



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Mecatrónica

## **TESIS**

“Método de mitigación de armónicos y no linealidades causadas por semiconductores de alta velocidad en micro-red eléctrica mediante algoritmos inteligentes”

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias Mecatrónica

### **Presenta:**

Ing. Julio Arturo Caudillo Olmedo

### **Dirigido por:**

Dr. Luis Morales Velázquez

San Juan del Río, Querétaro, 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Método de mitigación de armónicos y no  
linealidades causadas por semiconductores de alta  
velocidad en micro-red eléctrica mediante  
algoritmos inteligentes

**por**

Julio Arturo Caudillo Olmedo

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGMAC-302472



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias Mecatrónica

### TESIS

"Método de mitigación de armónicos y no linealidades causadas por semiconductores de alta velocidad en micro-red eléctrica mediante algoritmos inteligentes"

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ciencias Mecatrónica

**Presenta:**

Ing. Julio Arturo Caudillo Olmedo

**Dirigido por:**

Dr. Luis Morales Velázquez

Sinodales

Dr. Luis Morales Velázquez

Presidente

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Secretario

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz

Vocal

Dr. Jesús Rooney Rivera Guillen

Suplente 1

Dr. Fortino Mendoza Mondragón

Suplente 2

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

# Resumen

Hoy en día no se puede concebir el mundo sin energía eléctrica de potencia. Fuentes de alimentación, variadores de velocidad de motores, cargas de alumbrado fluorescente, convertidores de potencia, entre otros, son utilizados a diario en el sector empresarial y en los hogares. El crecimiento en el uso y demanda de estos equipos, ha traído consigo un problema para la distribución y consumo de electricidad conocido como armónicos de corriente eléctrica. Este disturbio, causante de malformaciones en la señal eléctrica, es originado por los equipos electrónicos que consumen energía eléctrica de forma “no lineal” o no continua en el tiempo, por ejemplo, semi conductores de alta velocidad y fuentes conmutadas. Esta distorsión es compuesta por elementos conocidos como armónicos. La presencia de estos armónicos se puede medir gracias a la Distorsión Armónica total (Total Harmonic Distortion) o THD. Este trabajo de tesis presenta una nueva metodología para la detección, clasificación y mitigación de disturbios armónicos conforme a la norma internacional IEC 61000-1. Esta metodología es basada en el uso e integración de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y una red neuronal artificial para la clasificación de los dos parámetros más importantes de los armónicos, amplitud y fase. Con el uso de una micro-red eléctrica y tres cargas principales: resistiva, semi conductora e inductiva, se desarrollaron más de 200 pruebas con el fin de demostrar la eficiencia de la metodología propuesta. Dicha metodología demuestra una eficiencia de entre 45% y 57% al mitigar los disturbios armónicos causados por las cargas conectadas a la micro-red.

**Palabras clave:** Disturbios, micro-red , FFT, red neuronal, mitigación de armónicos.

# Summary

Nowadays, the world cannot be conceived without electric power. Power supplies, motor speed variators, fluorescent lighting loads, power converters, among others, are used daily in the business sector and in homes. The growth in the use and demand of this equipment has caused a problem for the distribution and consumption of electricity known as harmonics of electrical current. This disturbance, which causes malformations in the electrical signal, is caused by electronic equipment that consumes electrical energy in a "non-linear" or non-continuous manner over time, for example, high-speed semiconductors and switched sources. This distortion is made up of elements known as harmonics. The presence of these harmonics can be measured thanks to the Total Harmonic Distortion (THD). This thesis work presents a new methodology for the detection, classification and mitigation of harmonic disturbances according to the international standard IEC 61000-1. This methodology is based on the use and integration of the Fast Fourier Transform (FFT) and an artificial neural network for the classification of the two most important parameters of harmonics, amplitude and phase. With the use of an electrical microgrid and three main loads: resistive, semiconductor and inductive, more than 200 tests were developed in order to demonstrate the efficiency of the proposed methodology. This methodology demonstrates an efficiency of between 45% and 57% in reducing harmonic disturbances caused by the loads connected to the microgrid.

**Keywords:** Disturbance, microgrid, FFT, mitigation of harmonic.

# Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una manera u otra, han hecho posible la realización de esta tesis de maestría.

En primer lugar, agradezco a mi asesor el Dr. Luis Morales Velázquez por creer en mi capacidad y por la valiosa orientación a través de la investigación para culminar este trabajo. Gracias a su conocimiento y experiencias, he podido completar este proyecto con éxito.

También deseo agradecer a los miembros del comité al Dr. Jean, Dr. Elvira, Dr. Rivera y el Dr. Mendoza, por apoyarme en el proceso y sus comentarios que hacen que el trabajo sea mejor y culminar mi posgrado con una mejor visión de la investigación en México.

