyendo ajustes por metodología SANN y GA-PSO.	103
Figura IV.14. Ajuste realizado sobre señales reales utilizando la metodología propuesta SANN y comparativa con GA-PSO.....	109

Índice de tablas

Tabla II.I. Características de cada tipo de disturbio. Fuente: Masoum et al. (2015, p. 9) (adaptación).....	25
Tabla III.I. Categorización de las señales sintéticas a generar junto con su respectiva descripción y parametrización específica para cada uno de los casos.	70
Tabla IV.I. Tabla ordenada por tamaño de población, donde se muestra el conjunto de estrategias e hiper-parámetros de evolución diferencial junto al error relativo del ajuste.	86
Tabla IV.II. Tabla de resultados promedios de ajuste sobre banco de pruebas de señales sintéticas bajo las metodologías MGA-PQA (anterior) y la metodología basada en evolución diferencial (Propuesta).	91
Tabla IV.III. Matrices de confusión para el clasificador de disturbios de tipo transitorio utilizando distintos valores de umbral th	99
Tabla IV.IV. Resultados numéricos correspondientes a la ejecución del banco de pruebas sobre señales sintéticas usando la metodología basada en SANN, comparación con GA-PSO.	104
Tabla IV.V. Resultados numéricos correspondientes a la ejecución del banco de pruebas sobre señales reales usando la metodología basada en SANN, comparación con GA-PSO.	105
Tabla IV.VI. Resultados de estimación paramétrica para los disturbios detectados por las metodologías GA-PSO y SANN-PQ sobre las señales U1, U2 y U3.	108

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas para el procesamiento de señales digitales son pilares fundamentales para el desarrollo de la ingeniería eléctrica. A través de este tipo de técnicas es posible realizar un estudio sobre los distintos datos que arrojan los sensores propios de cada dispositivo. De manera más específica, dentro de la industria las señales de voltaje y de corriente en la alimentación eléctrica de los dispositivos son señales de gran relevancia, ya que un disturbio presentado dentro de éstas puede provocar un fallo en el proceso de fabricación. El propósito de los sistemas de monitoreo de la calidad de la energía eléctrica es el de ofrecer información sobre los distintos disturbios que se presentan en las señales eléctricas que alimentan a los dispositivos. A través de la detección, clasificación y cuantificación de los disturbios eléctricos es posible obtener una medida de qué tan sana es la señal eléctrica, reduciendo de esta forma el riesgo o consecuencias a los equipos, procesos y usuarios, derivados de una mala calidad de la energía. La cuantificación de disturbios es un problema donde se desea obtener un ajuste de una señal real eléctrica sobre un modelo matemático, que sea capaz de representar los distintos posibles disturbios. Este problema puede ser resuelto a través de algoritmos de optimización meta-heurística que permitan optimizar la función de ajuste de error, maximizando la bondad del ajuste obtenido a través de los parámetros estimados. Para garantizar la adecuada representación de las frecuencias contenidas en una señal real, generalmente se requiere de altas tasas de muestreo por lo que el procesamiento de estas señales requiere de una alta carga computacional, y es por ello que la arquitectura de cómputo en paralelo es útil en este caso. A través de la potencia de cómputo multinúcleo de la tarjeta gráfica es posible obtener resultados de manera más rápida, creando de esta manera un proceso en línea.

El presente trabajo viene a aportar un método capaz de aunar métodos de optimización meta-heurística modernos implementados bajo una arquitectura de cómputo en paralelo para solucionar el problema de la cuantificación de disturbios eléctricos en línea, presentando una metodología que se defina por su alta capacidad de ajuste y su bajo tiempo de respuesta. A fin de poder conformar un documento legible, este ha sido dividido en distintos capítulos los cuales presentan el trabajo realizado de manera progresiva en su desarrollo, mismos que se describen a continuación.

En el primer capítulo, la introducción, se presentan los antecedentes dentro del área de investigación propia de la calidad de la energía, partiendo de lo general en el ámbito internacional a lo específico en el ámbito local, culminando esta parte con un estudio de los métodos de cuantificación de los disturbios de la energía eléctrica y un estudio de los trabajos de procesamiento en paralelo dentro del campo de la energía. Además de ello, se establece el objetivo general, mismo que es desglosado en distintos objetivos específicos, así como la hipótesis de la investigación y la justificación de la necesidad de realizar el presente estudio. Este primer capítulo llega a su fin con una estrategia de trabajo, conocida como planteamiento general, donde se describe cómo se pretenden alcanzar cada uno de los objetivos.

Posteriormente, el segundo capítulo versa sobre la fundamentación teórica y práctica, necesarias para el desarrollo de este trabajo. A través del desarrollo de este capítulo se abordarán todos los temas de las distintas áreas del conocimiento que fueron necesarios para poder desarrollar y evaluar la metodología presentada de una manera extensa, acompañándose cada una de las herramientas con la literatura sugerida que fue tomada como base para poder aplicarla en distintas etapas del trabajo.

Prosiguiendo a este, se encuentra el tercer capítulo en el que se presenta una metodología propuesta y se describe en detalle cada uno de los pasos que esta implica por medio de un diagrama general que dará claridad al panorama general de la propuesta y su posterior descripción detallada.

Tras el capítulo correspondiente a la metodología viene el capítulo cuatro, en el que se presentan los resultados obtenidos durante la parte experimental de la propuesta metodológica y la discusión de los mismos, varias observaciones se obtienen y describen aquí.

Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones del trabajo, confirmando que se cumplieron los objetivos específicos y general y destacando algunas observaciones puntuales durante el desarrollo del trabajo. Aquí también se presentan las perspectivas del proyecto, es decir, aquellas consideraciones que podrían dar seguimiento a esta investigación y que podrían llevarse a cabo en el futuro.

I.1. Antecedentes

Con el fin de poder describir aquello que ya ha sido realizado dentro del área de conocimiento que compete a este mismo estudio, así como detectar las áreas de oportunidad que son atacadas en este mismo trabajo, se presentan los antecedentes de este trabajo. Estos antecedentes han sido subdivididos en distintas secciones de manera que se comienza con un breve análisis histórico sobre el origen del estudio de la calidad de la energía eléctrica junto a sus aplicaciones, se realiza una indagación enfocada dentro de la industria manufacturera, así mismo, se realiza una investigación sobre los sistemas de monitoreo de la calidad de la energía actuales y finalmente se desarrolla una reseña sobre las implementaciones de la arquitectura de cómputo en paralelo para el procesamiento digital de señales.

El interés por el estudio de la calidad de la energía tiene su origen en el estudio de los disturbios eléctricos producidos por los fenómenos naturales, más en concreto, en las descargas eléctricas que se producían durante una tormenta. Whitehead (1938) presenta la necesidad de tomar medidas para paliar los efectos de los rayos que inciden sobre las subestaciones eléctricas, tomando como precedentes daños ocurridos en instalaciones de este tipo durante los dos años anteriores al estudio. Sin embargo, un agente externo climático, como puede ser un rayo, no es el único tipo de agente que puede provocar un disturbio dentro de la red eléctrica. Por ejemplo, Frichtel (1971), Lee y Chin (1971), y Smichdt y Reiquam (1978) en sus investigaciones posteriores arrojaron luz a esta área de la ciencia en los años subsiguientes con aplicaciones sobre la incidencia de la calidad de la energía eléctrica en el diseño aeronáutico, siempre ligado a aplicaciones de ámbito militar. Tras estos trabajos se inició una línea de investigación aplicada a la industria, tomando como primer trabajo un artículo donde se detallan las ventajas de aplicar el análisis de la calidad de la energía dentro de este ámbito, tal como apunta el trabajo de Mcfadden (1971), sin embargo, no fue directamente en el plano industrial donde ésta área de la ciencia alcanzó más popularidad en esa época, sino en la generación de energía eléctrica a partir de molinos de viento en los años consecutivos, esta nueva área del conocimiento se vio reforzada por distintas publicaciones científicas, todas ellas justificadas por la variabilidad de los parámetros de onda producidos por este tipo de energía (Park et al., 1984; Taylor, 1987; Newton y Clark, 1993; Keller, 1994).

Recientemente se han realizado estudios que señalan distintos factores que son responsables de provocar la aparición de disturbios dentro de las señales de la red eléctrica. Iagăr (2019) en su estudio trata sobre la inyección de estos disturbios debido al uso de las máquinas-herramientas que realizan distintos procesos en la industria. Mientras que Bozicek et al. (2018) muestran en su trabajo las consecuencias del uso de los dispositivos de electrónica de potencia sobre la red eléctrica. Debido a que la industria de la manufactura continua utilizando este tipo de dispositivos para sus operaciones, el área de investigación de la calidad de la energía es relevante para esta.

La calidad de la energía dentro de la industria es un área de investigación que lleva estudiándose formalmente desde finales de la década de 1980, época en la que se establecieron los primeros estándares completos. En relación a esto, el Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (*Institute of electrical and electronics engineers, IEEE*) (1987, 1989) estableció, a través de dos escritos estos primeros estándares. Dentro de la industria de la automatización, la presencia de dispositivos de control de lógica programable (PLC), para obtener una automatización de los procesos en coexistencia con las máquinas-herramientas, provocaba que el ruido introducido en la red eléctrica periférica por estas últimas citadas afectase negativamente al control de la producción. Por ejemplo, Martzloff y Hahn (1970) ya habían reportado anteriormente que esto ocurría, tanto en la industria como en el hogar. Sin embargo, este tema obtuvo mayor interés en la década de 1990 ya que, tal como apunta Sharma (2011) en su obra, existía una transformación digital latente dentro de la industria de manera propietaria, misma que pasaría a ser abierta a partir de la siguiente década. La automatización llegó a la industria de una manera más pronunciada a través de esta transformación, donde los sistemas de control digital se vinculaban de manera más pronunciada con la maquinaria de alta potencia, ya presente en los procesos de fabricación. Dispositivos como los PLC (Hughes, 2005) y aplicaciones de control de supervisión y adquisición de datos (*supervisory control and data acquisition, SCADA*) (Boyer, 2004), servían de apoyo para lograr una automatización del proceso de manufactura.

La dependencia sobre la estabilidad de los sistemas de control ha incrementado a través del tiempo, haciendo de esta un elemento crítico dentro en los procesos industriales, debido a que los procesos inherentes a la fabricación dependen del control digital. Este requisito ha dado lugar a los investigadores para desarrollar diferentes metodologías que permitan obtener el estado actual

de la calidad de la energía suministrada a los dispositivos conectados. Revisiones de distintos métodos para analizar la calidad de la energía han sido publicadas por Ahmad et al. (2015), Ray et al. (2018), Liu et al. (2018) y más recientemente por Mishra (2019).

Gracias al poder computacional de los procesadores que son fabricados, hoy en día se pueden resolver tareas más complejas en un tiempo más reducido, haciendo posible la implementación de algoritmos de inteligencia artificial de manera completa, situación que en un momento anterior, aun con las técnicas de inteligencia artificial desarrolladas, no pudo ser posible dando lugar a lo que se conoce como inviernos de la inteligencia artificial (*AI winter* en inglés), los cuales tuvieron lugar en diferentes momentos del siglo XX tal como afirma Yasnitsky (2020). Las implementaciones basadas en el aprendizaje automático (redes neuronales artificiales, por ejemplo) en un tiempo pasado no cumplieron con las altas expectativas que se tenían por parte de un público mayormente agnóstico, todo esto debido principalmente a tres motivos: no existía una cantidad de datos suficientemente extensa para entrenamiento del sistema, era necesario investigar sobre algoritmos de entrenamiento que fuesen eficientes y la potencia de cómputo de aquella época no era comparable a la que tenemos actualmente. El hecho de que este tipo de algoritmos pudiesen ser aplicables daría lugar, posteriormente, a la entrada de los sistemas ciber-físicos dentro de la industria, conformando así la cuarta revolución industrial.

La cuarta revolución industrial (también conocida como Industria 4.0) fue establecida en 2016 y utiliza como tecnologías de soporte fundamental en su incursión en la industria la implementación de sistemas ciber-físicos, los cuales, permiten obtener mayor cantidad de información sobre el proceso de fabricación real. Al respecto, Patnaik (2020) describe en su trabajo que esta revolución lleva consigo un enaltecimiento de las teorías del internet de las cosas (IoT), el análisis de datos y los sistemas ciber-físicos. Así mismo, tal y como señalan en su obra Ustundag y Cevikcan (2018), estos mismos sistemas ciber-físicos se definen por estar compuestos por su infraestructura física y su capacidad computacional.

En cuanto a la teoría del internet de las cosas dentro de esta nueva realidad, a través de distintos sensores colocados dentro de la línea de producción, junto con un análisis de datos exhaustivo mediante algoritmos de inteligencia artificial, se implementa una arquitectura de sistema de producción ciber-física (Gilchrist, 2016), la cual permite mejorar el sistema de producción rebajando el número de fallos y aplicando mantenimiento a los sistemas cuando se

pronostique un fallo (mantenimiento predictivo), el cual puede ser más o menos lejano, en vez de usar el modelo costoso de mantenimiento periódico correctivo, algo que ya se venía trabajando anteriormente mediante tareas tales como el análisis de vibraciones, análisis de aceite y partículas, ultra sonido e imágenes del espectro de termografía infrarroja, tal como apuntan Scheffer y Girdhar (2004) en su obra.

Los sistemas ciber-físicos requieren de un mayor costo de implementación ya que conllevan no tan solo la parte física de las máquinas-herramientas convencionales sino además todo el sistema digital que hace posible su capacidad computacional (instrumentación más internet de las cosas). Sin embargo, su costo de mantenimiento es mucho menor debido a que no se realiza un mantenimiento programado que puede dar lugar a un sobre-mantenimiento o mantenimiento no adecuado (Chen, 2018), por lo que dan una mayor oportunidad de incursionar dentro de la industria a nuevos inversores. Dentro de la información que se toma para su análisis se encuentra la información referida a la tensión y corriente de las líneas eléctricas de la fábrica, dando lugar posteriormente, a su análisis; es en este punto concreto, donde toman lugar las metodologías de monitoreo de la calidad de la energía, mismas que se definen a continuación.

Los sistemas de monitoreo de la calidad de la energía permiten obtener información sobre el estado actual de la red eléctrica, la implementación de estos sistemas, según Singh et al. (2015), se puede realizar con distintos objetivos tales como diagnosticar incompatibilidades entre la tensión de suministro y los dispositivos conectados a la red eléctrica, evaluar el entorno sobre el que se encuentra una instalación de un dispositivo o realizar una medición y predicción del desempeño de un dispositivo para poder añadir sistemas de mitigación de disturbios

. Actualmente, los sistemas de monitoreo se basan, en su lógica mayormente, en una combinación de técnicas de análisis de señales junto a métodos de inteligencia artificial, esta tendencia ha ido presentándose de manera creciente a través del tiempo tal como se puede observar en el estudio bibliométrico por Montoya et al. (2016). tal como apuntan los estudios de estado del arte realizados sobre esta área por Ozcanli et al. (2020), el cual se centra en una revisión de las técnicas de aprendizaje profundo y el trabajo de Thakur y Singh (2015) donde se aborda un conjunto de técnicas más amplias dentro del campo de la inteligencia artificial. La detección, clasificación y cuantificación de disturbios eléctricos son objetivos de estos sistemas de monitoreo.

El hardware en el que este tipo de sistemas está basado posee como característica principal un sistema de muestreo para la adquisición de datos, el cual funciona a una alta frecuencia, de tal forma que es posible a través de este capturar de manera detallada tanto los disturbios que aparecen en el espectro de baja frecuencia como en el de alta, mismo espectro de frecuencias donde se produce el contenido armónico de alto nivel. Según Sankaran (2001), el límite inferior para este valor de la frecuencia de muestreo, para este tipo de herramientas, debe ser el correspondiente al factor del criterio de Nyquist para el contenido armónico de orden 25, por lo que el dispositivo debe ser capaz de captar al menos 3000 muestras por segundo (basándose en una onda fundamental de 60 Hz) para poder distinguir correctamente el contenido de forma de onda. Sin embargo, en su misma publicación Sankaran advierte que para tratar con fenómenos de tipo transitorio esta cifra puede elevarse hasta valores atípicos de frecuencias de hasta 4 millones de muestras por segundo.

Estos sistemas pueden tener una o varias entradas, a fin de que puedan adquirir varias fases de la red eléctrica de manera simultánea sin necesidad de usar varios dispositivos. Además, adecúan la señal para que sea tratada por el convertidor analógico digital, almacenando estos datos de manera local persistente para un procesamiento fuera de línea, tal como el dispositivo llamado PQ-UAQ desarrollado por el equipo de investigación HSPdigital propio de la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual ha demostrado su eficacia para la adquisición de los datos que posteriormente han sido utilizados para alimentar algoritmos con aplicación en energía fotovoltaica (Jaen-Cuellar, 2019).

Otro tipo de sistemas se basan en transmitir a través de una red de datos la señal a una central de procesamiento, mientras que otros sistemas adquieren y analizan las señales de manera local en un sistema embebido. Un ejemplo de un sistema embebido que realiza esta tarea es el de la implementación presentada por Valtierra-Rodríguez (2013), en cuyo trabajo se presenta un sistema que ejecuta una técnica basada en redes neuronales para obtener un índice de la calidad de la energía de manera trifásica, todo ello implementado bajo un dispositivo de matriz de puertas lógicas programables en campo (*field programmable gate array*, FPGA). Por otra parte, otra implementación de un sistema embebido para realizar este análisis se presenta en el trabajo de Santos et al. (2019), donde un sistema basado en el hardware Raspberry Pi 3 y un sistema basado en el micro-controlador NodeMCU Amica son comparados entre sí.

Debido a que estos datos se almacenan en un formato digital la IEEE (2019) recientemente presentó una revisión sobre el tipo de formato estándar para almacenar estos mismos datos de señales para análisis de la calidad de la energía en formato digital, este estándar es nombrado como formato de intercambio de datos de la calidad de la energía (*power quality data interchange format*, PQDIF). A través de este estándar es posible utilizar bancos de datos estandarizados para la aplicación de algoritmos de monitoreo de la calidad de energía, por ejemplo, para realizar una comparativa de precisión o de tiempo de procesamiento.

La detección de disturbios es una tarea que exige acotar la aparición de éstos dentro de la línea de tiempo de la muestra, su naturaleza se basa principalmente en la aplicación de umbrales sobre descriptores de la señal eléctrica, sin embargo, esta tarea suele estar acompañada de un procesamiento de señal para reducir, entre otros factores, el nivel de ruido de la señal, por lo que puede llegar a ser una tarea compleja. Khoshkbar-Sadigh y Smedley (2016) presentan un ejemplo de esta donde a través de la transformada dq es posible detectar disturbios estacionarios de variaciones de voltaje. De manera similar, Latran y Teke (2015) desarrollaron anteriormente para este mismo fin un método basado en la transformada wavelet. Por su parte, Nagata et al. (2018) en su trabajo presentaron una metodología basada en el análisis de componentes independientes (*independent component análisis*, ICA) para poder realizar la detección de disturbios, en su metodología se aplica un umbral tras realizar un filtrado sobre las filas de la matriz resultante del algoritmo ICA. Los métodos de detección, al poseer menos complejidad, muestran como ventaja la baja carga computacional en su aplicación, por lo que pueden ser ejecutados en tiempo real, es decir, es posible procesar una muestra antes de completar la adquisición de la siguiente.

La clasificación de disturbios es una tarea más compleja debido a que internamente está incluida una detección de éstos. A través de la clasificación es posible definir qué disturbio eléctrico está ocurriendo a partir de la señal de voltaje o corriente, por lo que se utilizan técnicas estadísticas multivariantes y técnicas de inteligencia artificial, esta área es conocida como minería de datos, la cual se ha ido desarrollando de manera más acrecentada en los últimos años debido a la evolución de la informática. Sobre este tema, Ghosh y Lubkeman (1995), Jayasree et al. (2010), Huang et al. (2012), Kanirajan y Kumar (2015) trataron en sus publicaciones sobre cómo es posible aplicar técnicas de redes neuronales para realizar la tarea de clasificación de disturbios, en estos trabajos se utilizan distintas características de la señal y sus transformadas para poder crear

descriptores, los cuales sirven para alimentar una estructura de red neuronal probabilística. Hooshmand y Enshae (2010) centraron su metodología para la clasificación de disturbios en un sistema de lógica difusa, el cual es capaz de inferenciar el tipo de disturbio presente en la señal. Por otro lado, Upadhyaya y Mohanty (2016) desarrollaron una metodología que toma como base la teoría de los árboles de decisión, donde se crea una estructura condicional la cual se va entrenando mediante la modificación de los valores de umbral condicionados para desviarse, llegando finalmente a un nodo final en la estructura que da como resultado el tipo de disturbio estimado. Mientras tanto, en sus metodologías Erişti et al. (2010) y Abdelsalam et al. (2012) trataron con máquinas de vectores soporte para realizar la clasificación, esta técnica utiliza una discriminación binaria de manera recursiva para obtener una clasificación multi-clase.

Además de lo citado, existe una nueva tendencia donde se agregan algoritmos bio-inspirados para la realización de la tarea de clasificación. Jeevitha y Mabel (2018) realizaron un estudio sobre esta tendencia referenciando distintos trabajos que hacen uso de este tipo de técnicas. Estos métodos de clasificación son posibles de realizar debido a que los métodos de inteligencia artificial, los cuales son demandantes en cuanto a recursos computacionales, son factibles de ejecutar hoy en día debido a la evolución de los sistemas informáticos. Anteriormente, los métodos de inteligencia artificial no estaban soportados por bases de cómputo lo suficientemente potentes como para poder arrojar resultados precisos en un tiempo factible, lo que dio lugar al invierno de la inteligencia artificial tal como se presenta en el trabajo de Yasnitsky (2020), una época en la que tras el desarrollo de distintas metodologías desarrolladas dentro del campo de la inteligencia artificial y una gran expectativa sobre su aplicación, estas mismas quedaron en un segundo plano debido a la imposibilidad de ser utilizadas para tratar un gran caudal de datos en poco tiempo debido a los recursos de cómputo existentes.

La cuantificación de disturbios es la tarea más completa, ya que esta contiene a la detección y clasificación de manera interna. Es la menos común debido a su complejidad, sin embargo, resulta de gran utilidad para poder tener la mejor descripción del disturbio presente posible y poder aplicar estrategias de mitigación y control de ser posibles. En base a lo anterior, Panigrahi et al. (2009) desarrollaron un método de cuantificación de disturbios en su trabajo, sin embargo, el resultado de su método muestra una precisión mejorable debido a que, tal como en otros estudios de la misma época, no se utilizaba ninguna técnica de optimización para realizar un

ajuste sobre un modelo matemático. Más adelante, sin embargo, estos modelos fueron desarrollados y, junto con ellos, también los métodos de optimización meta-heurística se utilizaron para la cuantificación. Por ejemplo, Jaen-Cuellar et al. (2017) desarrollaron una metodología que se apoya en un modelo matemático cuya definición está basada en el estándar de IEEE (2009). En su trabajo, se utiliza como base un algoritmo de optimización micro genético (*micro-genetic algorithm*, MGA), el cual se trata de una versión reducida del algoritmo de optimización conocido como evolución diferencial (*differential evolution*, DE). Rodríguez-Guerrero et al. (2017) posteriormente extendieron este modelo matemático, añadiendo una definición más formal y más detallada de él, además se presentó una validación de este mismo modelo, demostrando sus capacidades de ajuste sobre señales reales. Más adelante, Rodríguez-Guerrero et al. (2018) implementaron una metodología de cuantificación de disturbios sobre este mismo modelo matemático donde se utilizaba un conjunto de técnicas de optimización meta-heurística, como son la optimización por enjambre de partículas (*particle swarm optimization*, PSO) y, de nuevo, los algoritmos micro genéticos, para obtener un ajuste sobre la señal real realizando distintas estimaciones paramétricas.

A pesar de que se han desarrollado en los trabajos mencionados validaciones sobre la metodología propia de cada uno, la tarea de cuantificación de disturbios no ha sido estudiada en cuanto a su desempeño en tiempo, complejidad de las técnicas usadas y la facilidad de implementación. Sin embargo, sí es notorio que requieren una gran carga computacional para su ejecución, esto debido mayormente a que se trata con señales de alta frecuencia de muestreo, algo propio de las señales de la calidad de la energía para detectar disturbios de manera detallada en el espectro de alta frecuencia, y los algoritmos de optimización poblacionales utilizados deben de evaluar la función de optimización de manera recursiva. Debido a la complejidad del problema de cuantificación, la carga computacional que su ejecución supone es elevada, esto se justifica mayormente por la complejidad del modelo matemático que define los distintos disturbios dentro de una señal eléctrica y la cantidad total de parámetros a estimar mediante el ajuste matemático.

Actualmente, existen trabajos dentro del área de la calidad de la energía que han utilizado la arquitectura de procesamiento en paralelo en sus implementaciones, a fin de reducir el tiempo de ejecución de sus algoritmos. Cisneros-Magaña et al. (2018) obtuvieron una medición del estado de la calidad de la energía a través de una versión paralelizada del algoritmo de filtrado de

partículas de Kalman (*particle Kalman filtering*, PKF) cuya implementación puede ser ejecutada dentro de un sistema que contenga una unidad de procesamiento gráfico (*graphical processing unit*, GPU). Por otra parte, Chen et al. (2020) presentaron un sistema bajo una arquitectura de paralelización para el entrenamiento y evaluación de redes neuronales, las cuales son utilizadas para la clasificación de disturbios eléctricos. Este trabajo presenta la arquitectura de procesamiento en paralelo como una herramienta necesaria para acercar las implementaciones de cuantificación a un procesamiento en tiempo real, es decir, donde el tiempo dedicado al procesamiento de cada una de las ventanas de tiempo es menor o igual a la longitud de estas.

Ambos estudios citados anteriormente tratan sobre implementaciones utilizando librerías propias de la empresa NVIDIA como es la librería de arquitectura unificada de dispositivos de cómputo (*compute unified devices architecture*, CUDA), donde para su ejecución es necesario contar con una GPU. Esta librería es de carácter privativo en cuanto a su desarrollo, lo que supone que no es posible desarrollar hardware fuera de esta empresa que utilice esta tecnología. Sin embargo, existe una alternativa para poder aprovechar las capacidades de los procesadores multi núcleos y las GPU de distintos fabricantes (incluyendo las del fabricante NVIDIA), los cuales permiten ejecutar de manera concurrente (de manera simultánea) distintas tareas. Esta alternativa se trata de la librería de lenguaje de cómputo abierto (*open computing language*, OpenCL), sobre la cual actualmente no existen soluciones publicadas dentro del área de investigación de la calidad de la energía. Tal como se afirma en el trabajo desarrollado por Holm et al. (2020). Este hecho es considerablemente prometedor teniendo en cuenta que la librería OpenCL no cuenta con las particularidades en su kit de desarrollo para aprovechar todas las características del diseño de cada uno de los modelos de hardware de NVIDIA.

Dentro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, misma institución en la que se desarrolla este trabajo de tesis, se han llevado a cabo distintos estudios de tesis sobre la calidad la energía de manera reciente. A continuación, se discuten varios de estos estudios relacionados con este mismo trabajo de manera cronológica descendente. En la tesis de Elvira-Ortiz (2019), titulada como “Monitorización de calidad de la energía en sistemas de generación alternos”, se presenta una metodología capaz de realizar una monitorización y detección de disturbios eléctricos centrada en el proceso de generación de energías renovables. Como trabajo paralelo a esta tesis se llevó a cabo la tesis del investigador Guillén-García (2019),

con el título “Modelos de diagnóstico de sistemas eléctricos basados en los índices de la calidad de la energía”, la cual realiza un trabajo centrado en la aplicación de las fórmulas útiles para el cálculo de índices de la calidad de la energía aplicadas sobre señales provenientes de un ámbito no-industrial. Dentro del conjunto de trabajos realizados de la Universidad se toma, como antecedente al presente trabajo la tesis desarrollada por Valtierra-Rodriguez (2014), titulada como “Arquitectura de procesador neuro-difuso para el desarrollo de instrumentos de monitoreo de la calidad de la energía”, en la cual se presenta un desarrollo en el contexto de la medición de la calidad de la energía, logrando realizar tareas de clasificación sobre disturbios aislados y mixturas de estos aplicando técnicas de inteligencia artificial, mayormente basadas en redes neuronales y sistemas difusos, implementadas bajo un entorno FPGA. Como antecesor de los trabajos de tesis discutidos, se tiene al trabajo de tesis de Granados-Lieberman (2013), con nombre “Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la calidad de la energía” dentro del cual, se trató el problema de la calidad de la energía con un enfoque hacia su aplicación industrial, sobre el monitoreo de condición de máquinas de torno CNC, esta tesis impulsó el trabajo dentro del grupo HSPDigital, propio de esta universidad.

I.2. Descripción del problema

La detección y clasificación de disturbios de la calidad de la energía eléctrica han sido tratados de manera extensa dentro de la literatura. Sin embargo, la cuantificación, o parametrización, de estos disturbios, con un rápido procesamiento de ajuste usando algoritmos que por definición representan una alta carga computacional (como los son los algoritmos poblacionales), no ha sido lo suficientemente tratada. Adicionalmente son pocos los trabajos que abordan la parametrización de manera completa, es decir, usando modelos matemáticos que describan toda la variedad de categorías de disturbios que se presentan en las redes y en los sistemas eléctricos, como es el trabajo realizado por Jaen-Cuellar et al. (2017) y el trabajo desarrollado por Rodriguez-Guerrero et al. (2018). Debido a la complejidad que esta tarea presenta en su diseño aún existe bastante nicho de oportunidad en su estudio, ya que se trabaja con un modelo matemático con un conjunto amplio de variables estáticas incluyendo algunas vectoriales y las que además son en función del tiempo (Rodriguez-Guerrero et al., 2017; Igual et al, 2018), añadiendo además la complejidad en cuanto a su implementación y el prolongado tiempo de

ejecución, la cual es debida inherentemente al tratamiento de un caudal de datos amplio, definido por la alta frecuencia de muestreo de la señal. Poca literatura referente a la cuantificación se tiene, debido a que la mayoría de los trabajos centran sus esfuerzos en la detección y clasificación exclusivamente, sin tomar en cuenta la parametrización del disturbio y, entre ella, no existen referencias sobre el costo en recursos computacionales para su implementación y ejecución. La industria no cuenta con los sistemas de cuantificación de disturbios de la calidad de la energía eléctrica, los cuales son capaces de brindar una descripción detallada sobre los distintos eventos que se producen en la señal de alimentación de sus dispositivos, este problema puede dar lugar a una prognosis con poco tiempo de reacción sobre un problema en la red eléctrica, provocando un desconocimiento detallado sobre el estado actual de los dispositivos de la industria.

Debido a que no se ha encontrado ningún estudio referente al rendimiento computacional de las aplicaciones de esta índole es que no se ha tratado de optimizar el tiempo de cómputo necesario para realizar las operaciones inherentes a este proceso, las implementaciones realizadas para la cuantificación de disturbios citadas anteriormente en este estudio no se han basado en una arquitectura de procesamiento propia de la computación de altas prestaciones, tal como el procesamiento a través de un esquema de cómputo paralelo. Hasta el momento la mayoría de las técnicas reportadas han usado un esquema de implementación por software bastante convencional, con instrucciones de naturaleza serial que se enfocan más en el resultado final sin importar la viabilidad de la técnica para una aplicación en línea, lo cual ha sido evidentemente insuficiente ya que cada vez es más apremiante la necesidad de llevar a cabo acciones correctivas, predictivas y de monitoreo exactas, precisas y rápidas. Aunado a lo anterior, en la literatura la mayoría de las técnicas reportadas para la tarea de la cuantificación recurren al uso de técnicas poblacionales (heurísticas y de inteligencia artificial), por lo tanto, este tipo de implementaciones reportadas se limitan a proveer resultados de muy alta exactitud sin tomar en cuenta costo, recursos y tiempo de ejecución, por lo que en su mayoría se implementan fuera de línea incapacitándolas para trabajar con datos directamente en el proceso de monitoreo y diagnóstico de señales en calidad de la energía. Por su parte, un campo que sí se ha estudiado dentro de la calidad de la energía en la tarea de clasificación, con implementaciones apoyándose mayormente sobre FPGA (Ribeiro et al., 2018; Patel, 2019; Sahani y Dash, 2019), y con implementaciones implementadas bajo GPU (Eisenmann et al., 2019), pero no en la tarea de cuantificación debido a la complejidad de implementar y evaluar técnicas de naturaleza poblacional. Esto da lugar a que no se tengan

actualmente implementaciones que sean más cercanas al tiempo en-línea o que permitan el tratamiento de grandes bases de datos en un tiempo reducido, haciendo de la tarea de cuantificación bajo un modelo completo, algo no factible para ser implementado en un entorno real.

Existe un problema de toma de decisión cuando se encuentra que la relación entre velocidad de procesamiento en la implementación de una técnica está relacionada con la complejidad del algoritmo que debe ser evaluado y más si es un algoritmo basado en población. Entonces, en relación al estudio de la calidad de la energía, se han presentado trabajos que buscan bajar los tiempos de ejecución al modificar la técnica aplicada para que los recursos que se requieren sean reducidos de forma considerable, pero esta situación puede comprometer la exactitud del resultado final. Por otra parte, la característica original de las técnicas de optimización y de inteligencia artificial es contar con grandes poblaciones que aseguren obtener soluciones exactas, pero lógicamente ejecutadas en periodos de tiempo muy elevados. Además, hoy en día existen tecnologías que no se ha explotado en su totalidad para conseguir el equilibrio entre exactitud y velocidad de cómputo para este tipo de técnicas, por lo que aquí hay otro nicho de oportunidad si se resuelve generar esquemas que permitan evaluar técnicas de población extensa.

I.3. Justificación

El trabajo a realizar dentro de este proyecto de investigación tiene como objetivo tratar de completar los huecos de conocimiento divisados dentro del área de investigación de la calidad de la energía en la tarea de la cuantificación de disturbios. Como los nichos de oportunidad observados en el uso de modelos completos en cuanto a cantidad de parámetros que caractericen detalladamente el disturbio, el uso de técnicas meta-heurísticas y de inteligencia artificial, basadas en el uso de poblaciones, para derivar en resultados con alta exactitud y, por su puesto, el aprovechamiento de las nuevas tecnologías emergentes de procesamiento paralelo de datos, o cómputo de altas prestaciones, para generar esquemas de implementación aplicados en el análisis de calidad de la energía. Todo ello a su vez debido a que se tiene una necesidad dentro de la industria de poder obtener una información de manera detallada del estado actual de la energía eléctrica y los dispositivos conectados a ella.

Por una parte, tras estudiar implementaciones recientes para cuantificar los disturbios de la calidad de la energía, se ha detectado que es necesario crear una nueva metodología para esta

misma tarea que integre el mínimo de técnicas heurísticas y de inteligencia artificial para realizar el ajuste sobre la señal de manera óptima y al mismo tiempo conseguir una metodología simple y sin comprometer la exactitud de los resultados del proceso de parametrización. Esto con el fin de hacer esta metodología compacta en su implementación, así mismo que la técnica-metaheurística o el algoritmo de inteligencia artificial sean la base medular de la parametrización y no técnicas de soporte como en la mayoría de los trabajos se reporta, donde un mismo bloque pueda ser reutilizado en distintas partes de la metodología. A través de esta filosofía será posible obtener una implementación sencilla, misma simplificación que es necesaria para poder dar mayores facilidades a los creadores de sistemas de monitoreo de calidad de la energía, simple, robusta, de ejecución más rápida que las hasta ahora reportadas y donde la técnica heurística o de inteligencia artificial son los principales actores en el procesamiento de ajuste. Las metodologías ya desarrolladas, contra las que se realizarán las distintas comparativas son la metodología de micro-algoritmos genéticos para el análisis de la calidad de la energía conocida como MGA-PQ y la metodología híbrida de optimización por enjambre de partículas con algoritmos genéticos (*genetic algorithms*, GA) conocida como GA-PSO.

Añadido a lo anterior, debido a que se pretende realizar una implementación eficiente comparada con las anteriores, en este trabajo se realizará una comparación cuantitativa y cualitativa en términos, no solo de precisión, cuyos datos ya se tienen sobre otros algoritmos, sino además de tiempo de cómputo y recursos computacionales, una metodología que en su misma estructura considere como algoritmo medular a la técnica heurística o a la de inteligencia artificial, como el elemento de ajuste, alcanzando así un nivel de simplicidad que otras técnicas no poseen, un trabajo que anteriormente no ha sido realizado pero que, con el fin de poder acercar los sistemas de cuantificación de disturbios a un proceso en línea debe ser realizado. A fin de poder reducir el tiempo de computación obtenido por la implementación de la metodología propuesta, inherente a la aplicación de algoritmos de optimización meta-heurística poblacionales, tal como son los algoritmos propuestos para conformar la metodología a diseñar, y a fin de aportar una nueva visión en cuanto a la implementación de metodologías de cuantificación de disturbios eléctricos bajo un esquema de computación de altas prestaciones para acercarse a un procesamiento en línea en tiempos de ejecución, se realizará una implementación bajo una arquitectura en paralelo usando GPU como soporte. De esta forma se contribuirá al área de conocimiento permitiendo aportar mediante la metodología implementada propuesta como una herramienta para poder tratar con

grandes bases de datos de señales eléctricas de manera masiva en un tiempo de procesamiento factible, apoyándose en las tecnologías basadas en el cómputo en la nube.

Debido a la naturaleza investigadora de una tesis de doctorado las tareas a realizar pueden dar lugar a encontrar una mejora de alguno de los algoritmos estudiados proponiéndose un nuevo método para el ajuste paramétrico o alguna variante de estos algoritmos. Añadido a lo mencionado anteriormente el desarrollo de la metodología propuesta en este trabajo podrá ser útil dentro de la industria manufacturera, la cual representa uno de los pilares del producto interior bruto del Estado de Querétaro, donde se sitúa nuestra universidad.

Dentro de la Facultad de Ingeniería de esta universidad, en concreto en el grupo HSPdigital, se han realizado trabajos notables y de calidad sobre el monitoreo de la calidad de la energía, algunos de los cuales han sido citados al final de la sección de antecedentes, demostrando que este mismo posee la capacidad de especialización dentro de esta área. Este grupo de investigación actualmente cuenta con varios tesis de nivel maestría y doctorado, así como un ritmo constante de publicaciones dentro de esta área, con aplicaciones mayormente sobre la generación de electricidad a través de energías renovables y el pronóstico sobre motores industriales. El presente trabajo abriría al grupo la puerta para usar técnicas de computación de altas prestaciones en sus aplicaciones, brindando a este de una mayor relevancia dentro del panorama de investigación sobre el área de la calidad de la energía.

I.4. Hipótesis

El desarrollo de una nueva metodología de detección, clasificación y cuantificación de disturbios eléctricos basada en el esquema de cómputo en paralelo junto a técnicas de optimización meta-heurísticas modernas que permita monitorear el estado de la calidad de la energía mejorará la precisión en cuanto a bondad de ajuste sobre las señales de entrada a las que se aplique esta metodología y el rendimiento computacional en cuanto a tiempo de ejecución de la implementación en al menos un 30% sobre la implementación en serie de las metodologías hasta ahora reportadas.

I.5. Objetivo general

Generar una metodología de cuantificación de disturbios eléctricos basada en algoritmos de optimización meta-heurística modernos y en la arquitectura de cómputo en paralelo que permita reducir el tiempo de procesamiento y simplificar el esquema de implementación de la metodología sin comprometer la exactitud de los resultados obtenidos.

I.6. Objetivos particulares

1. Diseñar una metodología de cuantificación de disturbios eléctricos basada en algoritmos de optimización meta-heurística que permita obtener una metodología con un esquema de implementación simplificado.
2. Desarrollar e implementar la metodología propuesta para que se ejecute bajo un entorno de computación de altas prestaciones en la nube, utilizando una arquitectura de cómputo en paralelo usando GPU tal que permita evaluar la mejora en el desempeño de la metodología propuesta con respecto a su implementación en serie en cuanto a recursos y tiempo de ejecución.
3. Comparar la metodología propuesta con otras metodologías de cuantificación de disturbios reportadas a través de un análisis estadístico basado en las medidas de bondad del ajuste y de tiempo de ejecución para cada metodología a través de señales sintéticas y bancos de señales reales.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Dentro de la presente sección se detalla cada uno de las definiciones, normativas y técnicas que conforman el conjunto de herramientas para el desarrollo de la metodología presentada en este trabajo. Además de lo anteriormente citado, se trata cada una de las metodologías contra las que se realizará la comparación de la metodología propuesta de manera más específica y más extendida de lo que se podría tratar en la sección de antecedentes.

II.1. La calidad de la energía

II.1.1. Normativas para la calidad de la energía

Las normativas para la calidad de la energía son documentos estándares que definen los distintos tipos de disturbios que pueden presentarse dentro de las señales de energía de la red eléctrica suministradora. Actualmente, se cuenta con dos estándares relevantes, el estándar EN 50160 y el estándar IEEE 1159. A continuación, se presenta una descripción de las características de cada uno de estos estándares:

El estándar EN 50160 (UNE, 2011), titulado como “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución” se basa en la descripción de las señales eléctricas presentes en las redes de baja y media tensión. Actualmente, se encuentra en su revisión EN 50160:2011/A1:2015, la cual se introdujo en junio de 2015. Esta normativa fue creada por el comité europeo de normalización electrotécnica.

En la última revisión del estándar IEEE 1159-2019 (IEEE, 2019), estándar titulado “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*” se incluyen las definiciones correspondientes a los distintos disturbios de la calidad de la energía, las características deseables en los dispositivos de monitoreo, técnicas de aplicación de medición e interpretación de los resultados de monitoreo. Además de la normativa señalada, IEEE presenta distintas normativas donde se concreta la definición de distintos tipos de fenómenos eléctricos.

La principal finalidad de estas normas no es otra que la de acotar los límites permisibles en las desviaciones respecto de la forma de onda ideal. Debido a que las señales dentro de la red eléctrica no son señales ideales, es necesario realizar una definición de las distintas desviaciones que se producen con respecto a la señal ideal, conocidos como disturbios eléctricos, los cuales son

fenómenos asociados a problemas de acoplamiento electromagnético. Esta misma tarea de definición es llevada a cabo en estos estándares.

Además de las normativas presentadas existe literatura referida a la calidad de la energía donde se definen y categorizan los distintos tipos de disturbios presentes en las señales eléctricas, tal como se muestra en los trabajos de Sankaran (2001), Chattopadhyay et al. (2011), Romero y Martínez (2012), Kazmierkowski (2015), Masoum y Fuchs (2015). Es necesario comprender los distintos tipos de disturbios eléctricos que se presentan en los sistemas de suministro eléctrico a fin de poder analizarlos posteriormente mediante una metodología propuesta. A continuación, se muestra la definición de los distintos tipos de disturbios los cuales están presentes dentro de ambos estándares relevantes presentados anteriormente.

II.1.2. Definición de los tipos de disturbios

Las señales de voltaje provenientes de cada una de las fases de una instalación de red eléctrica son idealmente senoidales, con una frecuencia teóricamente constante, fase relativa (con respecto a otras fases de la red) y amplitud determinada, a esta señal se le conoce como señal fundamental. En este sentido, las señales reales pueden contener distintos tipos de fenómenos eléctricos que causan su desviación de la ideal (misma que se muestra en la Figura II.1). A continuación, se presenta una definición de estos fenómenos de forma categorizada basada en los estándares presentados por IEEE (2019), mismos que se resumen en el trabajo de Masoum et. al (2015):

- **Variaciones en la amplitud de la señal.** Este tipo de variaciones puede presentarse en tres niveles: elevaciones de tensión (*swell* en inglés), huecos de tensión (*sag* en inglés) e interrupciones. Cada uno de estos fenómenos puede tener una duración instantánea (entre medio ciclo y 30 ciclos de la señal fundamental), momentánea (entre 30 ciclos de la señal fundamental y 3 segundos) o temporal (entre 3 segundos y 1 minuto). Los huecos de tensión se presentan cuando existe una desviación en el sentido contrario, es decir el sentido negativo, de entre el 10% y el 90% de la amplitud de la señal, este disturbio puede observarse en la Figura II.2. Las elevaciones de tensión se producen cuando existe una desviación de más del 10% de manera positiva sobre la amplitud de la señal fundamental, un ejemplo puede verse en la Figura II.3. Como caso extremo de hueco de tensión se tiene

a la interrupción, la cual se define por presentar una amplitud menor a 10% de la señal fundamental, siendo una condición crítica ya que la escasez de potencia transmitida a los dispositivos puede dar lugar a que estos se desconecten, una muestra de una interrupción se puede observar en la Figura II.4.

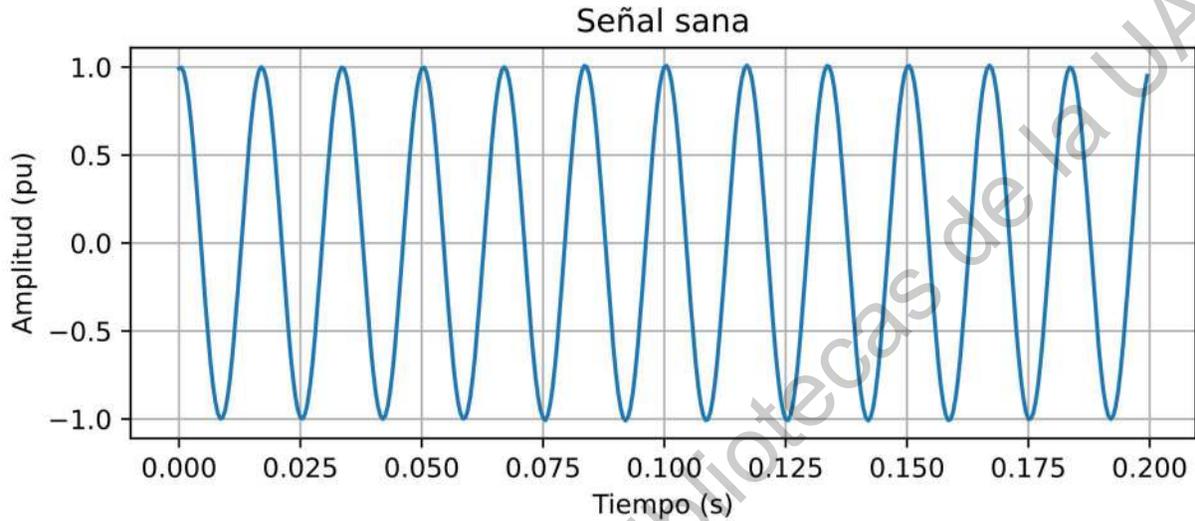


Figura II.1. Señal sana, la cual no presenta ningún tipo de disturbio eléctrico, tan solo se percibe una señal senoidal con una componente fundamental según la norma, con variaciones despreciables las cuales no son detectadas como disturbios.

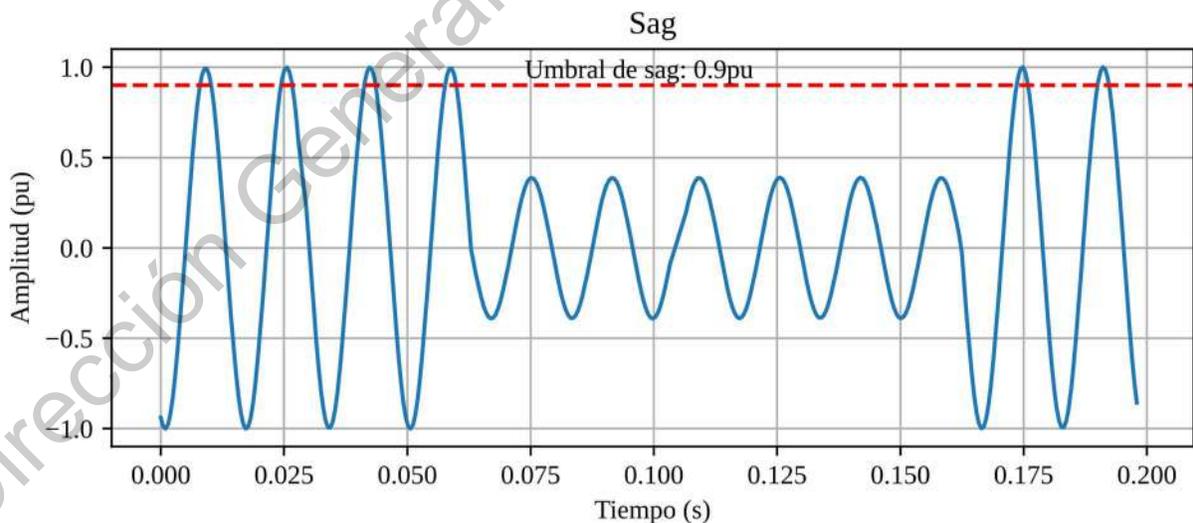


Figura II.2. Señal con disturbio de tipo sag, el cual se corresponde con una reducción temporal de la amplitud de la onda senoidal fundamental mayor al 10%.

- Contenido armónico.** Este tipo de contenido se presenta como ondas de tipo senoidal que son agregadas a la señal fundamental. La frecuencia de cada uno de estos fenómenos puede ser: un múltiplo entero de la frecuencia de la señal fundamental (contenido armónico), menor que la frecuencia de la señal fundamental (contenido sub-armónico) o mayor y no múltiplo entero de la frecuencia de la señal fundamental (contenido inter-armónico). Este tipo de contenido no es deseable dentro de una señal de energía eléctrica, ya que es capaz de producir, aún con una amplitud relativamente baja, interferencias en las señales de control y un desgaste prematuro de bancos de capacitores. A fin de poder mostrar un ejemplo de este tipo de disturbios se muestra en la Figura II.5 una señal que contiene contenido armónico de tercer orden, la presencia de contenido sub-armónico e inter-armónico tan solo varía en la frecuencia de la onda senoidal agregada.
- Transitorios.** Estos disturbios producen variaciones repentinas en la señal de voltaje con forma de pico (transitorio de impulso) o de manera senoidal con amplitud decreciente (transitorio oscilatorio). Se trata de un cambio abrupto de manera positiva en la señal de tensión, el cual puede llegar a producirse con un factor relativamente grande, produciendo grandes fallos en la alimentación de distintos dispositivos de manera simultánea. Cada uno de estos tipos de transitorio pueden observarse en la Figura II.6 (impulsivo) y la Figura II.7 (oscilatorio).

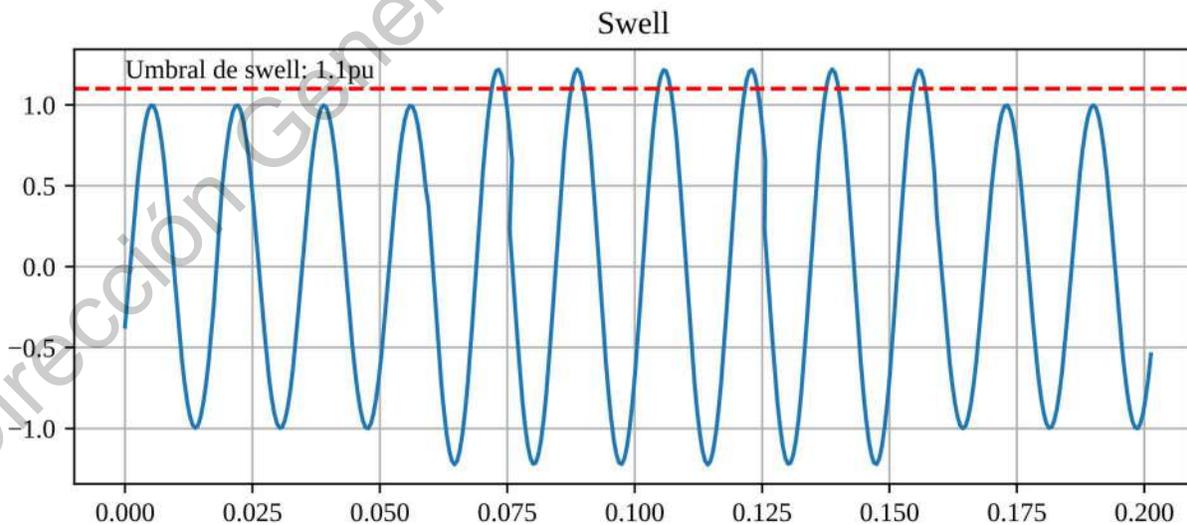


Figura II.3. Señal con disturbio de tipo swell, el cual se corresponde con un aumento temporal de la amplitud de la onda senoidal fundamental mayor al 10%.

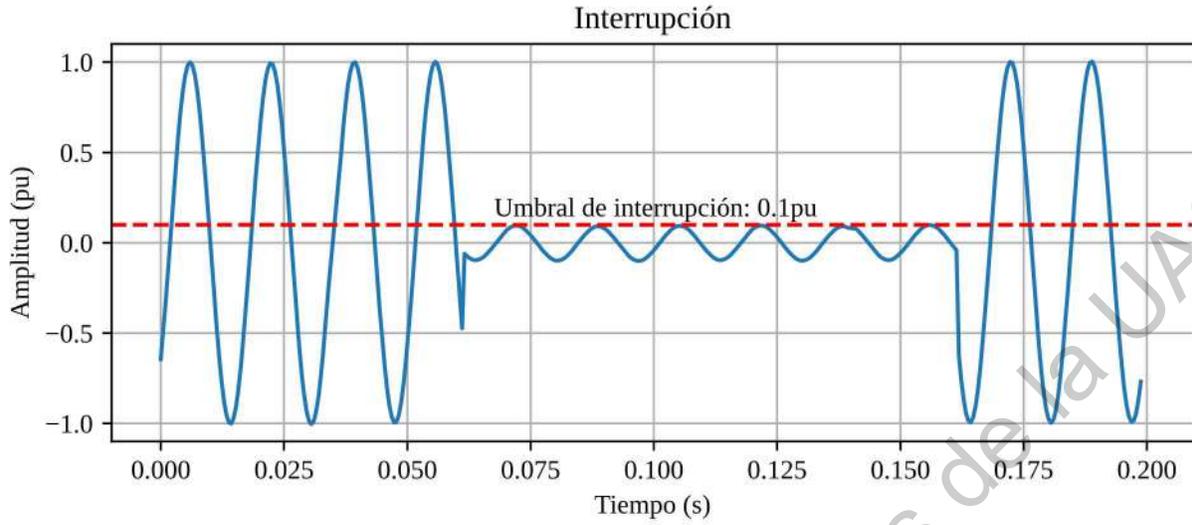


Figura II.4. Señal con disturbio de tipo interrupción, el cual se corresponde con una amplitud pico de la señal fundamental menor al 10%.

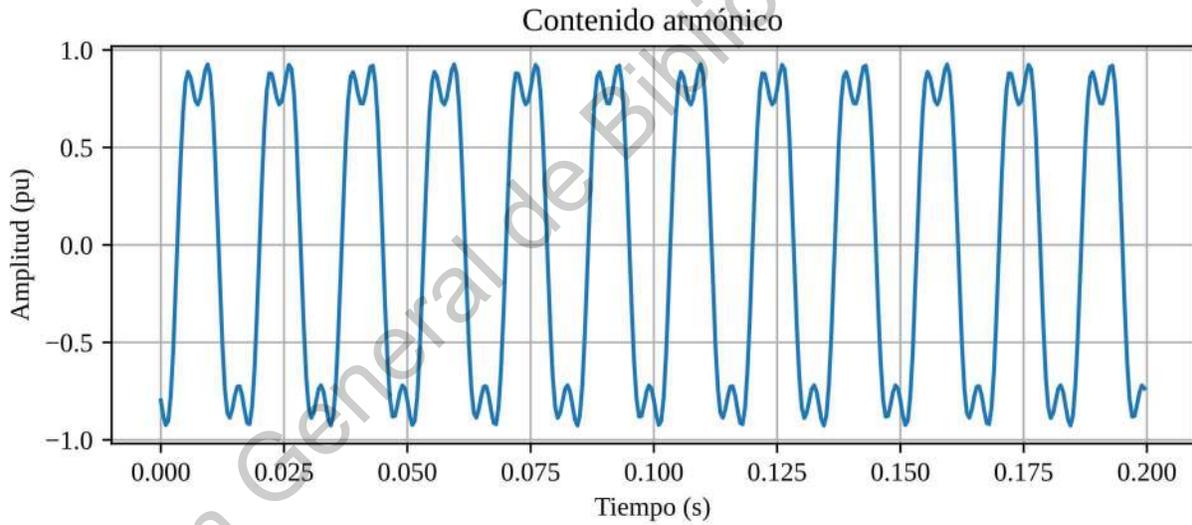


Figura II.5. Señal con contenido armónico de tercer orden, donde se puede apreciar una aparente distorsión de onda a causa de la suma de varias componentes senoidales.

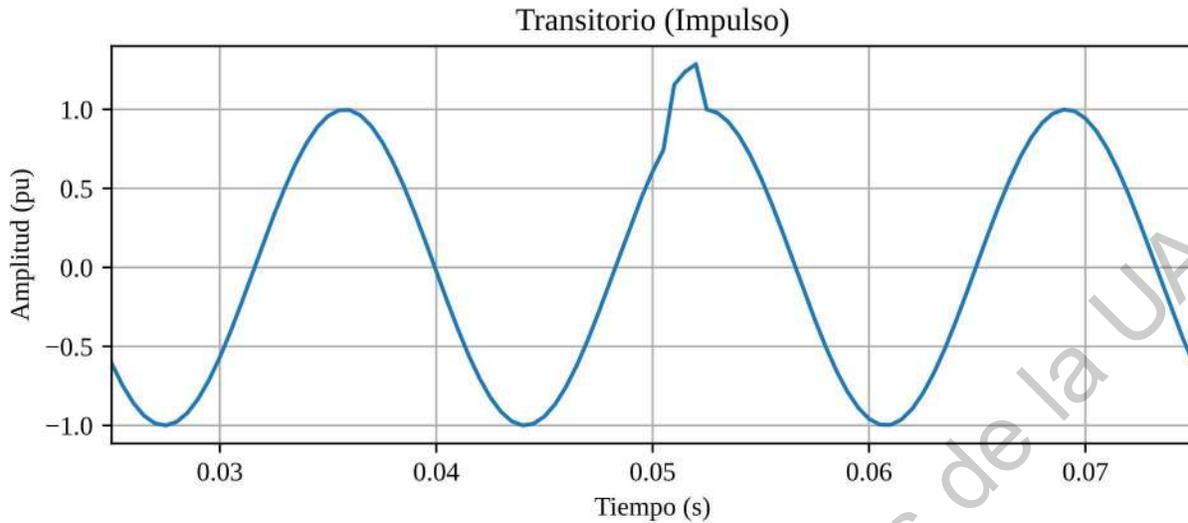


Figura II.6. Señal con disturbio de tipo transitorio de impulso, en el cual es posible percibir el pico de tensión producido, el cual se desvanece de manera casi instantánea.

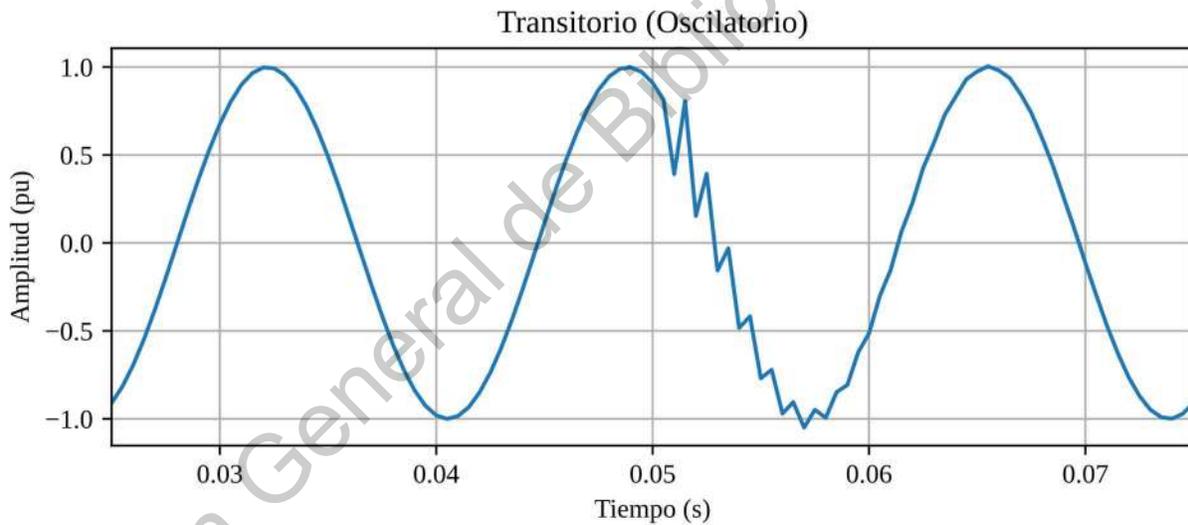


Figura II.7. Señal con disturbio de tipo transitorio oscilatorio, donde se puede apreciar la forma alternante propia de este tipo de fenómenos mientras este va degradándose.

- **Flicker o fluctuaciones periódicas de tensión.** Este tipo de fenómeno realiza de manera cíclica variaciones en la amplitud de la señal senoidal fundamental. Esta variación hace que los dispositivos se alimenten de manera irregular por variaciones en su suministro, dando lugar al efecto de parpadeo (*flicker* en inglés) en las lámparas incandescentes. Este tipo de disturbio es observable en la Figura II.8.

- Fluctuaciones en la frecuencia de la señal fundamental.** Este tipo de problema se caracteriza por presentar una desviación positiva o negativa sobre la frecuencia de la señal senoidal fundamental. El problema viene dado desde la imprecisión en la generación de la señal proveniente de la red eléctrica. Se puede observar este tipo de desviación, con una diferencia de un 5% negativo sobre la frecuencia estándar en la Figura II.9.

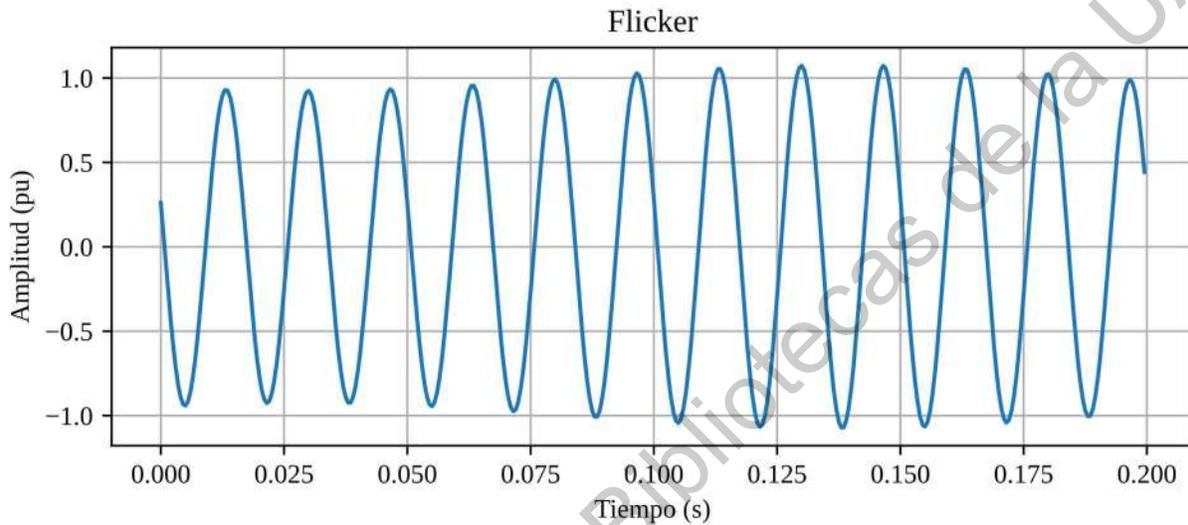


Figura II.8. Señal con disturbio de tipo flicker, donde es posible observar un comportamiento oscilante en el parámetro de amplitud de la onda fundamental.

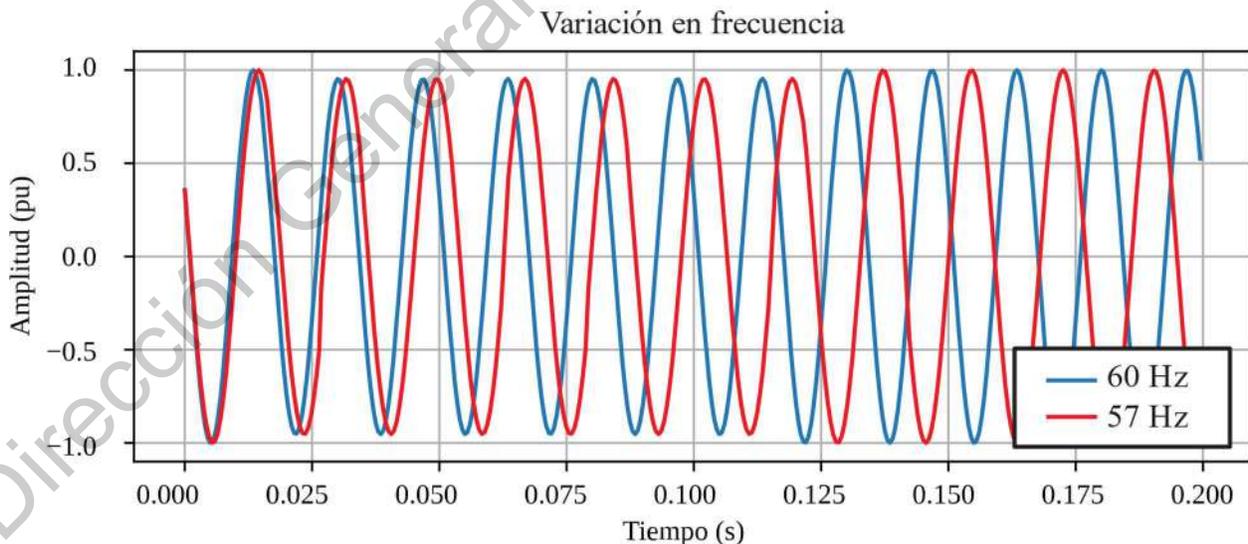


Figura II.9. Señal sana con frecuencia estándar de 60 Hz junto a señal con una variación de frecuencia presente del -5% (57 Hz).

En la Tabla II.I puede observarse una descripción paramétrica sobre los distintos tipos de disturbios, donde se hace un desglose por categoría, subcategoría, contenido espectral típico, duración típica y magnitud de voltaje (amplitud) típica, la cual utiliza como unidad las unidades de potencia (*power units* o pu en inglés).

Tabla II.I. Características de cada tipo de disturbio. Fuente: Masoum et al. (2015, p. 9) (adaptación).

Categoría	Subcategoría	Cont. Espectral	Duración típica	Amplitud típica
Transitorio	Impulsivo		1 ms	
	Oscilatorio		0-50 ms	0-4 pu
Var. de amplitud	Instantánea		0.5-30 ciclos	
	<i>Sag</i>			0.1-0.9 pu
	<i>Swell</i>			1.1-1.8 pu
	Interrupción			<0.1 pu
Distorsión	Armónica	Orden 0-100	Constante	0-0.2 pu
	Interarmónica	0-6 kHz	Constante	0-0.02 pu
<i>Flicker</i>		<25 Hz	Intermitente	0.001-0.07 pu
Fluct. Frec.			<10s	

II.1.3. Modelos matemáticos de la calidad de la energía

Un modelo matemático describe el comportamiento de un sistema mediante ecuaciones paramétricas. Todo ello con el fin de poder lograr una mejor comprensión del sistema y explorar la naturaleza de este. Distintos modelos matemáticos han sido creados con el fin de tratar con los distintos tipos de disturbios presentes en la red eléctrica. Por ejemplo, Igual et al. (2018) presentaron en su trabajo un modelo matemático basado en señales de la calidad de la energía. Sin embargo, este modelo es poco compacto en su ecuación general, resultando en un modelo complejo, aunque completo. Además, este modelo no presenta la frecuencia de la señal fundamental como una función con respecto al tiempo, lo que no permite estudiar las variaciones de frecuencia de la señal fundamental dentro de la misma ventana de tiempo analizada.

Un modelo completo, más compacto y simple en su implementación es presentado por Rodríguez-Guerrero et al. (2017), donde se toman en cuenta los distintos tipos de disturbios introducidos en la sección anterior, añadiendo que el modelo, además, permite tomar la frecuencia de la onda fundamental en función del tiempo. Tal como se muestra en (1), es posible denotar el modelo matemático citado anteriormente de manera aún más compacta y simplificada mediante una expresión de suma de funciones.

$$x(t) = w(t) + \sum_{m=1}^M r_m(t - \alpha_m) + n(t, \mu, \sigma) + \rho(t) \quad (1)$$

Los distintos sumandos de la ecuación presentada del modelo de Rodriguez-Guerrero et al. (2017) hacen referencia a distintos tipos de disturbios. A continuación, en los siguientes párrafos se realiza una definición de cada uno de los sumandos de esta misma ecuación presentada en el artículo de estos autores.

En el primer caso se tiene al sumando $w(t)$, cuya definición se muestra en (2), el cual hace referencia a las ondas senoidales de la señal.

$$w(t) = A \sum_{\omega_k \in \Omega} \delta_k(t) \cos(\omega_k(t)t + \phi_k(t)) \quad (2)$$

Donde cada onda senoidal posee una frecuencia $\omega_k(t)$, una amplitud A , con factor de amplitud variable $\delta_k(t)$, y una fase radial $\phi_k(t)$, todas ellas funciones del tiempo. Este modelo, debido a esta característica citada, permite las variaciones de estos parámetros dentro de la ventana de tiempo analizada.

Posteriormente, tal como se puede ver en (3), se tiene al sumando correspondiente a los disturbios de tipo transitorio, el cual se define con su propia ecuación.

$$r_m(t) = A c_m 1_{t \geq t_m}(t) \exp\left(\frac{-t_m}{\tau_m}\right) \cos(\omega_m t_m + \phi_m) \quad (3)$$

Donde se toma c_m como el factor de amplitud pico del fenómeno transitorio, $1_{t \geq t_m}(t)$ como una variable binaria indicadora que vale 1 cuando se cumple la condición del subíndice y 0 en caso contrario, τ_m como el factor de decaimiento del transitorio, ω_m como la frecuencia natural del transitorio y ϕ_m como la fase radial del transitorio. En este caso se hacen constantes estos últimos parámetros debido a que el transitorio ocupa poco tiempo dentro de la señal.

Finalmente, tal como se puede observar en (4), se tiene la expresión perteneciente al ruido que sigue una distribución de tipo normal y un último sumando de ruido que no sigue este tipo de distribución.

$$n(t, \mu, \sigma) + \rho(t) \quad (4)$$

Se trata de una observación de una variable de tipo normal con media μ y desviación típica σ , sumando a esta señal las perturbaciones que no pueden explicarse por ninguno de los términos anteriores, explicadas por $\rho(t)$.

Este modelo matemático será utilizado dentro del presente trabajo con dos fines:

- Con el fin de **generar distintas señales sintéticas**, permitiendo crear señales que contengan el mismo conjunto de disturbios con distintos parámetros. Esta base de datos es útil para tareas tales como el entrenamiento de modelos de aprendizaje automático o tareas de medición de la bondad de ajuste de la metodología seleccionada.
- Con el fin de **utilizarse dentro de la función objetivo** (para la medición del error) en la estimación de los parámetros mediante el ajuste utilizando un algoritmo de optimización. Esto no es posible de manera directa, debido a que existe una gran complejidad en la estimación utilizando funciones en base al tiempo, por lo que se desarrolla la metodología central de este trabajo con este fin.

II.2. Técnicas de procesamiento de señales digitales

II.2.1. La transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (*discrete Fourier transform*, DFT) es una de las técnicas más utilizadas dentro del campo de la ingeniería. Esta técnica es una discretización de la transformada continua de Fourier (*continuous Fourier transform*, CFT), la cual se trata de una función que es capaz de calcular el espectro de frecuencias de una señal observada, es decir, la distribución de las amplitudes presentes en sus componentes. Broughton y Bryan (2018) en su obra detallan esta técnica en el campo del análisis de señales e imágenes, resultando apropiado para el estudio actual. Además de esta obra mencionada, el libro escrito por Takahashi (2019) realiza una revisión sobre los detalles de la implementación del algoritmo y su paralelización, permitiendo aplicarlo de manera rápida a través de sus variantes, entre ellas la transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform*, FFT). La ecuación matemática que define a la DFT se expresa en (5), misma definición que es proporcionada por Takahashi (2019).

$$G_n = \sum_{k=0}^{N-1} g_k \exp\left(\frac{-i2\pi k n}{N}\right), n = 0, \dots, N - 1 \quad (5)$$

El resultado de esta transformada, G_n , se corresponde con una serie de números complejos, cuyo módulo se corresponde con la amplitud de la componente presente en la frecuencia calculada correspondiente. En el caso de aplicar el algoritmo tal como se muestra en (5) y aplicar la función de módulo, se obtendrá un conjunto de puntos simétricos con respecto al centro de este mismo conjunto, por lo que resulta redundante realizar la mitad de las evaluaciones (Takahashi, 2019, p. 12). En este caso se realiza el cálculo para las frecuencias desde 0 Hz hasta la frecuencia de muestreo utilizada en la obtención de la señal.

La resolución de la DFT viene dada precisamente por esta medida (la frecuencia de muestreo), encontrándose el límite superior de frecuencias percibidas en una medida relacionada con este a través de un factor de dos para señales de tipo senoidal (Osgood, 2019, p. 361). A mayor frecuencia de muestreo mayor resolución. Esto presenta un inconveniente en cuanto al análisis del espectro de frecuencia para señales que han sido adquiridas usando frecuencias de muestreo bajas, en este caso en particular, sería posible realizar un remuestreo a través de una función de suavizado o interpolación creando puntos intermedios sintéticos que sigan la forma de onda supuesta. Sin embargo, en el caso de la calidad de la energía se utilizan sistemas de monitoreo que poseen frecuencias de muestreo suficientemente altas como para obtener un espectro de Fourier suficientemente detallado para contenido armónico de alto orden.

El algoritmo original es costoso en su ejecución para frecuencias de muestreo relativamente altas. Esto se ha visto solucionado gracias a la implementación rápida de la DFT, la cual es conocida como la FFT, que realiza, a través de operaciones matriciales la evaluación de cada uno de los sumandos presentados en (5). Debido a que las operaciones de álgebra lineal están optimizadas en librerías de programación para los procesadores de uso general, tal como la librería de subprogramas para el álgebra lineal básico (*basic linear algebra subprograms*, BLAS), esta misma implementación de la DFT presenta como ventajas un menor tiempo de ejecución bajo este tipo de plataformas. Aún más, cuando estos mismos algoritmos se ejecutan bajo un entorno de ejecución en paralelo utilizando una tarjeta gráfica como soporte, tal como se referencia en los estudios de Isupov (2020) y de manera particular para esta aplicación en el trabajo de Takahashi (2019). Esta implementación se trata de un algoritmo más eficiente que explota las propiedades de simetría de la matriz de datos que se construye a través de los distintos valores que toma G_n ,

pasando de un tiempo de ejecución cuadrático a uno logarítmico, lo que acelera notablemente la ejecución para tamaños de muestra grandes (Broughton y Bryan, 2018).

Este algoritmo se implementará dentro de la metodología propuesta en este trabajo con el fin de obtener una primera aproximación al contenido espectral senoidal presente en la ventana de la señal analizada: frecuencia fundamental, contenido armónico y contenido inter-armónico. Es necesario utilizar un algoritmo de detección de picos para esto, por lo que se recomienda realizar un suavizado de la señal y obtener una estimación de aquellos puntos donde la derivada de la transformada es igual a cero sobre un umbral de amplitud significativo.

II.2.2.El filtro digital

Un filtro digital es una herramienta que es usada para el tratamiento de señales digitales. A través de esta se realizan distintas operaciones matemáticas sobre los datos de la señal a analizar y es posible, por ejemplo, aislar un rango de frecuencias dado. Existen distintos tipos de filtros digitales para aislar frecuencias, de entre los más conocidos para el tratamiento de señales digitales se encuentra el filtro de *Butterworth*. El objetivo del filtro *Butterworth* es el de aislar las frecuencias dentro de un intervalo utilizando el corte más limpio posible en los extremos del aislamiento, es decir, cortando de la manera más precisa en las frecuencias deseadas, esto es debido a una propiedad interna de la amplitud de la respuesta en frecuencia de este filtro tal como se detalla en el trabajo de Anderson (2012, p. 155).

Utilizando como base el filtro *Butterworth* es posible crear distintos tipos de filtrado de frecuencias en la señal. Sheno (2005), en su obra, realiza una descripción exhaustiva sobre el diseño de estos, generalizando sobre la definición es posible realizar una categorización de los filtros según el espectro de frecuencia que permiten aislar:

- **Filtro paso bajo (LPF).** Este tipo de filtro mantiene en su salida los componentes de la señal cuya frecuencia son menores a una frecuencia definida en su diseño. Es un filtro útil cuando se desea, por ejemplo, eliminar ruido de alta frecuencia de la señal u obtener la componente fundamental de la señal junto al *flicker*. En la Figura II.10 se muestra un filtro elíptico de paso bajo, donde es posible observar irregularidades en forma de ondulación en el área de banda de paso de manera notable.

- **Filtro paso alto (HPF).** A través de este filtro se obtiene la señal complementaria a la obtenida por el LPF. Es necesario tomar en cuenta que este tipo de filtrado no es comúnmente utilizado dentro de la calidad de la energía para el ajuste de modelos matemáticos, ya que su resultado contiene ruido de alta frecuencia. En la Figura II.11 se muestra un filtro *Butterworth* paso alto, donde es posible observar una respuesta constante en las zonas definidas de banda de paso y banda de parada, con una pendiente parabólica en la zona de transición de bandas.
- **Filtro paso banda (BPF).** Mediante el uso de este tipo de filtro se aísla un rango de frecuencias deseado definido por un límite inferior y un límite superior. Este filtro está conformado a partir de una componente LPF y una componente HPF. Es un tipo de filtro útil para aislar correctamente el contenido armónico e inter-armónico. En la Figura II.12 se observa un filtro Chebyshev I de tipo paso banda, donde es posible apreciar que existe una respuesta constante cero en las zonas de banda de parada, mientras que en la zona de banda de paso la respuesta es ondulada.
- **Filtro elimina banda (BSF).** Gracias a este tipo de filtro es posible eliminar un rango de frecuencias de la señal. Funciona de manera complementaria al BPF, tomando en cuenta que, en su diseño, el orden de los filtros LPF y HPF es invertido, tomándose el filtro LPF para el extremo inferior de frecuencias deseadas y el filtro HPF para el extremo superior de frecuencias deseadas. En la Figura II.13 se muestra un filtro de tipo Chebyshev II elimina banda, es posible observar que la respuesta en las zonas de banda de paso es constante, mientras que la ondulación se presenta en este caso dentro de la zona de banda de parada.

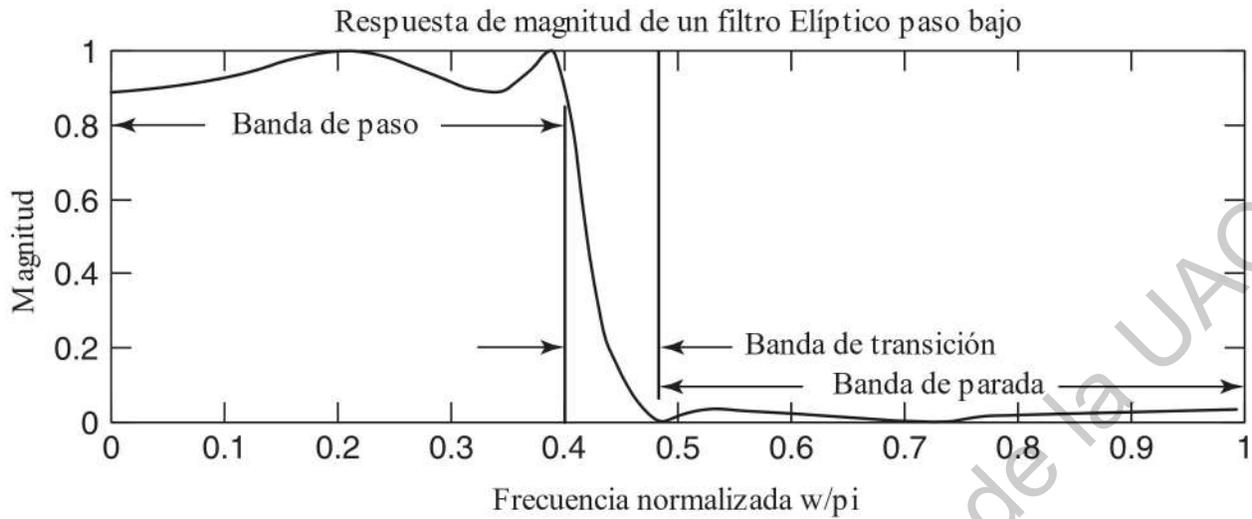


Figura II.10. Respuesta de magnitud de un filtro Elíptico de paso bajo. Fuente: Shenoj (2005) (Adaptación).

Figura II.7.

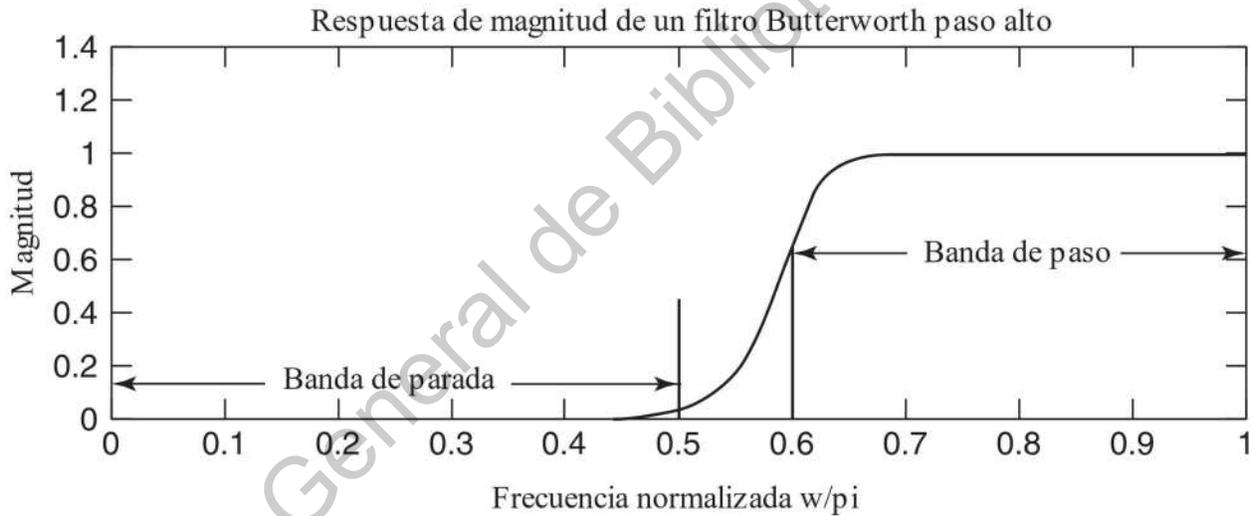


Figura II.11. Respuesta de magnitud de un filtro Butterworth paso alto. Fuente: Shenoj (2005) (Adaptación).

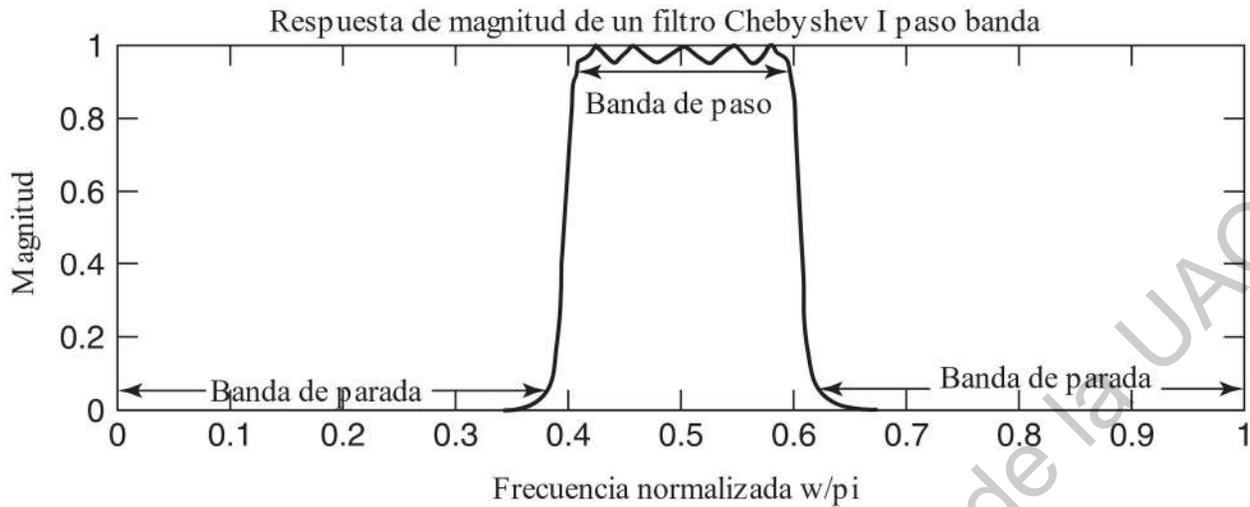


Figura II.12. Respuesta de magnitud de un filtro Chebyshev I paso banda. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).

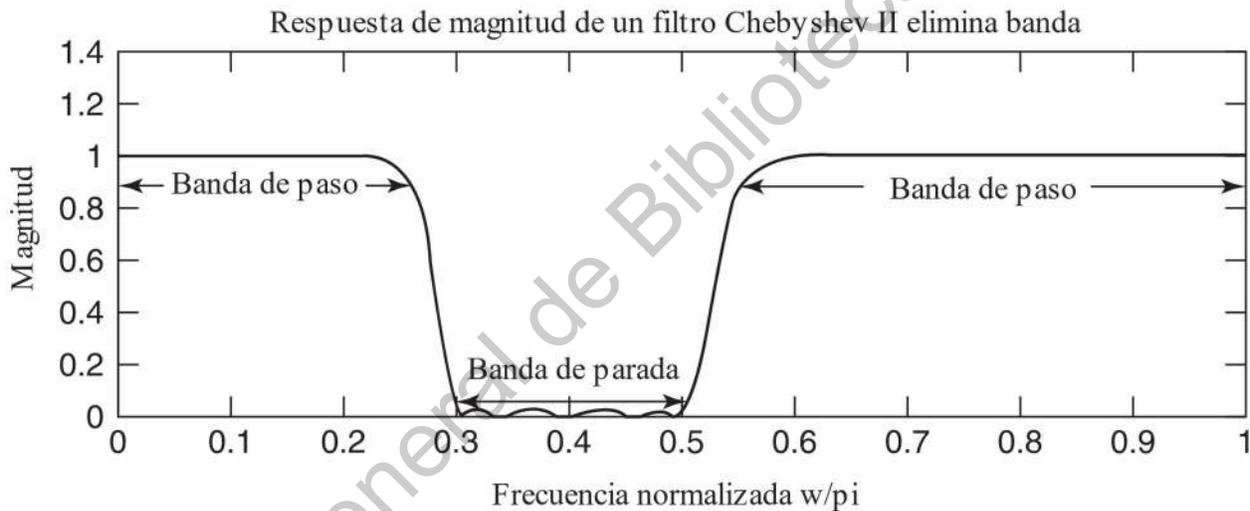


Figura II.13. Respuesta de magnitud de un filtro Chebyshev II elimina banda. Fuente: Sheno (2005) (Adaptación).

Se debe tomar en cuenta que el filtro *Butterworth*, aun teniendo una pendiente pronunciada en su gráfico atenuación-frecuencia y una respuesta plana para las frecuencias que deja pasar, no se trata de un filtro ideal, aunque, este mismo filtro, tal como indica Schlichthärle (2011, p. 21) posee un comportamiento polinómico en su función característica tal como los filtros de Chebyshev y Bessel, acercándolos a un comportamiento ideal. Con el fin de no atenuar la señal sobre los puntos de interés en los extremos es necesario considerar la no idealidad de cada filtro tomando en cuenta su función característica al realizar el diseño del filtro.

Dentro del presente estudio se utilizará el filtro *Butterworth*, creando filtros de manera dinámica tomando en cuenta el resultado de las distintas estimaciones paramétricas en distintas fases de la metodología con el fin de aislar distintas componentes y disturbios de la señal de la calidad de la energía.

II.2.3. La transformada discreta wavelet

La transformada discreta wavelet (*discrete wavelet transform*, DWT) es una técnica enmarcada dentro del área del procesamiento de señales digitales, se trata de una discretización de la transformada continua wavelet. A través de esta técnica es posible obtener un desglose del contenido de una señal (descomposición wavelet discreta o análisis de multi resolución). Esta técnica se encuentra explicada dentro de la obra de He (2016, p. 29-33), la cual está centrada en las aplicaciones de los sistemas de energía eléctrica y en la obra de Addison (2017, p. 111-115), la cual se dirige a lectores de distintas áreas de la ciencia. Su funcionamiento, detallado en las obras citadas anteriormente, se basa en la aplicación de distintos filtros en cascada, mismo desarrollo que se muestra a continuación:

- Mediante la aplicación de un filtro HPF se obtiene la componente de detalle de la señal. Esta componente, dentro de la estructura de la descomposición de la señal utilizando la transformada discreta wavelet, es un nodo terminal.
- Mediante la aplicación de un filtro LPF se obtiene la componente de aproximación de la señal. A través de esta componente es posible extraer de nuevo una nueva componente de detalle, así como también una nueva componente de aproximación.

Con el fin de poder aplicar esta descomposición se crea un banco de filtros HPF y LPF que realicen las tareas mencionadas anteriormente. Este tipo de filtros posee frecuencias de corte específicas, así como también utilizan una función matemática con una forma de onda deseada, conocida como wavelet madre, la cual es aplicada como filtro de convolución a través de toda la señal (Addison, 2017, p. 8).

La selección de la wavelet madre utilizada dependerá de la naturaleza de la señal a analizar debido a que la forma de esta debe estar relacionada con las características a resaltar de la señal. En este sentido, por ejemplo, Masoum et al. (2010) realizan una comparación entre la capacidad de un sistema de clasificación de disturbios basado en distintas funciones wavelet madre

para distintos casos de uso de este algoritmo. Sin embargo, debido a la heterogeneidad en forma de los distintos tipos de disturbio, la selección de la wavelet madre debe ser justificada de manera puntual para el problema de la calidad de la energía.

La descomposición wavelet discreta además puede contener submuestreo tras la aplicación de cada uno de los filtros propios de esta. Esta es la manera tradicional de realizar la descomposición wavelet, conocida como la descomposición wavelet en pirámide. Dentro de la metodología que se desarrollará en el trabajo actual se utilizará esta herramienta con el fin de poder aislar distintos tipos de disturbios y poder identificar disturbios de tipo transitorio.

II.2.4.RMS por ventana deslizante

Se presenta el concepto de la raíz media cuadrática (*root mean square*, RMS), así como también se presenta y se demuestra matemáticamente la relación entre el valor RMS y el valor pico de una señal senoidal. Mostrando además la necesidad de obtener el tamaño de ventana correcto, dependiente de la frecuencia de la señal senoidal.

En el campo del procesamiento de señales digitales, la raíz de la media cuadrática es una medida estadística que representa la magnitud de una señal o función contenida dentro de una ventana, esta técnica es capaz de plasmar la potencia efectiva de una señal de corriente alterna, mostrando el valor de corriente continua que tendría en el caso de que alimentase a una resistencia (Whitaker, 2005, p. 2165). De manera continua este valor está relacionado con la integral de la señal analógica. La definición de RMS (Whitaker, 2005) se presenta en (6).

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (6)$$

Donde N representa el número de puntos de la ventana analizada y x cada uno de los datos de la señal digital de la ventana. Se trata precisamente de una media cuadrática. Existe una relación establecida entre el valor RMS y la amplitud pico A , también conocida como valor eficaz, de una señal de tipo senoidal, la cual se muestra en la expresión de (7), la cual se deriva de realizar la integral sobre el semiciclo positivo de una señal senoidal, esta relación se ve plasmada en la obra de Cirrincione et al. (2012, p. 4).

$$A = \sqrt{2}x_{RMS} \quad (7)$$

Esta relación se cumple para ventanas cuyo contenido es un ciclo completo de la señal senoidal analizada. Sin embargo, debido a la supresión de signos y la simetría de la señal con respecto a la amplitud cero, es posible igualmente calcular la amplitud pico A utilizando como ventana medio ciclo de esta.

Dentro de este trabajo se utilizará el RMS por ventana deslizante con el fin de obtener la amplitud pico de la señal senoidal analizada (fundamental, contenido armónico, inter-armónico o variaciones de amplitud cíclicas en el *flicker*), misma técnica que se detalla en la obra de Bollen y Gu (2006, p. 575). Es decir, se aplicará el RMS como filtro convolucional a través de la señal, tomando como ancho de este filtro un semiciclo de la señal senoidal a analizar. Este procedimiento será posible debido a que dentro de la metodología se procederá a realizar un ajuste fino sobre la frecuencia de la señal analizada, dando lugar a un tamaño de ventana preciso para efectuar la operación de RMS por ventana deslizante.

II.3. Técnicas de optimización meta-heurísticas

Respecto a las técnicas de búsqueda y optimización, Cuevas et al. (2020) presentaron en su trabajo una compilación actualizada de técnicas de optimización meta-heurística para la búsqueda paramétrica. Las técnicas de optimización meta-heurísticas se definen por ser algoritmos que permiten optimizar (minimizar o maximizar) el valor de una función objetivo guiando una búsqueda entre los distintos valores que pueden tomar los parámetros utilizados en su definición. Este tipo de algoritmos permiten tratar problemas de optimización de distinta naturaleza, siendo independientes del problema a tratar y de su implementación.

Existen distintas clasificaciones dentro de los algoritmos de optimización meta-heurísticos. Se presenta una lista de las más relevantes, tomando como base el estudio de Cuevas et al. (2020):

- **Inspirados en la naturaleza.** Se trata de aquellos algoritmos cuya definición está inspirada en el comportamiento de un ser vivo, como, por ejemplo, el algoritmo optimización de colonia de hormigas.

- **Evolutivos y genéticos.** Este tipo de algoritmos están basados en la teoría de la evolución, donde distintos agentes pertenecientes a una población interactúan entre sí dando lugar a nuevas generaciones de la población. Un ejemplo de este tipo de algoritmos es la evolución diferencial (DE), el cual trata con variables continuas y el algoritmo genético (GA), el cual trata con variables categóricas.
- **De trayectoria.** Este tipo de algoritmos utilizan como su principal característica una velocidad y trayectoria sobre el valor de las variables que se optimizan. Pueden ser de tipo poblacional, permitiendo evitar con mayor probabilidad puntos óptimos locales. Un ejemplo de este tipo de optimización es el algoritmo de búsqueda por gravedad (GS).
- **Poblacionales.** Son todos aquellos algoritmos que utilizan una población de agentes para su ejecución. Es común que esta población se vea modificada mediante una estrategia iterativa hasta llegar a la solución final. Un ejemplo de este tipo de algoritmos es la optimización por enjambre de partículas.

Todos los algoritmos citados tienen en común que poseen un criterio de parada, por el cual, se toma como finalizado el proceso. Este criterio de parada puede ser, por ejemplo, una medida de error absoluto o relativo con respecto al valor de la función objetivo evaluada.

Dentro del presente trabajo se utilizarán algoritmos de optimización meta-heurística para poder obtener un ajuste de las señales analizadas sobre el modelo matemático mostrado anteriormente.

II.3.1. Estructura de redes neuronales específicas

Una red neuronal artificial es una herramienta utilizada dentro del área del aprendizaje profundo, donde existe una estructura centrada en el perceptrón, el cual no es más que una entidad que contiene una entrada y una salida, donde el valor de esta última se define a través de una función de activación. Tal como describe Mirjalili (2018), a través del ajuste de los parámetros internos de los perceptrones que conforman esta estructura, así como también de aquellos parámetros inherentes a las conexiones entre estos se obtiene una (o varias) salidas de la red neuronal artificial. De manera clásica las redes neuronales artificiales han sido utilizadas para

realizar regresión y clasificación. Este tipo de estructura es muy útil dentro de las aplicaciones de ingeniería tal como describen Alanis et al. (2019) en su obra.

El concepto de red neuronal específica es un concepto que aún no ha sido suficientemente explotado, con tan solo un trabajo utilizando esta técnica dentro del área de la calidad de la energía por Xiao et al. (2014). Este tipo de redes neuronales artificiales basan su diseño en plasmar las fórmulas correspondientes a cierto modelo matemático cuyos parámetros se desean estimar. A este tipo de red se le ofrecen ciertos datos de entrada cuya salida es conocida y se realiza un ajuste de los parámetros internos de la red (un entrenamiento, según el vocabulario del aprendizaje profundo) a fin de poder disminuir el error de la salida obtenida con la esperada.

II.3.2. Algoritmo de evolución diferencial

Mirjalili et al. (2020, p. 70) definen al algoritmo de evolución diferencial como una versión continua del algoritmo genético en su obra. En esta, se afirma que el origen de este algoritmo proviene de obtener una versión cuantitativa sobre los genes del algoritmo genético, un algoritmo evolutivo en el que, a través de sus iteraciones y de manera estocástica y heurística, asigna distintas clases, dentro del espacio de búsqueda, a cada uno de los agentes que constituyen la población sobre la que se realiza la optimización.

Este algoritmo se basa en realizar una búsqueda a través de una población de agentes de manera estocástica y heurística, donde, en cada iteración, realiza una mutación, cruzado (crossover en inglés) y selección de agentes tomando en cuenta la evaluación de estos mismos agentes sobre la función objetivo a optimizar (Feoktistov, 2006; Hong, 2013). Este proceso va dando lugar a distintas generaciones de la población, cuyo comportamiento se define por una estrategia de mutación hasta llegar a un criterio de parada, el cual puede estar basado en alcanzar un número máximo de iteraciones, un cambio relativo sobre el mejor valor de la función de optimización o un valor mínimo alcanzado sobre esta (en el caso de minimización). A continuación, se muestra una lista de las dos categorías de estrategias de mutación comunes, basada en el estudio de Hong (2013, p. 112):

- **Estrategia rand/K:** Esta estrategia muta cada agente tomando K agentes aleatorios de la población.

- **Estrategia best/K:** Esta estrategia permite iterar de forma que se mute cada agente tomando los K agentes de la población con valor más cercano al óptimo de la función objetivo.

Como ventajas de este algoritmo se presenta que es capaz de trabajar con variables cuyos valores se desean acotar a un rango específico, esto es posible debido a que se puede establecer una escala y un corrimiento de los valores entre 0 y 1 que puede tomar internamente cada variable. Además de ello, este algoritmo es capaz de lidiar con los mínimos locales que puedan aparecer debido a que, al tratarse de un algoritmo poblacional, se obtiene una vista más general sobre la búsqueda paramétrica, haciendo posible resolver problemas que serían difíciles de abordar bajo una estrategia de análisis matemático (Rout et al., 2020, p. 283).

Dentro del trabajo este algoritmo se utilizará para realizar la búsqueda de frecuencia y fase de cada una de las señales senoidales que componen una señal de voltaje, es decir, la onda fundamental y el contenido armónico.

II.3.3. Algoritmo de optimización del águila *Harris*

El algoritmo de optimización del águila *Harris* (*Harris hawks optimization*, HHO) se trata de un algoritmo de optimización poblacional bio-inspirado y definido por Heidari et al. (2019). El diseño de esta herramienta está basado en el comportamiento del águila *Harris* durante la caza, realizando una tarea de exploración en busca de una presa (ejemplificado con un conejo en el artículo original), un acercamiento hacia ella y finalmente el ataque sobre esta. En cuanto a la eficacia de este algoritmo, según Heidari et al. (2019), este es capaz de obtener soluciones comparables con las obtenidas por la de otros algoritmos de optimización bien conocidos, tales como la evolución diferencial, algoritmo que fue introducido anteriormente.

Este algoritmo se usará en el trabajo, como alternativa al algoritmo de optimización por enjambre de partículas que fue utilizado por Rodríguez-Guerrero et al. (2018), en cuyo trabajo se ajustaba el modelo matemático usando este algoritmo como herramienta.

II.4. Estimación paramétrica

La estimación paramétrica es un proceso realizado dentro de la resolución de los problemas inversos (Aster et al., 2013). Los problemas inversos pueden ser discretos o continuos, siendo estos últimos cuando las variables a estimar son dependientes del tiempo o del espacio.

Un ejemplo muy conocido de estimación paramétrica (y de problema inverso), se trata del caso de la regresión lineal, donde, a partir de datos referentes a las coordenadas de una nube de puntos, en 2 o más dimensiones, se desea establecer una relación lineal entre las coordenadas de cierto conjunto de dimensiones y la dimensión faltante. Un ejemplo de este tipo de regresión aplicada sobre un conjunto de datos puede verse en la obra de (2017, p. 11). Sin embargo, este método, aunque es un tema muy estudiado, no es el único que puede darse. Tal es así que, para problemas distintos y más complejos, es posible utilizar herramientas propias de la optimización meta-heurística, los cuales son capaces de tratar con problemas de distinta índole.

Tal como los algoritmos específicos mostrados anteriormente, los problemas de optimización meta-heurística son resueltos de manera iterada a través de evaluaciones repetidas de la función objetivo, la cual no es más que una función de error que se debe minimizar. Este error suele ser expresado como una medida y solo puede tomar valores no-negativos (siempre mayores o iguales a cero). Una medida común tomada como función objetivo es el error cuadrático medio (*mean squared error*, MSE), definido por la expresión de (8), misma que se plasma en la obra de Matloff (2017, p. 386).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_k (f(\hat{x}_k) - y_k)^2 \quad (8)$$

Donde, en la expresión anterior, $f(\hat{x}_k)$ se define como la evaluación del modelo matemático f sobre los valores actuales de los parámetros a estimar x_k , mientras que y_k es el valor esperado sobre el que se pretende ajustar (al que se pretende llegar) y N representa la cantidad de puntos de información que se tienen en el sumando. Este valor, sin promediar, puede ser relativizado sobre la suma de los valores al cuadrado de los valores esperados, pasando a ser definido como el error cuadrático relativo (*relative sum of squared errors*, RSSE), este puede ser expresado como un porcentaje y está definido por (9), misma expresión que la utilizada por Sun et al. (2007) en su trabajo.

$$RSSE = \frac{\sum_k (f(\hat{x}_k) - y_k)^2}{\sum_k y_k^2} \quad (9)$$

Añadido a esta medida se tiene la distancia absoluta máxima (*maximum absolute distance*, MAD), la cual se define como la diferencia máxima entre los valores estimados y los valores esperados. Matemáticamente, esta función se expresa en (10) y se trata de una medida ampliamente utilizada para medir la bondad de un ajuste de forma general, un ejemplo de su implementación con el fin de realizar una comparativa entre distintos métodos de segmentación de imagen puede verse en el artículo publicado por Vorontsov et al. (2014), mientras que dentro del campo de la calidad de la energía esta función es utilizada por Jaen-Cuellar (2017) como un porcentaje máximo sobre la señal de error de manera relativizada.

$$MAD = \max_k \{|\hat{x}_k - y_k|\} \quad (10)$$

Las medidas de error anteriormente descritas serán utilizadas en el trabajo actual para poder medir la precisión de la metodología propuesta, así como también poder realizar comparativas con otros métodos.