Por otro lado, a la Universidad Autónoma de Querétaro y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme la oportunidad de estudiar el posgrado mediante la beca otorgada 1103683.

En segundo lugar, me gustaría expresar el agradecimiento que siento hacia mis padres, no encuentro las palabras para agradecer por todo el apoyo, paciencia, comprensión y amor que me han brindado durante toda mi vida, les agradezco la confianza inquebrantable y la motivación constante, lo cual me impulso a seguir adelante. Reconozco el esfuerzo y sacrificio que han hecho para brindarme una buena educación y oportunidades necesarias para alcanzar cada meta que me he propuesto, espero haberlos hecho sentir orgullosos con este logro y seguir contando con su apoyo y cariño en cada nueva etapa que venga.

Finalmente, me gustaría agradecer a mis amigos, significo mucho para mi tenerlos a mi lado durante de esta etapa tan importante, gracias por su apoyo, su ánimo constante y sus palabras de aliento, que me impulsaron a seguir adelante, por estar disponibles para escucharme, gracias por compartir conmigo su tiempo, alegría y las experiencias que pasamos juntos, fue lo que me permitió mantener el equilibrio entre mi vida académica y social. Espero seguir contando con su amistad en los años venideros.

# Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes .....	3
1.2.1 Detección de disturbios.....	3
1.2.2 Clasificación de disturbios.....	5
1.2.3 Mitigación de disturbios.....	7
1.3 Descripción del problema.....	9
1.4 Justificación.....	10
1.4.1 Justificación.....	10
1.4.2 Contribución social.....	11
1.5 Hipótesis y Objetivos.....	12
1.5.1 Hipótesis general.....	12
1.5.2 Objetivo general.....	12
1.5.3 Objetivos específicos.....	12
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	13
2.1 Micro-redes.....	13
2.2 Redes convencionales.....	15
2.3 Transformada Rápida de Fourier.....	16
2.4 Redes Neuronales.....	18
2.5 Distorción Armónica Total.....	20
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1 Panorama general del proyecto.....	22
3.2 Micro-red eléctrica.....	23
3.2.1 Cargas de la micro-red.....	26
3.3 Medición y monitoreo.....	28
3.3.1 Medición y monitoreo fuera de línea.....	30

3.3.2	Medición y monitorio en línea.....	31
3.4	Detección de disturbio.....	31
3.4.1	Cálculo de amplitud y fase en los armónicos.....	32
3.4.2	Chorroo espectral.....	32
3.4.3	Detección de disturbios fuera de línea.....	33
3.4.4	Detección de disturbios en línea.....	34
3.5	Clasificación de disturbios.....	36
3.5.1	Bloque FFT.....	37
3.5.2	Red Neuronal.....	37
3.5.3	Clasificación de disturbios fuera de línea.....	39
3.5.3.1	Señales sintéticas de entrenamiento.....	41
3.5.3.2	Clasificación de disturbios a partir de ecuaciones.....	44
3.5.4	Clasificación de disturbios en línea.....	46
3.6	Mitigación de disturbios .....	48
3.6.1	Cruce por cero .....	49
3.6.2	Mitigación de disturbios fuera de línea.....	51
3.6.3	Mitigación de disturbios en línea.....	52
4.	RESULTADOS.....	54
4.1	Resultados de medición y monitoreo.....	54
4.2	Resultados de detección de disturbios.....	60
4.3	Resultados de clasificación de disturbios.....	66
4.4	Resultados de mitigación de disturbios.....	76
5.	CONCLUSIONES Y PERSPECTICAS.....	79
5.1	Conclusiones.....	79
5.2	Prospectivas.....	80
6.	LITERATURA CITADA .....	82
7.	ANEXOS.....	85