II.5. Computación de altas prestaciones

II.5.1. Modelo de ejecución en paralelo

Tradicionalmente, las implementaciones de algoritmos se suelen hacer en serie, es decir, bajo un solo hilo de ejecución, el cual tiene un comportamiento de ejecución secuencial instrucción por instrucción. Actualmente, este esquema va quedando relevado cuando la aplicación requiere de una alta rapidez de cómputo y la cantidad de datos a evaluar es elevada, donde existe una alta tendencia a la implementación en línea al menos si no es posible en tiempo real. Sin embargo, existe un modelo distinto a este, se trata del modelo de ejecución en paralelo, el cual es descrito por Hockney y Jesshope (2019), así como también por González-Domínguez et al. (2017). Este modelo de ejecución es capaz de realizar varias tareas de manera concurrente a través de la ejecución de varios hilos a la vez.

Este tipo de ejecución es posible bajo un hardware que contenga varios núcleos de procesamiento y una librería que permita desarrollar este tipo de aplicaciones. Tradicionalmente el sistema de interfaz de paso de mensajes (*message passing interface*, MPI) era el más utilizado dentro del ámbito científico. Sin embargo, hoy en día estas implementaciones van desarrolladas

sobre las librerías OpenCL (para procesadores de escritorio y tarjetas gráficas) y NVIDIA (para tarjetas gráficas de la marca NVIDIA). Este paradigma de programación utiliza un hilo maestro para orquestar la creación y destrucción de hilos de ejecución concurrentes (Hockney y Jesshope, 2019, p. 435), los cuales pueden realizar tareas en paralelo, permitiendo de esta forma reducir el tiempo de ejecución real de una aplicación.

A fin de poder explotar este tipo de arquitectura de procesamiento es necesario un estudio, no solo del algoritmo que se va a realizar, sino además un diseño de cómo se va a ejecutar, asegurando que la mayoría de núcleos de procesamiento se encuentren siempre ocupados y haya una comunicación rápida entre ellos. El proceso de afinación sobre el modo de ejecución de las tareas dentro de un programa paralelo es una tarea que se realiza comúnmente, esto añadido a la tarea de programación, con el fin de poder explotar la capacidad de cómputo del sistema en su totalidad, un ejemplo de ello es el trabajo de Petrovic et al. (2020), donde se realiza una comparativa entre distintas configuraciones de ejecución bajo entornos basados en GPU y CPU, en su trabajo se muestra además la eficiencia de un configurador automático para este tipo de estrategias de ejecución. Añadido a este trabajo, el trabajo publicado por Wang et al. (2020) muestra, de manera similar, el desarrollo de un sistema de configuración automática enfocado a la librería OpenCL en específico.

II.5.2. Descripción del Hardware GPU

Las tarjetas gráficas, las cuales originalmente tan solo tenían la función de servir de coprocesador para tareas de renderizado gráfico con rutinas preestablecidas poco a poco fueron migrando a un modelo de uso general (*general purpose computing on graphics processing units*, GPGPU). A través de una interfaz de programación de aplicaciones (*application programming interface*, API) privativa (como es CUDA de NVIDIA) o de uso libre (OpenCL) es posible explotar la capacidad de procesamiento de los numerosos núcleos de procesamiento contenidos en estos dispositivos hardware.

Este tipo de gráficas están conformadas por una gran cantidad de núcleos de procesamiento, estos núcleos están contenidos en bloques y estos bloques forman una rejilla de procesamiento. Dentro de cada bloque se permite lanzar hilos de ejecución, los cuales comparten

una memoria de bloque que permite compartir datos con una mayor velocidad que con el resto de bloques a través de la memoria general (Wei et al., 2020).

Una mejor vista sobre la arquitectura que conforma a este hardware puede encontrarse en el trabajo por Wilt (2013), donde se presenta la arquitectura y se realiza una introducción a la implementación de aplicaciones sobre esta. Distintas aplicaciones sobre la implementación de este tipo de aplicaciones en general se recopilan en el trabajo la obra realizada por Wolfgang (2020).

II.5.3. Modelo de ejecución en la nube

El modelo de ejecución en la nube (Conocido como *Cloud Computing* en inglés) se basa en la utilización de recursos de hardware de un tercero a través de internet para realizar un procesamiento bajo demanda. Este tipo de procesamiento se cataloga comúnmente en distintas categorías, tal como describen Surianarayanan y Chelliah (2019):

- **Software como servicio (SaaS):** Se trata de la utilización de un software (que puede tener una licencia en el equipo instalado del proveedor), ahorrando los costos de despliegue de este software en la máquina local y permitiendo aprovechar los recursos de procesamiento del servidor propio del proveedor. Un ejemplo de este tipo de servicio puede ser el servicio de correo de *Google (Gmail)*.
- **Plataforma como servicio (PaaS):** Este tipo de servicio permite desarrollar, compilar y ejecutar software de manera remota, sin tomar en cuenta factores tales como la infraestructura de hardware o la configuración (y mantenimiento) de este, centrándose en la programación. Un ejemplo de este tipo de servicio puede ser la plataforma de desarrollo colaborativo *Cloud9* de *Amazon Web Services*.
- **Infraestructura como servicio (IaaS):** El usuario de este servicio tiene un mayor control sobre el hardware que se usa de manera remota. De esta forma la organización que contrata este servicio no tiene necesidad de preocuparse por la actualización ni mantenimiento de este.

Las categorías anteriormente presentadas han sido ordenadas según sus restricciones de uso (de más restrictiva a menos restrictiva). Estas soluciones han permitido que se puedan

implementar de manera eficaz y rápida soluciones basadas en la nube con un presupuesto ínfimo comparado con el costo de adquisición de este tipo de equipos.

II.6. La metodología MGA-PQ

El trabajo publicado por Jaen-Cuellar et al. (2017) muestra la descripción de una metodología para la cuantificación de disturbios de la calidad de la energía eléctrica basada en la inteligencia artificial y, principalmente, en el algoritmo micro genético. Este algoritmo se trata realmente de una versión de evolución diferencial utilizando una población reducida. A través de la aplicación de este algoritmo es capaz de realizar búsquedas paramétricas para obtener las estimaciones de los parámetros del modelo matemático definido en el mismo trabajo modelando así distintas características de las señales de la calidad de la energía como son: la onda fundamental, el contenido armónico y *flicker*, tomando en cuenta los casos de *sag* y *swell* para la onda fundamental.

La metodología presentada se basa en la aplicación de un filtro digital para obtener la señal perteneciente a la banda de frecuencias centrada en la frecuencia fundamental esperada (señal A), obteniendo, por otra parte, el resto de la señal (señal B). Es sobre la señal A que se aplica el algoritmo micro genético para realizar la búsqueda de la amplitud de la onda fundamental en cada uno de los puntos de tiempo para, posteriormente, utilizar la información de la señal B para realizar distintas búsquedas acumulando sobre la señal fundamental los resultados de búsqueda sobre el contenido armónico y el *flicker*.

Esta metodología presentó un punto de partida para la cuantificación de disturbios utilizando algoritmos de inteligencia artificial, con resultados de precisión menores al 5% en cuanto a la distancia absoluta máxima (MAD), mostrando una precisión aceptable. La metodología es comparada con una implementación utilizando optimización por enjambre de partículas creada por el mismo autor en el mismo trabajo, por lo que no parece haber referencias anteriores a metodologías que realicen este mismo proceso. La metodología es capaz de realizar una cuantificación restringida, ya que trata con un conjunto reducido de disturbios de la calidad de la energía, el modelo no es tan completo, algo que se realizaría en un trabajo posterior, la metodología

GA-PSO, la cual se muestra a continuación, donde se utilizan las técnicas de optimización del algoritmo genético y la optimización de enjambre de partículas.

II.7. La metodología GA-PSO

En el artículo publicado por Rodriguez-Guerrero et al. (2018) se define una metodología de cuantificación de disturbios basada en la optimización a través de dos algoritmos poblacionales: el algoritmo genético y la optimización de enjambre de partículas.

El algoritmo genético, tal como se presenta, realmente se trata del algoritmo de evolución diferencial ya que esta trata con variables cuantitativas las cuales va modificando a fin de obtener una estimación de los distintos parámetros.

Esta metodología contiene una definición del modelo matemático sobre el que se realiza el ajuste definido por Rodriguez-Guerrero et al. (2017), el cual se trata de un modelo matemático completo para las señales de voltaje capaz de plasmar los distintos disturbios que pueden ser producidos en el contexto de la calidad de la energía eléctrica.

Dentro de esta técnica se utilizan técnicas de procesamiento de señales digitales: primeramente, se utilizan distintos filtros para aislar la señal perteneciente a la frecuencia de la onda fundamental esperada (señal A), para aislar la señal perteneciente a la banda de frecuencias del ruido (alta frecuencia, señal B) y el resto de la señal (señal C) es tratado con una transformada discreta wavelet, creando una segmentación de la señal.

A fin de obtener la amplitud en función del tiempo se utiliza la transformada de Hilbert-Huang sobre la señal A, la cual permite obtener una envoltura de la señal, derivando de esta su amplitud pico. Chupakhina et al. (2017) presentaron una definición de esta técnica en su obra, la cual está centrada en sistemas de energía. En este punto no se realiza ningún tipo de optimización meta-heurística, tan solo se utiliza un algoritmo de búsqueda simple para obtener la fase de la señal, suponiendo que su frecuencia es la esperada.

Por otra parte, el contenido armónico e inter-armónico es extraído de los distintos niveles de detalle de la transformada discreta wavelet de la señal B, donde a través de la aplicación de la transformada rápida de Fourier y la obtención de sus picos se utiliza una búsqueda de los parámetros propios del contenido armónico del nivel detectado a través de una optimización

mediante algoritmos genéticos o del contenido inter-armónico a través de una optimización de enjambre de partículas. Además, de entre los niveles de detalle de la descomposición de la señal B por DWT se encuentran los disturbios de tipo transitorio, cuyos parámetros son estimados a través del método de optimización de algoritmos genéticos.

Finalmente, el contenido de ruido (señal C) es tratado a través de un análisis estadístico donde es posible obtener las componentes de media y desviación típica asumiendo una distribución normal de este, quedando como residuo el comportamiento que no sigue este tipo de distribución.

Tal como se puede observar, esta metodología está apoyada por dos algoritmos de optimización meta-heurística, los cuales son equivalentes en su funcionamiento, ya que pretenden estimar valores de variables minimizando el error cuadrático medio en su función objetivo, es por esto mismo que no queda claro por qué la elección de cada uno de ellos para las distintas tareas. Los algoritmos genéticos (realmente, dentro del artículo, evolución diferencial) son algoritmos de índole poblacional los cuales iteran creando una población elitista, mientras que la optimización por enjambre de partículas, el segundo algoritmo de optimización meta-heurística utilizado, utiliza una estrategia de seguimiento de la mejor partícula actual en la población, ayudándose de la mejor posición obtenida históricamente.

Al utilizar ambos algoritmos se añade complejidad a la metodología, así como también a su implementación, por lo que esta metodología podría mejorarse utilizando tan solo la optimización por enjambre de partículas o la evolución diferencial.

III. METODOLOGÍA

Este capítulo se redacta con el fin de poder comprender el procedimiento a seguir para alcanzar los objetivos de la presente tesis, detallando el proceso de diseño e implementación, así como también haciendo referencia a los parámetros de afinamiento de los distintos algoritmos que se despliegan para el funcionamiento de esta metodología en cada una de sus configuraciones del bloque de estimación paramétrica. Más adelante, se detallan las técnicas de análisis que son aplicadas sobre los datos de salida obtenidos a través del procesamiento de la señal tratada y se finaliza con una descripción del procedimiento para realizar un diagnóstico basado en la evaluación de los parámetros en modelo matemático de los disturbios de la calidad de la energía.

A continuación, se realiza una descripción detallada de cada uno de los componentes que conforman la metodología propuesta para la cuantificación de disturbios eléctricos. Se presenta un diagrama general de un sistema que implementa esta metodología en la Figura III.1, en este diagrama es posible observar que el proceso de cuantificación de disturbios propuesto está dividido en tres fases: adquisición, estimación paramétrica y reconstrucción. A través de este trabajo se resolverán tres configuraciones posibles para conformar el bloque de estimación paramétrica, es por esto que se muestran de manera general e inconexa en este diagrama general, para, posteriormente, obtener una vista detallada sobre la construcción de este mismo bloque de manera particular para cada una de las configuraciones en su apartado correspondiente. Estas configuraciones están relacionadas entre sí de modo que ofrecen funcionalidades similares que hacen posible la cuantificación de distintos tipos de disturbio, así como opcionalmente la clasificación de disturbios de tipo transitorio.

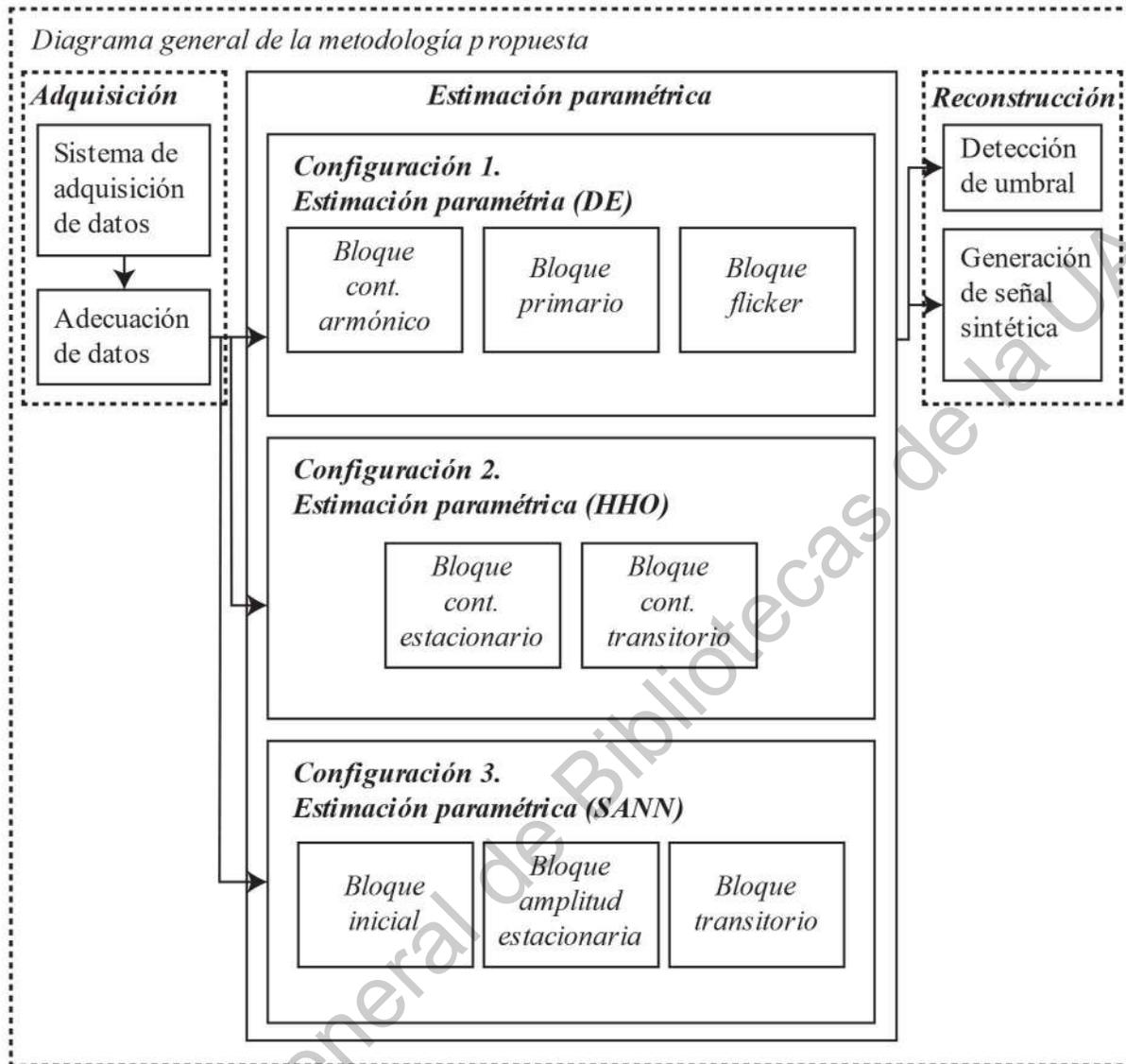


Figura III.1. Diagrama general de un sistema PQD que implementa la metodología propuesta.

A continuación, se procede a describir cada uno de los bloques del diagrama general, en su parte común con cada una de las configuraciones desarrolladas a lo largo de este trabajo.

III.1. Bloque de adquisición

III.1.1. Sistema de adquisición de datos

La metodología actual es capaz de adaptarse a distintos sistemas de muestreo de voltaje. Sin embargo, es recomendable que este sistema cumpla con ciertos requisitos mínimos para lograr obtener resultados precisos en su análisis. A continuación, se enumera un conjunto de requisitos deseables del hardware utilizado para la medida de voltaje de la red eléctrica:

- Número de canales amplio: Debido a que es posible realizar un análisis por separado de cada una de las fases de la red eléctrica es deseable que el instrumento utilizado sea capaz de medir simultáneamente, de manera sincronizada, cada una de las señales de voltaje correspondientes a cada fase.
- Alta frecuencia de muestreo: Esta consideración viene dada por la capacidad de analizar disturbios que pueden darse en el espectro de alta frecuencia, tales como los fenómenos de tipo transitorio y el contenido armónico e interarmónico de alto orden.
- Convertidor analógico-digital de alta resolución: El motivo de esta necesidad es debido a que se presentan disturbios cuya amplitud es porcentualmente baja con respecto a la tensión pico a pico que se presenta en una señal fundamental estándar. Este tipo de disturbios deben ser tomados en cuenta, ya que cualquier imprecisión de muestreo sobre la señal real puede dar lugar a un ajuste del modelo matemático de forma incorrecta en la metodología.

En la presente institución se cuenta con el sistema de adquisición PQ-UAQ, mismo que ha sido desarrollado y validado por parte del equipo de investigación HSPDigital. Este dispositivo ha sido utilizado anteriormente para realizar mediciones de voltaje presentes en los bancos de datos de medición de un hospital en Valladolid y un parque eólico, también en España.

La instalación de este sistema es realizada a través de una conexión con las distintas fases de la red eléctrica en un gabinete eléctrico cercano a la carga sobre la cual se desea obtener mayor información, la tensión es medida mediante una conexión a cada una de las fases mientras que la corriente es medida de forma no invasiva utilizando sensores de efecto Hall. Se puede observar a

continuación, en la Figura III.2 un diagrama de conexión del sistema de adquisición digital sobre una red trifásica.

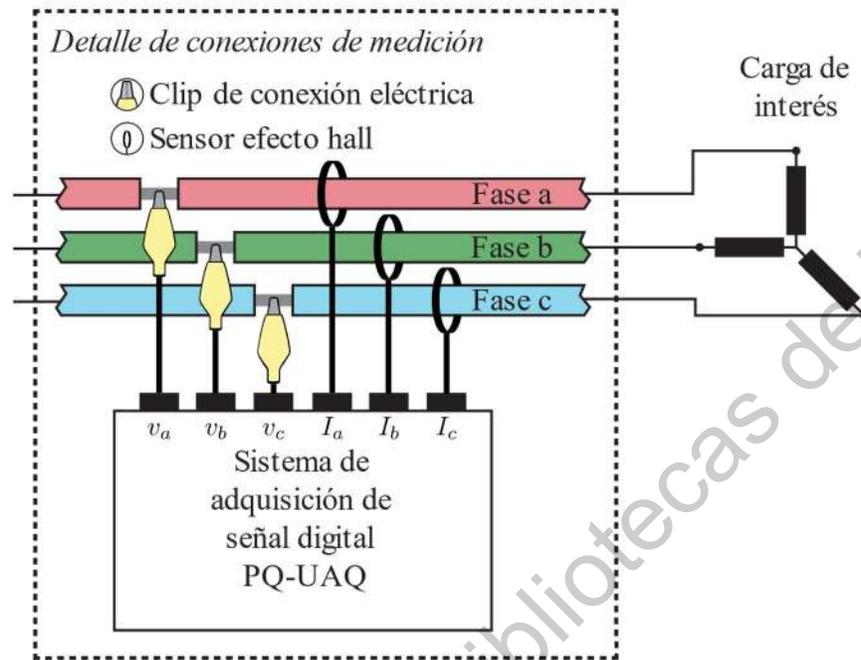


Figura III.2. Diagrama de conexión del sistema de adquisición digital sobre una red trifásica.

Este sistema de adquisición es un componente de hardware externo que es capaz de almacenar los datos capturados dentro de una tarjeta *microSD* para su posterior procesamiento y es capaz de tomar muestras a una frecuencia de 8 kHz. Por lo que, una vez se han realizado las mediciones pertinentes es posible realizar un análisis a posteriori de estos. Este desarrollo cuenta con las siguientes características:

- 4 canales de medición de corriente
- 4 canales de medición de tensión
- FPGA *Spartan 6* de *Xilinx*
- Planos de tierra aislados
- Convertidor ADC de 16 bits

Desde el grupo de trabajo propio de la universidad actualmente se están llevando a cabo distintas investigaciones que conducirán a introducir mejoras sobre este dispositivo, obteniendo

una segunda versión de este, aprovechando de manera más completa el potencial del FPGA que contiene.

III.1.2. Adecuación de los datos

La metodología actual toma como única entrada la señal muestreada que arroja el hardware de adquisición, tomando una ventana de tiempo predefinida para su posterior análisis. El tamaño de la ventana de tiempo de muestreo se corresponde, en proporción inversa, con la capacidad de reacción del dispositivo en el que se implemente esta misma metodología, una ventana de tiempo amplia implica una menor precisión en la estimación de frecuencia de onda fundamental, contenido armónico e interarmónico en teoría, ya que estas frecuencias se consideran constantes dentro del modelo matemático. La señal muestreada se escala en una primera etapa de procesamiento con el fin de poder utilizar unidades de potencia (pu), este proceso se realiza dividiendo la amplitud de la señal utilizando como factor la amplitud pico positiva de la componente senoidal fundamental estándar, este valor en México es de aproximadamente 179.6 V, mientras que en España se corresponde, aproximadamente, con la magnitud de 311.1 V. Debido a que existe una regulación en cada país sobre las características de la señal de voltaje suministrada y que esta misma indica el valor RMS, ha sido posible obtener, mediante el despeje de la fórmula de RMS correspondiente, los valores de amplitud de la señal senoidal estándar.

Tomando en cuenta que se tiene prefijada la frecuencia de muestreo de la señal a analizar es que es posible crear un vector de puntos de tiempo, mismo referente a cada una de las observaciones en la señal digital muestreada. En el caso de la implementación actual se toma al primer punto muestreado como el punto definido en el instante 0 ms, mientras que, de manera lineal, se agregan el resto de marcas de tiempo asociadas a las observaciones del proceso de adquisición. En la implementación digital, para un formato de coma flotante de 32 bits, es posible obtener una precisión de hasta 7 dígitos decimales, por lo que, para frecuencias de muestreo del rango de megahercios, se aconsejaría utilizar un formato de coma flotante de 64 bits. En el caso preciso de esta implementación se utilizó el primer formato citado al tratar con frecuencias de muestreo menores a 20 kilohercios.

En cuanto a la experimentación específica sobre señales de potencia sintéticas no es necesario realizar una adecuación sobre estos datos, ya que la generación de este banco de señales

se hace de manera personalizada, tomando como base para la generación de cada uno de los parámetros del modelo matemático, mismo presentado anteriormente en la ecuación , un método estocástico basado en una distribución de tipo uniforme, cuyos rangos, son definidos por los intervalos correspondientes a la presencia de cada uno de los tipos de disturbios. Es posible exportar este mismo banco de señales al sistema de almacenamiento masivo, sin embargo, a fin de poder ofrecer una mayor transparencia en el proceso de verificación de la metodología por terceros y debido a que esta validación no se realiza de manera constante se tomó la decisión de que este proceso no tomase como entrada datos estáticos. Por otra parte, es posible añadir repetibilidad al proceso estableciendo una semilla, predefiniendo de esta forma el conjunto de valores generados por el muestreador uniforme.

En cuanto a los bancos de señales reales, fue necesario realizar el pretratamiento correspondiente para cada uno de estos, tomando en cuenta que ambos proceden de grupos de trabajo distintos y no se utilizó un estándar de la industria para la compartición de estos. Tras un análisis sobre los datos correspondientes al grupo de trabajo de la IEEE se determinó que estos mismos poseían una escala de muestreo en cuanto a la amplitud de la onda de voltaje de 10000 niveles por cada pu, por lo que fue necesario realizar una normalización, se presume que el motivo por el que estos datos fueron almacenados en este formato fue debido a que se utilizó un formato de número entero de 32 bits con signo en el hardware de captura, pudiendo dar lugar a valores en el rango de aproximadamente -32767 a 32767, límites en valor absoluto correspondientes a 3,2767 pu, es decir, poco más de 3 veces la amplitud pico estándar de la señal de voltaje senoidal. En lo que se refiere al banco de señales del hospital, no fue necesario realizar ningún tipo de escalado ya que estos datos en amplitud se encontraban en formato de coma flotante. En ambos casos los datos de línea de tiempo poseían un formato en segundos, por lo que fue posible extraer la frecuencia de muestreo utilizada por las distintas herramientas, correspondiéndose con una frecuencia de muestreo de 7680 Hz para el grupo de trabajo de IEEE y una frecuencia de muestreo de aproximadamente 3837.2985 Hz para el caso propietario de las mediciones en el complejo sanitario. Debido a que los datos, en ambos casos, se encontraban en formato de valores separados por comas (*comma separated values*, CSV) la carga fue realizada de forma directa, sin necesidad de usar ningún tipo de decodificación.

Se muestran las distintas señales reales correspondientes a cada una de las bases de datos analizadas en la Figura III.3, donde las señales U1, U2 y U3 se refieren las distintas fases de una señal trifásica de ámbito industrial que muestran un disturbio de tipo transitorio, mientras que U4 muestra un *flicker* en una fase de alimentación. Finalmente, U5 y U6 por su parte muestran un disturbio de tipo *sag* (bajada de tensión nominal) y forman parte del banco de señales industrial y del hospital respectivamente.

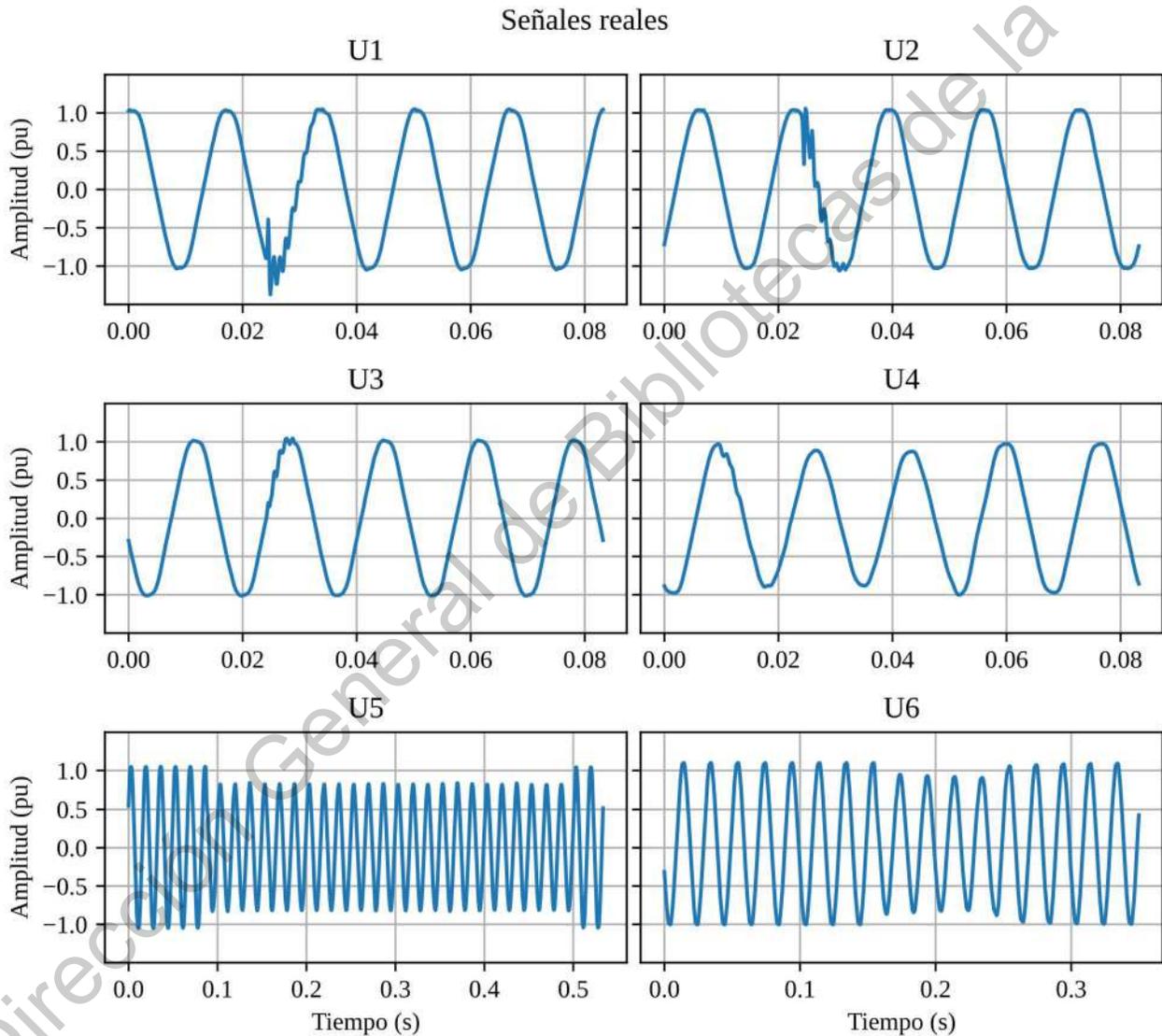


Figura III.3. Señales reales. Del ámbito industrial se encuentran las distintas fases de una señal trifásica que muestran disturbios: transitorio (U1, U2 y U3), flicker (U4) y sag (U5). Del hospital se muestra una señal con sag (U6).

III.2. Bloque de estimación paramétrica

El bloque de estimación paramétrica se trata de un bloque esencial para el correcto funcionamiento del sistema, debido a que la precisión de la estimación realizada sobre los parámetros propios del modelo matemático utilizado define la bondad de los resultados arrojados por el sistema. Es este bloque el mismo encargado de obtener, mediante aplicación de algoritmos de optimización, el conjunto paramétrico cuasi-óptimo que define cada uno de los componentes de los distintos disturbios en la señal de energía.

El contenido del bloque de estimación paramétrica se ve definido por las operaciones realizadas por cada una de las configuraciones sobre el diagrama general metodológico que son presentadas en secciones posteriores, es por esto que no se encuentra con información dentro del diagrama general, a fin de poder realizar la especificación correspondiente en las secciones referentes a estas configuraciones.

A través de la presente sección se muestra cómo es que la señal obtenida a partir del hardware de adquisición anteriormente presentado es procesada para obtener una estimación paramétrica sobre el modelo matemático de representación de disturbios de la calidad de la energía (1). En esta parte del documento se detalla el diseño de las configuraciones de los distintos bloques de configuración sobre la estimación paramétrica, mostrando las herramientas diseñadas que aúna en cada una de sus configuraciones distintas técnicas de optimización meta-heurística y de procesamiento de señales digitales, formando esta parte del documento el núcleo de la descripción sobre la contribución de la actual tesis. Cada una de las distintas configuraciones se presentan en una sección a continuación, a fin de no crear un nivel de profundidad mayor en el índice.

III.3. Configuración 1. Estimación paramétrica basada en DE

El primero de los trabajos desarrollados durante la presente investigación fue el diseño bloque de estimación paramétrica con una configuración basada en la utilización de la técnica de evolución diferencial. Esta misma metodología se basa en el algoritmo de optimización meta-heurística poblacional de la evolución diferencial, el cual no es más que una adaptación del algoritmo genético sobre variables numéricas (en vez de categóricas).

A continuación, se muestra en la Figura III.4 la configuración del bloque de estimación paramétrica utilizando la configuración basada en evolución diferencial, el cual muestra cada uno

de los componentes por los que la metodología está conformada, así como la comunicación entre ellos. En este diagrama se observan como flechas de trazo ancho los flujos de datos que contienen vectores de información, tal como, por ejemplo, el vector de amplitudes de la señal, mientras que con un trazo delgado se muestran los flujos de datos paramétricos. Así como también, es posible observar en la Figura III.5 el diagrama de flujo que, de manera específica, muestra los distintos pasos en la metodología dentro del bloque de estimación paramétrica, mismo que se describe en las siguientes secciones para esta configuración metodológica.

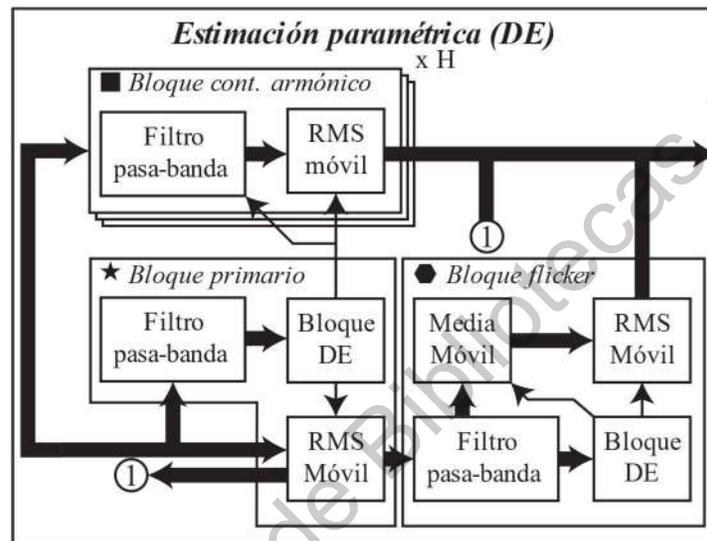


Figura III.4. Diagrama general de la metodología basada en evolución diferencial.

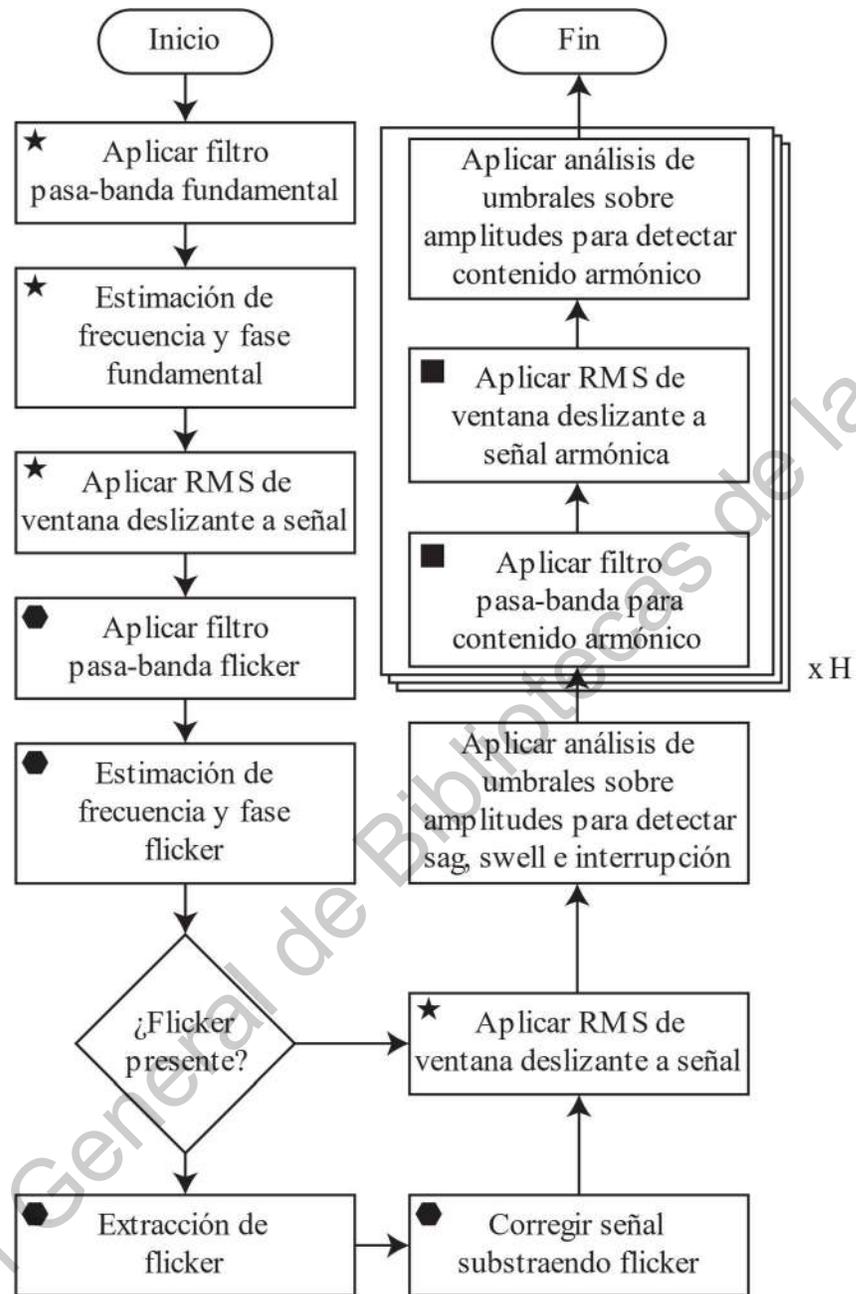


Figura III.5. Diagrama de flujo del proceso de estimación paramétrica basado en evolución diferencial.

III.3.1. Bloque primario

Este bloque tiene como fin realizar una estimación del contenido senoidal fundamental de la señal. Tomando como punto de partida el vector de amplitud de la señal junto al vector de tiempo generado se realiza una estimación fina de la frecuencia de la componente senoidal fundamental, así como de su fase. En un primer punto de la investigación, las técnicas revisadas

en la literatura tomaban como constante la frecuencia de la componente senoidal fundamental, estimando tan solo la fase de esta. Sin embargo, con el fin de obtener una mejor precisión en el ajuste para ventanas de tiempo más amplias, esta frecuencia es estimada en conjunto con la fase mediante un método de optimización meta-heurística como es el algoritmo de evolución diferencial.

Un primer enfoque basado en el análisis matemático realizado sobre la función de error a minimizar fue realizado con el fin de poder comprender la distribución en el espacio paramétrico de los mínimos locales presentes en esta misma función. A través de un muestreo realizado sobre una rejilla de paso fijo fue posible obtener un gráfico de curvas de nivel (contour plot en inglés) de esta misma función objetivo. Basado en este mismo resultado es que se proponen las restricciones correspondientes al rango de búsqueda para cada uno de los parámetros de frecuencia y fase de la componente senoidal fundamental. Los detalles sobre los resultados de este proceso se reflejan en la sección de resultados, dentro de los resultados propios de la metodología general, ya que este es un paso en común en todas las configuraciones metodológicas.

Con el fin de realizar los ajustes hiperparamétricos propios del algoritmo de evolución diferencial se realizó una comparativa entre el rendimiento en el proceso de optimización variando los valores para las variables: tamaño de la población, estrategia de mutación y número máximo de generaciones. Este proceso de afinamiento hiperparamétrico fue llevado a cabo a través de una búsqueda de rejilla, donde los resultados de este experimento se muestran en la sección de resultados, como primera subsección dentro de los resultados sobre evolución diferencial.

Posteriormente a obtener el ajuste correspondiente a la frecuencia y fase del contenido senoidal fundamental se procede a obtener una estimación de la amplitud de la señal en función del tiempo, esto es, la amplitud pico de la señal expresada en pu. Este cálculo se realiza a través del RMS por ventana deslizante de la señal, tomando como tamaño de ventana el muestreo correspondiente a medio ciclo de la señal senoidal.

A través de los parámetros obtenidos dentro de este proceso es posible conocer sobre la existencia de los disturbios eléctricos de variaciones en la amplitud de la señal: *sag*, *swell* e interrupciones. A parte de lo citado, es posible obtener una medida de precisión en la frecuencia de la componente senoidal fundamental con respecto a la frecuencia estándar de la red, así como medir la diferencia de fase radial entre cada una de las fases de la red eléctrica cuando se realiza

un análisis en una red trifásica en el proceso de reconstrucción. Con respecto a los fenómenos, estos pueden ser incorrectamente clasificados como un conjunto de fenómenos de *sag* y *swell* que se producen de manera cíclica, es por esto que es necesario realizar una detección de este fenómeno, asegurando que el *flicker* sea parametrizado de manera correcta, la detección y estimación del disturbio de tipo *flicker* se trata a continuación.

III.3.2. Bloque *flicker*

Con el fin de poder obtener una estimación de un posible *flicker* se aplica un proceso de búsqueda en el rango espectral correspondiente a este fenómeno a través del algoritmo de optimización de evolución diferencial. Este proceso es aplicado sobre la envoltura de la señal, la cual es obtenida a través de las variaciones obtenidas de la amplitud a través del bloque primario, a esta señal se le elimina su componente DC a través de filtrado digital, eliminado su componente de frecuencia cero, dando lugar a una señal senoidal en el caso de presencia de *flicker* o una señal plana en el caso de que no exista ningún tipo de disturbio correspondiente a los disturbios de variaciones de amplitud.

Sin embargo, debido a que es necesario discernir si existe o no la presencia de *flicker*, se debe realizar un análisis de umbral sobre los datos de comportamiento del proceso de optimización metaheurístico correspondiente a la estimación de la frecuencia y fase del fenómeno *flicker*. Una vez se tiene un ajuste, se realiza un análisis de amplitud RMS sobre este a fin de poder verificar que la potencia de la señal correspondiente al *flicker* es lo suficientemente notable para poder ser aceptado como tal y añadirse a la función de amplitud de la onda fundamental a través del tiempo.

En este punto de la metodología se han completado las tareas correspondientes a la estimación de los parámetros del modelo matemático (1) relacionados con las variaciones de amplitud de la señal en cuanto a su componente fundamental, sin embargo, aún es necesario tratar con el contenido armónico, mismo que se detalla a continuación.

III.3.3. Bloque contenido armónico

El contenido de tipo armónico se trata de un conjunto de ondas senoidales que pueden darse dentro de la señal, con una frecuencia de onda múltiplo entero de la componente fundamental de la señal.

Debido a que se tiene un ajuste preciso sobre la frecuencia de la señal senoidal correspondiente a la componente fundamental de la señal, proveniente del bloque primario, es posible crear filtros que aislen el contenido de la señal en un espectro de frecuencia de un múltiplo de alto orden de esta frecuencia de forma precisa. Este procedimiento de aislamiento de la señal es realizado por cada uno de los H múltiplos de la frecuencia de la componente fundamental que se deseen analizar para, posteriormente, tratar cada una de estas señales resultantes mediante un RMS por ventana deslizante, dando lugar a una medición de la amplitud a través del tiempo del contenido armónico. Es posible establecer cierto umbral sobre este para poder discernir entre la ocurrencia y no ocurrencia de cada uno de los niveles de contenido armónico, esto es realizado posteriormente, en el proceso de umbralización del bloque de reconstrucción del diagrama general.

III.3.4. Esquema de paralelización

Esta metodología utiliza un sistema de ejecución híbrida, en la que se sigue el diagrama de flujo mostrado en la Figura III.5, mostrando un comportamiento aparentemente secuencial.

El funcionamiento de la metodología está basado en la aplicación de sucesivos filtros pasa-banda que tratan de extraer los distintos componentes relevantes para la metodología tales como son la onda fundamental senoidal, el posible *flicker* presente sobre esta y el contenido armónico de los distintos órdenes que puedan presentarse. El orden de ejecución de los distintos pasos del algoritmo fue diseñado de esta manera ya que, a través de la estimación precisa basada en evolución diferencial, es posible obtener con gran precisión la frecuencia y fase de la onda senoidal fundamental, dando lugar a una mayor precisión en el diseño sobre la marcha de los distintos filtros pasa-banda para el contenido armónico. Si hubiese un error en la estimación de la frecuencia de la onda fundamental este mismo sería multiplicado por el orden del contenido armónico a aislar, produciendo errores en el proceso, pudiendo dar lugar a una cuantificación errónea de este. Es por esto que el presente trabajo realiza algo que no se ha realizado anteriormente y es cuantificar los distintos tipos de disturbios que puedan presentarse tales como *sag*, *swell*, interrupción, *flicker* y contenido armónico de orden discreto utilizando para ello una mayor precisión al tomar en cuenta que la frecuencia de la onda senoidal fundamental puede variar con respecto a la frecuencia estándar esperada.

A continuación, se presenta una descripción sobre el funcionamiento del bloque de evolución diferencial, mismo que capta una gran parte de la carga computacional al realizar la ejecución de la metodología, ya que se encarga de realizar una optimización tomando como fuente de datos señales de alta frecuencia.

III.3.5. Esquema de paralelización y descripción del bloque de evolución diferencial

Los bloques encargados de la estimación de frecuencia y fase fueron implementados tomando en cuenta un esquema de cómputo paralelo basado en CUDA (Y posteriormente OpenCL en una segunda versión).

A través de un esquema de diseño de implementación basado en arquitectura de ejecución paralela es posible brindar una mayor velocidad de procesamiento al sistema, acercándolo a una ejecución en línea, donde el tiempo de procesamiento de la señal es cercano al tiempo de adquisición de esta, este proceso de paralelización se detalla en el bloque de evolución diferencial.

El bloque de evolución diferencial dentro de la presente configuración de la metodología está conformado por una capa de programación secuencial que realiza un despliegue sobre el entorno de cómputo en paralelo encargado de realizar el proceso de optimización paramétrica para realizar la búsqueda de frecuencia y fase sobre una señal de tipo senoidal.

Este despliegue y ejecución se compone de varias fases:

1. **Carga del núcleo (o kernel en inglés) correspondiente a la búsqueda paramétrica utilizando evolución diferencial.** Dentro de esta fase se carga el programa que correrá bajo la GPU en un esquema de cómputo paralelizado. Este mismo programa que se carga contiene el algoritmo propio de la evolución diferencial, así como también fue diseñado tomando en cuenta el problema de estimación paramétrica concreto a resolver, junto a las medidas de error correspondientes en la función de error que evalúa cada uno de los agentes de la población.
2. **Carga de los datos de inicio para la generación semilla del algoritmo de evolución diferencial.** La tarea de generación de números aleatorios fue realizada mediante procesamiento CPU, utilizando para ello una rejilla de valores

bidimensional, correspondiente a los valores de frecuencia y fase, además de ello, también se generan de manera adelantada un conjunto de números aleatorios inherentes al algoritmo de evolución diferencial. Debido a que este proceso es realizado tan solo una vez y la cantidad de números aleatorios generados es relativamente bajo este proceso no es paralelizado.

3. **Llamada de ejecución, utilizando una estructura de ejecución en paralelo del núcleo cargado anteriormente.** Esta llamada de ejecución es realizada tomando en cuenta las características físicas del dispositivo GPU sobre el que correrá el núcleo. Este es un punto importante de la computación en paralelo, ya que al poder ajustar el modo de ejecución (por ejemplo, el número de hilos por cada bloque de ejecución) es posible aprovechar al máximo las capacidades del dispositivo y evitar los posibles cuellos de botella.
4. **Rescate de resultados de ejecución.** Finalmente se obtienen los datos resultantes de la ejecución del proceso realizando una transferencia de estos desde la memoria del GPU hacia la RAM del ordenador, obteniendo así el ajuste con el mínimo valor de error obtenido (es decir, el mejor agente), así como también los valores de los parámetros estimados.

Debido a que el algoritmo de evolución diferencial posee distintas estrategias de cruce, se realizaron distintas pruebas sobre cuatro estrategias de cruce, los resultados correspondientes a estas pruebas pueden observarse en la sección IV.2.1. Estas pruebas fueron realizadas tomando en cuenta un conjunto de señales senoidales puras con una frecuencia variable del 5% sobre 60 Hz en cada una de ellas y una fase variable en el rango propio de esta característica. Se midió el resultado promedio del error cuadrático medio sobre el ajuste de la señal al finalizar el proceso en lote tomando en cuenta las estrategias de/rand/1-2 y de/best/1-2, las cuales conforman el conjunto de estrategias más comunes dentro de este algoritmo.

Además de la selección de la estrategia de cruce, es necesario justificar la implementación en paralelo de este mismo bloque mediante una comparación de rendimiento en cuanto a tiempo de ejecución. Para ello se diseñó un banco de pruebas donde se compara el tiempo requerido en segundos en la ejecución de 100 generaciones tomando distintos tamaños de población y puntos de muestreo de la señal.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

III.4. Configuración 2. Estimación paramétrica basada en HHO

Esta metodología utiliza un algoritmo de optimización meta-heurística bio-inspirado como es el algoritmo de optimización del águila *Harris* (HHO), hace uso de este como piedra angular sobre la que se sostiene la lógica en que se fundamenta todo el funcionamiento de su propuesta.

La idea fundamental de este bloque, que representa una configuración de la metodología, es poder obtener un mayor acercamiento a los distintos tipos de disturbios de tipo transitorio a través de una reconstrucción de los distintos componentes senoiales presentes en la señal analizada, donde los procesos de estimación de frecuencia, fase, así como también de amplitud, son estimados utilizando HHO como algoritmo de optimización a fin de reducir el error de ajuste. Todo el proceso puede verse resumido en el diagrama propio de este bloque en la Figura III.6.

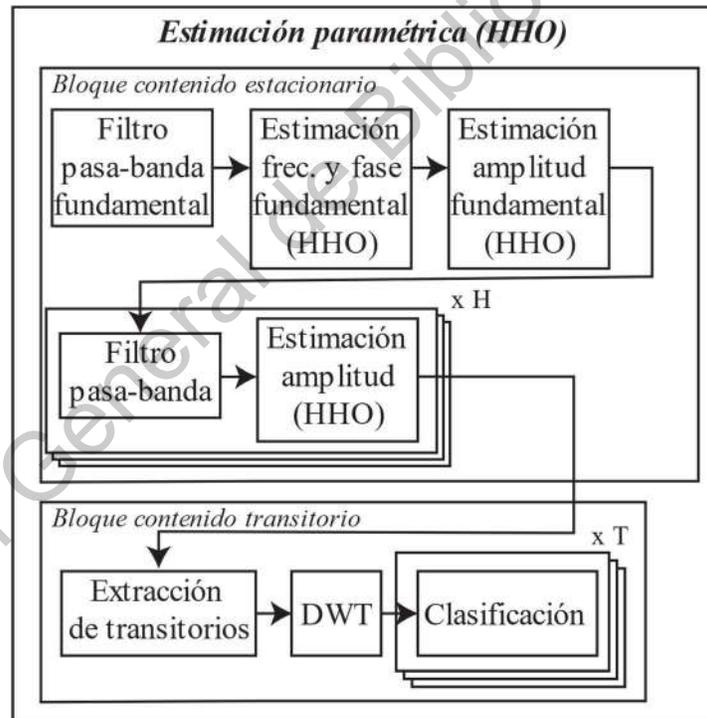


Figura III.6. Diagrama general de la metodología basada en HHO.

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los bloques correspondientes al proceso de estimación paramétrica basado en HHT: el bloque contenido estacionario y el bloque contenido transitorio.

III.4.1. Bloque contenido estacionario

En el primer bloque, el bloque contenido estacionario, se realizan las operaciones correspondientes a la estimación de frecuencia, fase y amplitud para cada una de las ondas correspondientes al contenido de onda fundamental y contenido armónico. Obteniendo una parametrización de cada uno de estos componentes a través del tiempo, pudiendo crear una señal sintética que sea capaz de detectar disturbios de tipo *sag*, *swell*, interrupciones, *flicker* (como un *sag-swell* de amplitud oscilante) y contenido armónico.

Este proceso es llevado a cabo realizando como primer paso una búsqueda a través de HHO de los parámetros de frecuencia y fase de la componente fundamental senoidal de la señal aislada. Este primer paso es designado en este lugar debido a que será necesario conocer con certeza la frecuencia real de la onda senoidal fundamental. Además de ello, tras la obtención de la frecuencia y la fase, se realiza posteriormente una segmentación de la señal donde se distinguen distintos intervalos de tiempo correspondientes a cada uno de los semiciclos de la onda fundamental presentes en la ventana de tiempo analizada.

La idea de utilizar los semiciclos de la onda fundamental y no los ciclos completos es debido a que esta medida de anchura de ventana de tiempo para un posterior análisis de la amplitud hace posible detectar los distintos posibles tipos de disturbios correspondientes a la variación de amplitud en un tiempo menor que medio ciclo de la onda fundamental. En esta metodología, al realizar este tipo de aproximación utilizando un algoritmo de optimización reemplazando al algoritmo de RMS por ventana deslizante de la configuración metodológica basada en DE (realizando algo más similar a lo que hace la metodología GA-PSO) se esperaba obtener de esta forma una mayor precisión en la medida de amplitud.

III.4.2. Bloque contenido transitorio

Como segundo bloque se tiene al bloque contenido transitorio. Este bloque es capaz de realizar una extracción de cada uno de los disturbios de tipo transitorio presentes en la señal, todo ello basado en el uso de la herramienta de la transformada discreta wavelet, donde se utiliza un umbral absoluto como filtro de detección sobre los niveles de detalle de esta sobre la diferencia de la señal reconstruida tras pasar por el bloque anterior y la señal medida. Tras obtener una descomposición de la señal resultante de esta resta usando la herramienta DWT y realizar el

filtrado por umbral correspondiente se aísla cada uno de los fenómenos de tipo transitorio detectados y se realiza una clasificación para discernir si se está ante un disturbio de tipo transitorio impulsivo u oscilante.

Los disturbios de tipo transitorio impulsivos son aquellos que presentan una variación instantánea y abrupta en amplitud, reduciendo a la misma velocidad esta tal como se produjo sin mostrar efecto de amortiguación idealmente, este tipo de transitorio puede verse ejemplificado en la Figura III.7, donde se muestra sobre una onda fundamental y de manera aislada.

Por otra parte, los disturbios de tipo transitorio oscilantes son aquellos que presentan una variación instantánea en su amplitud, sin embargo, desaparecen de manera paulatina intercambiando el signo de su variación de amplitud sobre la señal entre positivo y negativo de manera cíclica a la vez que se reduce su amplitud, tal como una onda senoidal que va degradándose a través del paso del tiempo, este tipo de transitorio puede verse ejemplificado en la Figura III.8, donde se muestra sobre una onda fundamental y de manera aislada.

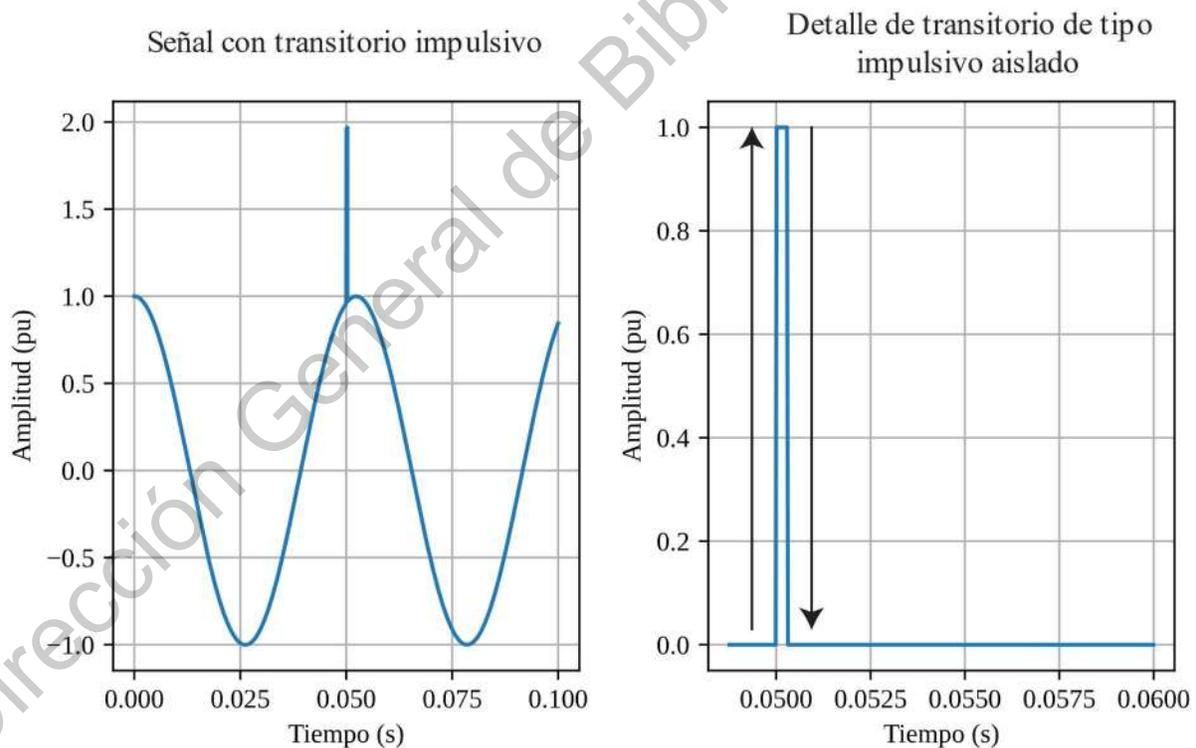


Figura III.7. Señal sintética con transitorio de tipo impulsivo (izquierda) y transitorio de tipo impulsivo aislado con comportamiento de este señalado (derecha).

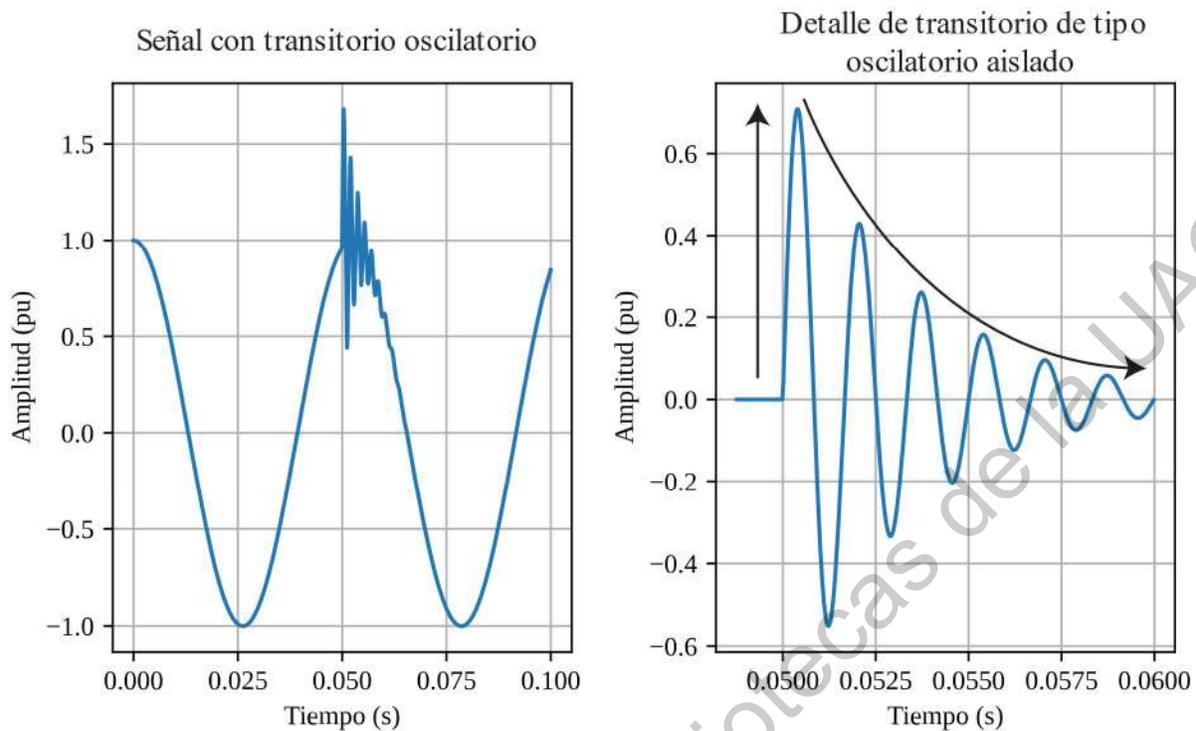


Figura III.8. Señal sintética con transitorio de tipo oscilatorio (izquierda) y transitorio de tipo oscilatorio aislado con comportamiento de este señalado (derecha).

III.4.3. Detalle del modelo de clasificación de transitorios

Debido a la divergencia entre las características que presentan cada una de las clases de los disturbios de tipo transitorio se diseñó que pudiera clasificarlos tomando en cuenta estas mismas diferencias.

El modelo de clasificación de transitorios, mismo que se refleja en la Figura III.9, se basa en que, una vez acotada la ventana de tiempo del transitorio en cuestión y extraído de la señal, es posible realizar un conteo del número de veces que la señal correspondiente a este disturbio cambia de signo. Este proceso de conteo, a fin evitar el ruido propio de la señal y el proceso de DWT, se realiza sobre una señal de disturbio ya suavizada usando un filtro de convolución.

En el caso de que el conteo arroje una cifra menor que cierto umbral el disturbio será clasificado como transitorio oscilatorio, en caso contrario este será clasificado como transitorio impulsivo.

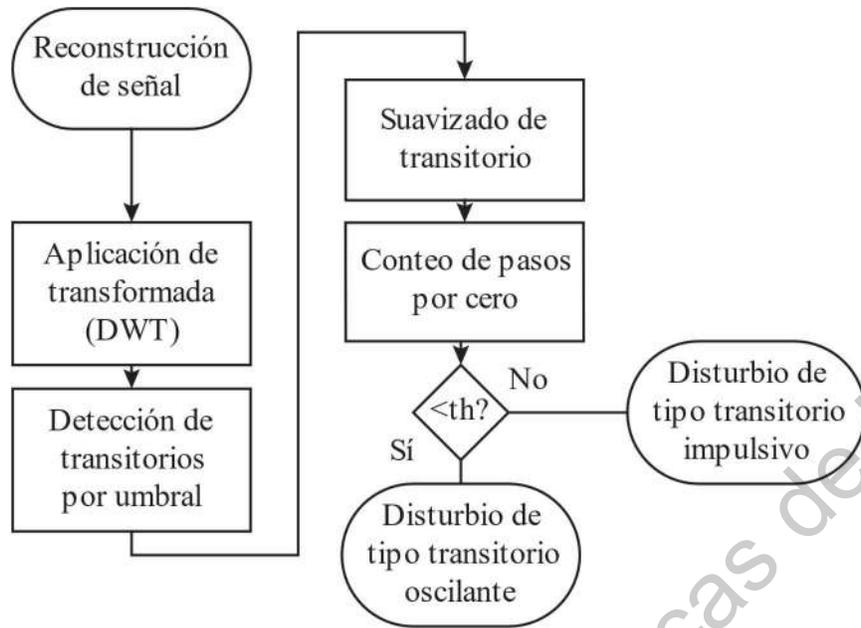


Figura III.9. Detalle del módulo de detección y clasificación de disturbios de tipo transitorio de la metodología propuesta basada en el algoritmo de optimización del águila Harris.

III.5. Configuración 3. Estimación paramétrica basada en SANN

La tercera de las configuraciones metodológicas desarrollada durante este trabajo se basa en una construcción que utiliza redes neuronales artificiales específicas (*specific artificial neural networks*, SANN). Este tipo de construcción permite que, a través de una estructura basada en una red neuronal pueda resolverse un problema de optimización.

Se muestra un diagrama general de la metodología propuesta en la Figura III.10. Se presenta como una metodología de implementación sencilla debido a que las herramientas que se utilizan para conformar un conjunto de bloques para el diagrama relativamente corto y general.

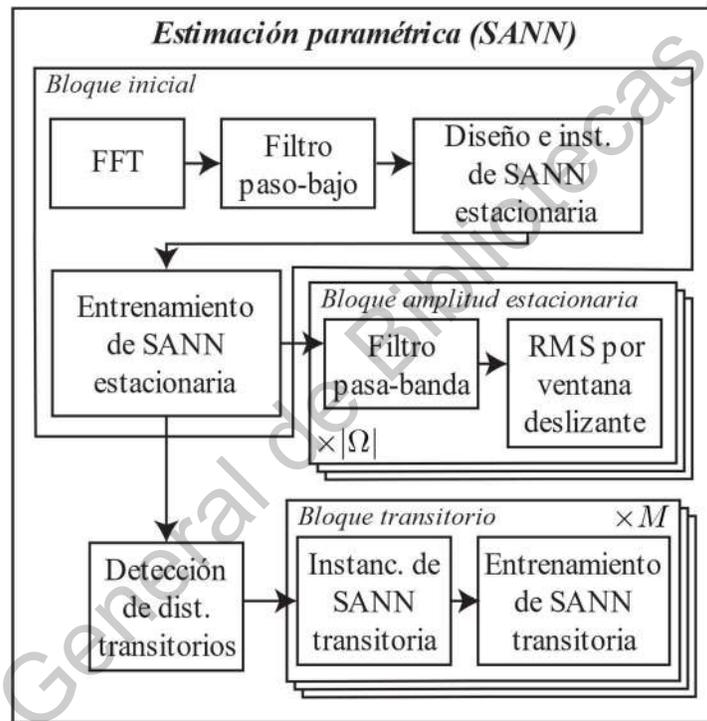


Figura III.10. Diagrama general de la metodología basada en SANN.

Dentro de la configuración metodológica presentada se establecen pasos de diseño e instanciación de dos estructuras de tipo SANN: estacionaria y transitoria.

III.5.1. Bloque inicial

El bloque de estimación paramétrica comienza con el bloque inicial, el cual toma como primera tarea el calcular el espectro de frecuencias de interés de la señal a través de FFT. Una vez

se obtiene la lista de frecuencias de interés se realiza una segmentación de la señal entre contenido espectral de baja-media frecuencia y contenido de alta frecuencia.

El contenido de baja-media frecuencia se asocia mayormente a los disturbios que no son de tipo transitorio, los cuales están basados en las amplitudes dentro de cada uno de los componentes senoidales que pueden presentarse, es por ello que se realiza un diseño e instanciación de una estructura SANN acorde a las frecuencias halladas dentro del resultado del algoritmo FFT. Posteriormente se realiza un entrenamiento sobre esta red, obteniendo el conjunto de frecuencias y fases de manera precisa, correspondientes a cada una de las componentes senoidales de la señal.

III.5.2. Bloque amplitud estacionaria (múltiple)

Cada una de las componentes finalmente son aisladas a través de un filtro pasa-banda y se obtiene el vector de amplitudes para cada una de las componentes a través de un filtro RMS por ventana deslizante.

III.5.3. Bloque transitorio (múltiple)

Al contenido de alta frecuencia se le asocian disturbios de tipo transitorio, por lo que, tras realizar una detección de estos mediante un filtro de umbral se realiza, para cada uno de los disturbios de tipo transitorio encontrados, una instanciación de una red SANN diseñada a la medida para el ajuste paramétrico a través de su entrenamiento sobre el tipo de disturbios nombrado.

III.5.4. Detalle de las estructuras específicas

La estructura SANN estacionaria, misma que se observa en la Figura III.11, se diseña tomando en cuenta el número de componentes de frecuencia de interés obtenidos en la transformada FFT de la señal, es por esto que esta red es diseñada durante la ejecución de la metodología. Se realiza en la capa intermedia de la red una replicación de perceptrones cuya función de activación se corresponde con la función coseno, misma que genera una señal senoidal. Durante el entrenamiento de esta estructura cada uno de los pesos asociados entre la entrada (que se corresponde con la variable de tiempo) y los perceptrones cuya función de activación es coseno realizarán un ajuste aproximándose a los valores reales de velocidad radial de la señal, así como también el parámetro de fase se irá ajustando para coincidir con la fase de cada una de las señales

senoidales. Finalmente, se realizará una suma, misma que da como resultado una medida de error que, si bien no refleja un error sobre el ajuste final de la metodología sobre la señal, sí se minimiza cuando los parámetros de la red están en sintonía con los propios del contenido senoidal de la señal.

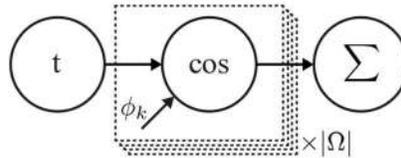


Figura III.11. Diseño de la estructura SANN estacionaria.

Por otra parte, la estructura SANN transitoria, la cual se muestra en la Figura III.12, permite realizar a través de su entrenamiento un ajuste sobre un disturbio transitorio. Esta estructura ha sido pensada tomando en cuenta la función matemática correspondiente del modelo matemático utilizado en este proyecto, donde un disturbio transitorio de tipo oscilatorio es designado como el único tipo de disturbio transitorio posible. Sin embargo, es de tener en cuenta que sería posible realizar un ajuste sobre un disturbio transitorio impulsivo regulando el valor correspondiente a la tasa de decrecimiento del disturbio (τ). Esta red es instanciada por cada uno de los disturbios de tipo transitorio detectados, sin necesidad de personalización, puesto que no existe ningún tipo de multiplicidad en su diseño interno, mas sí en su instanciación, la cual depende tal como se ha comentado del número de disturbios de tipo transitorio detectados a través del bloque de filtro de umbral.

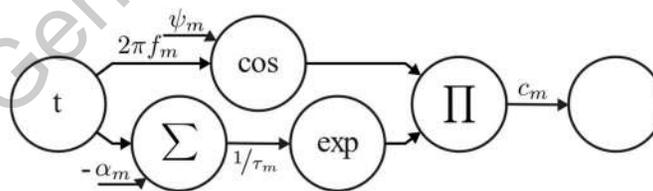


Figura III.12. Diseño de la estructura SANN transitoria.

III.5.5. Diseño de validación con banco de señales sintéticas

Se diseñó un proceso de validación a través de la utilización de un banco de señales sintéticas, contando con un total de 100 ejecuciones de la metodología de cuantificación de disturbios para cada una de las categorías de señal, las cuales podían contener uno o varios tipos de disturbio. Una descripción de las 8 categorías de señales diseñadas para componer este mismo

banco de pruebas puede encontrarse en la Tabla III.I. Entre los tipos de disturbios se encuentran disturbios de contenido senoidal estacionario (*sag*, *swell*, interrupción, contenido armónico de tercer orden, *flicker*, contenido armónico de tercer orden y contenido inter-armónico de orden 6.5) y una categoría para disturbios de tipo transitorio, en donde se prueba el disturbio de tipo transitorio oscilatorio.

Tabla III.I. Categorización de las señales sintéticas a generar junto con su respectiva descripción y parametrización específica para cada uno de los casos.

Cat.	Descripción y parámetros
TC1	Señal sana con perturbación no calificable como disturbio correspondiente a una variación de tensión nominal sobre la señal fundamental con una duración de 0.1 s y un factor de δ_k . $\delta_k \in (0.95, 1.05)$
TC2	Señal con un disturbio de tipo sag presente donde la tensión nominal de la onda fundamental se ve afectada por el factor δ_k durante 0.1 s. $\delta_k \in (0.1, 0.9)$
TC3	Señal con un disturbio de tipo swell presente donde la tensión nominal de la onda fundamental se ve afectada por el factor δ_k durante 0.1 s. $\delta_k \in (1.1, 1.5)$
TC4	Señal con un disturbio de tipo interrupción presente donde la tensión nominal de la onda fundamental se ve afectada por el factor δ_k durante 0.1 s. $\delta_k \in (0.0, 0.1)$
TC5	Señal con contenido armónico presente de tercer orden cuya señal senoidal se corresponde con una onda con un factor de amplitud δ_3 . $\omega_3 = 3\omega_1, \phi_3 \in (0.0, 2\pi), \delta_3 \in (0.15, 0.30)$
TC6	Señal con un disturbio de tipo flicker cuya velocidad radial tiene un valor de ω_f rad/s y cuya amplitud pico a pico es de A_f pu. $\omega_f \in (4\pi, 10\pi), \phi_f \in (0.0, 2\pi), A_f \in (0.05, 0.10)$
TC7	Señal con contenido armónico de tercer orden con factor δ_3 y contenido inter-armónico de orden 6.5 con factor $\delta_{6.5}$. $\omega_3 = 3\omega_1, \phi_3 \in (0.0, 2\pi), \delta_3 \in (0.15, 0.30)$ $\omega_{6.5} = 6.5\omega_1, \phi_{6.5} \in (0.0, 2\pi), \delta_{6.5} \in (0.10, 0.15)$
TC8	Señal con un disturbio de tipo transitorio oscilatorio con factor de amplitud pico inicial c , factor de decaimiento τ y frecuencia ω . $c \in (0.5, 0.7), \tau \in (0.003, 0.004), \omega = 2000\pi$

Este proceso de validación fue diseñado para conocer el grado de error, así como también el tiempo de ejecución de la configuración de la metodología propuesta, realizando además una comparación con el algoritmo híbrido GA-PSO.

Las pruebas correspondientes se diseñaron para ser ejecutadas bajo un entorno de ejecución en la nube usando *Python 3* y *Tensorflow 2* en su versión para GPU, la cual usa la librería de redes neuronales propias de NVIDIA CUDA de manera interna, adquiriendo de esta forma la implementación de manera automática como característica la arquitectura de ejecución en paralelo, todo ello bajo un hardware basado en un procesador Intel Skylake y una GPU NVIDIA Tesla P100.

III.5.6. Diseño de validación con señales reales

A fin de poder probar la metodología propuesta con señales reales se diseñó un banco de pruebas encargado de analizar las señales descritas en la sección III.1.2. Midiéndose cada una de las características que se midieron en las pruebas correspondientes a la validación de señales sintéticas. Los detalles de esta misma validación se encuentran en la sección de resultados.

III.6. Bloque de reconstrucción

Una vez se tiene un ajuste sobre los distintos disturbios que se ven representados en la señal como salida del bloque de estimación paramétrica, es posible realizar una detección de disturbios a través de umbral, así como también realizar una reconstrucción de una señal sintética que se ajusta de manera cuasi-óptima a la señal real introducida en el sistema.

III.6.1. Detección de umbral

Es posible realizar una detección de los disturbios presentes en la señal a través de una umbralización, tomando en cuenta los rangos definidos por las distintas normativas de la calidad de la energía tratadas anteriormente en este documento.

Esta operación basa su funcionamiento en realizar un conjunto de comprobaciones de rango sobre cada uno de los parámetros obtenidos del bloque anterior, donde, para los parámetros de tipo escalar se discierne entre presencia de disturbio mediante una sola comprobación numérica sobre el rango correspondiente según la normativa, sin embargo, para los parámetros de tipo vectorial es necesario realizar esta comprobación de pertenencia a rango para cada uno de los datos del vector.

Por otra parte, en el caso de que se esté realizando un análisis multifásico, donde se estudia una red bifásica o trifásica, el proceso de detección de umbral permite obtener una mayor información sobre la sincronización entre fases, así como también establecer la aparición de un mismo disturbio sobre varias fases de manera simultánea.

III.6.2. Generación de señal sintética

El proceso de generación de una señal sintética asociada a la señal real tiene un doble propósito dentro del sistema.

Por una parte, poder generar una señal sintética, basándose en la evaluación del modelo matemático asociado al sistema con los parámetros estimados en el bloque de estimación paramétrica, permite obtener una medida de la bondad de ajuste obtenida con la configuración metodológica utilizada en el sistema, pudiendo, de esta forma, realizar una comparativa entre estas de manera estándar.

Por otra parte, la generación de una señal sintética ideal como una representación fiel de la señal real permite recrear variantes de la señal aislando conjuntos de disturbios basándose en una selección del usuario del sistema, permitiendo de esta forma un mejor estudio de cada uno de los factores que perturban la señal.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

III.7. Estrategia de implementación y optimización de rendimiento

Debido a que el presente trabajo de tesis plantea una metodología que utiliza una cantidad de recursos computacionales considerable en su ejecución es necesario plantear una estrategia de implementación acorde a estos requisitos que permita acercar la solución a una implementación de baja latencia de ejecución. Hoy en día, las tecnologías de fabricación de dispositivos electrónicos de lógica digital han encontrado un limitante en cuanto a la mínima longitud de puerta de transistor que se puede obtener de forma consistente. Debido a la precisión de las herramientas de fabricación utilizadas y los efectos a nivel cuántico que son capaces de perturbar la señal de puerta de los transistores con longitud de puerta menor, unido al calentamiento producido por utilizar frecuencias de funcionamiento mayor, los fabricantes de microprocesadores optan por incluir varios núcleos en sus productos, haciendo del modelo de ejecución en paralelo una estrategia fundamental para lograr obtener rendimientos que aprovechen todos los recursos de un procesador, es por esto mismo que toda la implementación fue basada en este mismo modelo.

La estrategia llevada a cabo para la implementación tomó en cuenta la portabilidad de esta para que la implementación pudiese ser adaptada en distintos entornos, tomando como alternativas al entorno de ejecución bajo plataforma en la nube y de manera local, y a su vez, bajo un entorno de ejecución bajo un microprocesador convencional y bajo GPU. La presente tesis ha tratado sobre una implementación en lenguaje *C++* y *Python 3*, aprovechando en ambas implementaciones las librerías correspondientes a la optimización meta-heurística y el procesamiento en paralelo.

III.7.1. Escritura del código fuente

A fin de poder llevar a cabo una correcta implementación de la metodología descrita anteriormente que sea compatible con los estándares de desarrollo de software más modernos se realizó un desarrollo basado en una metodología ágil, en concreto se usó *Scrum*, misma metodología que descrita en la obra de Sutherland (2016). Esta metodología permite, a través de distintas etapas, poder ofrecer una mejor calidad en el producto desarrollado, añadiendo un mayor nivel de detalle en cada una de las etapas necesarias para este proceso en grandes proyectos. Se utilizaron buenas prácticas de codificación durante el proceso con el fin de poder cumplir con los

estándares de desarrollo a nivel de programación, mismos que se dictan en la obra de Martin (2008).

Se utilizó la herramienta *Doxygen* para la creación de documentación técnica basada en comentarios dentro de la aplicación desarrollada. A través de un esquema basado en inserción de comentarios dentro del código fuente es posible crear, mediante esta herramienta citada, una documentación estructurada de las funcionalidades y descripción de cada una de las clases que componen la librería propia de la metodología. De esta manera se asegura que se facilite la integración de esta misma en un entorno distinto al entorno de pruebas.

Tomando en cuenta la metodología del desarrollo conducido a través de pruebas (*Test Driven Development* o TDD en inglés), misma presente en el trabajo de Beck (2002), se escribieron distintas pruebas unitarias que permitían, durante el proceso de desarrollo, poder probar cada una de las características del sistema de manera automatizada, asegurando la solidez del proceso de desarrollo, así como también permitiendo la reproducibilidad de las pruebas realizadas así como la generación de tablas y gráficas correspondientes.

III.7.2. Selección de librerías

Con el fin de poder crear una solución que permitiese aprovechar las características del hardware presente en una computadora común, se decidió utilizar una implementación basada en *OpenCL* a través de la cual es posible lanzar distintos hilos de ejecución bajo un ambiente naturalmente paralelo, tal como pueden ser los distintos núcleos del microprocesador o cada uno de los núcleos de procesamiento de la tarjeta gráfica (bien sea dedicada o integrada).

Debido a que, durante el proceso de desarrollo se dio la necesidad de desarrollar distintos filtros digitales se utilizó *Matlab* para la creación de estos mismos, de cuyos resultados se extrajeron los parámetros correspondientes para el posterior diseño paramétrico que se llevarían a cabo dentro de la solución basada en *Python 3* y *C++*.

En cuanto a la implementación de los algoritmos de optimización basados en redes neuronales artificiales específicas se utilizó el paquete *Tensorflow*, el cual, de manera nativa, ya contiene la posibilidad de poder correr bajo un entorno paralelizado utilizando *CUDA* u *OpenCL*, aprovechando la capacidad de cómputo del sistema de cómputo.

III.7.3. Automatización del despliegue

Con el fin de poder realizar un despliegue de la implementación abierto, flexible y de manera controlada, se utilizó una estrategia de desarrollo de operaciones (*DevOps* en inglés), tal como se describe en el trabajo de Kim et al. (2016). Para esto mismo se creó una metodología de despliegue basada en dos ambientes, pruebas y producción, mismos que tradicionalmente son utilizados para este tipo de metodología de despliegue. Esta metodología de despliegue se basó en la nube de cómputo de *Amazon Web Services*, utilizando *EC2* como servicio de máquinas virtuales de soporte para cómputo dedicado, tomando en cuenta los estándares de integración continua y despliegue continuo.

La integración continua del desarrollo en el proyecto se llevó a cabo a través de la ejecución automatizada del conjunto de test unitarios citados anteriormente, misma acción que era ejecutada al actualizar el repositorio de código en su rama de pruebas. En el caso de que no se produjese un error en la ejecución del conjunto de tests se realizaría una fusión automática de la rama de pruebas con la rama principal. Además de ello, fue posible crear nuevas ramas para funcionalidades específicas con lógica de dificultad significativa que, posteriormente se fusionarían con las ramas de desarrollo, este proceso de fusión de ramas se enmarca dentro del desarrollo continuo. Se muestra un diagrama del proceso en la Figura III.13.

Con el fin de poder crear entornos de ejecución uniformes e inamovibles se crearon scripts de despliegue basados en *Docker*, un sistema de automatización de despliegues basado en la creación de contenedores a través de imágenes que contienen preinstalados los motores de ejecución necesarios para el entorno, compartiendo el núcleo (*kernel* en inglés) del sistema bajo el que corre el servicio de *Docker*. Este sistema es equivalente a la utilización de jaulas, tal como se haría con *chroot*, sin embargo, se incluyen opciones de configuración de despliegue referentes a la exposición de puertos y también a la posibilidad de introducir imágenes preconfiguradas accesibles a través de un repositorio central.

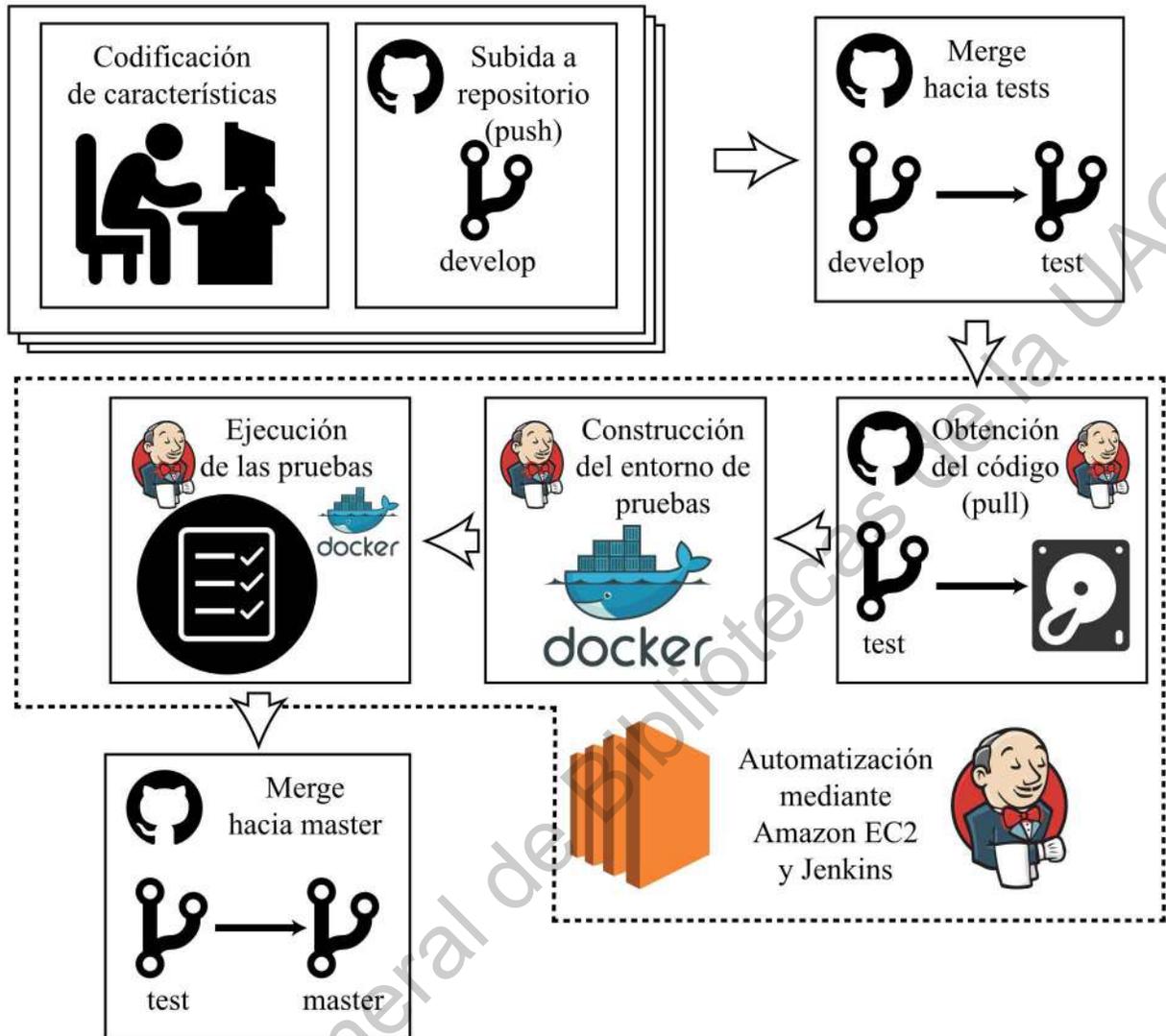


Figura III.13. Diagrama del proceso de integración continua y desarrollo continuo basado en tecnologías en la nube y manejo de repositorios.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de la presente sección se muestran los resultados de la investigación llevada a cabo en el presente trabajo. Estos resultados son aquellos referentes tanto a la precisión de ajuste de la metodología en todas sus configuraciones, es decir, para cada uno de los sub-bloques del bloque de estimación paramétrica, así como también al tiempo de cómputo en cuanto a la aplicación de las distintas técnicas de optimización utilizadas implementadas con un modelo de ejecución concurrente.

Debido a que se realizaron pruebas de validación de la metodología de manera que se pudiera asegurar la robustez de este, tanto en un despliegue teórico como uno real, se generaron las bases de datos de señales sintéticas que se corresponden con mixturas de disturbios eléctricos, así como también, por otra parte, se realizó un análisis sobre señales de energía obtenidas de un hospital situado en la región de Castilla y León (España), cuyos datos fueron obtenidos en un estudio anterior fruto de un convenio con nuestra universidad. Añadido a las señales reales citadas, se añadieron las bases de datos del grupo de trabajo de la IEEE, mismo que se centra en el estudio de la calidad en la energía eléctrica.

Debido a la naturaleza heterogénea de los sistemas de medición utilizados en las distintas fuentes los datos capturados deberán ser tratados a fin de estandarizarlos y poder introducirlos a la metodología actual, posteriormente se aplicará esta misma a cada uno de los datos, dando lugar a una estimación paramétrica sobre cada uno de estos modelos a través de ventanas de tiempo, finalizando el proceso con un diagnóstico y una apreciación basada en el uso los datos de salida de la metodología. A continuación, se presentan distintas subsecciones referidas a cada una de las configuraciones desarrolladas junto con sus resultados asociados en los distintos experimentos llevados a cabo, mismas que se corresponden con los trabajos realizados durante la presente tesis.

IV.1. Metodología general

A fin de poder obtener las evidencias necesarias para justificar el añadir el paso de estimación de frecuencia y fase a las metodologías de cuantificación de disturbios sobre señales de la calidad de la energía, mismo que es común a todas las configuraciones desarrolladas en el presente trabajo de tesis, fue necesario desplegar un conjunto de pruebas iniciales, todo ello a fin de obtener los resultados numéricos correspondientes que permitiesen mostrar la importancia de este punto.

Es importante notar que el añadir este paso supone una contribución científica al *modus operandi* propio de los algoritmos de cuantificación, añadiendo una mayor bondad de ajuste a los procesos de optimización, resultando en una señal sintética generada más fiel a la señal real de entrada al sistema, permitiendo así reducir el error de la metodología.

Dentro de esta sección de resultados sobre la metodología general se muestran los resultados de las pruebas correspondientes a la importancia de estimar frecuencia y fase en el contenido senoidal fundamental, así como también se muestran los resultados correspondientes al análisis matemático llevado a cabo sobre la señal senoidal, misma que conforma la esencia de una señal de voltaje de una línea de alimentación, siendo este paso necesario para comprender cómo es que será necesario ajustar los algoritmos de optimización variados que se presentan en cada una de las configuraciones metodológicas de esta tesis en cuanto a sus rangos de búsqueda.

IV.1.1. Importancia de estimar frecuencia y fase

A fin de poder demostrar la importancia del proceso de estimación de frecuencia y fase de manera precisa sobre el contenido fundamental de la señal de energía para obtener un buen ajuste de señal (parametrización) que describa de manera fiel el verdadero contenido de la señal real se estableció un primer experimento, dentro del cual se mide la suma del error cuadrático producido relativo (RSSE) al utilizar señales senoidales puras en el rango de 54 Hz a 66 Hz, tomando una señal senoidal de frecuencia fija igual a 60 Hz para su comparación.

Se denota la importancia de realizar el proceso de estimación de frecuencia y fase por el que se define la metodología implementada, en cada una de sus configuraciones, en la Figura IV.1. En esta figura es observable que, al utilizar un método que no contiene como característica la estimación de los parámetros de frecuencia y fase de manera simultánea, tomando como constante la frecuencia estándar para la onda fundamental (como es el método MGA-PQA o GA-PSO) el error relativo aumenta a ambos lados de la frecuencia sobre la que se encuentra realmente la señal senoidal pura (60 Hz en el caso de la figura referida).

Debido a este comportamiento es que posteriormente es posible encontrarse aún mayores discordancias al tratar con contenido senoidal armónico de alto orden y amplitud notable, ya que se multiplicaría el error correspondiente a la falta de estimación de frecuencia de la onda fundamental por el número correspondiente al contenido armónico a tratar, acumulándose este error de manera acrecentada para tamaños de ventana de tiempo superiores. Es debido a las razones expuestas que la metodología propuesta utiliza un ajuste fino sobre la frecuencia y fase de la señal fundamental antes de realizar cualquier otra tarea.

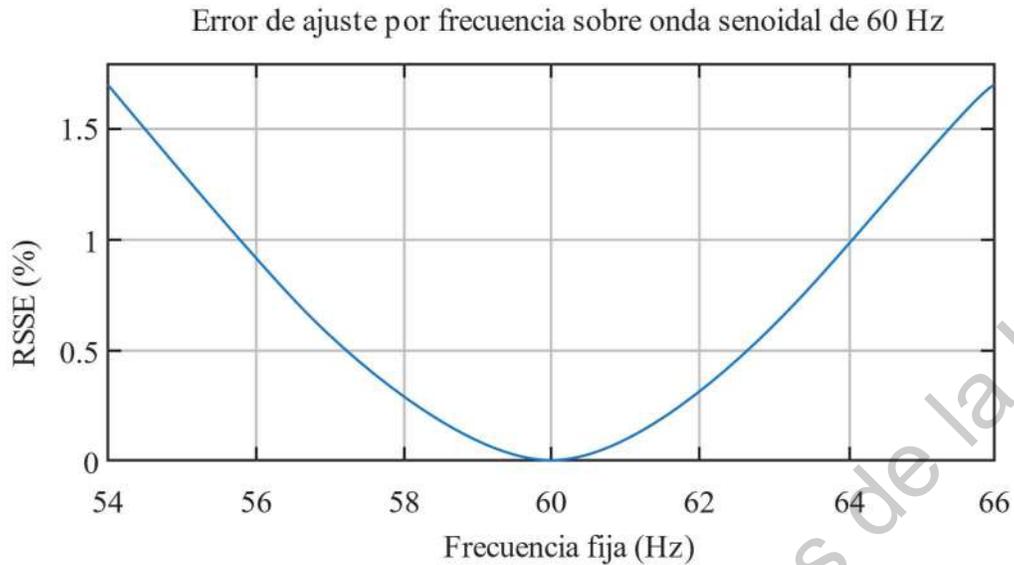


Figura IV.1. Gráfica de error de ajuste relativo sobre una señal senoidal utilizando una metodología basada en frecuencia fija.

IV.1.2. Análisis matemático sobre la onda senoidal

A través de la metodología diseñada se realizó el proceso de estimación paramétrica tomando como base el modelo matemático utilizado de manera equivalente para el proceso de generación de señales sintéticas. El primer paso dentro de este proceso, para cualquiera de las distintas configuraciones metodológicas presentadas en este trabajo de tesis, se corresponde con una estimación precisa de la frecuencia y fase de la señal fundamental. Este proceso de optimización fue estudiado con detenimiento a fin de poder aplicar distintas técnicas de optimización con seguridad, un primer análisis sobre la derivada de una señal senoidal pura de frecuencia 60 Hz y fase radial de π radianes dio como resultado el diagrama de contornos sobre el error cuadrático medio que se muestra en la Figura IV.2 en su versión bidimensional y en la Figura IV.3 en su versión tridimensional. Tal como se puede apreciar en este diagrama existen distintos mínimos locales a tomar en cuenta en la hiper-parametrización de los distintos algoritmos de optimización a utilizar para obtener el valor resultante para estos parámetros (frecuencia y fase), además existen cierta área acotada cercana al punto de solución (correspondiente a la frecuencia y fase de la señal original) que sería aconsejable tomar como punto de inicio para la búsqueda de estos parámetros.

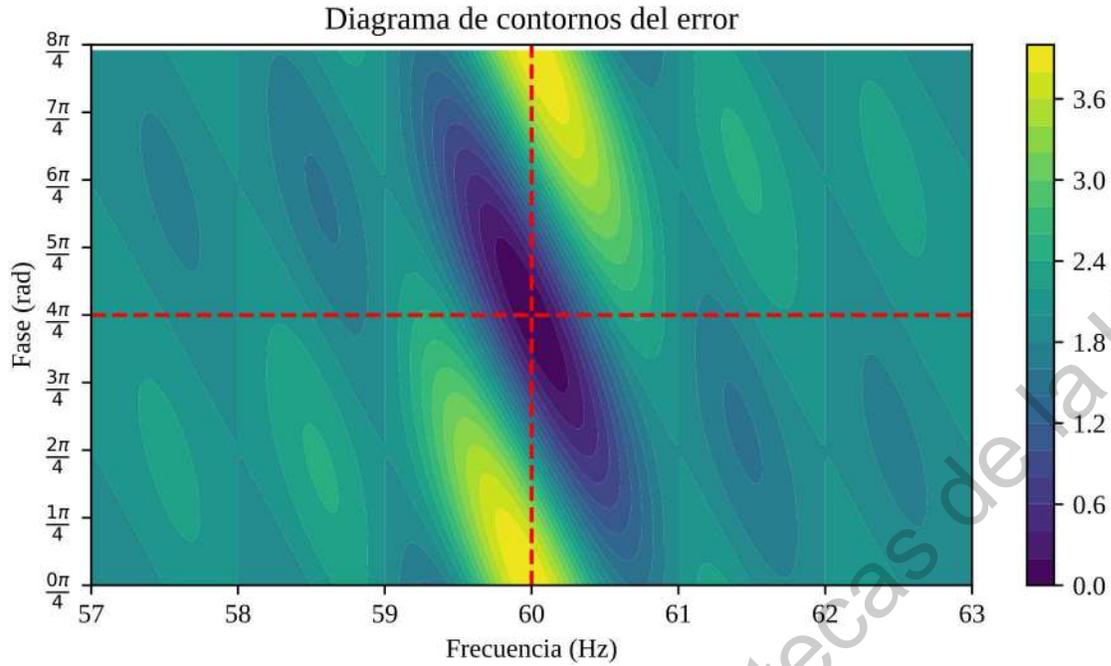


Figura IV.2. Diagrama de contornos de la función del error cuadrático medio en la búsqueda por rejilla del par de parámetros de frecuencia y fase (2D).

Diagrama de contornos del error (3D)

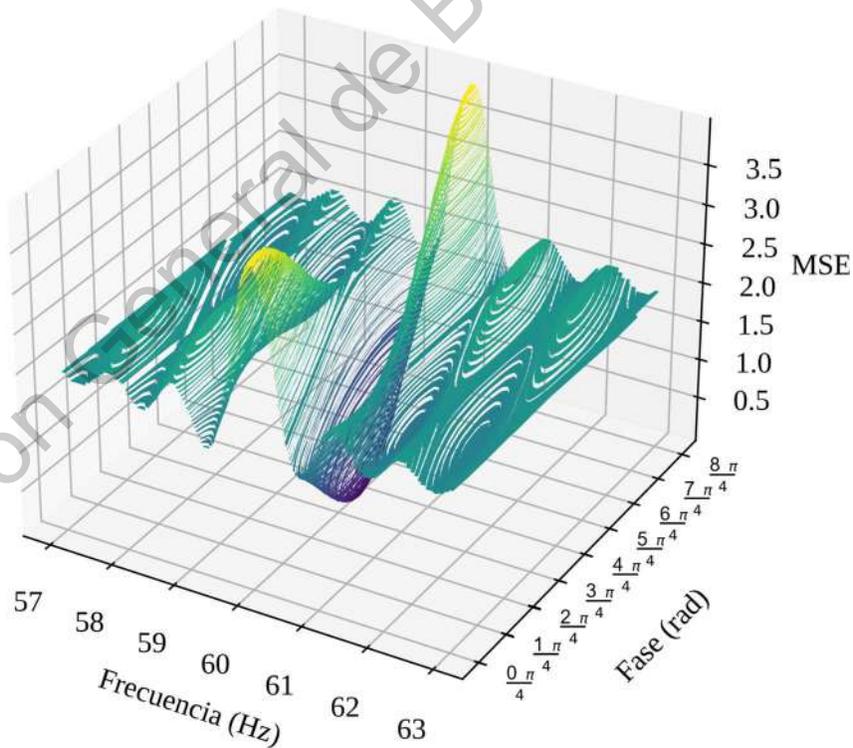


Figura IV.3. Diagrama de contornos de la función del error cuadrático medio en la búsqueda por rejilla del par de parámetros de frecuencia y fase (3D).

IV.2. Configuración 1. Estimación paramétrica basada en DE

Dentro de esta sección de resultados se presentan aquellos resultados que se corresponden con los experimentos llevados a cabo con la configuración metodológica que utiliza la evolución diferencial (DE) como algoritmo base para llevar a cabo la resolución de los problemas de estimación paramétrica sobre frecuencia y fase.

La presente configuración metodológica conlleva consigo, como contribución científica, la utilización de técnicas propias del campo de la computación de altas prestaciones al procesamiento de señales de la calidad de la energía en cuanto a la cuantificación de disturbios, algo que anteriormente no se había reportado en ninguna publicación anterior. La codificación de los algoritmos en su variante de ejecución en paralelo soportada por GPU permitió obtener, tal como se muestra en esta sección, un tiempo de respuesta del sistema mucho menor.

Estos mismos resultados expuestos sobre esta configuración metodológica fueron publicados en la revista indexada *JCR* conocida como *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*, dentro del número 2 del año 2019 bajo el título: *Differential Evolution Implementation for Power Quality Disturbances Monitoring using OpenCL* (Solis-Munoz et al., 2019), conformando la primera publicación de este trabajo de tesis. Este artículo ha sido adjuntado en la sección de anexos de este documento.

Además de la publicación anteriormente mencionada, el código fuente correspondiente a la implementación de esta metodología se registró ante el organismo *Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR)*, con el fin de poder formalizar la autoría correspondiente a esta configuración metodológica novedosa que fue precursora y base del desarrollo de las subsiguientes. Igualmente, tal como el artículo, se tiene la prueba de este registro en la sección de anexos junto a las cartas de usuario correspondientes de la *Universidad Politécnica de Valencia* y la *Universidad de Valladolid*, fortaleciendo de esta forma la relación entre las universidades citadas y la *Universidad Autónoma de Querétaro*.

IV.2.1. Estudio sobre la estrategia de cruce

A fin de poder establecer esta estrategia de cruce se realizó un experimento en dos fases. Ambas fases fueron ejecutadas bajo un entorno de ejecución secuencial utilizando para ello una codificación clásica acorde a este. Mismas pruebas que fueron soportadas por una máquina virtual instalada en la nube propia de Google Cloud Compute Engine, de la categoría c2-standard-4, misma categoría especificada para su uso en computación de altas prestaciones (*high performance computing*, HPC), la cual contiene las siguientes especificaciones técnicas:

- 4 CPU virtuales basados en la arquitectura de Intel Cascade Lake, misma que ofrece una frecuencia de reloj de hasta 3.8 GHz de manera sostenida en su modo de rendimiento máximo (turbo). En este caso, debido a que la codificación fue realizada para que la aplicación corriese bajo un entorno de ejecución en serie, se tomó el número más bajo de procesadores disponibles para esta categoría de cómputo, tan solo cuidando de que el resto de tareas propias del sistema operativo montado sobre el servidor no perjudicase la ejecución de la aplicación de pruebas principal.
- 16 GB de memoria RAM. Se tomó una cantidad de memoria RAM mínima, debido a que el proceso en sí no necesita guardar varias copias de la señal ni de un banco de señales como tal, por lo que no se trata de un proceso que tenga un consumo de memoria moderado o alto.
- Unidad de estado sólido de 40 GB. Debido a que no es necesario almacenar una gran cantidad de información (tan solo los resultados en formato CSV), no fue necesario requerir de una gran capacidad de almacenamiento. Sin embargo, es de tomar en cuenta que el poder utilizar este tipo de unidad de almacenamiento hace más eficiente la ejecución en el sentido de que el tiempo de bloqueo por lectura-escritura es menor comparado con un disco duro tradicional.

En la primera fase se tomaron en cuenta, a fin de realizar una comparativa entre ellas, las estrategias de cruce de/rand/1-2 y de/best/1-2, correspondiéndose estas con un conjunto básico de estrategias triviales, misma comparación que tuvo como objetivo obtener una idea inicial sobre el tipo de estrategia a convenir, así como también el comportamiento de cada una de estas estrategias tomando uno o dos pares de agentes para el cruce. Se utilizó el entorno de ejecución anteriormente

señalado (c2-standard-4 sin GPU), estableciendo un número de 100 iteraciones por cada estrategia de cruce, donde para cada una de las iteraciones se generó una señal senoidal pura con una frecuencia aleatoria uniforme tomando un rango de variación de entre 54 y 66 Hz (hasta un 10% de variación sobre la frecuencia estándar). Se tomó este número de iteraciones de manera arbitraria, usando una cifra lo suficientemente grande para lograr una estabilización en los tiempos y evitar que el promedio se viese afectado por la aparición de *outliers*, es decir, datos atípicos los cuales no son consistentes dentro de la muestra obtenida.

Tal como se puede observar en la Figura IV.4, las distintas variantes de cruce de evolución diferencial estudiadas son capaces de alcanzar un error de suma de cuadrados relativa cercano a al 0% en un número reducido de iteraciones, es decir, de conseguir un ajuste perfecto rápidamente. Esta misma figura muestra además el mínimo y el máximo para cada una de las iteraciones del experimento, mismos valores que se ven representados en cada una de las áreas. Sin embargo, existen ciertas diferencias entre cada una de las estrategias, donde la estrategia de/best/1 obtiene una respuesta con una pendiente más pronunciada, es decir, logra alcanzar un mejor ajuste promedio que el resto de estrategias estudiadas a través de las distintas iteraciones. Además de ello, esta misma estrategia tiene un área menor, por lo que se espera que brinde una mayor estabilidad en la ejecución del algoritmo bajo esta estrategia.

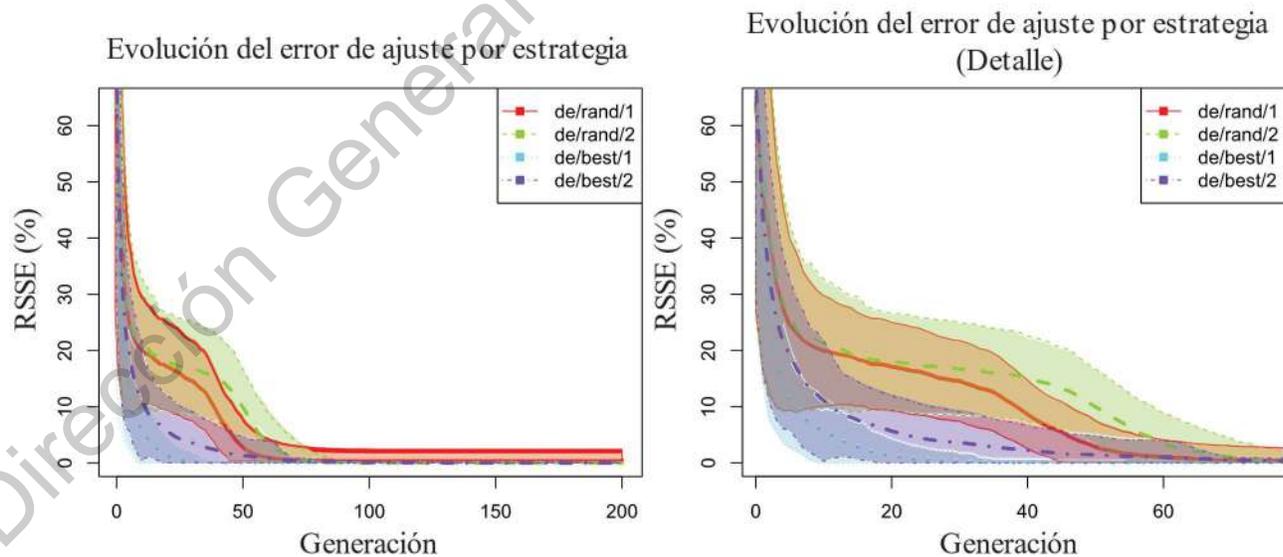


Figura IV.4. Gráfica de área de evolución del error de ajuste por distintos tipos de estrategia en la metodología basada en evolución diferencial.

Por otra parte, en una segunda fase de la experimentación, a fin de poder realizar una experimentación más extensa y obtener resultados sólidos sobre un conjunto mayor de estrategias de cruce, una vez obtenida una idea sobre el panorama restringido anteriormente presentado, se agregaron un mayor número de posibilidades de configuración hiper-paramétrica sobre la evolución diferencial y utilizando replicación, tomando como resultados el promedio de 100 ejecuciones por cada una de las configuraciones, tal como en la primera fase experimental. Este experimento resume sus resultados finalmente en la Tabla IV.I, donde es posible observar que para una población de 200 agentes se alcanza en tan solo 3 generaciones un valor de 0.46% de error relativo en cuanto al ajuste de una onda senoidal pura mediante la estrategia DE/Best/1*. Dando lugar a utilizar esta estrategia (DE/Best/1*) como estrategia de cruce final en la implementación de la configuración metodológica en cuestión, tanto en la implementación en serie como en paralelo, donde en esta última se espera obtener un rendimiento mayor del sistema reduciendo su tiempo de respuesta considerablemente, misma cuestión que es estudiada en el próximo experimento descrito.

Tabla IV.I. Tabla ordenada por tamaño de población, donde se muestra el conjunto de estrategias e hiper-parámetros de evolución diferencial junto al error relativo del ajuste.

Tamaño de población	Estrategia	C	F	g	RSSE (%)
25	DE/Best/3*	1	0.25	20	0.43317
25	DE/Best/1*	1	0.25	24	0.42089
25	DE/Best/1	0.75	0.25	24	0.44026
50	DE/Best/1*	1	0.25	9	0.31885
50	DE/Best/2*	1	0.25	9	0.49077
50	DE/Best/3*	1	0.25	9	0.49430
100	DE/Best/1*	1	0.25	5	0.35433
100	DE/Best/2*	1	0.25	6	0.30329
100	DE/Best/1*	0.75	0.25	6	0.37286
200	DE/Best/1*	1	0.25	3	0.46988
200	DE/Best/2*	1	0.25	4	0.32843
200	DE/Best/3*	1	0.25	4	0.36404

IV.2.2. Estudio sobre la arquitectura de implementación

Tras mostrar el resultado correspondiente a la comparación de las estrategias y determinar la estrategia a utilizar se procede a mostrar los resultados correspondientes al rendimiento obtenido mediante la implementación en paralelo del bloque de evolución diferencial.

Este experimento fue diseñado tomando en cuenta un total de 100 iteraciones por cada una de las configuraciones de este, donde cada configuración se corresponde con un tamaño de ventana de señal a ajustar, en cuanto a su frecuencia y fase, mediante el algoritmo de DE utilizando la estrategia de cruce y configuración resultante del experimento anterior, utilizando un tamaño de ventana de 600, 1200, 1800, 2400, 3000, 3600 y 5400 puntos, siendo este último un tamaño de ventana moderado, el cual representa más de un segundo de señal para una frecuencia de muestreo de 4800 Hz.

Debido a que en esta experimentación fue necesario establecer una arquitectura de ejecución en paralelo fue necesaria la modificación del código fuente para la modalidad GPU del algoritmo, añadiendo la librería OpenCL junto a la codificación de los núcleos propios necesarios para este algoritmo de optimización meta-heurística. Además de ello, fue necesario agregar una GPU Nvidia Tesla K80 a la configuración de la máquina virtual mostrada anteriormente (c2-standard-4), misma tarjeta gráfica que es específica para la computación de altas prestaciones paralelizada y cuenta con un total de 2496 núcleos de procesamiento.

Se pueden observar los resultados de la ejecución de estas pruebas realizando un ajuste de optimización paramétrico simultáneo mediante la aplicación que basa su ejecución en un esquema en serie y CPU (ver Figura IV.5) y mediante la aplicación que basa su ejecución en un esquema paralelo y GPU (ver Figura IV.6).

Tras realizar la revisión sobre los resultados obtenidos por estas figuras es posible observar (tomando en cuenta la diferencia de rangos en el eje vertical de ambas gráficas) la supremacía en cuanto a velocidad de ejecución del algoritmo bajo GPU usando el esquema paralelizado, resultando en un tiempo de respuesta con un comportamiento lineal para ambos casos, sin embargo, mostrando una menor pendiente y valor de la variable de tiempo para la modalidad GPU, justificando de este modo su implementación bajo esta arquitectura, al quedar

constatada una aceleración de más de 17 veces al usar GPU con respecto al usar CPU, validando la hipótesis de mejora de un 30% al realizar la implementación de este modo.

Un tamaño de población mayor resulta conveniente a fin de poder alcanzar con mayor velocidad un valor bajo de la función objetivo en el algoritmo, por lo que se establece un tamaño de población relativamente alto (200 agentes), tomando en cuenta la baja pendiente (casi nula) que se tiene en los distintos trazos correspondientes al procesamiento GPU.



Figura IV.5. Gráfico de tiempo de ejecución por tamaño de población y puntos de muestra de la señal a través de CPU en esquema de procesamiento secuencial.

Tiempo de ejecución de 100 generaciones por tamaño de población y puntos de muestra (GPU)

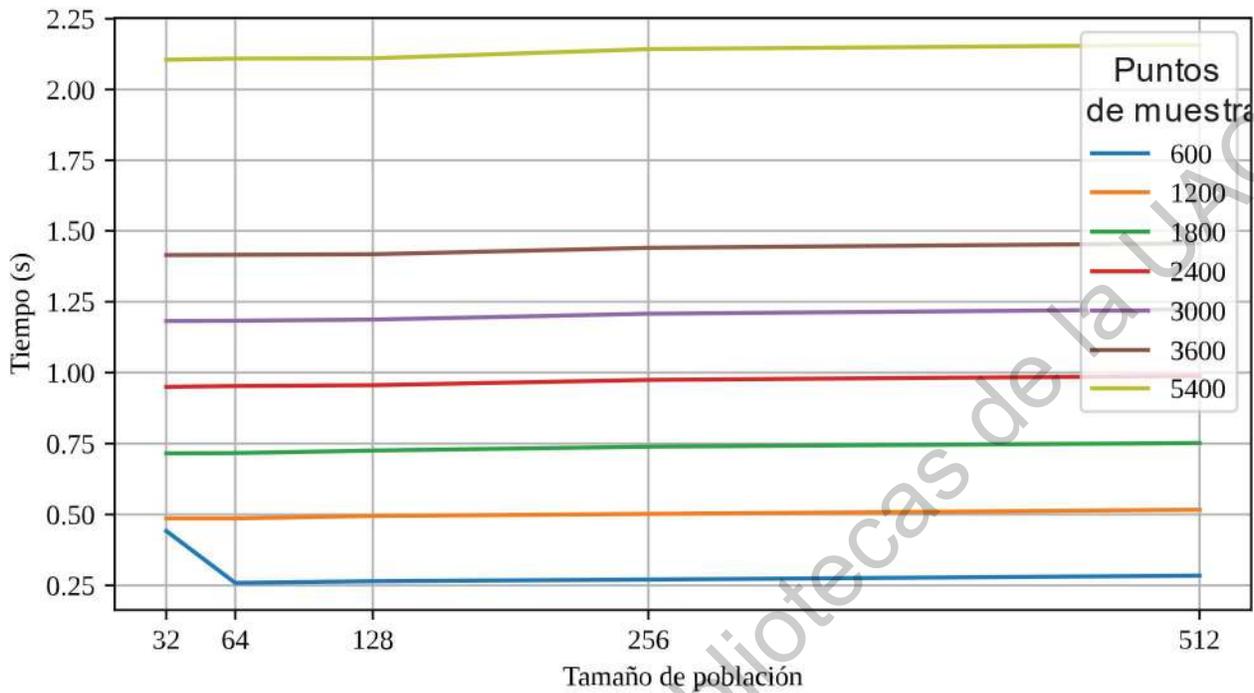


Figura IV.6. Gráfico de tiempo de ejecución por tamaño de población y puntos de muestra de la señal a través de GPU en esquema de procesamiento paralelo.

IV.2.3. Validación sintética

Se realizaron las pruebas correspondientes a la generación de un banco de señales sintéticas de la calidad de la energía, tomando en cuenta distintas categorías de señales, las cuales estaban compuestas por uno o más disturbios propios de la calidad de la energía, utilizando como categorías de señal aquellas generadas a través de la descripción presente en la sección de metodología en la Tabla IV.II. Se tomaron dos frecuencias para la señal senoidal fundamental, una primera frecuencia de 60 Hz (estándar) varias frecuencias con desviación sobre el estándar: 59.7 Hz (0.5%), 59.4 Hz (1.0%) y 58.8 Hz (2.0%).

Se realizó una ejecución de esta batería de pruebas sobre el entorno de ejecución citado anteriormente (c2-standard-4 con GPU Tesla K80), utilizando la variante de la implementación que corre sobre una arquitectura de ejecución en paralelo, a fin de poder realizar en un lapso menor de tiempo el conjunto total de pruebas dada la extensión amplia de este.

Los resultados sobre la distancia absoluta máxima (MAD) y el error cuadrado relativo (RSSE) presentes en la Tabla IV.II muestran un mejor comportamiento de forma general (resaltado en fondo gris) para la metodología basada en evolución diferencial, con una diferencia más notable aún en el ajuste sobre señales con contenido armónico bajo la frecuencia con desviación, tal como se señalaba en la sección anterior. Sin embargo, es de notar que existe un mejor comportamiento en el indicador MAD, con una diferencia siempre menor al 2% entre metodologías, de la metodología MGA-PQA con respecto a la metodología propuesta bajo la frecuencia estándar para la onda fundamental (60 Hz).

De manera particular, se puede observar que existe un mayor contraste entre los resultados de las distintas metodologías para mayores desviaciones sobre la frecuencia estándar de la onda senoidal fundamental, donde para un 2.0% de desviación, es decir, -1.2 Hz de diferencia sobre la frecuencia estándar, se obtienen medidas de MAD superiores al 100% para categorías de señal de *swell*, *flicker* y contenido armónico. Esta desviación ocurre debido a que se produce un desfase acumulado sobre el análisis de la señal a lo largo de la ventana de tiempo procesada, llegando a límites absolutos mayores al 100%, que se corresponden, casualmente, con la aparición de un incremento en la amplitud de la señal, factor propio de los disturbios comentados anteriormente.

Los resultados que se obtienen de error relativo (RSSE) son menores al 5% en cada uno de los casos para la metodología propuesta. Este indicador muestra un comportamiento bueno de la metodología propuesta, así como también demuestra que en teoría la metodología se ha probado con un buen rendimiento en cuanto a su capacidad de ajuste de manera general, ya que este indicador resume el comportamiento a través de toda la ventana sin puntualizar de manera concreta sobre puntos de error alto.

Las medidas obtenidas en estos resultados no serían posibles si no se realizase una cuantificación de los disturbios presentes en la señal, debido a que no existiría una forma de realizar una reconstrucción basada en el modelo matemático consciente de los disturbios de la calidad de la energía, tal como es el modelo utilizado y redactado en (1).

Tabla IV.II. Tabla de resultados promedios de ajuste sobre banco de pruebas de señales sintéticas bajo las metodologías MGA-PQA (anterior) y la metodología basada en evolución diferencial (Propuesta).

Categoría de señal	Método	60 Hz		59.7 Hz (-0.5%)	
		MAD (%)	RSSE (%)	MAD (%)	RSSE(%)
Sag (TC2)	MGA-PQA	29.355	0.306	38.599	5.145
	Propuesto	30.718	0.3132	32.171	0.283
Swell (TC3)	MGA-PQA	13.385	0.0863	38.894	4.259
	Propuesto	14.196	0.091	13.418	0.099
Flicker (TC6)	MGA-PQA	11.49	0.439	45.553	5.069
	Propuesto	7.866	0.31	8.183	0.308
C. armónico (TC5)	MGA-PQA	6.677	0.05	52.081	7.644
	Propuesto	2.238	0.01	0.268	0.00
Mixtura de Disturbios (*)	MGA-PQA	20.248	0.666	33.314	2.491
	Propuesto	17.25	0.178	15.898	0.219
Categoría de señal	Método	59.4 Hz (-1.0%)		58.8 Hz (-2.0%)	
		MAD (%)	RSSE (%)	MAD (%)	RSSE(%)
Sag (TC2)	MGA-PQA	42.089	4.981	69.756	16.234
	Propuesto	32.828	0.601	31.07	0.587
Swell (TC3)	MGA-PQA	75.381	17.698	117.41	50.342
	Propuesto	15.179	0.103	15.204	0.105
Flicker (TC6)	MGA-PQA	80.565	17.332	118.64	48.953
	Propuesto	8.337	0.309	8.429	0.309
C. armónico (TC5)	MGA-PQA	83.32	19.71	109.26	50.065
	Propuesto	0.419	0.00	0.853	0.00
Mixtura de Disturbios (*)	MGA-PQA	54.203	6.126	76.811	17.814
	Propuesto	14.96	0.229	13.639	0.222

IV.2.4. Validación específica

A fin de poder realizar una validación del algoritmo sobre su comportamiento en un entorno de ejecución más cercano a un entorno real, se creó una batería de pruebas donde se extrajo información sobre los resultados obtenidos a través del ajuste de la configuración metodológica concreta para con las siguientes señales:

Una primera señal, la cual se trata de una señal compleja sintética que contiene una mixtura de disturbios. Esta señal, la cual se basa en una señal senoidal de 60 Hz y 1 pu de amplitud, contiene los siguientes disturbios:

- Un disturbio de tipo *flicker* con una amplitud de 0.4 pu pico a pico y 20 Hz de frecuencia
- Un disturbio de tipo *sag* con 0.6 pu de amplitud de incidencia
- Un componente de contenido armónico de quinto orden con 0.1 pu de amplitud de incidencia.

El resultado gráfico al aplicar la metodología basada en evolución diferencial sobre la señal compleja diseñada es visible en la Figura IV.7, en ella es posible observar cada uno de los semiciclos positivos de la onda senoidal fundamental de la señal junto con los distintos tipos de disturbios, además de ello se muestra en distintas tonalidades: de color verde la corrección del RMS de la señal tomando en los factores estimados de manera acertada sobre el *flicker*, así como también se muestra de color rojo la sección del RMS corregido correspondiente a la aparición del *sag*.

Ajuste de una señal compleja usando método basado en Evolución Diferencial

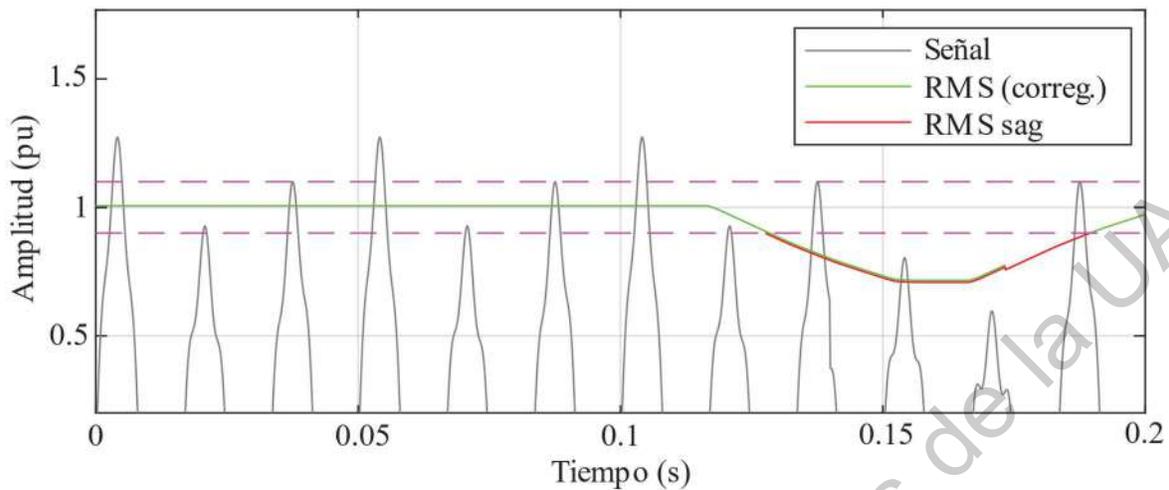


Figura IV.7. Gráfica de ajuste de una señal compleja que contiene flicker, sag y contenido armónico de quinto orden utilizando la metodología propuesta basada en evolución diferencial.

Tal como es posible observar en la Figura IV.8 existe cierto grado de error al realizar el ajuste, el cual se debe a la presencia de los distintos tipos de disturbios. Debido a que la metodología propuesta utiliza un método basado en ventanas deslizantes para realizar el cálculo del RMS sobre la señal este error sucede al iniciar y finalizar el efecto del disturbio de tipo *sag* de manera más pronunciada, ya que este aparece de manera abrupta y el algoritmo requiere de medio ciclo de señal fundamental para poder adaptarse en cuanto a la amplitud estimada, detectando el *sag*.

El tiempo de reacción del algoritmo viene determinado por el factor de tamaño de ventana deslizante utilizado para el cálculo de RMS, por lo que si un disturbio aparece dentro de una ventana de tiempo, es posible que exista un retardo entre la aparición del disturbio sobre la amplitud de la onda fundamental y su detección, sin embargo el tiempo de reacción será siempre menor o igual al tamaño de ventana del RMS deslizante: medio ciclo de la señal fundamental o lo que equivale aproximadamente a $1/120$ s para una señal de 60 Hz.

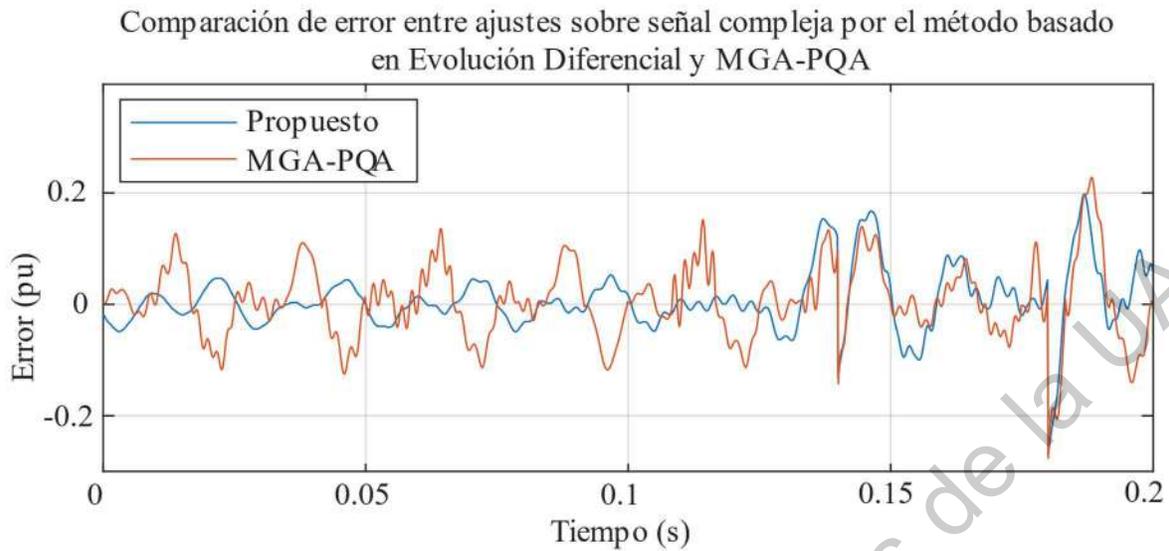


Figura IV.8. Gráfica comparativa de error de ajuste (valor real) sobre una señal compleja utilizando la metodología basada en evolución diferencial y MGA-PQA.

Posteriormente, ya obtenidos los resultados positivos esperados de la configuración metodológica implementada basada en DE con una señal compleja, se aplica esta metodología sobre la señal U6, misma que se corresponde a la aparición de un disturbio de tipo *sag* de grado leve. El resultado de ajuste se observa en la Figura IV.9, donde el disturbio de tipo *sag* es correctamente detectado a través de la umbralización de la señal sintética, cuya amplitud viene señalada de color rojo en el tramo de aparición del disturbio estudiado. La representación gráfica del error comparativo del algoritmo con respecto a MGA-PQA se muestra en la Figura IV.10, obtenido un error absoluto menor para la metodología propuesta.

Es de notar que la calidad de la energía es un factor controlado en el centro sanitario sobre el que se realizaron las medidas, este fue el único disturbio presente durante los registros de varios días. Tal como se puede observar el disturbio en cuestión dura aproximadamente 0.1 s y el factor de *sag* es bastante leve, aun así, es detectado por la metodología propuesta y, además, al observar la gráfica de error comparativa con la metodología MGA-PQA se observa un mejor ajuste utilizando la metodología basada en evolución diferencial, donde de manera repetida se observa que ambas metodologías obtienen un mayor error absoluto en los puntos de inicio y fin de este tipo de disturbios, algo esperado debido al cambio de amplitud que se produce de manera abrupta, derivándose en un desajuste por el tiempo de reacción necesario de cada metodología.

A modo de resumen, se muestra una descripción del disturbio tipo *sag* sobre la señal U6 a continuación:

Disturbios detectados: 1

[1] Disturbio tipo *sag*

Rango de tiempo [0.15756, 0.248066] s

Duración 0.083149 s (~4.9889 ciclos 60 Hz)

Desviación máxima -0.1846843 pu (-18.46843%)

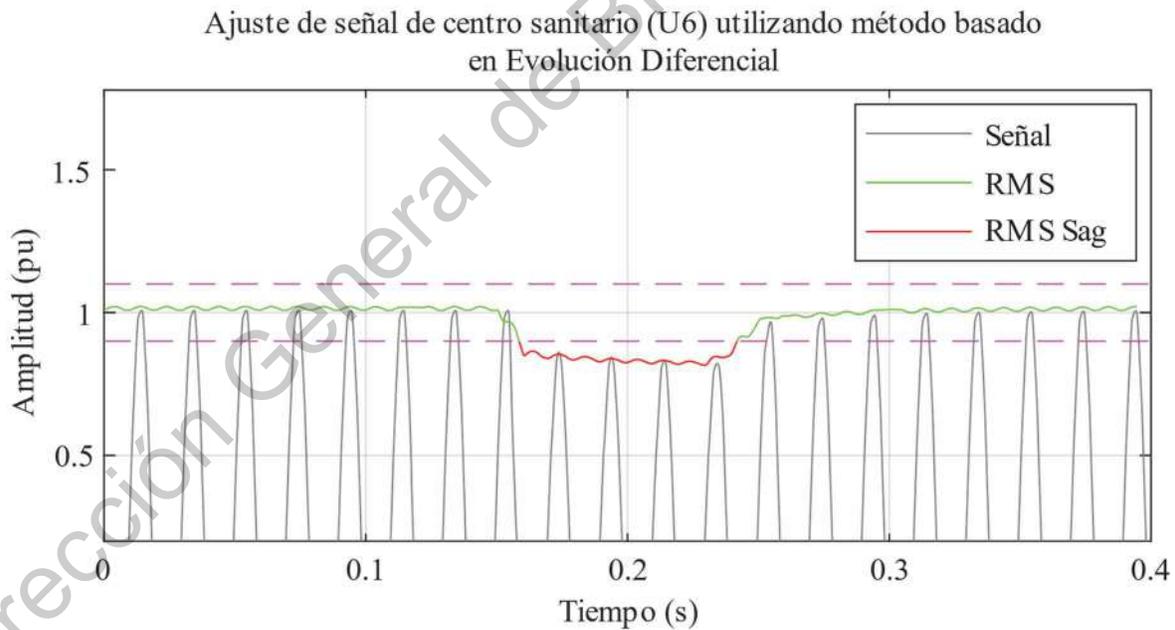


Figura IV.9. Gráfica de ajuste usando la metodología propuesta basada en evolución diferencial sobre la señal U6 referente a un centro sanitario, donde se puede apreciar un sag leve entre los segundos 0.15 y 0.25.

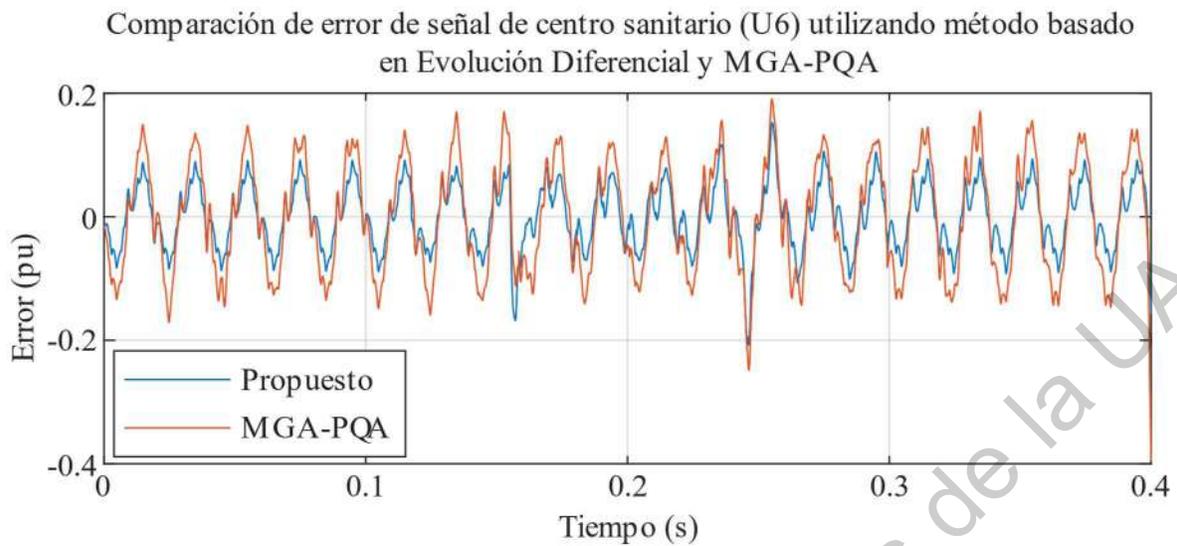


Figura IV.10. Gráfica comparativa de error de ajuste (valor real) sobre la señal U6 utilizando la metodología basada en evolución diferencial y MGA-PQA.

IV.3. Configuración 2. Estimación paramétrica basada en HHO

A fin de poder darle el suficiente soporte al segundo bloque de configuración contenido en el proceso de estimación paramétrica, el cual se basa en el uso de HHO como algoritmo de optimización meta-heurística, se presenta un conjunto de resultados obtenido a través del diseño y ejecución de distintas pruebas. Donde se centra el trabajo referente a este bloque en el diagrama e la metodología en poder realizar una clasificación de los disturbios de tipo transitorio extraídos entre impulsivo y oscilantes, debido a que este módulo es el punto diferenciador más claro de esta configuración con respecto al resto de las configuraciones presentes en el bloque de estimación paramétrica.

Este algoritmo no busca cuantificar los disturbios de tipo transitorio y si bien no se implementa en paralelo, tiene como ventajas en que es capaz de adaptarse de una manera más completa que el bloque anteriormente descrito a la amplitud de onda, debido a que utiliza una estimación de esta, a través de un método de optimización (HHO), por cada medio ciclo de la señal fundamental.

El esfuerzo realizado dentro de esta publicación se centró en poder obtener una configuración metodológica que contuviese dentro de ella una mejor descripción de los disturbios de tipo transitorio, los cuales se presentan en el espectro de alta frecuencia y se tratan de irregularidades en la señal a veces imperceptibles a simple vista. La contribución científica de esta configuración metodológica se corresponde con dos puntos.

En primer lugar, se logra una contribución científica al hacer uso de un mismo algoritmo de optimización meta-heurística para el ajuste sobre la señal, no tan solo en cuanto a la frecuencia y fase de las distintas componentes senoidales, sino además de la amplitud de esta, logrando una simplificación del diagrama de metodologías anteriores, tales como GA-PSO.

En segundo lugar, se logra una contribución científica al lograr establecer un método de clasificación sobre los dos tipos de disturbios transitorio, utilizando para ello tan solo un suavizado y un conteo de pasos por cero.

Estos mismos resultados expuestos sobre esta configuración metodológica fueron publicados en la revista indexada *JCR* conocida como *Journal of Scientific and Industrial Research*, dentro del número 9 del año 2019 bajo el título: *A Novel Methodology for Power Quality*

Disturbances Detection and Classification in Industrial Facilities (Solis-Munoz et al., 2020), siendo esta la segunda publicación en revista de este trabajo de tesis. Se adjunta este mismo artículo en la sección de anexos.

IV.3.1. Optimización hiper-paramétrica del clasificador de disturbios de tipo transitorio

Con el fin de poder establecer el rango correspondiente a cada tipo de clase para el algoritmo de clasificación de los disturbios de tipo transitorio (entre impulsivo y oscilatorio) se diseñó y llevó a cabo un experimento, el cual cuenta con un total de 100 observaciones por cada tipo de disturbio de tipo transitorio (impulsivo y oscilatorio) con el fin de poder establecer un número de umbral th que realice la clasificación de manera óptima, minimizando el número de clasificaciones erróneas entre clases. Se utilizó este número de réplicas (100) por cada tipo de disturbio como un número lo suficientemente alto como poder desplegar mediante generadores basados en la distribución uniforme un rango adecuado de todos los parámetros correspondientes a este tipo de disturbios.

Tras realizar la ejecución de las pruebas sobre la máquina c2-standard-4, se obtuvieron cada una de las tablas correspondientes a cada uno de los valores para el umbral th , obteniéndose finalmente la clasificación con el menor error para un valor de umbral th igual a 20, estableciéndose de esta forma para la metodología actual.

El entorno correspondiente al valor de th óptimo muestra claramente un mínimo de error para el valor citado, con tan solo un total de 1 y 7 clasificaciones erróneas para este valor hiper-paramétrico óptimo para la clasificación. La tabla correspondiente al valor de umbral óptimo th , así como sus valores más cercanos se muestran en la Tabla IV.III, donde se resaltan las clasificaciones realizadas de forma correcta para cada uno de las categorías en negrita. Debido a que el número de muestras por cada una de las categorías es igual a 100 cada uno de estos números presentes en cada matriz de confusión puede tomarse como un porcentaje relativo a cada una de las categorías por fila.

Tabla IV.III. Matrices de confusión para el clasificador de disturbios de tipo transitorio utilizando distintos valores de umbral th .

Clasificado	<i>Impulsivo</i>	<i>Oscilatorio</i>	<i>Ninguno</i>
Real ($th=19$)			
<i>Impulsivo</i>	100	0	0
<i>Oscilatorio</i>	14	84	2
Clasificado	<i>Impulsivo</i>	<i>Oscilatorio</i>	<i>Ninguno</i>
Real ($th=20$)			
<i>Impulsivo</i>	99	0	1
<i>Oscilatorio</i>	6	93	1
Clasificado	<i>Impulsivo</i>	<i>Oscilatorio</i>	<i>Ninguno</i>
Real ($th=21$)			
<i>Impulsivo</i>	98	2	0
<i>Oscilatorio</i>	10	87	3

Idealmente el valor de th debería ser igual a cero, puesto que un disturbio de tipo transitorio impulsivo no debería contener ningún cambio de signo. Sin embargo, debido a la aparición de irregularidades sobre la señal propia del disturbio por el uso de DWT y el proceso de ajuste sobre la señal mediante HHO es posible observar estos cambios de signo para disturbios de tipo impulsivo. Se muestra un ejemplo para cada uno de los tipos de transitorio junto con su representación suavizada mediante el filtro de convolución aplicado en la Figura IV.11 y la Figura IV.12.

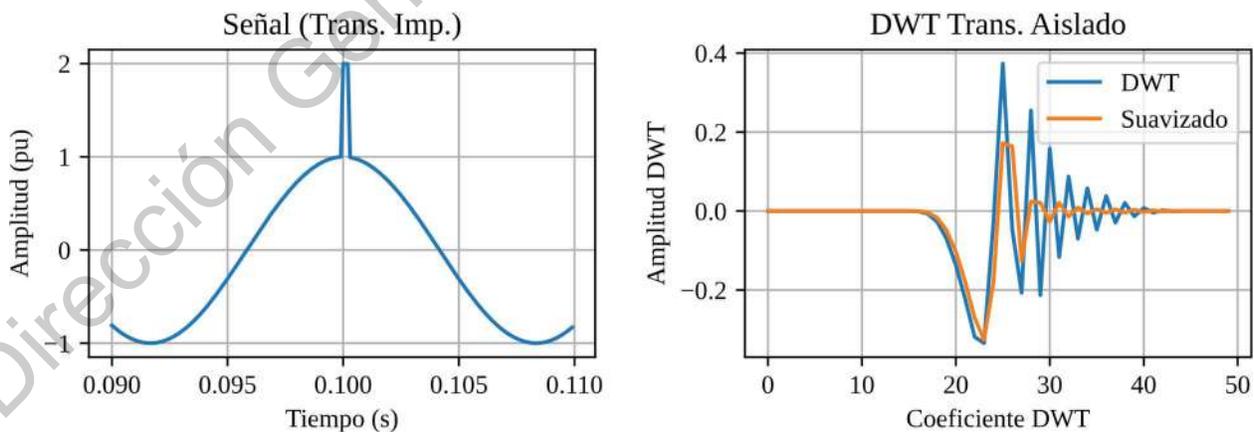


Figura IV.11. Señal senoidal con disturbio transitorio de tipo impulsivo (izquierda) junto a salida del algoritmo DWT (derecha).

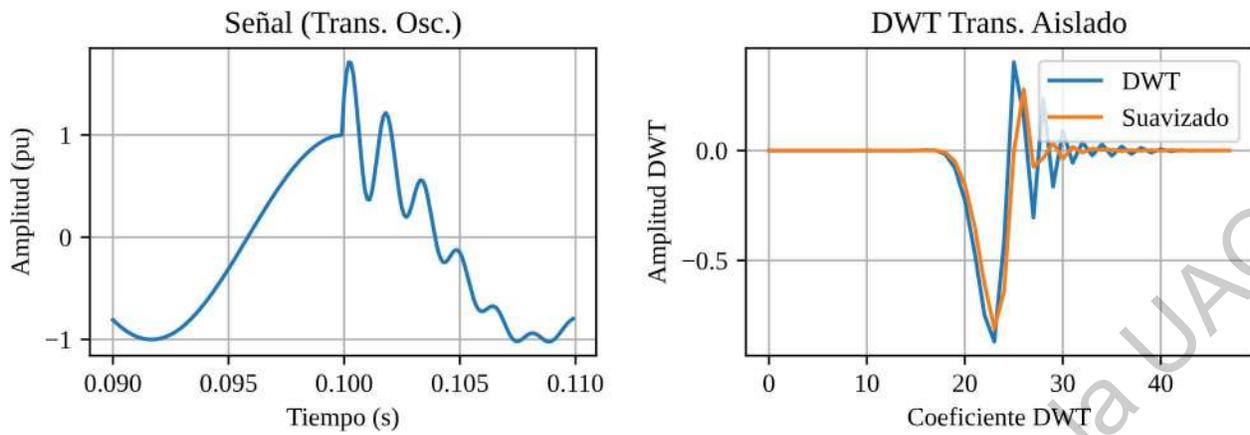


Figura IV.12. Señal senoidal con disturbio transitorio de tipo oscilatorio (izquierda) junto a salida del algoritmo DWT (derecha).

IV.4. Configuración 3. Estimación paramétrica basada en SANN

Como tercera parte de la sección de resultados se presentan aquellos correspondientes a la metodología de cuantificación de disturbios basada en SANN como método de optimización.

Debido a que esta configuración metodológica soporta gran parte de su carga computación en el entrenamiento de redes neuronales artificiales, la ejecución de las pruebas correspondientes a la validación de esta metodología fue llevada a cabo bajo el entorno de ejecución paralelizado c2-standard-4 con GPU, utilizando las características propias del paquete *Tensorflow* en su versión GPU que permite un entrenamiento paralelizado, realizando este proceso de manera más eficiente que en su versión basada en la arquitectura en serie.

La contribución científica de esta configuración metodológica se basa en la utilización de las estructuras específicas que conforman las distintas redes neuronales artificiales sobre las que trabaja esta metodología en su optimización para el ajuste de frecuencia y fase, realizando este proceso con una sola red neuronal artificial que es diseñada para resolver, de manera simultánea, todos los parámetros de frecuencia y fase de cada una de las componentes senoidales extraídas del FFT de la señal, sin necesidad de ir una por una en específico.

Dentro de esta sección se presentan los resultados correspondientes a la validación sintética y con señales reales, donde para esta última se realizó un conjunto de pruebas extenso basado en el análisis de 6 señales reales.

El artículo científico donde se describen los resultados obtenidos a partir de esta configuración metodológica se encuentra en el proceso de envío para su publicación, por lo que aún no ha sido publicado en ninguna revista indexada, sin embargo, se adjunta, en formato de borrador, en la sección de anexos.

IV.4.1. Validación sintética

A fin de poder corroborar la solidez en el ajuste sobre el bloque de configuración de estimación paramétrica en cuestión, se desarrollaron pruebas de validación sintéticas, las cuales fueron diseñadas con el fin de poder validar la lógica de este bloque bajo la presencia de distintos tipos de disturbios de manera aislada y conjunta.

Se realizó una batería de pruebas consistente en la generación de un total de 100 señales por cada una de las categorías descritas en la Tabla III.I, donde para cada una de ellas se realizó el proceso de ajuste, reconstrucción y medida del error mediante la configuración metodológica propuesta basada en SANN y una metodología previa (GA-PSO). Estas pruebas fueron ejecutadas bajo un entorno de ejecución basado en la citada c2-standard-4 usando la GPU Tesla K80 para la metodología propuesta. Tras realizar el ajuste correspondiente para cada uno de los tipos de señal en cada una de las iteraciones se obtuvieron los resultados promedio de error y tiempo de procesamiento para la metodología propuesta, los resultados numéricos provenientes de esta ejecución mientras que los resultados globales del experimento son visibles en la Tabla IV.IV. Además, a fin de poder mostrar una mejor idea sobre las distintas categorías de las señales, así como también mostrar el alcance de cada una de las metodologías se presenta en la Figura IV.13 un muestrario referente a esta batería de pruebas.

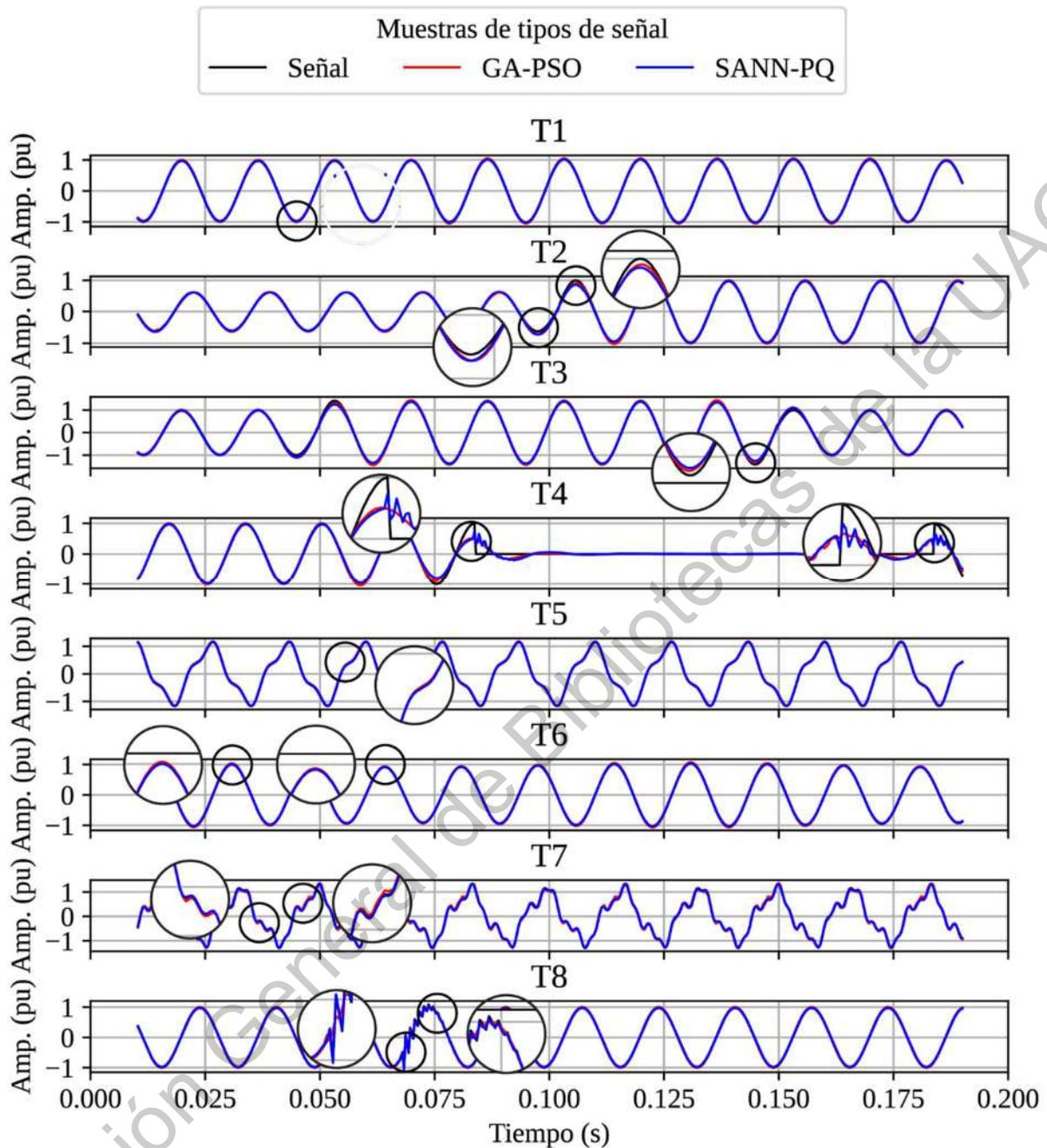


Figura IV.13. Muestras de tipos de caso por categoría para el test sobre el banco de señales sintéticas, incluyendo ajustes por metodología SANN y GA-PSO.

Observando los casos de entre las figuras de muestra es posible ver un comportamiento extraño en los detalles correspondientes a la muestra TC4, correspondiente al caso de interrupción. Dentro de este caso es posible observar cómo es que el algoritmo basado en SANN parece resolver el presente disturbio como una combinación entre un disturbio de tipo transitorio y un *sag* de manera simultánea, debido a que el cambio de amplitud sobre la señal senoidal se produce de

forma abrupta, tanto en el sentido negativo (al iniciar la interrupción) como en el sentido positivo (al finalizar la interrupción).

Dejando a un lado la diferencia entre el comportamiento de los algoritmos en el caso de la interrupción, el resto de señales parecen obtener un ajuste muy similar, tomando en cuenta que el resultado de ajuste usando la metodología propuesta basada en SANN obtiene ajustes con un error más simétrico con respecto a la forma de onda senoidal de la componente fundamental.

Tabla IV.IV. Resultados numéricos correspondientes a la ejecución del banco de pruebas sobre señales sintéticas usando la metodología basada en SANN, comparación con GA-PSO.

Cat.	GA-PSO			SANN (Propuesto)		
	RSSE (%)	MAD (%)	Tiempo de proc. (s)	RSSE (%)	MAD (%)	Tiempo de proc. (s)
TC1	0.0021	1.3635	1.103697	0.0785	3.8322	1.328867
TC2	1.1017	18.7893	6.076496	1.4591	22.9605	3.055738
TC3	0.1350	14.5914	4.193770	0.3121	20.6148	2.557724
TC4	4.6136	40.6611	7.212735	4.4235	43.0791	4.700241
TC5	0.0001	0.1938	83.047983	0.2404	6.6576	1.214214
TC6	0.0002	0.1396	0.225084	0.0811	3.7285	1.157209
TC7	0.1646	8.8349	109.651708	0.4136	10.7097	1.412305
TC8	0.1565	36.3473	3.227767	0.0924	13.4737	3.008355

Analizando los resultados numéricos de la Tabla IV.IV se muestra una precisión de ajuste similar en casi todos los casos, excepto en el caso referente a la categoría correspondiente a la aparición de fenómenos de tipo transitorio, donde la metodología propuesta obtiene una mejor precisión, con un error máximo absoluto de tan solo 13.47% mientras que la metodología anterior (GA-PSO) muestra un error máximo absoluto de 36.34%, demostrando un mejor ajuste sobre este tipo de disturbios al utilizar la metodología propuesta.

Los resultados más notables vienen de la mano del tiempo de ejecución del algoritmo, donde para el algoritmo propuesto se alcanzan tiempos de ejecución de 77 veces más rápido para la presencia de contenido armónico e inter-armónico (TC7) y 68 veces más rápido para el contenido armónico (TC5), velocidad comparada con la velocidad de ejecución del algoritmo GA-PSO.

IV.4.2. Validación real

A fin de poder poner a prueba la configuración metodológica se estableció un conjunto de pruebas de ejecución de esta metodología sobre distintas señales reales, mismas pertenecientes al ámbito industrial y al ámbito sanitario, anteriormente descritas en la sección III.1.2.

Tras realizar el ajuste y reconstrucción de la señal con los parámetros obtenidos para la metodología propuesta y la metodología anterior GA-PSO, se obtuvieron los resultados numéricos presentes dentro de la Tabla IV.V.

Tabla IV.V. Resultados numéricos correspondientes a la ejecución del banco de pruebas sobre señales reales usando la metodología basada en SANN, comparación con GA-PSO.

Señal	GA-PSO			SANN (Propuesto)		
	RSSE (%)	MAD (%)	Tiempo de procesamiento (s)	RSSE (%)	MAD (%)	Tiempo de procesamiento (s)
U1	0.4955	23.5755	13.074557	0.4684	35.4144	4.762100
U2	0.5716	33.5543	18.272139	0.4973	43.2216	3.337736
U3	0.1845	7.0636	14.696974	0.1659	8.2761	3.254040
U4	0.3022	10.1951	15.048643	0.2109	8.8296	2.374716
U5	0.4841	23.6918	28.139294	0.4236	20.6534	4.248778
U6	2.2107	27.1881	55.289110	0.3182	16.9411	36.373999

En la tabla anteriormente mencionada se puede observar resaltado en negrita aquellos resultados donde destacó de manera positiva en la comparación entre metodologías la metodología propuesta basada en SANN. La metodología propuesta muestra un comportamiento sólido en sus resultados, haciéndola una metodología recomendable para su uso en el análisis de señales reales.

De manera particular se puede observar que, para las señales U4, U5 y U6, el comportamiento de la metodología propuesta resulta más apropiado de manera global, es decir, la metodología propuesta muestra un valor menor para los indicadores de error MAD (indicador de máximo entre errores absolutos) y RSSE (media del error), mostrando además un tiempo de procesamiento menor que el del procesamiento en paralelo, siete veces menor para las señales U4 y U5. El tiempo de procesamiento depende en gran medida del tiempo de entrenamiento de las distintas redes neuronales, donde se produce la optimización durante este mismo proceso, es por esto que, al utilizar la librería *Tensorflow* en su versión GPU se obtiene un rendimiento notable.

El resto de señales, (U1, U2 y U3), muestran un índice de error RSSE favorable para la metodología propuesta, sin embargo, el error máximo absoluto, es decir, el indicador de error MAD, obtiene valores levemente más altos con respecto a la metodología híbrida GA-PSO, de aproximadamente un 10% de diferencia. El motivo de que se produzca este resultado es que el tiempo de reacción y la capacidad de adaptación a fenómenos de tipo transitorio de la metodología de redes neuronales es menor, dando lugar a un seguimiento más irregular de este tipo de fenómenos. A continuación, se muestra una vista detallada de los parámetros obtenidos por cada una de las metodologías para estas tres señales en la Tabla IV.VI.

Tal como es posible observar, para la señal U1, la cual se encuentra analizada en la parte superior izquierda de la Tabla IV.VI por ambas metodologías, para la metodología GA-PSO se encuentran un total de 2 disturbios de tipo transitorio, con amplitudes pico de inicio de 0.3030 pu y 0.1037 pu se encuentran iniciando en el segundo 0.0240 s y 0.0242 s respectivamente. Por parte del algoritmo SANN-PQ, este, de manera acertada encuentra tan solo un disturbio de tipo transitorio, el cual en el punto temporal 0.0243 s, una medida de tiempo similar a la obtenida a través de la otra metodología, estimando una amplitud de 0.3859 pu, la cual no llega a ser igual a la suma de las amplitudes obtenidas a través de la metodología GA-PSO.

Por otra parte, para la señal U2, misma que se observa en la parte superior derecha de la Tabla IV.VI, es visible en los resultados correspondientes a la metodología GA-PSO un total de 2 disturbios de tipo transitorio oscilatorio, con amplitudes de 0.2894 pu y 0.1236 pu, donde el primero de ellos inicia en el punto 0.022 s y el segundo de ellos en el punto 0.0242 s. Por otro lado, el algoritmo propuesto SANN-PQ atisba un transitorio de tipo oscilatorio con una amplitud pico de 0.2511 pu que inicia en el punto 0.0242 s, justo el mismo punto que el segundo de los disturbios detectados por el algoritmo anterior, no realizando ninguna detección para el primero de los fenómenos detectados por GA-PSO. Se puede obtener como conclusión que el algoritmo GA-PSO brinda su primer disturbio como resultado a fin de poder realizar una bajada abrupta al inicio del segundo (y verdadero) transitorio, minimizando así el indicador de error MAD aun agregando un transitorio no existente.

Finalmente, para la señal U3, cuyos resultados de cuantificación se resumen en la parte inferior izquierda de la Tabla IV.VI, ambas metodologías presentan un resultado similar, donde la metodología GA-PSO detecta dos transitorios oscilatorios con amplitudes pico 0.0977 pu y 0.0170

pu en los puntos de tiempo 0.0246 s y 0.0244 s respectivamente. Tomando en cuenta la cercanía entre cada uno de los disturbios detectados se puede asumir un solo disturbio en el punto 0.0245s con una amplitud suma de 0.1147 pu, producto de la suma de amplitudes de los dos disturbios detectados por esta metodología. Mientras tanto, SANN-PQ obtuvo como resultado un solo disturbio con amplitud pico -0.1097 pu (negativa) comenzando en el punto 0.0253 s. La amplitud absoluta para cada una de las metodologías resulta bastante similar, sin embargo, el punto de inicio en la estimación paramétrica (junto con el signo de la amplitud) sugiere que la metodología GA-PSO se adelanta a la aparición del disturbio a fin de poder obtener posteriormente un menor error absoluto.

Una vista de los resultados de ajuste sobre cada una de las señales puede apreciarse en la Figura IV.14. Es posible ver dentro de los distintos tipos de ajuste que la metodología propuesta parece detectar y ajustar de manera correcta cada uno de los disturbios presentados, tal como ya se notaba en la tabla, logrando una gran precisión en el ajuste de los disturbios de tipo transitorio, quedando de esta forma constatada la funcionalidad completa de la metodología propuesta tanto con señales de tipo sintético como reales.

Tabla IV.VI. Resultados de estimación paramétrica para los disturbios detectados por las metodologías GA-PSO y SANN-PQ sobre las señales U1, U2 y U3.

Met.	Tipo dist	Parámetros	Met.	Tipo dist	Parámetros
GA-PSO U1	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.3030 pu Omega 6046.2560 rad/s Phi 3.1863 rad Tasa de decaimiento 0.0030 Inicio 0.0240 s	GA-PSO U2	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.2894 pu Omega 6115.0525 rad/s Phi 4.5424 rad Tasa de decaimiento 0.0035 Inicio 0.022 s
	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.1037 pu Omega 6157.4687 rad/s Phi 6.2831 rad Tasa de decaimiento 0.0025 Inicio 0.0242 s		<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.1236 pu Omega 6021.8067 rad/s Phi 6.2831 rad Tasa de decaimiento 0.0025 Inicio 0.0242 s
SANN-PQ U1	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.3859 pu Omega 4838.2847 rad/s Phi 1.6874 rad Tasa de decaimiento 0.0023 Inicio 0.0243 s	SANN-PQ U2	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.2511 pu Omega 5145.442 rad/s Phi -2.2466 rad Tasa de decaimiento 0.0024 Inicio 0.0242 s
GA-PSO U3	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.0977 pu Omega 6173.1348 rad/s Phi 6.2276 rad Tasa de decaimiento 0.0025 Inicio 0.0246 s			
	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial 0.0170 pu Omega 5804.7291 rad/s Phi 3.1942 rad Tasa de decaimiento 0.0033 Inicio 0.0244 s			
SANN-PQ U3	<i>Trans. Osc.</i>	Amplitud inicial -0.1097 pu Omega 5573.768 rad/s Phi -0.5042 rad Tasa de decaimiento 0.0025 Inicio 0.0253 s			

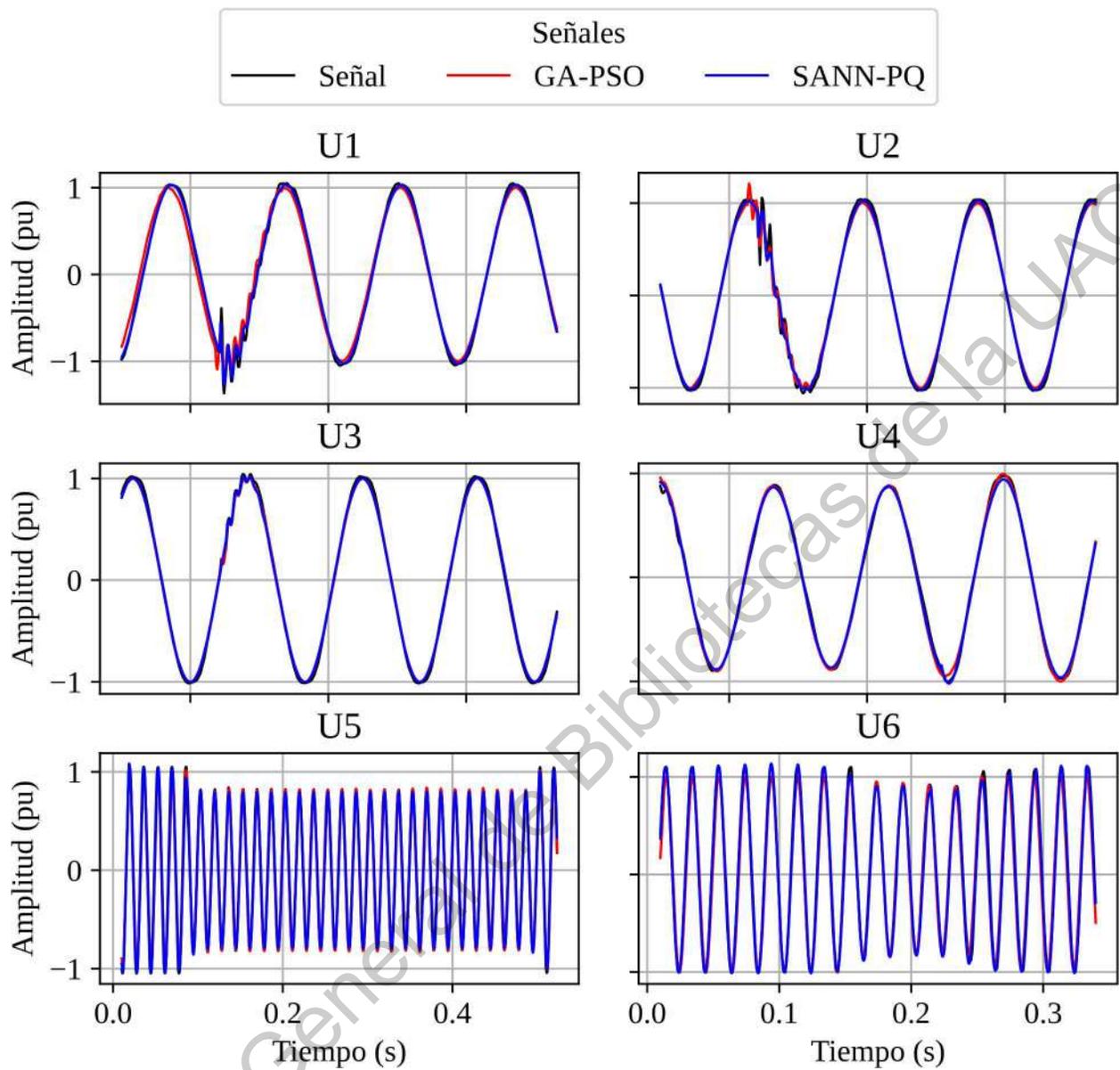


Figura IV.14. Ajuste realizado sobre señales reales utilizando la metodología propuesta SANN y comparativa con GA-PSO.

V. CONCLUSIONES

V.1. Validación de la hipótesis y cumplimiento de objetivos

Se desarrollaron distintos bloques que conformaron el bloque de estimación paramétrica de la metodología general, cada uno de ellos basados en un número reducido de bloques algorítmicos, dando lugar diagramas de descripción simples donde se acudía a la reutilización de bloques con el propósito de agilizar la implementación y añadir un mayor nivel de generalización en la descripción de cada uno de estos. Esta simplificación del diagrama no se daba en las metodologías anteriormente reportadas, por lo que se añadía un nivel mayor de complejidad en la estrategia de implementación de estas. De esta forma se cumplió con el primer objetivo particular.

Se logró mejorar la precisión en la bondad de ajuste al agregar como punto base del proceso de estimación paramétrica una búsqueda sobre la frecuencia de la onda correspondiente al contenido fundamental de la señal. Este proceso de búsqueda fue tomado en cuenta bajo las diferentes configuraciones de bloques, con distintos algoritmos de optimización meta-heurística: DE, HHO y SANN, donde para esta última configuración la estimación es realizada de manera simultánea para la componente fundamental, contenido armónico e interarmónico. Los resultados de mejora de precisión son dependientes de las distintas variables metodológicas, donde para la configuración metodológica que se basa en DE se obtiene una mejora siempre mayor al 2% para cada uno de los casos de validación sintética comparado con un método anterior (GA-PSO) en el caso de una desviación del -0.5% sobre la frecuencia de la onda fundamental de la señal. De esta forma se cumplió con el tercer objetivo en cuanto a la comparación de bondad entre metodologías.

A través del proceso de implementación fue posible encontrar una oportunidad de mejora en la codificación de los algoritmos de optimización meta-heurísticos basados en población, tal como es la evolución diferencial, mostrando una estructura fácilmente adaptada a un esquema de ejecución concurrente. Tras lo cual, se aprovecharon estas oportunidades para dar lugar a una codificación bajo un esquema de programación en paralelo utilizando la librería OpenCL, donde posteriormente la ejecución de estas aplicaciones se vería soportada por una arquitectura de ejecución paralela bajo GPU. De esta forma se cumplió con el segundo objetivo particular.

Fue a través de este mismo ajuste realizado sobre la codificación y el entorno de ejecución que fue posible lograr una aceleración notable sobre el tiempo de ejecución requerido

para el proceso de estimación paramétrica. Al basarse en una estrategia de codificación y ejecución en paralelo se logró obtener un rendimiento de hasta 17 veces sobre la misma configuración metodológica con una estrategia de codificación y ejecución en serie, este resultado fue obtenido para la configuración metodológica basada en evolución diferencial, quedando demostrada la validez del uso de este tipo de arquitectura para la aceleración de procesos basados en algoritmos de optimización poblacionales. Comparado con metodologías anteriores, como GA-PSO, se obtuvo, a través de la configuración metodológica basada en SANN y entrenamiento a través de GPU, una aceleración mayor 60 veces el tiempo de ejecución para el caso de presencia de contenido armónico en la validación sintética.

Mediante los detalles brindados en los cuatro párrafos anteriores quedan completos cada uno de los objetivos particulares, así como el objetivo general, además queda comprobada la hipótesis de estudio de este trabajo, ya que fue posible el desarrollo de una nueva metodología de detección, clasificación y cuantificación de disturbios eléctricos basada en el esquema de cómputo en paralelo junto a técnicas de optimización meta-heurísticas modernas que permitió monitorear el estado de la calidad de la energía mejorando la precisión en cuanto a bondad de ajuste sobre las señales de entrada a las que se aplicó esta metodología y el rendimiento computacional en cuanto a tiempo de ejecución de la implementación en al menos un 30% sobre la implementación en serie de las metodologías hasta ahora reportadas, en concreto 17 veces más rápido al utilizar la configuración basada en DE y 60 veces más rápido utilizando la configuración SANN de la metodología propuesta.

V.2. Aportes del trabajo

La configuración de la metodología basada en evolución diferencial representa una alternativa plausible para el análisis de las señales de la energía en voltaje. Esta metodología, al estar basada en un algoritmo de optimización poblacional permite obtener una implementación casi directa sobre una arquitectura de ejecución en paralelo, logrando grandes resultados de aceleración en cuanto al tiempo de ejecución del algoritmo en una arquitectura secuencial clásica. El aporte científico de esta configuración metodológica se basa en la adaptación de estrategia de ejecución en paralelo, propia del área de computación de altas prestaciones, además, presenta como novedad la introducción de una primera etapa en las metodologías de cuantificación de

disturbios donde se realiza una estimación de la frecuencia y la fase, de manera simultánea, sobre la onda correspondiente al contenido fundamental de la señal.

La configuración de la metodología basada en HHO ha demostrado que es posible realizar una clasificación de disturbios de tipo transitorio utilizando técnicas basadas en la transformada wavelet una vez realizado el ajuste correspondiente de la señal de origen, eliminando las componentes senoidales de esta. Si bien no presenta un método de estimación paramétrica para con el modelo matemático de la calidad de la energía, sí es capaz de realizar un primer paso de clasificación sobre los tipos de disturbios de tipo transitorio, cuestión que no se tomó en cuenta para la metodología anteriormente discutida. El aporte científico de esta configuración metodológica se basa en la utilización de un mismo algoritmo para la estimación de frecuencia, fase y amplitud del contenido senoidal de la señal por separado: contenido fundamental, contenido armónico y contenido interarmónico. Añadido a esto, se tiene como contribución científica la presentación de un algoritmo simple basado en el suavizado y el cambio de signo para la clasificación de disturbios transitorios.

La utilización de técnicas de optimización metaheurísticas basadas en población han demostrado, en los estudios presentados, ser eficaces para resolver el problema de la cuantificación de disturbios en señales de la energía. Así como también la metodología SANN se presenta como una alternativa más para la optimización, sin embargo, esta última metodología requiere de una configuración específica de la red neuronal que resuelve el problema. Por otra parte, es importante notar que hoy en día se desarrollan una gran variedad de soluciones de hardware y software para la implementación y ejecución de redes neuronales, por lo que la implementación de un sistema basado en esta metodología es bastante accesible hoy en día. Los métodos basados en SANN ofrecen una fácil interpretación sobre cada uno de los parámetros propios de la red neuronal, donde cada uno de ellos tiene una finalidad y un significado. Como contribución científica de esta configuración metodológica se ha aportado el uso de este tipo de estructuras de optimización poco comunes adaptándolas a un modelo matemático concreto sobre la calidad de la energía, permitiendo así una estimación de parámetros de frecuencia y fase de manera directa y simultánea para el contenido fundamental, contenido armónico e interarmónico.

V.3. Prospectivas del trabajo

Como prospectivas para este trabajo, la metodología general presentada, así como cada una de sus configuraciones, abren una nueva perspectiva sobre la manera de estudiar las señales de la energía, agregando como incógnita al problema la frecuencia de la onda fundamental, misma que tal como se ha demostrado es prioritaria para con los siguientes pasos del ajuste sobre la señal. Este hecho está justificado debido a que se pretende lograr el ajuste más fiel sobre la señal a fin de que cuando se realice una reconstrucción sobre esta se obtenga el menor grado de error posible, por lo que un error en la parametrización de la señal sintética sobre la frecuencia fundamental incide de manera directa, no solo en la misma onda base sino además en la frecuencia de las ondas correspondientes al contenido armónico, pudiendo además detectar contenido de tipo armónico como interarmónico, cayendo en un error de clasificación.

La utilización de este tipo de implementaciones de cuantificación de disturbios sobre GPU abre una nueva oportunidad de mejora en el rendimiento de estas acercándolas al análisis de señales en línea. Sin embargo, debido a que el tipo de dispositivo programable predominante dentro de la industria es el FPGA y no existen implementaciones sobre cuantificación de disturbios completas bajo esta tecnología, se abre una oportunidad para nuevas investigaciones basadas en este tipo de dispositivos. Las soluciones basadas en la tecnología FPGA permiten un mayor grado de personalización, más cercano al silicio, donde existe un nivel de personalización del algoritmo hasta el nivel de puertas lógicas, sin embargo, las soluciones basadas en GPU se basan en un conjunto de instrucciones, que, aunque se encuentran implementadas de manera eficiente, son de propósito general y se encuentran en un conjunto estático.

Una parte interesante de estudio posterior a este trabajo se basa en la alteración del factor de forma de las componentes fundamental, contenido armónico e interarmónico. Es de notar que estas metodologías basan su funcionamiento contemplando un factor de forma senoidal perfecto para cada una de las ondas, por lo que sería interesante realizar pruebas sobre señales que no se correspondan con este patrón.

Por otra parte, la clasificación del tipo de disturbio dentro del conjunto de los disturbios de tipo transitorio es un paso importante y desarrollado en la configuración metodológica basada en HHO. En el caso de que se deseen utilizar métodos de optimización meta-heurística para el ajuste paramétrico de este tipo de disturbios es útil conocer de qué tipo es el transitorio bajo estudio

a fin de no consumir recursos computacionales innecesariamente, realizando una selección de la variante del modelo matemático sobre el que realizar el ajuste del transitorio extraído. En un trabajo posterior sería posible utilizar un método de optimización meta-heurística para realizar una búsqueda paramétrica sobre la variante del modelo matemático correspondiente al tipo de disturbio transitorio extraído.

En cuanto a un posible paso tras este trabajo de investigación sobre la implementación sería interesante poder realizar las pruebas correspondientes al tiempo de transmisión de datos sobre la red, a fin de realizar una prueba sobre una implementación del sistema completo con un procesamiento basado en la ejecución remota de los algoritmos de optimización y la medición del retardo correspondiente.

A partir de los resultados obtenidos en la configuración metodológica basada en SANN se propone una línea de trabajo donde se utilicen este tipo de redes específicas, de manera combinada con redes neuronales artificiales tradicionales para realizar distintos procesos de optimización y clasificación. La utilización de una arquitectura mixta basada totalmente en redes neuronales y la aplicación de técnicas de optimización metaheurísticas bio-inspiradas prometen un avance no tan solo en el área de la calidad de la energía sino de la inteligencia artificial y la toma de decisiones.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelsalam, A. A., A. A. Eldesouky, y A. A. Sallam. 2012. Classification of power system disturbances using linear Kalman filter and fuzzy-expert system. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 43:688-695.

Addison, P. S. 2017. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance (2ª Ed.)*. CRC Press.

Ahmad, B. A., H. H. Elsheikh y A. Fadoun. 2015. Review of power quality monitoring systems. *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Man.* p. 1-8.

Alanis, A. Y., N. Arana-Daniel, y C. Lopez-Franco. 2019. *Artificial neural networks for engineering applications (1ª Ed.)*. Academic Press.

Anderson, J. B. 2012. *Digital Filters: Principles and Applications with MATLAB (1ª Ed.)*. Wiley.

Aster, R. C., B. Borchers, y C. H. Thurber. 2013. *Parameter Estimation and Inverse Problems (2ª Ed.)*. Elsevier.

Beck, K. 2002. *Test Driven Development: By Example (1ª Ed.)*. 2002.

Bollen, M. H. J. y I. Y. Gu. 2006. *Signal Processing of Power Quality Disturbances (1ª Ed.)*. Wiley.

Boyd, D. W. 2001. *Systems Analysis and Modeling: A Macro-to-Micro Approach with Multidisciplinary Applications (1ª Ed.)*. Academic Press.

Boyer, S. A. 2004. *SCADA: Supervisory control and data acquisition (3ª Ed.)*. The Instrumentation, Systems and Automation Society.

Bozicek, A., J. Kilter, T. Sarnet, I. Papic, y B. Blazic. 2018. Harmonic Emissions of Power Electronic Devices Under Different Transmission Network Operating Conditions. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 54:5216-5226.

Broughton, S. A., y K. Bryan. 2018. *Discrete fourier analysis and wavelets: Applications to signal and image processing (2ª Ed.)*. Wiley.

Chattopadhyay, S., M. Mitra, y S. Sengupta. 2011. *Electric Power Quality (1ª Ed.)*. Springer.

Chen, Z., H. Xiao, R. Zhang, X. Shi, Y. Zhou, J. Lv y S. Xu. Optimization of dynamic preventive maintenance for multicomponent systems. 2018. *Proc. IEEE Int. Congr. Cyberm.* p. 591-598.

Chen, Z., M. Li, T. Ji, y Q. Wu. 2020. Real-time recognition of power quality disturbance-based deep belief network using embedded parallel computing platform. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* 15:519-526.

Chupakhina, A., M. Martinovich, G. Zinoviev, y V. Skolota. 2017. Modern mathematical methods and computerized tools of artificial intelligence for solving problems of identifying the energy quality of electrical systems. *Proc. Int. Mul. Conf. Eng. Comp. Inf. Sci.* p. 485-490.

Cirrincione, M., M. Pucci y G. Vitale. 2012. *Power Converters and AC Electrical Drives with Linear Neural Networks (1ª Ed.)*. CRC Press.

Cisneros-Magaña, R., A. Medina, V. Dinavahi, y A. Ramos-Paz. 2018. Time-Domain Power Quality State Estimation Based on Kalman Filter Using Parallel Computing on Graphics Processing Units. *IEEE Access*. 6:21152-21163.

Cuevas, E., J. Gálvez, y O. Avalos. 2020. *Recent Metaheuristics Algorithms for Parameter Identification* (1ª Ed.). Springer.

Eisenmann, A., T. Streubel y K. Rudion. 2019. PQ classification by way of parallel computing – A sensitivity analysis for a real-time LSTM approach using waveform and RMS data. *Proc. IEEE Milan Power Tech*. p. 1-6.

Elvira-Ortiz, D. A. 2019. *Monitorización de calidad de la energía en sistemas de generación alternos* (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Erişti, H., A. Uçar, y Y. Demir. 2010. Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines. *Electr. Power Syst. Res.* 80:743-752.

Feoktistov, V. 2006. *Differential Evolution: In Search of Solutions* (1ª Ed.). Springer.

Frichtel, J. S. 1971. Influence of electric power quality on avionic design and weapon system effectiveness. *Proc. IEEE Power Elec. Spec. Conf.* p. 152-161.

Ghosh, A., y D. L. Lubkeman. 1995. The classification of power system disturbance waveforms using a neural network approach. *IEEE Trans. Power Deliv.* 10:109-115.

Gilchrist, A. 2016. *Industry 4.0: The industrial internet of things* (1ª Ed.). Apress.

González-Domínguez, J., B. Schmidt, C. Hundt, y M. Schlarb. 2017. *Parallel programming: Concepts and practice* (1ª Ed.). Elsevier.

Granados-Lieberman, D., R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, y L. A. Franco-Gasca. 2009. A real-time smart sensor for high-resolution frequency estimation in power systems. *Sensors*. 9:7412-7429.

Granados-Lieberman, D. 2013. *Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la calidad de la energía* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Guillén-García, E. 2019. *Modelos de diagnóstico de sistemas eléctricos basados en los índices de la calidad de la energía* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

He, Z. 2016. *Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems* (1ª Ed.). Wiley.

Heidari, A. A., S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, y H. Chen. 2019. *Harris hawks optimization: Algorithm and applications*. *Futur. Gener. Comput. Syst.* 97:849-872.

Hockney, R. W. y C. R. Jesshope. 2019. *Parallel Computers 2* (2ª Ed.). CRC Press.

Holm, H. H., A. R. Brodtkorb y M. L. Sætra. 2020. Performance and Energy Efficiency of CUDA and OpenCL for GPU Computing Using Python. *Parall. Comp. Tech. Trends*. 36:593-604.

Hong, W. S. 2013. *Modeling Applications and Theoretical Innovations in Interdisciplinary Evolutionary Computation* (1^a Ed.). IGI Global.

Hooshmand, R., y A. Enshae. 2010. Detection and classification of single and combined power quality disturbances using fuzzy systems oriented by particle swarm optimization algorithm. *Electr. Power Syst. Res.* 80:1552-1561.

Huang, N., D. Xu, X. Liu, y L. Lin. 2012. Power quality disturbances classification based on S-transform and probabilistic neural network. *Neurocomputing.* 98:12-23.

Hughes, T. A. 2005. *Programmable controllers: Resources for Measurement and Control* (4^a Ed.). The Instrumentation, Systems and Automation Society.

Iagăr, A., G. N. Popa, y C. M. Dini. 2019. Investigation of harmonic pollution produced by power tools. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 477.

IEEE. 1987. *Guide for Surge Voltages in Low Voltage AC Power Circuits.* IEEE Std. C62.41-1987.

IEEE. 1989. *Voltage Ratings (60 Hertz) for Electric Power Systems and Equipment.* IEEE C84.1-1989.

IEEE. 2009. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.* IEEE Std 1159-2009 (Revision IEEE Std 1159-1995).

IEEE. 2019. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.* IEEE Std 1159-2019.

IEEE. 2019. *IEEE Recommended Practice for Power Quality Data Interchange Format (PQDIF).* IEEE Std 1159.3-2019 (Revision IEEE Std 1159.3-2003).

Igual, R., C. Medrano, F. J. Arcega, y G. Mantescu. 2018. Integral mathematical model of power quality disturbances. *Proc. IEEE Int. Conf. Harm. Qual. Power.*

Isupov, K. 2020. Performance data of multiple-precision scalar and vector BLAS operations on CPU and GPU. *J. Parallel Distrib. Comput.* 140:25-36.

Jaen-Cuellar, A. Y., L. Morales-Velazquez, R. de J. Romero-Troncoso, D. Moriñigo-Sotelo, y R. A. Osornio-Rios. 2017. Micro-genetic algorithms for detecting and classifying electric power disturbances. *Neural Comput. Appl.* 28:379-392.

Jaen-Cuellar, A. Y., D. A. Elvira-Ortiz, R. A. Osornio-Rios, R. J. Romero-Troncoso. 2019. Efficiency monitoring of photovoltaic inverters considering weather conditions. *Proc. IEEE Int. Autumn Meet. Power Electr. Comp.* 8661439:1-6.

Jayasree, T., D. Devaraj, y R. Sukanesh. 2010. Power quality disturbance classification using Hilbert transform and RBF networks. *Neurocomputing.* 73:1451-1456.

Jeevitha, S. R. S., y M. C. Mabel. 2018. Novel optimization parameters of power quality disturbances using novel bio-inspired algorithms: A comparative approach. *Biomed. Signal Process. Control.* 42:253-266.

Kanirajan, P., y V. Suresh Kumar. 2015. Power quality disturbance detection and classification

using wavelet and RBFNN. Appl. Soft Comput. 35:470-481.

Kazmierkowski, M. P. 2015. Power Quality: Problems and Mitigation Techniques (1^a Ed.). Wiley.

Keller, J. G. 1994. Methodology for power quality measurements for wind turbines and remote communities. Wind Eng. 18:87-91.

Khoshkbar Sadigh, A., y K. M. Smedley. 2016. Fast and precise voltage *sag* detection method for dynamic voltage restorer (DVR) application. Electr. Power Syst. Res. 130:192-207.

Kim, G., Debois, P., Willis, J., Humble, J. y Allspaw, J. 2016. The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations (1^a Ed.). It Revolution Press.

Latran, M. B., y A. Teke. 2015. A novel wavelet transform based voltage *sag/swell* detection algorithm. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 71:131-139.

Lee, C. H., y C. Y. Chin. 1971. A hybrid electrical power system for aircraft application. En: IEEE Power Elec. Spec. Conf. p. 162-174.

Liu, R., R. Wang, Q. Liu, L. Yang, C. Xi, W. Wang, L. Li, Z. Zhao y Y. Zhou. 2018. Review of comprehensive evaluation methods for power quality and its trend in new generation energy system. Proc. Earth Env. Sci. 113:012190

Martin, R. C. 2008. Clean code: A Handbook of Agile Software Craftmanship (1^a Ed.). Prentice Hall.

Martzloff, F. D., y G. J. Hahn. 1970. Surge Voltages in Residential and Industrial Power Circuits. IEEE Trans. Power Appar. Syst. PAS-89:1049-1056.

Masoum, M. A. S., y E. Fuchs. 2015. Power quality in power systems and electrical machines (2^a Ed.). Academic Press.

Masoum, M. A. S., S. Jamali, y N. Ghaffarzadeh. 2010. Detection and classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and wavelet networks. IET Sci. Meas. Techn. 4:193-205.

Matloff, N. 2017. Statistical Regression and Classification: From Linear Models to Machine Learning (1^a Ed.). CRC Press.

Mcfadden, R. H. 1971. Power-System Analysis: What It Can Do for Industrial Plants. IEEE Trans. Ind. Gen. Appl. IGA-7:181-188.

Mirjalili, S. 2018. Evolutionary Algorithms and Neural Networks (1^a Ed.). Springer.

Mirjalili, S. 2020. Nature-Inspired Optimizers: Theories, Literature Reviews and Applications (1^a Ed.). Springer.

Mishra, M. 2019. Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review. Int. Trans. Electr. Energ. Sys. 29:e12008

Montoya, F. G., A. Garcia-Cruz, M. G. Montoya y F. Manzano-Agugliaro. 2016. Power quality techniques research worldwide: A review. Ren. Sust. Energy Rev. 54:846-856.

- Nagata, E. A., D. D. Ferreira, C. A. Duque, y A. S. Cequeira. 2018. Voltage *sag* and *swell* detection and segmentation based on Independent Component Analysis. *Electr. Power Syst. Res.* 155:274-280.
- Newton, S. C., y R. N. Clark. 1993. Power quality measurements on a 500 kW variable speed VAWT. *ASME Solar. Energy Div.* 14:149-154.
- Osgood, B. G. 2019. *Lectures on the Fourier Transform and Its Applications (1ª Ed.)*. American Mathematical Society.
- Ozcanli, A. K., F. Yaprakdal y M. Baysal. 2020. Deep learning methods and applications for electrical power systems: A comprehensive review. *Int. J. Energy Res.* p. 1-22
- Panigrahi, B. K., P. K. Dash, y J. B. V Reddy. 2009. Hybrid signal processing and machine intelligence techniques for detection, quantification and classification of power quality disturbances. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22:442-454.
- Park, G. L., O. Krauss, y J. Miller. 1984. Performance testing of small interconnected wind systems. *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME.* 106:212-217.
- Patel, V. 2019. Classification of Power System Disturbances Using Support Vector Machine in FPGA. *Proc. Intell. Comp. Techn. Smart Energy Syst.* p. 825-835.
- Patnaik, S. 2020. *New paradigm of industry 4.0: Internet of things, big data & cyber physical systems (1ª Ed.)*. Springer.
- Petrovic, F., D. Strelak, J. Hozzová, J. Ol'ha, R. Trembecky, S. Benkner y J. Filipovic. 2020. A benchmark set of highly-efficient CUDA and OpenCL kernels and its dynamic autotuning with Kernel Tuning Toolkit. *Future Gen. Comp. Sys.* 108:166-177.
- Ray, P., G. K. Budumuru y B. K. Mohanty. 2018. A comprehensive review on soft computing and signal processing techniques in feature extraction and classification of power quality problems. *J. Renew. Sust. Energy.* 10:025102.
- Ribeiro, E. G., T. M. Mendes, G. L. Dias, E. R. S. Faria, F. M. Viana, B. H. G. Barbosa y D. D. Ferreira. 2018. Real-time system for automatic detection and classification of single and multiple power quality disturbances. *Measur.* 128:276-283.
- Rodriguez-Guerrero, M. A., R. Carranza-Lopez-Padilla, R. A. Osornio-Rios, y R. de J. Romero-Troncoso. 2017. A novel methodology for modeling waveforms for power quality disturbance analysis. *Electr. Power Syst. Res.* 143:14-24.
- Rodriguez-Guerrero, M. A., A. Y. Jaen-Cuellar, R. D. Carranza-Lopez-Padilla, R. A. Osornio-Rios, G. Herrera-Ruiz, y R. D. J. Romero-Troncoso. 2018. Hybrid Approach Based on GA and PSO for Parameter Estimation of a Full Power Quality Disturbance Parameterized Model. *IEEE Trans. Ind. Informatics.* 14:1016-1028.
- Romero, G., y L. Martinez. 2012. *Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances (1ª Ed.)*. InTech.
- Rout, M., J. K. Rout y H. Das. 2020. *Nature Inspired Computing for Data Science (1ª Ed.)*. Springer.

Sahani, M. y P. K. Dash. 2019. FPGA-Based Online Power Quality Disturbances Monitoring Using Reduced-Sample HHT and Class-Specific Weighted RVFLN. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 15(8):4614-4623.

Sankaran, C. 2001. *Power Quality* (1ª Ed.). CRC Press.

Santos, R., E. D. Moreno y C. Estombelo-Montesco. 2019. *Proc. Symp. Integr. Circ. Sys. Design.* p. 1-6.

Scheffer, C. y P. Girdhar. 2004. *Machinery vibration analysis & predictive maintenance* (1ª Ed.). Newnes.

Schlichthärle, D. 2011. *Digital Filters: Basics and Design* (2ª Ed.). Springer.

Schmidt, A. W., y E. T. Reiquam. 1978. Impact of Aircraft Electrical Power Quality on Utilization Equipment. *Proc. Nat. Aero. Electr. Conf.* p. 1010-1014.

Shenoi, B. A. 2005. *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design* (1ª Ed.). Wiley.

Singh, B., A. Chandra y K. Al-Haddad. 2015. *Power quality problems and mitigation techniques* (1ª Ed.). Wiley.

Solis-Munoz, F. J., R. A. Osornio-Rios, R. de J. Romero-Troncoso y A. Y. Jaen-Cuellar. 2019. Differential Evolution Implementation for Power Quality Disturbances Monitoring using OpenCL. *Adv. Elec. Comp. Eng.* 19(2):13-22.

Solis-Munoz, F. J., D. A. Elvira-Ortiz, A. Y. Jaen-Cuellar, R. de J. Romero-Troncoso y R. A. Osornio-Rios. 2020. A Novel Methodology for Power Quality Disturbances Detection and Classification in Industrial Facilities. *J. Sci. Ind. Res.* 79:819-823.

Sun, J., Y. Xie, H. Zhang y C. Faloutsos. 2007. Less is More: Compact Matrix Decomposition for Large Sparse Graphs. *Proc. Int. Conf. Data Mining.* p. 1-12.

Surianarayanan, C., y P. R. Chelliah. 2019. *Essentials of Cloud Computing* (1ª Ed.). Springer.

Sutherland, J. 2016. *Scrum: El Arte de Hacer el Doble de Trabajo en la Mitad de Tiempo* (1ª Ed.). Oceano.

Takahashi, D. 2019. *Fast Fourier Transform Algorithms for Parallel Computers* (1ª Ed.). Springer.

Taylor, G. J. 1987. Power quality measurements on a 24 m windmill. *IEE Proc. A Phys. Sci. Meas. Instrumentation, Manag. Educ. Rev.* 134:435-440.

Thakur, P. y A. K. Singh. 2015. *Proc. IEEE Int. Conf. Energy Econ. Envir.* p. 1-6.

UNE. 2011. *Voltage Characteristics Of Electricity Supplied by Public Electricity Networks.* Eur. Std. EN 501602011.

Upadhyaya, S., y S. Mohanty. 2016. Localization and classification of power quality disturbances using maximal overlap discrete wavelet transform and data mining based classifiers. *Proc. Conf. Adv. Control Optim. Dyn. Sys.* p. 437-442.

Ustundag, A. y E. Cevikcan. 2018. *Industry 4.0: Managing the digital transformation* (1ª Ed.). Springer.

Valtierra-Rodriguez, M., R. de J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, D. Granados-Lieberman y R. A. Osornio-Rios. 2013. Reconfigurable instrument for neural-network-based power-quality monitoring in 3-phase power systems.

Valtierra-Rodriguez, M. 2014. Arquitectura de procesador neuro-difuso para el desarrollo de instrumentos de monitoreo de la calidad de la energía (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Vorontsov, E., N. Abi-Jaoudeh y S. Kadoury. 2014. Metastatic Liver Tumor Segmentation Using Texture-Based Omni-Directional Deformable Surface Models. Proc. Abdom. Imag. Comp. Clinic. Appl. p. 74-82.

Wang, X., X. Qian, A. Knoll y K. Huang. 2020. Efficient Performance Estimation and Work-Group Size Pruning for OpenCL Kernels on GPUs. IEEE Trans. Parall. Distr. Sys. 31(5):1089-1106.

Wei F., L. Jin, J. Liu, F. Ding y X. Zheng. 2020. GPU acceleration of a 2D compressible Euler solver on CUDA-based block-structured Cartesian meshes. J. Brazil. Soc. Mech. Sci. Eng. 42:250.

Whitaker, J. C. 2005. The Electronics Handbook (2^a Ed.). Taylor & Francis.

Whitehead, E. R. 1938. Lightning Protection of 22-Kv Substations. Trans. Am. Inst. Electr. Eng. 57:568-572.

Wilt, N. 2013. The CUDA Handbook (1^a Ed.). Addison-Wesley.

Wolfgang, E. 2020. GPU Pro 360: Guide to GPGPU (1^a Ed.). CRC Press.

Xiao, X., J.-H. Lai, y C.-D. Wang. 2014. Parameter estimation of the exponentially damped sinusoids signal using a specific neural network. Neurocomputing. 143:331-338.

Yasnitsky, L. N. 2020. Whether be new “winter” of artificial intelligence?. Proc. Integr. Sci. Dig. Age. p. 13-17

VII. Anexo A: Artículo publicado sobre configuración metodológica basada en DE en Journal JCR

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

Differential Evolution Implementation for Power Quality Disturbances Monitoring using OpenCL

Francisco J. SOLIS-MUNOZ, Roque A. OSORNIO-RIOS,
Rene J. ROMERO-TRONCOSO, Arturo Y. JAEN-CUELLAR

HSPdigital – CA Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus
San Juan del Río, Río Moctezuma 249, 76807 San Juan del Río, QRO, México
ayjaen@hspdigital.org

Abstract—This article presents a new methodology to implement a computational parallel scheme based on Differential Evolution (DE) algorithm through the use of Graphical Processing Units (GPU). A system application in which it is possible to perform an online monitoring of Power Quality Disturbances (PQD) in electric grids is presented as a case study, where a fitting of the parameters of a mathematical model is performed through this technique. Hyper-parameter optimization of the parallel Differential Evolution algorithm is performed for the assigned fitting function. As a result of this parallel implementation, a speed-up of 37 times compared with the serial implementation is achieved by using a single low budget GPU. The work presented shows a significant speed and accuracy improvement compared with Micro-Genetic Algorithm for Power Quality Analysis (MGA-PQA) technique.

Index Terms—evolutionary computation, parallel programming, parallel processing, power quality, power system faults.

I. INTRODUCTION

Nowadays, parallel computation techniques allow to obtain an improvement on computation time and the processing of wide data sets. As a large number of computation cores exist, processing time can be diminished when an initial complex task can be decomposed into independent simpler subtasks assigning a processor core to each one, executing them simultaneously. Computational intensive tasks as meta-heuristic optimization algorithms [1]–[4] that were used to taking a significant amount of time for computational expensive evaluation functions, are processed more efficiently by the use of parallel computing scheme allowing their implementation to obtain on-line systems. Different parallel systems architectures as multi-core central processing units (CPU) and graphics processing units (GPU) are present these days in nearly every personal computer, while infrastructure as a service (IaaS) servers specifically built for this purpose can be easily accessed by Google Cloud Platform and Amazon Web Services.

The meta-heuristic algorithms are used to obtain an approximate solution to a problem whose exact resolution method is unknown, where the classic algorithms are ineffective, or where it is very expensive to apply due to its

computational time and resources needed. Differential Evolution (DE) is a technique within meta-heuristic algorithms, which allows obtaining an estimation for the solution of a multi-parametric continuous optimization problem. This technique is based on the evolution of a population through mutation and crossover operations between its agents, leading to a new population whose best agent score is equal or better for each new generation. Due to the population nature that DE has, this algorithm allows being directly implemented in a parallel computing environment taking the developers to an application able to solve multi-parametric optimization problems in a sped-up way by minimizing the impact on the resources consumption that its serial implementation implies. Particularly, an application in which this work will focus is given in a mathematical model fit to an electric signal containing power quality disturbances, a problem in power quality.

Power quality (PQ) is a research area focused on studying disturbances appearing in electric signals at power lines. Because now many key processes from the continuous manufacturing industry, commerce and services are dependent on the electric supply, this research area has increased its popularity. The continuous monitoring and conditioning of the power line signals prevent fails that would lead to significant losses [5], which can be economical in the case of the continuous manufacturing industry or fatal in a hospital building. In the PQ field, various disturbances can appear at voltage electric signals such as constant amplitude variations, harmonic contents, and flickers. Different sources responsible for causing disturbance events are present with a considerable portion of them because of customer loads [6]. These can cause harmonic content (due to nonlinear loads), poor power factor (due to highly inductive loads), flicker (due to arc furnaces), transients (due to device switching) and others. Power quality monitoring and conditioning should be considered for economic benefits. For example, a present disturbance like harmonic content at the power line could lead to a reduction of a 30% of life expectancy of a capacitor [7]. Because sampling frequency necessary for obtaining a valid signal for the power quality analysis is by the range of 6 kHz to 8 kHz [8], the quantity of data generated is very large. So, an on-line fitting process on a mathematical model which represents the various

This work was supported by SEP-CONACyT 222453-2013 Project, CONACyT scholarship 783317, PRODEP UAQ-PTC-350 funding, the Universidad Autónoma de Querétaro.

Digital Object Identifier 10.4318/AECE.2019.02002

1582-7445 © 2019 AECE

13

disturbances that can appear in the electric signal has not been studied yet. In the literature simplifications are taken in the actual model implementations, for instance, by declaring the fundamental wave frequency as a constant to get solutions in a shorter time. However, through this way, real power signals are not adequately adjusted. Nowadays, the online monitoring of power signals is a tendency where the monitoring system response delay is reduced to be able to detect and quantify power quality disturbances in a fast and accurate way [9]–[12]. The reported methods for the mathematical model adjustment focused on PQD detection are widely computational expensive. Regarding the meta-heuristic techniques, these could be used for the power quality analysis. Therefore, it would be desirable to develop a methodology which has a parallel distributed computational cost as well as an on-line implementation.

The contribution of this paper is the development of a new methodology based on differential evolution for a mathematical model fitting of power quality disturbances. Parallel implementation is achieved through the use of GPU. A mathematical model that describes power quality disturbances in an electric voltage signal is used as the case study. Parallel implementation of this new methodology leads to an on-line signal parameters estimation for high-frequency sampled signals. Validation is run for synthetic and real power signals and a comparison is performed with MGA-PQA method [13]. The outcome of this study represents a significant advance in power quality field.

II. RELATED WORK

Recently, parallel implementations of meta-heuristic algorithms have been published [14]–[19]. They are known to be a computational intensive task, as well, development of GPU based solutions for signal processing [20], [21] and FPGA based ones [22]–[24] show that parallel programming fits at the Signal Processing applications empowering researchers with the fastest tools for their experiments, situating the solutions at the area of High-Performance Computing (HPC).

The use of evolutionary algorithms (EA) as a multi-parametric optimization algorithms is instantiated at signal processing research area [25]–[27], where differential evolution (DE) has been used for feature subset selection in conjunction with other artificial intelligence classification algorithms [28]–[31] to obtain the input variable set that maximizes the classification process accuracy. The idea of DE comes from genetic algorithms (GA), which follows the idea of principles of evolution. This algorithm has been studied extensively and new variants are being published recently [32]. In the predictive maintenance area, DE is used for obtaining an estimation of uncertain ranged bearing-related physical values [33]. Examples are shown in the literature where a meta-heuristic algorithm is used in conjunction with other techniques for solving optimization problems [34]–[36]. The monitoring and the identification of the power quality disturbances present in power lines must be performed. Different methods were recently published where the estimations of the phase offset ϕ and the fundamental frequency f are done in separate processes (or even considered fixed as in the standards) [11], [13], [37]–

[39]. The accuracy of the results is acceptable for test cases presented at those studies but an improvement is needed for these methodologies by using a full time-dependent parametric model, in order to obtain a higher accuracy at Power Quality Disturbances detection and characterization. The EN 50160 standard [40] specifies a nominal frequency of 60Hz (50Hz for Europe) with deviations (using measuring periods of 10s) of $\pm 1\%$ over a year and $\pm 6\%$ for each measuring period at interconnected systems. Given that, the frequency may vary over time, the decision of estimating frequencies at a calibration stage that only runs once or fixating it at the standard nominal frequency leads to a self-imposed lower-bound at fitting error. Mathematical models for signals with Power Quality Disturbances where the frequency value is taken as a function of time has been presented lately [41], [42], these works present the most complete modelization. However, the frequency and the phase are fixed at a posterior step because of the complexity of the model presented and the computing time needed to manage signal processing with it. This error is aggravated during harmonic content parameters estimation because of the nature of their frequency being a multiple of the fundamental one [43], [44]. Also, an incorrect frequency filter band could lead to attenuation of these important disturbances. Having the correct phase and frequency of the fundamental waveform and the harmonic content ensures the accuracy of the power quality diagnostic tool because of the flexibility to adapt the synthetic signal to the real one and it has not been done before. Considering the aforementioned, there is a need on developing an on-line robust methodology capable of providing these parameters accurately for reaching the best fitting of the PQ parameterized model with the minimal computational resources required, and in the lowest time, though a parallel structure, compared with the current solution based on the micro-genetic algorithm power quality analysis (MGA-PQA) proposed in [13]. The present work introduces a new methodology that performs PQD detection and characterization considering a parametric mathematical model where the frequency and the phase offset are considered as time-dependent variables and their values are estimated with accuracy at first. The proposed approach is based on two main techniques. A combination of both makes up a more accurate fitting: DE and moving root mean squared (MRMS). DE algorithm has been parallelized using OpenCL, and a flexible parallel C++ library has been developed for future implementations of the algorithm. The algorithm has been studied considering different variants of it and internal parameters tuning for the sinusoidal waveform fitting with the aim of obtaining the configuration that minimizes the number of generations computed for reaching a goal relative squared error (RSE) ϵ . The MRMS technique detects the voltage sag and the voltage swell for each half cycle by the use of a precise number of points defined by the previous DE block output.

A parallel implementation has been done for a power quality event classifier leading to a greater event detection accuracy, lowering misclassification rate as a consequence, even for a mixture of PQD events. The electric events detected and characterized are voltage sag, voltage swell, flicker, harmonic content and disturbance mixture. A

statistical study on the outcomes obtained was accomplished to prove the goodness of the methodology proposed, by using randomly generated voltage power signals. A comparison was performed with the MGA-PQA methodology, which considers the frequency and the phase values as time-invariant, by using real power signal data from a hospital in Spain and from the IEEE 1159.2 working group database, where the proposed methodology returns faster and more accurate results.

III. METHODS

A. Differential Evolution algorithm

DE algorithms [45]–[47] are a family of evolutionary algorithms designed to solve optimization problems by using a population-based approach. The algorithm is iterative, at an initial step a population matrix $X^0 = [x_{i,j}^0]$, containing Λ different agents, where each one of them has P parameters, the dimensions of the problem, is randomly generated by using a random variable following a normalized $\mathcal{U}(0,1)$ distribution. The use of random values allows to avoid the grid search and locates the initial population in certain solutions, that if they are close enough to the global solution, they will converge to it. These parameters are randomly distributed as the classical way that it is done for genetic algorithms [48], [49]. In this study, $P = 2$ is defined, as the set $\{\omega, \phi\}$ will be estimated, $x_{i,1}^0 = x_{i,2}^0$ and $x_{i,1}^0 = x_{i,2}^0$ are equivalents.

The stop conditions of the algorithm indicate when it has already finished the computation and must return a result. A certain number of maximum generations G is defined. A generation counter increases at each iteration of the algorithm's main loop starting at 0 where a check of the goal condition is performed in the beginning.

In the main loop a population X^g previously defined, a matrix of neighbors $N^g = [n_{i,j}^g]$ is generated, Λ is dependent on the strategy (or scheme) selected. A population $Y^g = [y_{i,j}^g]$ is created by crossover and mutation. A selection is done by pairs, where each agent $x_{i,j}^{g+1}$ of X^{g+1} will be equal to the best of the agents $\{x_{i,j}^g, y_{i,j}^g\}$, using the fitting function value of the agents for the comparison. Once the stop condition is reached, the best agent is returned as the best fit solution found. A flowchart of the algorithm is shown in Fig. 1.

The schemes used in the study are presented and the new trial parameter expression is shown for each one of them. The differential process is the core of the proposed methodology and the factor $F \in (0,1)$ determines the behavior of the crossover (graduates how much noticeable is the change at the parameters).

The name of the strategies is defined by considering the used crossover technique and the count of neighbors pairs used at this stage. The *DE/Rand/N* and *DE/Best/N* sets are the family of strategies analyzed in this research, where a vector of unique neighbors is created for each agent, taking $n_{i,1}^g$ as the agent with the lowest score in the main population when using *Best* strategies. The parameter N in

the strategy name refers to how many pairs of agents are appended to the vector, leading to $\Lambda - 1 + 2N$ as the cardinality of the vector of neighbors for each agent. For the p -th parameter, the trial parameter w of the agent a at generation g is calculated as shown in (1).

$$w = \kappa(1) + \sum_{\lambda=2}^{\Lambda} ((-1)^\lambda F \kappa(\lambda)) \cdot \kappa(\lambda) \cdot x_{(n_{i,1}^g),p}^g \quad (1)$$

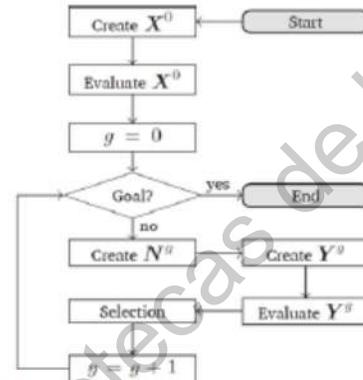


Figure 1. DE algorithm flowchart

For each a -th agent of the main population at generation g , a crossover process is done. A randomly selected parameter is fixed where the index of the parameter is δ which is taken from a discrete uniform distribution $\mathcal{U}(1,P)$. For each parameter $p = \delta$, a random c is generated using an $\mathcal{U}(0,1)$ if $c \leq C$ with C being the crossover probability. Then, the trial parameter w is generated as described in the equation (1) and as the last step $y_{i,p}^g = \min(1, \max(0, w))$, else $y_{i,p}^g = x_{i,p}^g$. When F is multiplied by an observation of a $\mathcal{U}(0,1)$ variable for each parameter and the agent of the population in the crossover stage the strategy is named with a * mark at the end of its name (*DE/Best/N** and *DE/Rand/N**).

B. Analytical study of the sinusoidal waveform definition

A study of the sinusoidal waveform definition needs to be done for the selection of the optimization method that will be used with the aim of obtaining an approximate solution.

Given a signal $r(t)$ based on a sinusoidal waveform, with the formula shown in (2), it is necessary to obtain a synthetic signal $\hat{r}(t)$ that minimizes the error.

$$r(t) = a \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

The error is described in the integral part of (3) for a given standard sine wave. This expression must be converted to its discrete form to work with it.

$$\hat{r}(t) = \underset{s(t)}{\operatorname{argmin}} \int_{I_s} (x(t) - r(t))^2 dt \quad (3)$$

The equation (4) shows the objective function to optimize by using s as the sampling rate and r as the raw signal data vector, with r_p as its p -th component, and $I_s = [I_{s,1}, I_{s,2}]$ as the time interval where the waveform parameters are

estimated and $\gamma(I_s)$ is the interval of discrete sample indexes corresponding to I_s . The parameters ω and ϕ are defined as the frequency and the phase offset of the waveform, respectively, and t is a variable representing time.

$$\hat{r}(t) = \underset{x(t)}{\operatorname{argmin}} \sum_{p \in \gamma(I_s)} \left(x\left(\frac{p}{z}\right) - r_p \right)^2 \quad (4)$$

The objective function has local minimum points at \mathcal{F} as expressed in (5). So, an adequate constraint set must be defined to obtain a solution.

$$\mathcal{F} = \left\{ \begin{array}{l} \omega = \omega_s, \phi = \phi_s + 2n\pi, n \in \mathbb{Z} \\ \omega = -\omega_s, \phi = -\phi_s + 2n\pi - \pi, n \in \mathbb{Z} \end{array} \right\} \quad (5)$$

The equation (6) specifies a definition of the constraints κ created for the resolution, where $\omega_s = 2\pi f_s$ relates to the standard fundamental frequency as described in [40]. A deviation of $\pm 6\%$ is selected to comply with the frequency specification. A $\phi \in [0, 2\pi)$ constraint was added for phase offset because of the cyclic property that sine wave function possesses in $x(t)$.

$$\kappa = \left\{ \begin{array}{l} (0.94)\omega_s \leq \omega \leq (1.06)\omega_s \\ 0 \leq \phi < 2\pi \end{array} \right\} \quad (6)$$

A filled contour plot of the objective function is shown in Fig. 2 where the RSE between the real and the estimated signal, calculated by applying the equation (7) and by using \bar{r} as the mean of the raw signal data mean (must be equal to zero for this methodology), measures waveform fitting.

$$\text{RSE} = \frac{\sum_p (r_p - \hat{r}_p)^2}{\sum_p (r_p - \bar{r})^2} \quad (7)$$

The RSE goes from 0 to infinity where a lower index value corresponds to a better fit. The minimum value is reached at (60Hz, π radians) as expected.

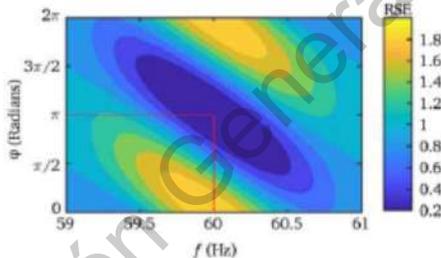


Figure 2. Objective function contour plot for f_s (60Hz, π rads)

The DE algorithm will find out the optimization problem solution stated by (4), using (5) and (6) as constraints. This particular algorithm was chosen because it is able to solve optimization problems with multiple continuous variables as the present problem, whereas its population nature makes its implementation in parallel a straightforward process. Furthermore, recent evidence reveals the prevalence of meta-heuristic algorithms for solving this kind of problem, as particle swarm optimization (PSO) in [34], gravitational search algorithm (GSA) in [35] and harmony search (HS) in [36].

C. Micro-genetic algorithm for power quality analysis

A methodology focused on power quality disturbances detection and measuring named as Micro-genetic algorithm for power quality analysis (MGA-PQA) has been studied in [13]. This methodology will be used for comparison purposes with the proposed methodology.

The approach presented in the article is based on the use of low population size genetic algorithms for parameter estimation. Mathematical model fitting by using MGA is performed at different steps of the methodology showing results that outperform the PSO and classical methodologies.

IV. METHODOLOGY

In this section, the proposed methodology is described and the system implementation is presented. The system shown in Fig. 3 is proposed as an online power quality event classifier, where the characterization of sag, swell, flicker and harmonic content can be done. Furthermore, unbalance and asymmetries between phases [50] can be accomplished with no extra steps. The proposed approach is also able to determine if an unknown disturbance is present at the system because of the fitting error that distinct DE blocks may return. The simplicity of the methodology which is mainly based on DE blocks, band-pass filters and moving RMS blocks is a key point for the ease of its implementation.

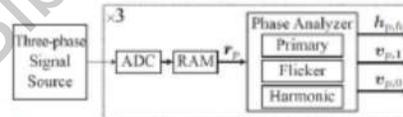


Figure 3. Main block diagram of the system

The presented block diagram is designed for a three-phase signal which is most common at continuous manufacturing industry, a different diagram could be built for being used in two-phase systems where the multiplicity of the components in the acquisition and analysis modules is changed. The methodology takes a raw stationary voltage power signal which is composed of three phases, this is sampled through ADC systems and the data is stored in a Random-Access Memory (RAM) using a sampling rate z_s , after certain number of samples a window phase signal data vector r_p is obtained for each phase p . These vectors r_p are submitted to the analysis module where fundamental signal estimated waveform parameters $\{\hat{\omega}_p, \hat{\phi}_p\}$ and moving RMS of the signal are calculated. Harmonic content characterization is conducted where moving RMS h_p of each of them is obtained. Moreover, flicker characterization is performed, where its moving RMS, v_p , is taken as the result. Once all outputs of the analysis module are calculated, different thresholds are applied to accomplish with the event detection.

A. Phase Analyzer module

An extended description of the Phase Analyzer is needed in order to understand the proposed methodology. This

module is the main block of the methodology, where the logic of the method is contained, it is shown in Fig. 4. In the Primary module, a band-pass filter is needed in order to attenuate frequencies far from the fundamental frequency. Once applied, the resulting signal $r_{p,1}$ is taken as input for a DE block and the system proceeds to an estimation of $\{\omega_{p,1}, \phi_{p,1}\}$ parameter set. The Moving RMS by a half fundamental cycle sliding window (with $\pi / \omega_{p,1}$ as length) of the raw phase signal data (formerly $v_{p,1}$) is performed. A threshold analysis is performed at $v_{p,1}$, where for each value $v \in v_{p,1}$, a sag is present if $0.1pu \leq v \leq 0.9pu$, a swell is present if $1.1pu \leq v \leq 1.5pu$ and an interruption is present if $v < 0.1pu$. This method allows an accurate detection and characterization for these voltage variation disturbances by each half of a period or more as the standard claims [8]. There is no need for syncing by using phase offset because moving RMS does the calculation independently of it.

A flicker module is present at the phase analyzer. The primary module output signal is filtered by a band-pass filter in order to erase frequencies outside the flicker expected range. A DE block proceeds with the estimation of flicker parameters $\{\omega_{f,1}, \phi_{f,1}\}$. By obtaining an estimated frequency close to the search lower bound could be a sign of flicker absence. Otherwise, a flicker effect correction must be done at $v_{p,1}$ to avoid detecting flicker cycles as voltage sags and voltage swells (because it can be seen as voltage falling and voltage rising, continuously). A moving mean is used to center the filtered signal at 0V. The Moving RMS by a half flicker cycle sliding window is calculated (formerly $v_{p,1}$ using last step output. A flicker present at the time window analyzed lead to a DC signal at $v_{p,1}$.

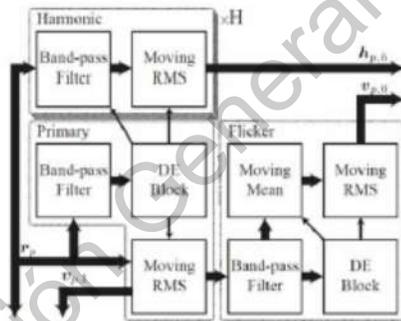


Figure 4: Phase Analyzer block diagram

The harmonic modules are implemented as well, where each one of them performs the analysis of one harmonic, by receiving the raw phase signal r , and returning a moving RMS signal $h_{p,1}$, from Fig. 4 harmonic content modules are replicated H times with H being the number of harmonic content to analyze. This module composition leads to a linear growth of the system architecture taking the number of harmonic content orders to analyze as the parameter. A threshold is set for harmonic module output signal $h_{p,1}$ to

show the presence of harmonic content. There is the need of having the fundamental frequency estimation done before analyzing harmonic content, the reason is that this method relies on it for creating the harmonic filter and moving RMS sliding window. A flowchart of the process performed at phase analyzer block is shown at Fig. 5.

B. Differential evolution parameters estimation block

The most compute expensive part of the methodology is the DE parameters estimation block. Given that the fitting function evaluation shown in (7) is computationally expensive when the sampling frequency of the signal is high ($\geq 3kHz$), summed up to the presence of this block at different parts of the system. A study has been directed for reducing the computation time required for fitting waveform signals.

Because DE is a generation-based algorithm, the lowest number of generations needed to obtain a fit, whose sum of square errors (SSE) is expected to be lower than certain ϵ is desired. This goal could be reached by increasing the population size or by modifying the random generation of the initial agents. The first approach is discarded because of a not efficient use of the computational resources would be done. Given that signals present at the system are not supposed to change over time and similar frequencies between the last processed time window signal and the current one is expected, DE modules are designed in a way that feedback of the best agent found at last time window is stored for using it at the creation of the new initial population.

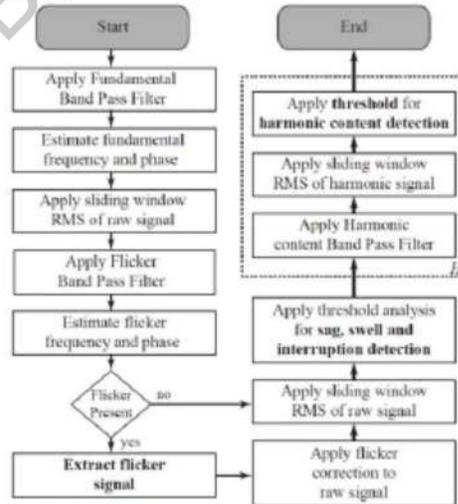


Figure 5: Flowchart of Phase Analyzer block

A study was driven in the DE block for waveform fitting, where different parameters of the algorithm were tuned to achieve a better fit in fewer generations. The results of the study by population size are summarized in Table I where each test case is defined using a population size, a mutation strategy, a crossover probability C and a differential factor F . Each line represents the minimum generations, g^f , needed to reach the lower bound defined as $\epsilon = 0.005$ (0.5%

mean square error). The phase shift, Φ , is defined as the sum of the mean and the standard deviation of the MSE for that row using 100 samples per each. The table shows that for 25 agents as population size test case (DE/Best/3*,1,0.25) with 20 as the generations needed using 3 pairs of neighbors (and the best agent) for the mutation strategy, for all the population sizes tested the case (DE/Best/1*,1,0.25) appears at the top in the first or the second position. This case will be named the general optimum configuration.

Also, a comparison is done between a serial and a parallel GPU OpenCL implementation (both present at the C++ library developed in this study), where parallel implementation shows a significant difference of running time required for 80 generations. Tests were run defining 200 agents as population size for the general optimum configuration, (Best,1,1,0.25,1), a mean speed-up of up to 37 times is reached when using the GPU parallel implementation. In Fig. 6 is shown that, this speed-up will probably increase for larger window sizes.

The maximum parallel implementation throughput is achieved by the subdivision of the process in independent tasks, taking advantage of the fact that computation of the population scores is an independent process between agents.

TABLE I. GENERATIONS NEEDED BY DE CONFIGURATION TO ACHIEVE $\epsilon < 0.5\%$ RSE

Pop. Size	Strategy	C	F	g'	Φ (%)
25	DE/Best/3*	1	0.25	20	0.43317
25	DE/Best/1*	1	0.25	24	0.42089
25	DE/Best/1	0.75	0.25	24	0.44026
50	DE/Best/1*	1	0.25	9	0.31885
50	DE/Best/2*	1	0.25	9	0.49077
50	DE/Best/3*	1	0.25	9	0.4943
100	DE/Best/1*	1	0.25	5	0.35433
100	DE/Best/2*	1	0.25	6	0.30329
100	DE/Best/1*	0.75	0.25	6	0.37286
200	DE/Best/1*	1	0.25	3	0.46988
200	DE/Best/2*	1	0.25	4	0.32843
200	DE/Best/3*	1	0.25	4	0.46404

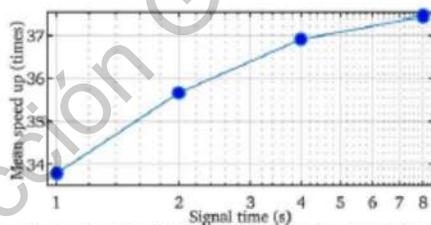


Figure 6. Speed up by window size by the use of a Tesla K80 GPU on Amazon Web Services Elastic Cloud Computing

V. VALIDATION USING SYNTHETIC POWER SIGNALS

To test the validity of the methodology in a simulated environment a synthetic power signals battery of tests is performed.

Detection of PQDs using larger windows is done with a

gain of accuracy in disturbance classification compared with the MGA-PQA methodology proposed in [42] where a fixed standard frequency is taken.

For each test case a synthetic signal that contains a set of PQD is generated, after that, MGA-PQA and proposed methodology are both applied using the raw signal as input. Using the output fit from each methodology the error values are calculated by using (7) and (8).

$$\Delta(r, \hat{r}) = \max |r_i - \hat{r}_i| \tag{8}$$

Synthetic signals were created by using the mathematical model shown in [51], analysis and reconstruction of each signal are done by the MGA-PQA and the proposed methodology. These tests have run taking 60 Hz and 59.7 Hz as the fundamental frequency and the next disturbances present for each test: 0.6pu sag, 1.2pu swell, 20 Hz and 0.3pu flicker, harmonic content of third and ninth order with an amplitude of 0.1pu and 0.2pu respectively. A signal with a 0.6pu sag, 20 Hz and 0.2pu flicker and fifth order harmonic content of 0.1pu is analyzed at 60 Hz fundamental frequency as well.

The tracking error comparison is done by using maximum absolute difference, which is calculated as shown in (8) using r as the raw signal and \hat{r} as the reconstructed estimated signal, which is the output of the proposed methodology based on DE. The results of the fitting quality by both methodologies are summarized in Table II.

The disadvantage of analyzing a signal using a fixed frequency at the model is noticeable even more when analyzing high order harmonic content, because the error of the fundamental frequency is multiplied so automated analysis is now possible under these uncertain conditions.

Analysis of the signal with a combination of disturbances shows that a flicker is detected, a correction at the signal RMS must be done to detect the sag component. After the correction is done, the sag is detected correctly independently from the flicker as two distinct events as shown in Fig. 7. The proposed methodology is able to extract the flicker as well.

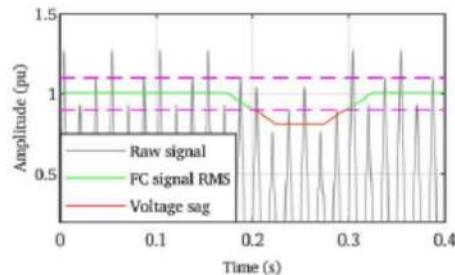


Figure 7. Flicker corrected RMS analysis of mixed signal

A study has been driven to analyze the importance of using good fixed frequency parameter in the MGA-PQA method. A synthetic 60Hz sine waveform is generated, and the RSE is calculated for different fixed frequencies set for the MGA-PQA method. The results of the study can be seen in Fig. 8. The results reveal the important use of the correct fixed frequency parameter for the estimation of the waveform. Furthermore, real power signals are not constant in frequency, what leads to an estimation of this parameter

for each window.

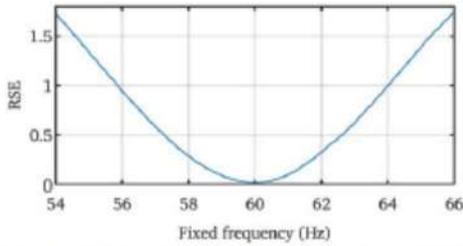


Figure 8. RSE for different fixed frequencies set for the MGA-PQA method on a 60Hz sine waveform

TABLE II. RESULTS OF SYNTHETIC SIGNALS TESTS

Test Signal	Method	60 Hz		59.7 Hz	
		Δ (%)	RSE (%)	Δ (%)	RSE (%)
Sag	MGA-PQA	29.355	0.306	38.599	5.145
	Proposed	30.718	0.3132	32.171	0.283
Swell	MGA-PQA	13.385	0.0863	38.894	4.259
	Proposed	14.196	0.091	13.418	0.099
Flicker	MGA-PQA	11.49	0.439	45.553	5.069
	Proposed	7.866	0.31	8.183	0.308
Harm. content	MGA-PQA	6.677	0.05	52.801	7.644
	Proposed	2.238	0.01	0.268	0
Mixed	MGA-PQA	20.248	0.656	33.314	2.491
	Proposed	17.25	0.178	15.898	0.219
Test Signal	Method	59.4 Hz		58.8 Hz	
		Δ (%)	RSE (%)	Δ (%)	RSE (%)
Sag	MGA-PQA	42.089	4.981	69.756	16.234
	Proposed	32.828	0.601	31.07	0.587
Swell	MGA-PQA	75.381	17.698	117.41	50.342
	Proposed	15.179	0.103	15.204	0.105
Flicker	MGA-PQA	80.565	17.332	118.64	48.953
	Proposed	8.337	0.309	8.429	0.309
Harm. content	MGA-PQA	83.32	19.71	109.26	50.065
	Proposed	0.419	0	0.853	0
Mixed	MGA-PQA	54.203	6.126	76.811	17.814
	Proposed	14.96	0.229	13.639	0.222

VI. VALIDATION USING REAL POWER SIGNALS

With the purpose of validating the proposed methodology in a real environment after it has been validated with synthetic signals, real power signals are being processed by the implementation of the system: a signal from IEEE and another from a hospital in Spain.

With the aim of comparing the proposed methodology and MGA-PQA methodology, the raw signal has been given to each of these methods. After a fit is obtained for each methodology, errors are calculated by using (7) and (8).

A. Laboratory power signal from IEEE

With the aim to provide a standard signal, a real power signal from the IEEE 1159.2 Working Group database, phase B from wave 1 in their dataset, was used to validate the proposed method showing an accurate detection for disturbances sag and harmonic content.

In Fig. 9.a it could be seen that the signal shows a disturbance between 0.3-0.4 seconds, normalized RMS falls to 24.75% with the proposed methodology and a sag is detected as shown in Fig 9.b. No flicker has been detected at the signal so no correction is needed for the signal normalized RMS. In Figure 9.c tracking error is present as shown for the MGA-PQA methodology and the proposed methodology showing a result of $\Delta = 21.009\%$, $RSE = 0.578\%$

for the proposed methodology and $\Delta = 39.562\%$, $RSE = 1.749\%$ for the MGA-PQA methodology. Harmonic content is estimated by the proposed method, an amplitude of $5.82\% \pm 0.87\%$ is estimated for the third order, $3.44\% \pm 0.38\%$ for the fifth order, $2.46\% \pm 0.28\%$ for the seventh order and $0.38\% \pm 0.1\%$ for the ninth order.

Because of this signal is generated under a controlled environment, its frequency is about to 60Hz; at the fundamental waveform DE block, a frequency of 59.9521 Hz is estimated. By the use of a longer time window, the MGA-PQA is expected to fail at voltage sag estimation if the disturbance is present at some point where the phase offset difference of the waveform generated by the fixed frequency method and the fundamental waveform is relatively high in magnitude.

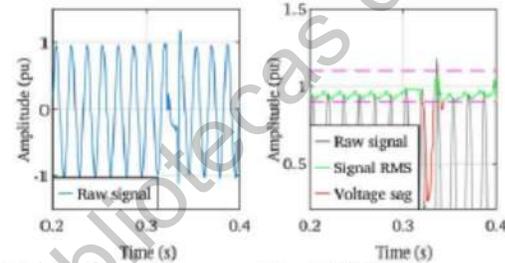


Figure 9. a. Raw signal Figure 9. b. RMS analysis

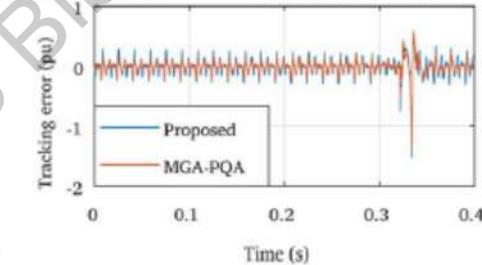


Figure 9. c. Tracking error Figure 9. IEEE Working Group signal analysis by the proposed method

B. Power signal from a hospital in Spain

Having as a goal to provide a second real power signal test, a sanitary facility study has been done. The analysis of an uncontrolled environment power signal obtained by a proprietary acquisition system from a hospital at Valladolid, Spain, has been accomplished. Having in mind that this signal was acquired in Spain the fundamental frequency is expected to be 50 Hz, estimation by the proposed methodology solved it as 50.0209 Hz. The raw signal is shown in Fig. 10.a. A voltage sag is detected by the proposed methodology in 0.16-0.24 seconds time range as shown in Fig. 10.b. The tracking error of the MGA-PQA methodology and the proposed methodology could be seen in Fig 10.c where the proposed methodology tracking error seems lower compared with the other methodology, confirmed by the numerical results of $\Delta = 21.009\%$, $RSE = 0.57828\%$ for the proposed methodology and $\Delta = 39.562\%$, $RSE = 1.735\%$ for the MGA-PQA methodology.

Harmonic content is analyzed by the proposed methodology showing an amplitude of $1.12\% \pm 0.28\%$ for the third order, $0.49\% \pm 0.11\%$ for the fifth order, $0.36\% \pm 0.07\%$ for the seventh order and $0.52\% \pm 0.05\%$ for the ninth order respectively.

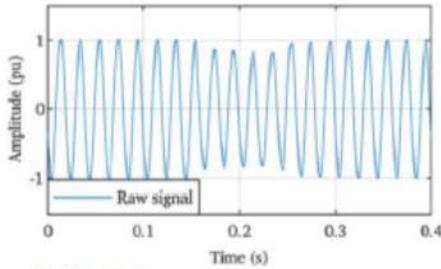


Figure 10. a. Raw signal

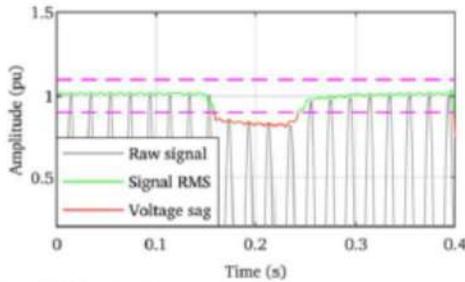


Figure 10. b. RMS analysis

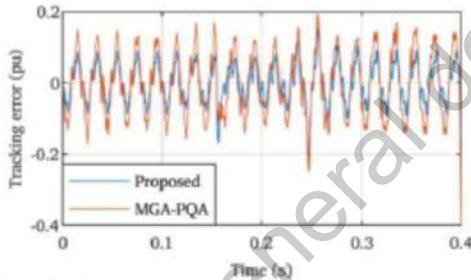


Figure 10. c. Tracking error

Figure 10. Hospital signal analysis by the proposed method

VII. DISCUSSION AND ANALYSIS

An analysis of the results of the previous section is needed. In this section, analysis and discussion of the results is performed.

In section IV B a group of strategies for DE are presented. These strategies are studied where using DE/Best/1* as the mutation strategy shows generally more favorable results for high population sizes, where only 3 generations are needed to obtain a 0.16% RSE for a population of 400 agents with no previous information of the signal. The number of generations needed is expected to decrease when initial population parameters are distributed centered on last window values. A new statistical distribution based on a constrained normal distribution is presented for this process.

A test suite has been performed showing the mean and the standard deviation of maximum absolute difference (Δ) and

RSE by the use of the MGA-PQA methodology and the proposed methodology using 60 Hz standard. Also, fundamental frequencies deviations of -0.5% , 1% and 2% were tested. Ten iterations per configuration are run, where a configuration is represented by a synthetic signal generated: a sag with amplitude in the range of $(0.8, 0.9)$ pu and a length in the range of $(0.05, 0.10)$ s, a swell with amplitude in the range of $(1.1, 1.2)$ pu and a length in the range of $(0.05, 0.10)$ s, a flicker with a frequency in the range of $(10, 20)$ Hz and an amplitude in the range of $(0.2, 0.3)$ pu, a 3rd harmonic content with an amplitude in the range of $(0.05, 0.10)$ pu, a 9th harmonic content with an amplitude in the range of $(0.05, 0.10)$ pu and a combination of the sag, flicker and 9th harmonic content described before. The results of this test suite are shown in Table III.

For each test-case 100 signals were generated. After applying the proposed methodology and the MGA-PQA methodology on each one, a fit is obtained. The error vector is calculated by using (7) and (8). Average and standard deviation of the errors vector are calculated for each methodology.

TABLE III. RESULTS OF THE TEST SUITE PERFORMED

Test signal	Method	60 Hz	
		Δ (%)	RSE (%)
Sag	MGA-PQA	12.37±2.117	0.09±0.017
	Proposed	11.04±3.183	0.04±0.031
Swell	MGA-PQA	10.28±1.411	0.07±0.004
	Proposed	13.77±5.136	0.11±0.236
Flicker	MGA-PQA	18.43±1.25	1.08±0.189
	Proposed	9.4±0.956	0.42±0.077
3rd H.	MGA-PQA	6.14±0.998	0.04±0.008
	Proposed	0.54±0.015	0±0
9th H.	MGA-PQA	5.65±1.032	0.04±0.008
	Proposed	0.47±0.007	0±0
Mixed	MGA-PQA	18.79±1.909	1.08±0.101
	Proposed	14.14±4.883	0.45±0.107
Test signal	Method	59.7 Hz	
		Δ (%)	RSE (%)
Sag	MGA-PQA	37.77±0.989	4.78±0.152
	Proposed	10.24±2.216	0.04±0.03
Swell	MGA-PQA	38.76±1.672	4.65±0.157
	Proposed	12.09±2.905	0.03±0.015
Flicker	MGA-PQA	47.95±0.801	5.73±0.153
	Proposed	9.06±1.111	0.39±0.083
3rd H.	MGA-PQA	45.84±1.854	4.9±0.117
	Proposed	0.18±0.029	0±0
9th H.	MGA-PQA	38.88±1.563	5.14±0.16
	Proposed	0.32±0.008	0±0
Mixed	MGA-PQA	49.51±1.454	6.39±0.272
	Proposed	15.04±3.236	0.48±0.07
Test signal	Method	59.4 Hz	
		Δ (%)	RSE (%)
Sag	MGA-PQA	68.44±0.838	17.51±0.444
	Proposed	11.57±4.426	0.07±0.125
Swell	MGA-PQA	69.19±0.928	16.49±0.59
	Proposed	12±4.823	0.08±0.153
Flicker	MGA-PQA	88.01±1.213	18.01±0.314
	Proposed	8.91±1.114	0.37±0.089
3rd H.	MGA-PQA	75.33±1.543	17.36±0.117
	Proposed	0.24±0.035	0±0
9th H.	MGA-PQA	72.02±1.16	17.28±0.115
	Proposed	0.25±0.032	0±0
Mixed	MGA-PQA	92.01±1.335	18.5±0.631
	Proposed	14.44±3.72	0.5±0.099

The proposed methodology shows more accurate results compared with the MGA-PQA methodology even when

using 58.8 Hz as the fundamental frequency.

Differences between the MGA-PQA methodology and the proposed methodology presented in section IV lead to different results. By using the MGA-PQA methodology a DE parameter search is conducted for each half cycle, using zero crossings as the indicator, resulting in a peak amplitude value. The assumption of the standard frequency presence at the fundamental waveform could drive to a low accuracy signal fitting where PQD could not be detected and characterized. A fundamental frequency difference for a 60Hz standard, a 5% difference, has shown a high loss of accuracy in the previous fixed frequency method, showing an interruption when a flicker is present. Through the frequency and the phase estimation of the signal fundamental waveform by time window, a new level of stability is reached where the proposed methodology adapts itself effectively to real power signals in an automated way. The results obtained from the analysis of synthetic and real power signals are as they were expected to be, given that frequency search space is compliant with valid fundamental waveform frequency range.

Given that harmonic content frequencies are multiples of the fundamental waveform frequency a precise estimation of the last one must be performed in order to design and calculate the total harmonic distortion (THD). As the order of the harmonic content grows error does as.

VIII. CONCLUSIONS

After the assessment of the results presented in this research, several conclusions are reached. These conclusions are related to the parallel implementation of the algorithm and the use of DE as a method for fitting the PQD mathematical model used.

In conclusion, current research presented a new methodology based on a parallelization scheme for minimizing the computational resources that the computationally intensive technique of definition evolution requires. This parallel structure allows a decrease in a significant amount the processing time by applying calculations in parallel structures at high speed diminishing the computational effort by the use of hardware dedicated to graphics processing through CUDA and OpenCL libraries. Nevertheless, the architecture introduced shows simplicity as one of its characteristics in an open architecture.

The presented methodology uses differential evolution as its main module for its construction. Through the implementation of libraries that allow the use of graphics processing units, a parallelization of this technique is reached. As a consequence of the computational scheme shift, the result of this case study, a complete mathematical model fitting of a signal, is a speed-up of 37 times. Demonstrating the power in the use of both techniques together, leading to a minimization of the resources needed for the processing.

The implementation of the methodology in the case study leads to an on-line monitoring power quality system with high accuracy in the measurement of power disturbances. This new methodology has been validated through tests using synthetic and real power signals, which contain different types of disturbances such as isolated and mixed. A remarkable improvement has been obtained compared with

the MGA-PQA methodology, reaching a precision gain of 5% for signals whose fundamental wave frequency is equal to the fixed standard and a precision gain of 69% when dealing with signals whose fundamental wave frequency differs by 1% from the standard frequency.

It has been demonstrated that the proposed methodology is capable of making a considerable contribution to the scope of power quality monitoring. Computation of evaluation function values in the differential evolution algorithm has been accelerated by the use of parallel computing obtaining an on-line power quality monitoring system as a result. The future aims for using parallel computing along with meta-heuristic and artificial intelligence algorithms. The compound of these techniques would illuminate the various uncertainties that are currently present in the field of power quality.

REFERENCES

- [1] Y. Ma, X. Yu, and Y. Niu, "A parallel heuristic reduction based approach for distribution network fault diagnosis," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 548-559, Dec. 2015, doi:10.1016/j.ijepes.2015.05.027.
- [2] A. Delévacq, P. Delisle, M. Gravel, and M. Krajecki, "Parallel Ant Colony Optimization on Graphics Processing Units," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 73, no. 1, pp. 52-61, Jan. 2013, doi:10.1016/j.jpdc.2012.01.003.
- [3] K. Luu, M. Noble, A. Gesret, N. Belayouni, and P-F. Roux, "A parallel competitive Particle Swarm Optimization for non-linear first arrival traveltimes tomography and uncertainty quantification," *Comput. Geosci.*, vol. 113, pp. 81-93, Apr. 2018, doi:10.1016/j.cageo.2018.01.016.
- [4] S. Iwata and Y. Fukuyama, "Verification of Dependability on Parallel Differential Evolution Based Voltage and Reactive Power Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 27, pp. 140-145, Jan. 2016, doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.733.
- [5] P. Salmerón Revuelta, J. Prieto Thomas, and S. Pérez Litrán, *Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality*. Academic Press, 2016.
- [6] M. A. S. Masoum and E. Fuchs, *Power quality in power systems and electrical machines*, 2nd ed. Academic Press/Elsevier, 2015.
- [7] S. Chattopadhyay, M. Mitra, and S. Sengupta, *Electric power quality*. Springer, 2011.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)." 2009, doi:10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- [9] M. Naglic, L. Liu, I. Tyuryukanov, M. Popov, M. A. M. M. van der Meijden, and V. Terzija, "Synchronized measurement technology supported AC and HVDC online disturbance detection," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 160, pp. 308-317, Jul. 2018, doi:10.1016/j.epsr.2018.03.007.
- [10] M. Lopez-Ramirez, E. Cabal-Yepes, L. Ledesma-Carrillo, H. Miranda-Vidales, C. Rodriguez-Donate, and R. Lizarraga-Morales, "FPGA-Based Online PQD Detection and Classification through DWT, Mathematical Morphology and SVD," *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 769, Mar. 2018, doi:10.3390/en11040769.
- [11] O. P. Mahela and A. G. Shaik, "Recognition of power quality disturbances using S-transform based ruled decision tree and fuzzy C-means clustering classifiers," *Appl. Soft Comput.*, vol. 59, pp. 243-257, Oct. 2017, doi:10.1016/j.asoc.2017.05.061.
- [12] P. Kanirajan and V. Suresh Kumar, "Power quality disturbance detection and classification using wavelet and RBFNN," *Appl. Soft Comput.*, vol. 35, pp. 470-481, Oct. 2015, doi:10.1016/j.asoc.2015.05.048.
- [13] A. Y. Jaen-Cuellar, L. Morales-Velazquez, R. de J. Romero-Troncoso, D. Morfígo-Sotelo, and R. A. Osorio-Rios, "Micro-genetic algorithms for detecting and classifying electric power disturbances," *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, pp. 379-392, 2017, doi:10.1007/s00521-016-2355-z.
- [14] W. Bozejko, M. Uchroński, and M. Wodecki, "Parallel metaheuristics for the cyclic flow shop scheduling problem," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 95, pp. 156-163, May 2016, doi:10.1016/j.cie.2016.03.008.
- [15] Z.-H. Hu, "Heuristics for solving continuous berth allocation problem considering periodic balancing utilization of cranes," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 85, pp. 216-226, Jul. 2015, doi:10.1016/j.cie.2015.03.017.

- [16] T. Dokeroglu, "Hybrid teaching-learning-based optimization algorithms for the Quadratic Assignment Problem," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 85, pp. 86–101, Jul. 2015, doi:10.1016/j.cie.2015.03.001.
- [17] W. Niu, Z. Feng, C. Cheng, and X. Wu, "A parallel multi-objective particle swarm optimization for cascade hydropower reservoir operation in southwest China," *Appl. Soft Comput.*, vol. 70, pp. 562–575, Sep. 2018, doi:10.1016/j.asoc.2018.06.011.
- [18] D. R. Penas, J. R. Banga, P. Gonzalez, and R. Doallo, "Enhanced parallel Differential Evolution algorithm for problems in computational systems biology," *Appl. Soft Comput.*, vol. 33, pp. 86–99, Aug. 2015, doi:10.1016/j.asoc.2015.04.025.
- [19] D. M. Pedroso, M. R. Bonyadi, and M. Gallagher, "Parallel evolutionary algorithm for single and multi-objective optimisation: Differential evolution and constraints handling," *Appl. Soft Comput.*, vol. 61, pp. 995–1012, Dec. 2017, doi:10.1016/j.asoc.2017.09.006.
- [20] P. Nejedly, F. Plesinger, J. Halamek, and P. Jurak, "CudaFilters: A SignalPlant library for GPU-accelerated FFT and FIR filtering," *Softw. Pract. Exp.*, vol. 48, no. 1, pp. 3–9, Jan. 2018, doi:10.1002/spe.2507.
- [21] G. Zhou et al., "A novel GPU-accelerated strategy for contingency screening of static security analysis," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 83, pp. 33–39, 2016, doi:10.1016/j.ijepes.2016.03.048.
- [22] S. Luthra, "High Level Synthesis and Evaluation of an Automotive RADAR Signal Processing algorithm for FPGAs," University of Windsor, 2017.
- [23] C. Liu, R. Ma, H. Bai, F. Gechter, and F. Gao, "A new approach for FPGA-based real-time simulation of power electronic system with no simulation latency in subsystem partitioning," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 99, pp. 650–658, 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2018.01.053.
- [24] M. S. Ben Ameur and A. Sakly, "FPGA based hardware implementation of Bat Algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 58, pp. 378–387, Sep. 2017, doi:10.1016/j.asoc.2017.04.015.
- [25] H. Setiadi, A. U. Krisnanto, N. Mithulananthan, and M. J. Hossain, "Modal interaction of power systems with high penetration of renewable energy and BES systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 97, pp. 385–395, 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2017.11.021.
- [26] M. Singh, V. Telukunta, and S. G. Srivani, "Enhanced real time coordination of distance and user defined over current relays," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 98, pp. 430–441, 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2017.12.018.
- [27] H. M. G. C. Branco, M. Oleskovicz, D. V. Coury, and A. C. B. Delbem, "Multiobjective optimization for power quality monitoring allocation considering voltage sags in distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 97, pp. 1–10, Apr. 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2017.10.011.
- [28] P. Baraldi, G. Bonfanti, and E. Zio, "Differential evolution-based multi-objective optimization for the definition of a health indicator for fault diagnostics and prognostics," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 102, pp. 382–400, Mar. 2018, doi:10.1016/j.ymssp.2017.09.013.
- [29] M. Z. Baig, N. Aslam, H. P. H. Shum, and L. Zhang, "Differential evolution algorithm as a tool for optimal feature subset selection in motor imagery EEG," *Expert Syst. Appl.*, vol. 90, pp. 184–195, Dec. 2017, doi:10.1016/j.eswa.2017.07.033.
- [30] M. Pal and S. Bandyopadhyay, "Many-objective feature selection for motor imagery EEG signals using differential evolution and support vector machine," in 2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), 2016, pp. 1–6, doi:10.1109/MicroCom.2016.7522574.
- [31] T. Niu, J. Wang, K. Zhang, and P. Du, "Multi-step-ahead wind speed forecasting based on optimal feature selection and a modified bat algorithm with the cognition strategy," *Renew. Energy*, vol. 118, pp. 213–229, Apr. 2018, doi:10.1016/j.renene.2017.10.075.
- [32] E. Osaba, F. Diaz, E. Onieva, R. Carballedo, and A. Perallos, "AMCPA: A population metaheuristic with adaptive crossover probability and multi-crossover mechanism for solving combinatorial optimization problems," *Int. J. Artif. Intell.*, vol. 12, no. 2, pp. 1–23, 2014.
- [33] W. He, Q. Miao, M. Azarian, and M. Pecht, "Health monitoring of cooling fan bearings based on wavelet filter," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 64–65, pp. 149–161, Dec. 2015, doi:10.1016/j.ymssp.2015.04.002.
- [34] K. Y. Chan, T. S. Dillon, and E. Chang, "An Intelligent Particle Swarm Optimization for Short-Term Traffic Flow Forecasting Using on-Road Sensor Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4714–4725, Oct. 2013, doi:10.1109/TIE.2012.2213556.
- [35] R.-C. David, R.-E. Precup, E. M. Petru, M.-B. Rădac, and S. Preitl, "Gravitational search algorithm-based design of fuzzy control systems with a reduced parametric sensitivity," *Inf. Sci. (Nij.)*, vol. 247, pp. 154–173, Oct. 2013, doi:10.1016/j.ins.2013.05.035.
- [36] J. Saadat, P. Moallem, and H. Koofigar, "Training Echo State Neural Network Using Harmony Search Algorithm," *Int. J. Artif. Intell.*, vol. 15, no. 1, pp. 136–179, 2017.
- [37] I. Sillitoe, M. Burton, and E. Owhonda, "An Intelligent, multi-transducer signal conditioning design for manufacturing applications," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 47, pp. 61–69, Oct. 2017, doi:10.1016/j.rcim.2016.12.001.
- [38] Y. Kabalci, S. Kockanat, and E. Kabalci, "A modified ABC algorithm approach for power system harmonic estimation problems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 160–173, Jan. 2018, doi:10.1016/j.epsr.2017.08.019.
- [39] M. Seera, C. P. Lim, C. K. Loo, and H. Singh, "A modified fuzzy min-max neural network for data clustering and its application to power quality monitoring," *Appl. Soft Comput.*, vol. 28, pp. 19–29, Mar. 2015, doi:10.1016/j.asoc.2014.09.050.
- [40] CENELEC, "EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems," 2015.
- [41] M. A. Rodriguez-Guerrero, R. Carranza-Lopez-Padilla, R. A. Osornio-Rios, and R. de J. Romero-Troncoso, "A novel methodology for modeling waveforms for power quality disturbance analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 14–24, Feb. 2017, doi:10.1016/j.epsr.2016.09.003.
- [42] M. A. Rodriguez-Guerrero, A. Y. Jaen-Cuellar, R. D. Carranza-Lopez-Padilla, R. A. Osornio-Rios, G. Herrera-Ruiz, and R. de J. Romero-Troncoso, "Hybrid Approach based on GA and PSO for Parameter Estimation of a Full Power Quality Disturbance Parameterized Model," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, pp. 1–1, Aug. 2017, doi:10.1109/TII.2017.2743762.
- [43] B. Xie, S. Gong, and G. Tan, "LiPro: light-based indoor positioning with rotating handheld devices," *Wirel. Networks*, vol. 24, no. 1, pp. 49–59, Jan. 2018, doi:10.1007/s11276-016-1312-1.
- [44] H. A. Kloub and F. Alkhatib, "Impact of increased deployment of distributed photovoltaic systems on power grid in Jordan challenges and potential solutions," in 2017 10th Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference (JIEEC), 2017, pp. 1–4, doi:10.1109/JIEEC.2017.8051411.
- [45] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces," *J. Glob. Optim.*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997, doi:10.1023/A:1008202821328.
- [46] K. V. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer, 2005.
- [47] V. Feoktistov, *Differential Evolution: In Search of Solutions*. Springer US, 2006, doi:10.1007/978-0-387-36896-2.
- [48] H. Maaranen, K. Miettinen, and A. Penttinen, "On initial populations of a genetic algorithm for continuous optimization problems," *J. Glob. Optim.*, vol. 37, no. 3, pp. 405–436, Jan. 2007, doi:10.1007/s10898-006-9056-6.
- [49] W. F. Sacco and A. C. Rios-Coelho, "On Initial Populations of Differential Evolution for Practical Optimization Problems," in *Computational Intelligence, Optimization and Inverse Problems with Applications in Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 53–62, doi:10.1007/978-3-319-96433-1_3.
- [50] L. H. B. Liboni, M. C. de Oliveira, and I. N. da Silva, "On the problem of optimal estimation of balanced and symmetric three-phase signals," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 91, pp. 155–165, 2017, doi:10.1016/j.ijepes.2017.03.002.
- [51] M. A. Rodriguez-Guerrero, R. Carranza-Lopez-Padilla, R. A. Osornio-Rios, and R. de J. Romero-Troncoso, "A novel methodology for modeling waveforms for power quality disturbance analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 14–24, Feb. 2017, doi:10.1016/j.epsr.2016.09.003.

VIII. Anexo B: Artículo publicado sobre configuración metodológica basada en HHO en Journal JCR

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ



A Novel Methodology for Power Quality Disturbances Detection and Classification in Industrial Facilities

F J Solis-Munoz, D A Elvira-Ortiz, A Y Jaen-Cuellar, R J Romero-Troncoso, and R A Osornio-Rios*

H S P Digital – C A Mecatronica, Facultad de Ingenieria Campus San Juan del Rio, Universidad Autonoma de Queretaro, Rio Moctezuma 249, 76807 San Juan del Rio, Queretaro, Mexico

Received 26 August 2019; revised 21 January 2020; accepted 29 April 2020

The industrial facilities inject noise to the power line. Concerning this issue, researchers are focusing their effort on developing new techniques for analyzing the power quality of the power net. This work presents a novel methodology for power quality disturbances detection and classification based on the Harris hawks optimization algorithm and discrete wavelet transforms decomposition of the signal.

Keywords: Classification, Discrete wavelet transform, Harris hawks optimization, Optimization, Power quality analysis

Introduction

A healthy power net is critical for the continuous manufacturing industry¹. For this reason, there is a concern on power quality (PQ) monitoring for the power lines that feed these facilities.^{2,3} Most PQ analysis solutions are based in detecting and classifying PQD events by using features of power signals or certain transformation of them. Methods developed have used the d-q transform⁴, the continuous wavelet transform^{5,6}, the wavelet packet transform^{7,8}, the S-transform^{9,10}, the empirical mode decomposition¹¹ and the discrete wavelet transform¹²⁻¹⁴ as the base for the extracting features from the signal to analyze. While, regarding to classification techniques, support vector machine¹⁵ (SVM), artificial neural network¹⁶ (ANN), particle swarm optimization¹⁷ (PSO), genetic algorithms (GA)¹⁸ and ant colony framework (ACF)¹⁹ have been studied as well. Recently, novel methodologies have emerged for example using convolutional neural networks (CNN).²⁰ Meta-heuristic optimization algorithms have been used for fitting synthetic to raw power signals as GA combined with particle swarm optimization (PSO)²¹ or differential evolution (DE).²²

In this paper, a novel hybrid methodology for PQD detection and classification is proposed. The work use an optimization method known as Harris hawks optimization (HHO) and DWT decomposition of the signal takes place for obtaining features that allow

classifying the remaining transient PQD. The proposed methodology is validated with synthetic power signal dataset and real power signals from the industry.

Experimental Details

Harris Hawks Optimization (HHO)

Harris hawks optimization algorithm²³ is a meta-heuristic optimization technique. It is nature-inspired in the hunting behavior of Harris hawks, where a family of hawks prey for a rabbit, whose energy decreases over time as it tries to escape. The goal is to minimize the distance from the hawks to the rabbit in order to optimize the function. At first, the energy of the rabbit is high, after that, there is a first exploitation phase, where the rabbit tries to escape jumping and the hawks encircle it. Finally, at the last exploitation phase, the rabbit is so much exhausted that has not enough energy to escape and the prey is completed.

Discrete Wavelet Transform Algorithm (DWT)

The algorithm of discrete wavelet transform²⁴ is used for decomposing a signal by the use of filters repeatedly. Where, for each step (level), there is a low-pass and a high-pass filtering process that results in the approximation and detail coefficients respectively. With it resulting in a higher number of features that can be extracted in order to feed a subsequent classification algorithm as support vector machine (SVM), a decision tree (DT) or a probabilistic neural network (PNN).

*Author for Correspondence
E-mail: raosornio@hspdigital.org

Power Quality Disturbances Detection and Classification

The proposed methodology is based primarily on HHO and DWT. The complete methodology can be divided in two stages, at a first stage the steady PQD are characterized, while at a second stage the transient PQD are analyzed as well. Firstly, the voltage signal for a phase of the power line is acquired by a signal acquisition system, whose sampling frequency can be as high as the resolution of the system needed. In counterpart, because of high frequency content, as transient power quality disturbances and higher order harmonic content, a trade-off must be carried out. In this implementation, a sampling frequency of 10 kHz is used. Secondly, the steady PQD detection block adjust with the aid of HHO the raw power signal to a synthetic power signal whose frequency and phase matches the fundamental sine-wave by reducing the sum of squares error (SSE) using the sine wave mathematical model. The function to minimize, e , is shown in Eq. (1). In this function $x(t)$ represents the captured sample point at time t , f_1 is the estimated fundamental frequency and ϕ_1 is the estimated radial phase for the fundamental sine wave. After this optimization is performed, amplitude is estimated for each half cycle for detecting sag, swell, interruptions and flickers of the fundamental frequency and harmonic content as well by application of HHO too, resulting in $A_h(t)$. This results in a synthetic power signal whose amplitude is defined by half cycles,

expressed as $s(t)$ in Eq. (2).

$$e = \sum_{t \in T} (x(t) - \sin(2\pi f_1 t + \phi_1))^2 \quad \dots (1)$$

$$s(t) = \sum_{h \in \mathcal{N}} (A_h(t) \sin(2\pi h f_1 t + \phi_1)) \quad \dots (2)$$

Thirdly, the transient PQD detection block is used to assess whether the power signal is affected by transient phenomena or not. In this case, the transient PQD that are detected by the system are: impulsive transients and oscillatory transients. In this step, a transient extraction system is used, a signal $a(t)$ is calculated by using the difference between the synthetic signal from the last block and the raw signal as shown in Eq. (3). Immediately after, the level 4 DWT is extracted from the signal. After that result is obtained, an absolute threshold for certain ε is applied over it, resulting in an indicator function $I_\varepsilon(t)$, shown in Eq. (4). Disturbances signatures are extracted by isolating the time ranges where, $I_\varepsilon(t) = 1$. As the last step, a smoothing of this signature is performed and the number of zero-crossings is used for discrimination between the classes, the classification of transient PQD takes place. When the number of zero-crossings is less than 18 the disturbance is classified as an oscillatory transient, otherwise it is classified as an impulsive transient. Examples of the signatures for each kind of disturbance can be seen in Fig. 1, where, the previously described behaviors of the transient PQD are shown.

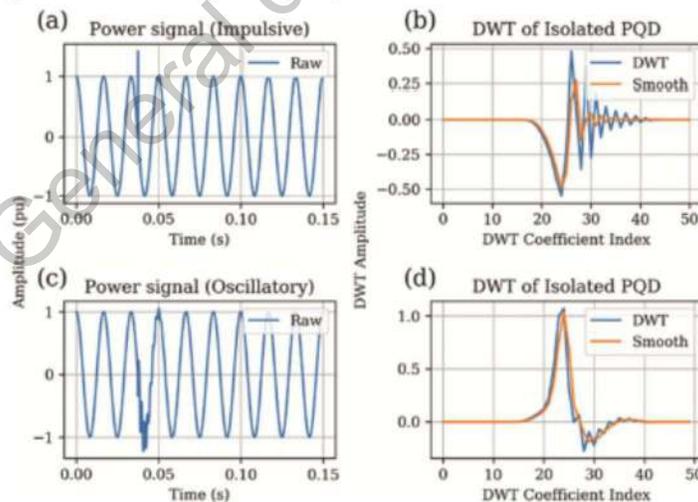


Fig. 1 — (a) Power signal of an impulsive transient; (b) DWT of isolated impulsive transient; (c) Power signal of an oscillatory transient; (d) DWT of isolated oscillatory transient

$$a(t) = x(t) - s(t) \quad \dots (3)$$

$$I_\varepsilon(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } |W_4(t)| > \varepsilon \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (4)$$

Test Bench for Synthetic Power Signals

A series of experiments have been developed to validate the proposed methodology. As a theoretical approach, a bank of synthetic power signals has been generated. Where, for each one of them, a set of one or more power quality disturbances is present. The synthetic signals have been generated by the complete mathematical model described in a recent publication²⁵, taking values for the parameters in the ranges shown in it. Testbench power signals are divided in two groups: steady PQD power signals and transient PQD power signals, as the nature of the methodology requires a different validation for each one of them.

For the steady PQD power signals validation, a data bank of signals containing sag, swell, interruption, flicker and harmonic content is generated. After that, an estimation of the power signal parameters is performed by the methodology, leading to an estimated power signal. The relative sum of squares error is taken as an indicator in order to evaluate how the methodology performed; its formula is presented in Eq. (5). In this equation, $x(t)$ represents the estimation of the raw acquired signal $s(t)$. As values of this indicator approach zero a better fit is obtained, elsewhere, when values of this indicator approach one, a worse fit is obtained. As a result of the testbench execution, a RSSE of 0.06% is obtained for flicker, 1.52% for harmonic content of third, fifth and seventh order, 2.79% for interruption, 0.26% for sag of 3.6% for swell. It can be seen that the algorithm behaves reasonably well for every kind of steady PQD.

$$RSSE(x, s) = \frac{\sum_t (x(t) - s(t))^2}{\sum_t s(t)^2} \quad \dots (5)$$

After the generation of steady PQD power signals, the transient PQD classification block needs to be validated. Having this a goal, synthetic signals containing oscillatory transient disturbances and impulsive transient disturbances are generated. The methodology computes the signal of fourth-level DWT decomposition, extracts the PQD by using an absolute threshold, smooths them and

classifies them by the number of zero-crossings found. A correct classification of 92.2% in the cases for the impulsive transient, while, on the other hand, classification accuracy for the oscillatory transient obtained is 94%. Based on these results, it could be affirmed that the present methodology behaves as expected when tackling with steady and transient PQD.

Industrial Real Power Signal

A real signal sampled from the power lines of an industrial environment present in the IEEE Workgroup database is used as input for the proposed methodology. Using descriptive analysis, the signal seems to contain a sag disturbance, where the amplitude of the sine wave has decreased over 14%. This PQD could lead to malfunction of sensitive digital equipment as micro-processor control systems, what could lead to a stoppage of the production in some part of the plant. The steady PQD analysis of the proposed methodology is performed by using HHO, giving as result the Fig. 2. After measuring the signal decomposition obtained by the optimizer, average amplitude of 86.42 pu is obtained for the fundamental sine-wave, while harmonic content amplitude is under 0.5 pu for each one of the analyzed orders (three, five and seven).

Results and Discussion

The outcome of the analysis for the real power signal agrees with the assumptions made. It can be seen in Fig. 2 as the fitting signal adjusts itself reducing its amplitude in the range between 0.1 and 0.5 seconds. Moreover, the sag effect in the amplitude of the fundamental sine wave in this range is estimated to be over 81%.

The observed results clearly demonstrate the validity of the proposed methodology for real power signals added to the theoretical results shown two sections before. The key principal advantages of the proposed methodology are its reliability, taking into account that no filters are used for isolating frequencies, and its simplicity at implementation, where there exists only HHO and DWT as the main algorithms and no other computational demanding classic techniques, as FFT or Wavelet decomposition, are used.

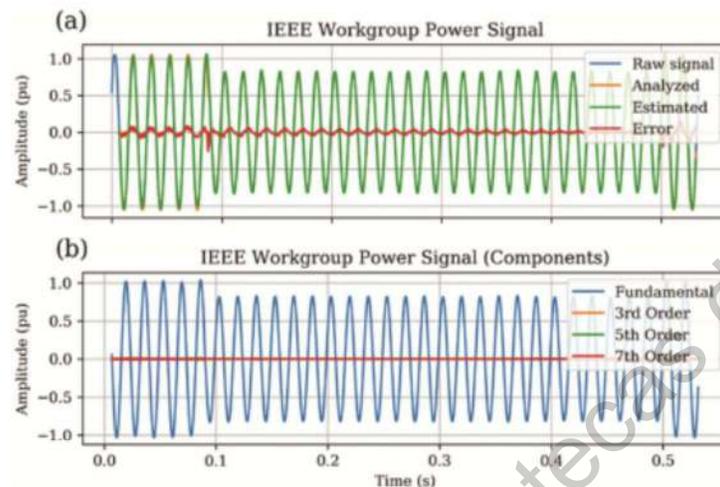


Fig. 2 — (a) Real power signal from IEEE Workgroup, estimated signal by the proposed methodology and estimation error; (b) Real power signal decomposition into fundamental sine-wave and harmonic content of order 3, 5 and 7

Conclusions

To sum up, it has been shown that the proposed methodology is able to characterize and classify steady and transient PQD that are present in power signals. Moreover, it accomplishes the characterization task with the help of a state-of-the-art meta-heuristic optimization algorithm (HHO). Nevertheless, there are hyper-parameters in the optimization algorithm that need to be refined in order to achieve a more efficient implementation for this research area. Added to this, it must be said that in this case there was no need on implementing any intelligent algorithm for the binary classification, as the signal smoothed zero-crossings turned out to be a valuable feature. Future research will aim to obtain an intelligent method that allows a full characterization of the signal in an on-line process.

Acknowledgements

This work was partially supported by CONACyT scholarship 415315 and by project FOFI –UAQ 2018 FIN201812.

References

- Granados-Lieberman D, Romero-Troncoso R J & Osornio-Rios R A, Voltage drop repercussions in industrial processes due to the interaction of several machines in a manufacturing cell, *J Sci Ind Res*, 72(12) (2013) 746–753.
- Thapar A, Saha T K & Zhao Y D, Investigation of power quality categorisation and simulating its impact on sensitive electronic equipment, *IEEE Power Eng Soc Gen Meet*, (2004) 528–533.
- Sharma A, Rajpurohit B S & Singh S N, A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation, *Renew Sustain Energy Rev*, 88 (2018) 363–372.
- Gao Q, Pan F, Yuan F, Pan J, Zhang J & Zhang Y, The classification of multiple power quality disturbances based on dynamic event tree and support vector machine, *Int Conf Adv Mach Learn Technol Appl*, 921 (2020) 321–329.
- Goudarzi M, Vahidi B, Naghizadeh R A & Hosseini S H, Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis, *Int J Electr Power Energy Syst*, 67 (2015) 423–430.
- Pinto S J & Panda G, Performance assessment of islanding detection using complex wavelet in a three-phase utility interactive inverter system, *Asia-Pacific Power Energy Eng Conf*, (2017) 161–167.
- Wan Q & Zhao L, A novel fault section location method for small current grounding fault based on Hilbert-Huang transform with wavelet packet transform preprocessing, *Int Conf Intell Comput Technol Autom*, (2018) 365–370.
- Hmida M A & Braham A, RSWPT for induction machine fault diagnosis based on transient current signal, *Int Multi-Conference Syst Signals Devices*, (2018) 893–898.
- Shamachun H, Assessing the performance of a modified S-transform with probabilistic neural network, support vector machine and nearest neighbour classifiers for single and multiple power quality disturbances identification, *Neural Comput Appl*, 31(4) (2019) 1041–1060.
- Rajan P & Varugese D K, S-Transform using detection of different power quality disturbance in wind energy system, *Middle-East J Sci Res*, 23(3) (2015) 499–505.
- Singh R H, Mohanty S R, Kishor N & Singh D K, Comparison of empirical mode decomposition and wavelet transform for power quality assessment in FPGA, *IEEE Int Conf Power Electron Drives Energy Syst*, (2018) 1482–1488.

- 12 Mahela O P, Dev Kansal K & Agarwal S, Detection of power quality disturbances in utility grid with wind energy penetration, *IEEE India Int Conf Power Electron*, (2018) 1026–1031.
- 13 Mahela O P, Dev Kansal K & Agarwal S, Detection of power quality disturbances in utility grid with solar photovoltaic energy penetration, *India Int Conf Power Electron*, (2018) 1020–1025.
- 14 Deokar S A & Waghmare L M, Discrete wavelet transform based classifier for PQ disturbance detection, *J Sci Ind Res*, 72(2) (2013) 92–100.
- 15 Deshpande R & Raviprakash M S, Detection and analysis of power quality variations for initiating control actions in DGs, *IEEE Int Conf Power Electron Drives Energy Syst*, (2018) 1478–1482.
- 16 González-Bueno J M, Palomares-Salas J C, González-De-La-Rosa J J, Florencias-Oliveros O, Sierra-Fernández J M, Espinosa-Gavira M J & Agüera-Pérez A, PQD classifier based on higher-order statistics and total harmonic distortion, *Renew Energy Power Qual J*, 17 (2019) 26–30.
- 17 Hafiz F, Swain A, Naik C & Patel N, Efficient feature selection of power quality events using two dimensional (2D) particle swarms, *Appl Soft Comput J*, 81 (2019) 527–541.
- 18 Manimala K, Selvi K & Ahila R, Optimization techniques for improving power quality data mining using wavelet packet based support vector machine, *Neurocomputing*, 77(1) (2012) 36–47.
- 19 Singh U & Singh S N, A new optimal feature selection scheme for classification of power quality disturbances based on ant colony framework, *Appl Soft Comput J*, 74 (2019) 216–225.
- 20 Wang S & Chen H, A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using deep convolutional neural network, *Appl Energy*, (2019) 1126–1140.
- 21 Rodríguez-Guerrero M A, Jaen-Cuellar A Y, Carranza-Lopez-Padilla R D, Osorio-Rios R A, Herrera-Ruiz G & Romero-Troncoso R J, Hybrid approach based on GA and PSO for parameter estimation of a full power quality disturbance parameterized model, *IEEE Trans Ind Informatics*, 14(3) (2018) 1016–1028.
- 22 Solis-Munoz F J, Osorio-Rios R A, Romero-Troncoso R J & Jaen-Cuellar A Y, Differential evolution implementation for power quality disturbances monitoring using openCL, *Adv Electr Comput Eng*, 19(2) (2019) 13–22.
- 23 Heidari A A, Mirjalili S, Faris H, Aljarah I, Mafarja M & Chen H, Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Futur Gener Comput Syst*, 97 (2019) 849–872.
- 24 Shensa M J, The Discrete Wavelet Transform: Wedding the À Troux and Mallat Algorithms, *IEEE Trans Signal Process*, 40(10) (1992) 2464–2482.
- 25 Zhao L & Long Y, An improved PSO algorithm for the classification of multiple power quality disturbances, *J Inf Process Syst*, 15(1) (2019) 116–126.

IX. Anexo C: Artículo en proceso de envío

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

A novel methodology for model fitting of power quality disturbances based on
specific artificial neural networks

Francisco J. Solis-Munoz, Roque A. Osornio-Rios, Rene J. Romero-Troncoso, Arturo Y. Jaen-Cuellar*

*HSPdigital – CA Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de
Querétaro, Campus San Juan del Río, Río Moctezuma 249, 76807 San Juan del Río, QRO,
México.*

Abstract

The Power Quality Analysis (PQA) in the fourth industrial revolution (Industry 4.0) is nowadays an important issue. In this industrial environment, the cyber-physical systems integrated into the control scheme and working together with the power electro-mechanical machinery, all of these elements connected to the electrical grid, make necessary to study their induced effects. The electrical and electronic devices pollute the power signal creating disturbances that reduce the lifespan of these elements and could lead to system failures with significant economic losses. Therefore, it would be desirable to develop new methodologies that accurately detect or approximate the power disturbances through the use of recent techniques. Then, this paper presents a new methodology for estimating parameters of power disturbances based on a new scheme that uses specific artificial neural networks (SANN). A mathematical model of the disturbances is used for the estimation task by solving an optimization problem with the aid of SANN. In order to validate the proposed methodology, a testbench was performed by using synthetic signals and real

*Email address: ayjaen@hspdigital.org (Arturo Y. Jaen-Cuellar)

signals from two data sets (industrial process and a healthcare facility). As a result, convergence speed has increased as well as simplicity in terms of the implementation.

Keywords: Power quality analysis, Power quality disturbances, Specific Artificial Neural Networks, Power Disturbances Model

1. Introduction

The Industry 4.0 is characterized by a wide variety of electrical and electronic equipment performing critical tasks, integrating now cyber-physical systems [4-6]. In this environment, the complex hardware architectures generate and inject power quality disturbances (PQD) of diverse nature to the electrical grid that they are connected to. This fact makes the electronic components (mostly used as control devices) prone to fail, because they are sensitive to variations in their power supply. As consequence, losses associated to the production operation may appear, such as: production costs, resources, time, equipment damage, and even human injury [7]. The PQD definitions can be found in the UNE-EN 50160 European standard [2] and in the IEEE standard [3]. Accordingly, an important aspect in the industrial environment is the PQA through the generation of new methodologies that characterize the PQD with accuracy and precision. Therefore, methodologies for PQD detection [8,9], classification [10,11] and quantification have been proposed [12-14]. Besides, the artificial intelligence (AI) techniques have become relevant because they are used for obtaining invaluable parameters in the processes [1]. However, just a few works consider the AI as the core technique, instead of a supporting technique. The recent methodologies use the AI algorithms as an auxiliary tool to give support to the classical methodologies, adding a layer of complexity without exploiting its full potential.

19 Thus, there is an opportunity to improve the PQA by proposing a new methodology that
20 uses the AI as the core tool, instead of an auxiliary complement. Even more, this approach
21 would allow to obtain a clear, clean, compact and simple methodology capable to provide
22 estimations with high accuracy and precision.

23 On the other side, previous classic methodologies have focused on either the time-
24 frequency transformations of the signal, as the S-transform [15,16], or decomposing the
25 raw signal into different modes, as wavelet transform [17] or principal curves [18]. After
26 this process is completed, the methodology classifies or quantifies each power quality
27 disturbance found. Thus, for the classification task of the signal the techniques used are
28 primarily based on hard thresholds or machine learning tools. Meanwhile, for the
29 quantification task the techniques used are mainly focused on fitting the signal to a
30 mathematical model by using either the least squares minimization or the meta-heuristic
31 optimization algorithms. Particularly speaking, the classification methods allow the
32 detection of PQD in the power grid, but these methods are not able to estimate the degree of
33 incidence for the disturbance detected. Therefore, the aforementioned task is accomplished
34 by quantification methodologies, which allow to do a follow up for the evolution of each
35 power disturbance over the time. With this, an early forecast of the fail can be achieved by
36 these methods, preventing losses at industrial facilities. Hence, it is seen an area of
37 opportunity because all the analyzed methodologies in the literature are based mainly on
38 fitting a power signal using a partial mathematical model of the disturbances, that apply
39 multi-techniques schemes or complex time-consuming solutions. For example, least square
40 minimization fitting is an analytical method that has been already implemented by different
41 researchers for this goal, but not all the disturbances are considered [19–21]. So, while the

42 most complete method [19] analyzes sag, swell, interruptions, flicker and harmonic content,
43 the classical methodologies are based on time-frequency transformations that makes them
44 often suffer from mis-detection problems, when dealing with transient power quality
45 disturbances.

46 Regarding the artificial intelligence approaches, and in order to reduce the loss of
47 information, recent developed methodologies have taken the whole raw signal as an input
48 set in the PQA. Nevertheless, may not be a need to apply a transformation to the voltage
49 signal if machine learning tools are used, and with this in mind the new methodologies are
50 capable to overcome with problems referring to PQD detection, classification, and
51 quantification, no matter their nature. For example, the one-dimensional convolutional
52 neural networks are used in different studies for the classification task of power events
53 [22,23]. The tests for this methodology have shown that it is able to classify different PQD,
54 isolated and mixed, with a low error. However, this kind of neural networks are vulnerable
55 and sensible to external agents, it has been shown that the network can be tricked, resulting
56 in misclassification [24]. Additionally, the training of these neural networks is based on the
57 generation of synthetic signals specifically designed for each type of fail and for each
58 sampling rate, this leads to a large training process, whose results may not be valid for all
59 the disturbs in real conditions. On the other side, in reference to the quantifying task, other
60 kind of artificial neural network has been newly used, it is called specific artificial neural
61 network (SANN), also known as custom neural network (CNN).

62 The structure of the SANN is built for a particular requirement, where a signal fits a
63 mathematical model by applying a feed forward neural network. This technique has been
64 used in areas like mathematics [25] and materials science [26], and recently a work shows

65 how a methodology can be implemented for fitting oscillatory transient disturbances
66 presented in electric signals [27], but other than this, the SANN has not been widely
67 exploited in the PQA. Notwithstanding, the methodology cited does not tackle with other
68 kind of power quality disturbances, therefore, a validation of SANN for this purpose must
69 be performed.

70 This work contributes with a novel methodology based on the structure of SANN along
71 with a complete parameterized model for the detection, classification and quantification of
72 PQD with accuracy and precision. The flexibility of the SANN structure combined with the
73 parameterized model allows developing a methodology whose medullar base is the AI that
74 uses as complementary support the mathematical model. The proposed methodology is
75 named SANN-PQ and it has been designed with the purpose to provide a complete analysis
76 of a wide variety of power quality disturbances; including stationary and transient
77 disturbances. Therefore, by using different SANN structures a simple methodology is
78 achieved that can portray the operations of a modified mathematical model that fits the
79 power disturbances. In this work the proposed methodology is validated through three
80 different data sets: the first one corresponds to a test bench of synthetic signals, the second
81 one corresponds to power signals obtained from an industrial facility, and the last one is a
82 set of signals obtained from a hospital facility. Finally, a comparison of the results has been
83 performed versus other reported methodology, showing that the proposed approach (that
84 only uses SANN structure) is less expensive in terms of the computing time required for its
85 execution, besides it achieves a higher accuracy in the fitting of the model (PQD
86 quantification).

87 2. Theoretical background

88 This section describes in detail the theoretical concepts and the mathematical basis used
89 by the proposed approach named SANN-PQ. Moreover, a brief explanation of the hybrid
90 GA-PSO methodology (for the results comparison) [28] and the one-dimensional deep
91 convolutional neural network (1-DCNN) methodology [29] are presented as well.

92 2.1. Power quality disturbances modeling

93 The complete mathematical model for the different PQDs that could appear in the power
94 grid is developed in [30] and it is adopted in this work. A simplification of this model,
95 without losing its essence, has been done through a generalization of its parameters, and it
96 is described as follows. The expression that contains the fundamental waveform, the
97 harmonic content, and the inter-harmonic content is shown in Eq. (1). This equation
98 simplifies the original model and it adds the possibility to vary, as a function of time, the
99 amplitudes of the harmonic content, independently of the amplitude at the fundamental
100 waveform. Further, it is possible to use the frequencies as a function of time.

$$101 \quad w(t) = A \sum_{\omega_k \in \Omega} \delta_k(t) \cos(\omega_k(t)t + \phi_k) \quad (1)$$

102 From Eq. (1), the $w(t)$ is considered the composed waveform; A express the standard
103 peak amplitude of the fundamental component; each ω_k , contained in Ω , represents the
104 frequency over time for certain waveform present in the signal; ϕ_k means the phase shift;
105 each $\delta_k(t)$ translates to a function, that represents the amplitude variations for each
106 normalized waveform (measured in the dimensionless per units, *pu*).

107 Meanwhile, for handling with transients the Eq. (2) is used for a single transient using
108 the $r_m(t_m)$ term as its contribution to the signal, where an indicator function $\mathbf{1}_{t_m \geq 0}(t)$ deals
109 with the interval related to the transient disturbance. As it could be seen, a transformation

110 of the time variable is made, this is defined as $t_m = t - \alpha_m$. The decay factor of the
 111 transient is captured as τ_m in the equation, the radial frequency and the phase of the
 112 transient are meant to be ω_m and ϕ_m , respectively.

$$113 \quad r_m(t_m) = A c_m \mathbf{1}_{t_m \geq 0}(t) \exp(-t_m/\tau_m) \cos(\omega_m t_m + \phi_m) \quad (2)$$

114 Finally, the noise, $n(t, \mu, \sigma)$, is added to the model as a normal distribution to provide
 115 industrial conditions as real as possible; using μ as the mean and σ as the standard
 116 deviation. The noise that not behaves as a normal distribution is stated in the equation as
 117 $\rho(t)$. The modified model used is finally shown in (3).

$$118 \quad x(t) = w(t) + \sum_{m=1}^M r_m(t - \alpha_m) + n(t, \mu, \sigma) + \rho(t) \quad (3)$$

119 The flexibility of the SANN structure allows to use this modified model in order to
 120 create a specific topology dynamic for the PQD quantification.

121 2.2. Specific Artificial Neural Networks for solving optimization problems

122 Nowadays, the ANNs are powerful tools typically used by researchers to solve
 123 classification and regression problems. They are conformed by inter-connected perceptrons
 124 with an associated activation function and a weight that is used as a multiplier factor for the
 125 connection, also a bias is added as an offset to each perceptron. For a perceptron p , the
 126 output, $o(x)$, being x an input vector, is equal to the evaluation of its activation function, α ,
 127 applied to the sum of its bias, b_p , and the sum-product of the connections weights of the
 128 other perceptrons $q \in E(p)$, $w_{q,p}$ by the input vector values, x_q , as stated in Eq. (4).

$$129 \quad o(x) = \alpha(b_p + \sum_{q \in E(p)} w_{q,p} x_q) \quad (4)$$

130 A recent study presented the SANN, a variant of an ANN, as an alternative solution to
 131 the optimization problems, since it is a feedforward artificial neural network whose

132 operations go strictly after a certain mathematical formulation [31]. The SANN includes
 133 special perceptrons in its structure called operators, which compute the sum, the product,
 134 and other operations by using their inputs. In this technique, the optimization process is
 135 accomplished by a selected training algorithm. When the SANN is trained, the weights and
 136 the biases of the network represent the estimations of the parameters present in the
 137 mathematical model. In the proposed methodology, the SANN structure could be used, as
 138 in an optimization problem, to provide the parameters of a signal that fits a mathematical
 139 model representing a particular kind of PQD in an accurate way.

140 Therefore, the Fig. 1 shows the diagram for the general implementation of the Eq. (1)
 141 based in the SANN structure. Here the time vector is taken as the input signal which is
 142 operated through the cosine function (activation function) and the compensation is made by
 143 the corresponding phase shift whether necessary, this process is added $x|\Omega|$ amounts in
 144 order to obtain the final output.

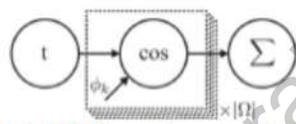


Fig. 1. SANN for stationary optimization

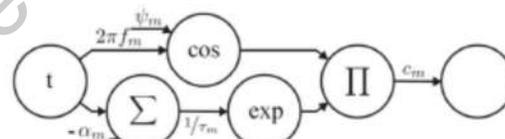


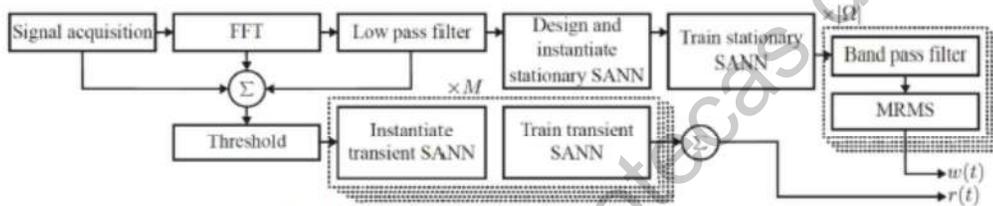
Fig. 2. SANN for transient optimization.

145

146 Meantime, the Fig. 2 shows the way that Eq. (2) is implemented through the SANN
 147 structure. In this case, the diagram indicates that time vector and the parameter α are the
 148 input to the structure. As observed, the operators in this case are more complex, since the
 149 product to give the final output implicates the previous calculation of the cosine function in
 150 parallel with the sum of the exponential value.

151 **3. Methodology**

152 The general block diagram of the proposed methodology based on the SANN structure
 153 and the parameterized model of the PQDs is presented in the Fig. 3. The approach was
 154 designed in order to avoid complexity on its implementation. Thus, the methodology is
 155 divided in two parts: the stationary and the transient disturbances quantification. The steps
 156 followed by the methodology are presented in detail in the following lines.



157
 158 Fig. 3. General block diagram for the implementation of the methodology

159 The proposed work starts with the signal acquisition, in which a time window of the
 160 voltage signal is acquired using a sampling frequency of 8 kHz. Hence, for the stationary
 161 part analysis a fast Fourier transform (FFT) is accomplished over the source signal, this
 162 way, a first approximation of the fundamental frequency is obtained, which is the closest
 163 local maximum to the fundamental frequency. At that point, a low-pass filter is performed
 164 for getting the raw signal lower portion, in the frequency spectrum, and taking the
 165 estimated 9th harmonic component as the limit. The objective of this simple pre-processing
 166 on the signal is to separate the information to facilitate the power quality disturbances
 167 discrimination and quantification. Consecutively, a SANN is designed dynamically, whose
 168 structure is defined by the number of frequencies found in the signal by the FFT. That
 169 means, the outputs of the network would be in function of the stationary content. Then, the
 170 training process of the stationary SANN is performed for obtaining the estimations in

171 frequency and phase of each waveform. This training process is accomplished by the
172 classical backpropagation algorithm known as stochastic gradient descent. After that, each
173 component found is isolated by using a band-pass filter and with the aid of the moving root
174 mean squared (MRMS), the amplitude variations are acquired. Through this structure, the
175 parameters of the radial speed, the phase shift and the amplitude variations for the
176 fundamental waveform and for the harmonic and inter-harmonic content are finally
177 recovered and quantified in the mathematical model presented in $w(t)$ in the Eq. (1).

178 On the other part, the transient analysis is performed by using the FFT previously
179 calculated and by subtracting the signal of the low-pass filter that was obtained at the
180 stationary analysis from the input raw signal. This is done with the aim of detecting when a
181 potential transient disturb starts, thereby an absolute threshold is applied over the resulting
182 signal for the location of the transient. At last, a SANN structure is created for each
183 potential transient detected, where a fit is taken over and the parameters returned by this
184 analysis are $r_m(t_m)$ from the model in Eq. (2).

185 4. Proposed Methodology Validation

186 With the aim of validating the proposed methodology, several of tests were performed
187 by using synthetic signals. For each signal, the relative sum of the squared errors (RSSE),
188 as stated in Eq. (4), and the maximum absolute difference (MAD), presented in Eq. (5),
189 have been calculated. These indicators are used in both, the developed SANN-PQ and the
190 GA-PSO technique for the results comparison. In these equations, the real signal is
191 expressed as x , while the estimated signal is expressed as y . All the values are reported *pu*.

$$192 \quad RSSE(x, y) = \frac{\sum_k (x_k - y_k)^2}{\sum_k x_k^2} \quad (4)$$

193 $MAD(x, y) = \max(|x - y|)$ (5)

194 To ensure the functionality and reliability of the presented SANN-PQ an experiment was
 195 designed by using different test cases, where one or more PQD appears. The synthetic
 196 signals are set with a frequency of 60 Hz, the sampling frequency used is 15360 Hz over
 197 0.2s, and a total of 100 runs are executed. The different case definitions are shown in Table
 198 I and the average of the obtained results, for each one of them, are summarized in the Table
 199 II. The Fig. 4 shows only one signal from each test case and the estimation obtained by
 200 using the SANN-PQ approach and the GA-PSO methodology.

201

Test case	Name	Equation	Parameters range
T1	Healthy	$f(x) = (1 + \mathbf{1}_{\tau \geq \alpha \wedge \tau < \beta} s_f) \cos(\omega t + \phi)$	$s_f \in [-0.05, 0.05]$
T2	Sag	$f(x) = (1 + \mathbf{1}_{\tau \geq \alpha \wedge \tau < \beta} s_f) \cos(\omega t + \phi)$	$s_f \in [-0.9, -0.1]$
T3	Swell	$f(x) = (1 + \mathbf{1}_{\tau \geq \alpha \wedge \tau < \beta} s_f) \cos(\omega t + \phi)$	$s_f \in [0.1, 0.5]$
T4	Interruption	$f(x) = (1 + \mathbf{1}_{\tau \geq \alpha \wedge \tau < \beta} s_f) \cos(\omega t + \phi)$	$s_f \in [-1.0, -0.9]$
T5	Harmonic content	$f(x) = \sum_{k=1}^2 A_k \cos(h_k \omega t + \phi_k)$	$h_k = \{1, 3\}$ $A_1 = 1$ $A_2 \in [0.15, 0.30]$
T6	Flicker	$f(x) = (1 + f_f \cos(\omega_f t + \phi_f)) \cos(\omega t + \phi)$	$\omega_f \in [8\pi, 20\pi]$ $f_f \in [0.05, 0.1]$
T7	Harmonic and Inter-harmonic content	$f(x) = \sum_{k=1}^3 A_k \cos(h_k \omega t + \phi_k)$	$h_k = \{1, 3, 6.5\}$ $A_1 = 1$ $A_2 \in [0.15, 0.3]$ $A_3 \in [0.1, 0.15]$
T8	Transient	$f(x) = \cos(\omega t + \phi) + \mathbf{1}_{\tau \geq \alpha \wedge \tau < \beta} c \exp\left(-\frac{t - \alpha}{\tau}\right) \cos(\omega_t t + \phi_t)$	$c \in [0.5, 0.7]$ $\tau \in [0.003, 0.004]$ $\omega_t = 2000\pi$

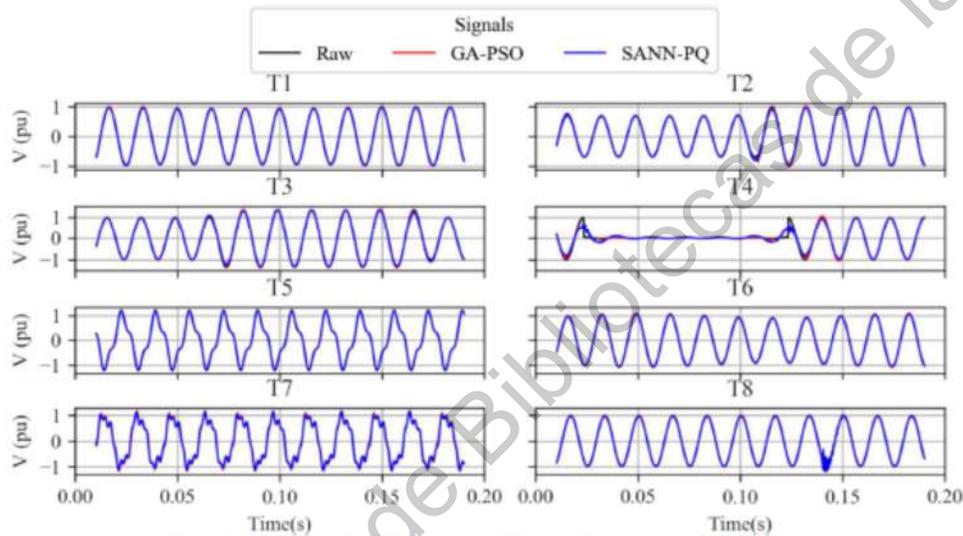
202 Table I. Test-case definitions for the experiment.

Test case	GA-PSO			SANN-PQ (Proposed)		
	RSSE (%)	MAD (%)	Processing time (s)	RSSE (%)	MAD (%)	Processing time (s)
T1	0.0021	1.3635	1.103697	0.0785	3.8322	1.328867
T2	1.1017	18.7893	6.076496	1.4591	22.9605	3.055738

T3	0.1350	14.5914	4.193770	0.3121	20.6148	2.557724
T4	4.6136	40.6611	7.212735	4.4235	43.0791	4.700241
T5	0.0001	0.1938	83.047983	0.2404	6.6576	1.214214
T6	0.0002	0.1396	0.225084	0.0811	3.7285	1.157209
T7	0.1646	8.8349	109.651708	0.4136	10.7097	1.412305
T8	0.1565	36.3473	3.227767	0.0924	13.4737	3.008355

203

Table II. Synthetic tests numerical results.



204-
205

Fig. 4. Synthetic signals generated for each test case of Table I.

206

The results obtained show a decrease in the processing time spent for the quantification

207

process by the proposed methodology compared with the reported GA-PSO technique (in

208

the majority of the test cases). Also, it is observed from table that the proposed

209

methodology maintains the fitting accuracy for most of the cases. Additionally, when using

210

the proposed methodology, a noticeable processing time speed-up, up to 77 times, is

211

reached in the test cases T5 and T7, which are referred to harmonic and inter-harmonic

212

content. Added to this, the proposed method shows more accuracy compared with the GA-

213

PSO methodology when the signal contains transient PQD, as it can be seen in the RSSE

214 and MAD values of the test case T8. The optimization methods are able to avoid
215 misdetection of similar PQD whose parameters differ between them by a low value.
216 Therefore, to show this point, a confusion matrix of the 1-DCNN classification method has
217 been calculated for a total of 10000 runs per test case. The results obtained show that there
218 exists misclassification of PQD between test cases, particularly speaking in the pairs T1-T3
219 and T2-T4 with an error in more than 1% of the executions, and for the pair T1-T6 with an
220 error of 0.0007% of the total runs.

221 5. Experimental setup

222 The general description of the experimental setup is as follows. The signals used for the
223 experimentation stage correspond to a data base from the IEEE working group that
224 represents the industrial environment conditions. Also, a second data set that corresponds to
225 the signals acquired from a health facility is used. Meantime, a software implementation of
226 the methodology is done in Python 3.6.8 and complementing with the Google Tensorflow
227 library 2.0 in its graphical processing unit (GPU) version, which uses the NVIDIA CUDA
228 deep neural network library (cuDNN) as its backend. For the experimentation, the tests
229 were run over a virtual machine instance of Google Cloud Platform using 4 virtual central
230 processing units Intel Skylake and a NVIDIA Tesla P100 GPU. All the signals from both,
231 the industrial environment and the health facility are plotted in Fig. 5 and labeled as U1 to
232 U6, furthermore, their labeling description is detailed in the next subsections.

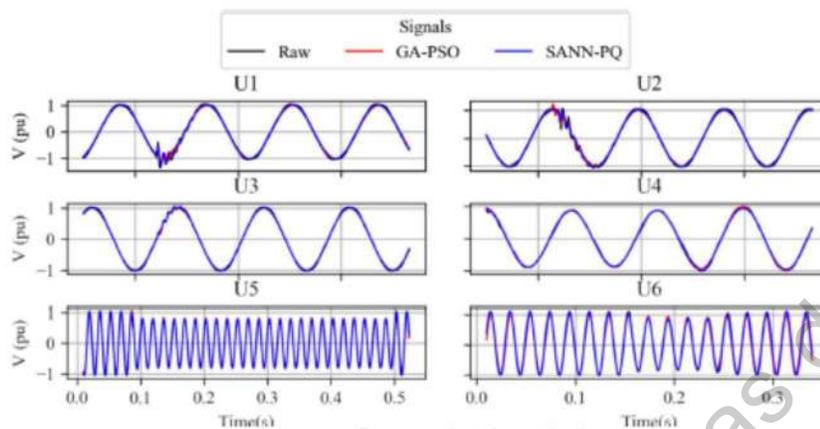


Fig. 5. Real power signals analysis.

233
234

235 5.1. Industrial power signals from the IEEE data base

236 Having in mind that power failures in the continuous manufacturing industry can lead to
237 important economic losses, a set of signals from the IEEE P1159.3 task force of the IEEE
238 working group on monitoring electric power quality are selected and analyzed. Thus, these
239 signals contain transients (U1, U2, and U3), flicker (U4) and sag (U5). The first three types
240 of signals (transient disturbs) belong to the same measurement point and correspond to the
241 three phases, respectively. While the fourth and the fifth signals are not correlated, as they
242 are from different measurement points and their occurrence happened at different times.

243 5.2. Hospital facility data set

244 A fail in the power lines of a health facility could trigger malfunctions in healthcare
245 devices, these could lead to risky health situations as a consequence. A proprietary digital
246 acquisition system (DAS) has been used for collecting the voltage data from the power line
247 form a hospital in Valladolid, Spain. After the collection of the logs over a period of three
248 months, an automatized coarse grained first analysis has been run over the data. From this

249 previsualization of the data, it was observed a PQD that correspond to a voltage sag,
 250 labeled as U6.

251 6. Results and discussion

252 The robustness and the reliability of the proposed approach is proved for the real signals
 253 described in the experimental setup. The numerical results for each real power signal
 254 analyzed are presented in the Table III, where the proposed SANN-PQ methodology shows
 255 a more favorable values in comparison with the GA-PSO. From the table, it is observed the
 256 best results marked in bold, and even though, the best test cases visualized are the U4, U5
 257 and U6. The obtained results, when the proposed approach is applied to the set of real
 258 power signals, confirm the impact of the solution and its prevalence over the reported GA-
 259 PSO alternative. The proposed methodology is proven to be more accurate when fitting the
 260 power signals U4 (flicker), U5 (sag) and U6 (sag), where a lower RSSE and MAD values
 261 are obtained in almost all the cases. Moreover, the proposed technique also shows a more
 262 convenient RSSE indicator value for power signals with PQD transient; U1, U2 and U3,
 263 respectively. It is noticeable that the proposed approach reduces the computational cost of
 264 the optimization task by a speed up of more than 6.5 times for the U5 test case, this is
 265 observed in the comparison of the processing time between GA-PSO and SANN-PQ.

Test case	GA-PSO			SANN-PQ		
	RSSE (%)	MAD (%)	Processing time (s)	RSSE (%)	MAD (%)	Processing time (s)
U1	0.4955	23.5755	13.074557	0.4684	35.4144	4.762100
U2	0.5716	33.5543	18.272139	0.4973	43.2216	3.337736
U3	0.1845	7.0636	14.696974	0.1659	8.2761	3.254040
U4	0.3022	10.1951	15.048643	0.2109	8.8296	2.374716
U5	0.4841	23.6918	28.139294	0.4236	20.6534	4.248778
U6	2.2107	27.1881	55.289110	0.3182	16.9411	36.373999

266 Table III. Real power signals numerical results.

267 From the obtained results, the proposed methodology shows a clear advantage in terms
268 of the optimization accuracy and the computational resources consumed, compared with the
269 GA-PSO methodology. Besides, it demonstrates the limitations that the 1-DCNN
270 classification method has, as it suffers from a lack of quantification, returning a
271 misclassification of the disturbance when the parameter values are close to the threshold
272 values between different PQD classes. The most remarkable result that has been seen in the
273 proposed methodology is when fitting a stationary PQD, where the processing time is
274 reduced dramatically when the harmonic and the inter-harmonic content are present. The
275 reason for this is because the meta-heuristic algorithms need to evaluate the error function
276 for each agent of its population, if the error function is computationally expensive, as it is
277 the case, then it makes the execution of the algorithm expensive as well. This is not the case
278 for the proposed SANN structure, as it is not a population-based algorithm and its
279 computing effort is based in simple operations such as additions and products. As it can be
280 seen from the Table III, the GA-PSO methodology implementation is unsatisfactory
281 because this system shows an increase in the processing time, that even depends of the
282 population size and the complexity in the objective function. Moreover, one of the major
283 drawbacks to adopt this system is its complexity, as it is composed by different
284 heterogeneous processing blocks, that means, different techniques integrate this reported
285 approach.

286 7. Conclusions

287 This work presented a novel methodology based on SANN structure and a
288 parameterized PQD model for the detection and quantifications of different power disturbs,

289 named SANN-PQ. A complete mathematical model reported was modified and used by this
290 methodology for simplify the PQD quantification englobing stationary and transient events.
291 The use of a classical training algorithm based on back-propagation estimation of each
292 parameter is performed. By using the proposed SANN-PQ methodology a benefit is
293 obtained in simplicity of its implementation and fast computation time. This study proves
294 suitability of the proposed methodology for different kinds of PQD. It has been
295 demonstrated its prevalence over the GA-PSO methodology, which shows similar results
296 for estimation error. While this new solution is able to run over 6.5 times faster over non-
297 specific hardware for real signals. Evidence of the use of the presented methodology with
298 real power signals from industrial and sanitary environments are presented as well, showing
299 low estimation error. The proposed methodology could be considered as an affordable
300 alternative in comparison with its predecessor for power quality analysis; this kind of
301 structure is now an open field in power quality. As a future work, a study must be driven on
302 the length of the time window used for the analysis. Moreover, a method based on neural
303 networks that evades local optima when fitting must be discovered. In this way, the
304 methodology presented is simple in concept, reliable, robust and efficient for the
305 quantification of a wide variety of power quality disturbances with estimation RSSE below
306 the 1% for the SANN-PQ with respect to the 3% for the GA-PSO in the real case signals.

307

308 **Acknowledgments**

309 This work was supported partially by SEP-CONACYT 222453-2013 and FOFI-UAQ
310 2018 FIN201812 projects; CONACyT scholarship 783317.

311 **References**

- 312 [1] Y. Lu, Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,
313 J. Ind. Inf. Integr. 6 (2017) 1–10. doi:10.1016/J.JII.2017.04.005.
- 314 [2] UNE, Voltage Characteristics Of Electricity Supplied by Public Electricity
315 Networks, Eur. Std. EN 50160:2011. (2011).
- 316 [3] IEEE, IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality, IEEE
317 Std. 1159–2009. (2009).
- 318 [4] A. Iagăr, G.N. Popa, C.M. Diniş, Investigation of harmonic pollution produced by
319 power tools, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 477 (2019) 012039. doi:10.1088/1757-
320 899X/477/1/012039.
- 321 [5] G.K. Singh, Power system harmonics research: a survey, Eur. Trans. Electr. Power.
322 19 (2009) 151–172. doi:10.1002/etep.201.
- 323 [6] A. Bozicek, J. Kilter, T. Samet, I. Papic, B. Blazic, Harmonic Emissions of Power
324 Electronic Devices Under Different Transmission Network Operating Conditions,
325 IEEE Trans. Ind. Appl. 54 (2018) 5216–5226. doi:10.1109/TIA.2018.2808478.
- 326 [7] A. Sharma, B.S. Rajpurohit, S.N. Singh, A review on economics of power quality:
327 Impact, assessment and mitigation, Renew. Sustain. Energy Rev. 88 (2018) 363–
328 372. doi:10.1016/j.rser.2018.02.011.
- 329 [8] D. Das, T. Chakravorti, P.K. Dash, Hilbert Huang transform with fuzzy rules for
330 feature selection and classification of power quality disturbances, en: 2017 4th IEEE
331 Uttar Pradesh Sect. Int. Conf. Electr. Comput. Electron. UPCON 2017, Institute of
332 Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018: pp. 439–445.
333 doi:10.1109/UPCON.2017.8251088.
- 334 [9] P. Kalyana Sundaram, R. Neela, Analysis and classification of power quality events

- 335 using Hilbert transform and fuzzy system, en: Proc. 2017 3rd IEEE Int. Conf.
336 Sensing, Signal Process. Secur. ICSSS 2017, Institute of Electrical and Electronics
337 Engineers Inc., 2017: pp. 269–274. doi:10.1109/SSPS.2017.8071604.
- 338 [10] S. Wang, H. Chen, A novel deep learning method for the classification of power
339 quality disturbances using deep convolutional neural network, *Appl. Energy*. 235
340 (2019) 1126–1140. doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.160.
- 341 [11] C. Liu, R. Ma, H. Bai, F. Gechter, F. Gao, A new approach for FPGA-based real-
342 time simulation of power electronic system with no simulation latency in subsystem
343 partitioning, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 99 (2018) 650–658.
344 doi:10.1016/j.ijepes.2018.01.053.
- 345 [12] M.A. Rodriguez-Guerrero, A.Y. Jaen-Cuellar, R.D. Carranza-Lopez-Padilla, R.A.
346 Osomio-Rios, G. Herrera-Ruiz, R. de J. Romero-Troncoso, Hybrid Approach Based
347 on GA and PSO for Parameter Estimation of a Full Power Quality Disturbance
348 Parameterized Model, *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 14 (2018) 1016–1028.
349 doi:10.1109/TII.2017.2743762.
- 350 [13] A.Y. Jaen-Cuellar, L. Morales-Velazquez, R. de J. Romero-Troncoso, D. Morinigo-
351 Sotelo, R.A. Osomio-Rios, Micro-genetic algorithms for detecting and classifying
352 electric power disturbances, *Neural Comput. Appl.* 28 (2017) 379–392.
353 doi:10.1007/s00521-016-2355-z.
- 354 [14] F.J. Solis-Munoz, R.A. Osomio-Rios, R.J. Romero-Troncoso, A.Y. Jaen-Cuellar,
355 Differential evolution implementation for Power Quality Disturbances monitoring
356 using OpenCL, *Adv. Electr. Comput. Eng.* 19 (2019) 13–22.
357 doi:10.4316/aece.2019.02002.

- 358 [15] S. Wang, H. Chen, A novel deep learning method for the classification of power
359 quality disturbances using deep convolutional neural network, *Appl. Energy*. 235
360 (2019) 1126–1140. doi:10.1016/J.APENERGY.2018.09.160.
- 361 [16] S. Karasu, Z. Saraç, S-Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Güç Kalitesi
362 Bozulmalarının Sınıflandırılması Classification of Power Quality Disturbances with
363 S- Transform and Artificial Neural Networks Method, (2017) 6–9.
- 364 [17] P. Kanirajan, V. Suresh Kumar, Power quality disturbance detection and
365 classification using wavelet and RBFNN, *Appl. Soft Comput.* 35 (2015) 470–481.
366 doi:10.1016/j.asoc.2015.05.048.
- 367 [18] D.D. Ferreira, J.M. de Seixas, A.S. Cerqueira, C.A. Duque, Exploiting principal
368 curves for power quality monitoring, *Electr. Power Syst. Res.* 100 (2013) 1–6.
369 doi:10.1016/J.EPSR.2013.02.006.
- 370 [19] H. Xiao, J. Wei, Q. Li, Identification of combined power quality disturbances using
371 singular value decomposition (SVD) and total least squares-estimation of signal
372 parameters via rotational invariance techniques (TLS-ESPRIT), *Energies*. 10 (2017).
373 doi:10.3390/en10111809.
- 374 [20] P. Garanayak, G. Panda, P.K. Ray, Power system harmonic parameters estimation
375 using ADALINE-VLLMS algorithm, en: 2015 Int. Conf. Energy, Power Environ.
376 Towar. Sustain. Growth, ICEPE 2015, Institute of Electrical and Electronics
377 Engineers Inc., 2016. doi:10.1109/EPETSG.2015.7510132.
- 378 [21] N.M. Rodrigues, P.M. Ramos, F.M. Janeiro, Comparison of harmonic estimation
379 methods for power quality assessment, en: *J. Phys. Conf. Ser.*, Institute of Physics
380 Publishing, 2018. doi:10.1088/1742-6596/1065/5/052036.

- 381 [22] S. Wang, H. Chen, A novel deep learning method for the classification of power
382 quality disturbances using deep convolutional neural network, *Appl. Energy*. (2019)
383 1126–1140. doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.160.
- 384 [23] Rahul, K. Rajiv, M.M. Tripathi, Long Short-Term Memory-Convolution Neural
385 Network Based Hybrid Deep Learning Approach for Power Quality Events
386 Classification, en: *Lect. Notes Networks Syst.*, Springer, 2019: pp. 501–510,
387 doi:10.1007/978-981-13-3765-9_52.
- 388 [24] Z. Li, D. Zou, J. Tang, Z. Zhang, M. Sun, H. Jin, A Comparative Study of Deep
389 Learning-Based Vulnerability Detection System, *IEEE Access*. 7 (2019) 103184–
390 103197. doi:10.1109/access.2019.2930578.
- 391 [25] S. Zhou, K. Zhang, Structure-specific neural networks for parallel computation of all
392 types of moore-penrose pseudoinverses, *J. Converg. Inf. Technol.* 7 (2012) 8–16.
393 doi:10.4156/jcit.vol7.issue20.2.
- 394 [26] Y. He, H. Li, J. Du, Fitting Methods based on Custom Neural Network for
395 Relaxation Modulus of Viscoelastic Materials, *Int. J. Performability Eng.* 15 (2019)
396 107–115. doi:10.23940/ijpe.19.01.p11.107115.
- 397 [27] X. Xiao, J.H. Lai, C.D. Wang, Parameter estimation of the exponentially damped
398 sinusoids signal using a specific neural network, *Neurocomputing*. 143 (2014) 331–
399 338. doi:10.1016/j.neucom.2014.05.059.
- 400 [28] M.A. Rodriguez-Guerrero, A.Y. Jaen-Cuellar, R.D. Carranza-Lopez-Padilla, R.A.
401 Osornio-Rios, G. Herrera-Ruiz, R. de J. Romero-Troncoso, Hybrid Approach Based
402 on GA and PSO for Parameter Estimation of a Full Power Quality Disturbance
403 Parameterized Model, *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 14 (2018) 1016–1028.

- 404 doi:10.1109/TII.2017.2743762.
- 405 [29] S. Wang, H. Chen, A novel deep learning method for the classification of power
406 quality disturbances using deep convolutional neural network, *Appl. Energy*. 235
407 (2019) 1126–1140. doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.160.
- 408 [30] M.A. Rodriguez-Guerrero, R. Carranza-Lopez-Padilla, R.A. Osornio-Rios, R. de J.
409 Romero-Troncoso, A novel methodology for modeling waveforms for power quality
410 disturbance analysis, *Electr. Power Syst. Res.* 143 (2017) 14–24.
411 doi:10.1016/J.EPSR.2016.09.003.
- 412 [31] X. Xiao, J.-H. Lai, C.-D. Wang, Parameter estimation of the exponentially damped
413 sinusoids signal using a specific neural network, *Neurocomputing*. 143 (2014) 331–
414 338. doi:10.1016/J.NEUCOM.2014.05.059.

X. Anexo D: Carta de registro de propiedad intelectual y cartas de usuario

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: JEAN CUELLAR ARTURO YOSIMAR
OSORNIO RIOS ROQUE ALFREDO
ROMERO TRONCOSO RENE DE JESUS
SOLIS MUÑOZ FRANCISCO JOSE

TITULO: FUNCION DE DESCOMPOSICION DE SEÑALES PARA LA PARAMETRIZACION
DE DISTURBIOS ELECTRICOS

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULARES: JEAN CUELLAR ARTURO YOSIMAR
OSORNIO RIOS ROQUE ALFREDO
ROMERO TRONCOSO RENE DE JESUS
SOLIS MUÑOZ FRANCISCO JOSE

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas conste salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2020-022011263400-01

Ciudad de México, a 3 de marzo de 2020

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ

SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DE REGISTRO PÚBLICO
DEL DERECHO DE AUTOR

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



Universitat Politècnica de València
Departamento de Ingeniería Eléctrica



A QUIEN CORRESPONDA

Presente

Por medio de la presente le informo que en los laboratorios de Eléctrica de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) se han utilizado en sus investigaciones; y se reconoce como usuario del sistema "Función de descomposición de señales para la parametrización de disturbios eléctricos" desarrollado por el grupo HSPDigital de México, específicamente por los investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ):

Jaen Cuellar Arturo Yosimar
Osornio Rios Roque Alfredo
Romero Troncoso Rene de Jesús
Solis Muñoz Francisco José

Dicho módulo ha sido instalado con el objetivo de monitorear en el desarrollo de nuestros proyectos de investigación. Estamos conscientes de que el sistema cuenta con la propiedad de los autores y que están protegidos en México por el Registro de Derechos de autor con número 03-2020-022011263400-01. El uso del sistema se desarrolla con el consentimiento de los autores y basado en un convenio de colaboración existente entre la Universidad Autónoma de Querétaro con la Universidad de Valencia.

Se extiende la presente para los fines que a los interesados convenga.

En Valencia España, a 08 de octubre de 2020,

JOSE ALFONSO| Firmado digitalmente
ANTONINO| por JOSE ALFONSO|
DAVIU| ANTONINO|DAVIU
Fecha: 2020.10.08
20:13:52 +02'00'

Dr. Jose A. Antonino Daviu
Profesor Catedrático de Universidad
Depto. Ingeniería Eléctrica
Universitat Politècnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, ESPAÑA
Tel. 0034963877592; Fax. 0034963877599
e-mail: joanda@die.upv.es

Valladolid, España, 5 de octubre de 2020

CARTA USUARIO

A QUIEN CORRESPONDA

Presente

Por medio de la presente le informo que la Universidad de Valladolid, España se encuentra utilizando en sus laboratorios e instalaciones el sistema FUNCIÓN DE DESCOMPOSICIÓN DE SEÑALES PARA LA PARAMETRIZACIÓN DE DISTURBIOS ELÉCTRICOS desarrollado específicamente por los investigadores:

Jaén Cuellar Arturo Yosimar

Osornio Ríos Roque Alfredo

Romero Troncoso Rene de Jesús

Solis Muñoz Francisco José

Dicho programa se está utilizando en instalaciones de monitoreo de la Universidad de Valladolid en el desarrollo de diferentes proyectos de investigación para detectar y clasificar disturbios eléctricos que se puedan producir en sus redes. Estamos conscientes de que el sistema cuenta con la propiedad de los autores y que esta protegido en México por el Registro de Derechos de autor con número 03-2020-022011263400-01. El uso del programa se desarrolla con el consentimiento de los autores y basado en un convenio de colaboración existente entre la Universidad Autónoma de Querétaro con la Universidad de Valladolid

Se extiende la presente para los fines que a los interesados convenga.

Atentamente



Dr. Daniel Moriño Sotelo
Profesor Titular de Universidad
Universidad de Valladolid