## Índice de figuras

Figura 1.- Estructura básica de una micro-red (Medina R., 2014).....	14
Figura 2.- Señal original en tiempo (a), con su correspondiente espectro armónico (b) y representación final FFT (c).....	17
Figura 3.- Estructura de un perceptrón simple (Castro, 2016).....	19
Figura 4.- Metodología general del sistema.....	22
Figura 5.- Diagrama eléctrico de la micro-red.....	24
Figura 6.- Micro-red propuesta, circuito físico.....	26
Figura 7.- Sistema de adquisición de datos y control xQDAD233.....	29
Figura 8.- Representación de chorreo espectral.....	33
Figura 9.- Diagrama de metodología de clasificación de disturbios.....	36
Figura 10.- Diagrama de la red neuronal propuesta.....	38
Figura 11.- Diagrama de metodología de clasificación de disturbios, a partir de las ecuaciones de amplitud y fase.....	44
Figura 12.- Diagrama del sistema de clasificación en línea.....	47
Figura 13.- Representación del cruce por cero (Loflin, 2018).....	50
Figura 14.- Mitigación de disturbios en línea.....	53
Figura 15.- Señal de voltaje en la carga de la micro red, Diodo-Inductor (1410 uH).....	54
Figura 16.- Señal de voltaje en la carga de la micro red, Diodo-Inductor (1410 uH) con disturbio transitorio.....	59
Figura 17.- Transformada FFT, prueba Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio.....	60
Figura 18.- Transformada de las 5 pruebas realizadas con las cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio.....	65
Figura 19.- Resultados de la implementación del algoritmo de clasificación de disturbios, (a) propuesta 1, (b) propuesta 2, (c) propuesta 3, (d) propuesta 4, cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio.....	67
Figura 20.- Resultados de clasificación y mitigación de disturbios utilizando las ecuaciones 8 y 9...74	
Figura 21.- Reconocimiento Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals Chiapas 2022.....	86

Figura 22.- Artículo de investigación.....87

## Índice de tablas

Tabla 1.- Frecuencia de los primeros 25 armónicos impares de una frecuencia fundamental de 60 Hz.....	20
Tabla 2.- Elementos eléctricos de la micro-red.....	24
Tabla 3.- Pruebas y cargas en la micro-red eléctrica.....	27
Tabla 4.- Datos que representan cada armónico (fuera de línea).....	34
Tabla 5.- Datos que representan cada armónico (en línea).....	35
Tabla 6.- Amplitud de armónicos en la señal sintética, propuesta 2.....	42
Tabla 7.- Monitoreo de la señal de voltaje presente en la carga R1.....	55
Tabla 8.- Amplitud de los armónicos presentes en las distintas pruebas.....	61
Tabla 9.- Resultado del algoritmo de clasificación y mitigación de disturbio.....	69
Tabla 10.- Resultados de clasificación y mitigación de disturbios.....	70
Tabla 11.- Comparación de THDv utilizando las ecuaciones 8 y 9.....	75
Tabla 12.- Resultados de mitigación del disturbio armónico sin contenido transitorio.....	76
Tabla 13.- Resultados de mitigación del disturbio armónico con contenido transitorio.....	77

## Índice de acrónimos

A: Amplitud

F: Frecuencia

FFT: Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

FPGA: Field Programmable Gate Array

Hz: Hertz

mV: Milivolts

NN: Red neuronal (Neural Network)

PC: Computador Personal (Personal Computer)

PWM: Modulación por Ancho de Pulso (Pulse-Width Modulation)

RAM: Memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory)

S: Segundos

THD: Distorcion armónica total (Total Harmonic Distortion)

# CAPÍTULO 1:

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

La calidad de la energía es un tema que está tomando mucha importancia en la época moderna debido a los nuevos dispositivos electrónicos y eléctricos. Estos se han vuelto tan especializados y precisos que se ha requerido un nuevo estándar en la calidad de la energía utilizada para su implementación. Junto con este avance tecnológico, han aparecido nuevos elementos que tienen una relación directa con la calidad de la energía de forma negativa ya que uno de los efectos relacionados a su uso es la presencia de disturbios en la red eléctrica. Uno de estos elementos que más se han empleado en los últimos años, debido a su eficiencia y a las técnicas desarrolladas para su manejo son los semiconductores de alta velocidad. Se han convertido en uno de los elementos más utilizados en dispositivos empleados diariamente.

Gracias a la presencia de estos semiconductores de alta velocidad los disturbios de la red se han vuelto cada vez más presentes, con un especial énfasis en los armónicos y no linealidades ya que son las distorsiones ocasionadas por estos elementos convirtiéndose en uno de los disturbios más importantes (Saucedo y Taxis, 2008). Por esto se han desarrollado diversas metodologías dirigidas a este tema con diversas áreas de especialidad como son la detección de disturbios, clasificación de disturbios y mitigación de disturbios. Se han presentado varios trabajos relacionados al tema, pero una de las problemáticas más evidente es que la gran mayoría han sido enfocados solo a la detección y clasificación de estos disturbios dejando muy por detrás los trabajos relacionados a la mitigación.

Si bien han sido pocos los trabajos relacionados con la mitigación se han presentado, los resultados obtenidos han sido satisfactorios, aunque hay muchas áreas de oportunidad para mejorar como lo son los algoritmos empleados, metodologías más eficientes o las fuentes de energía de respaldo usadas para la mitigación. Estas metodologías se han desarrollado he implementado en

diferentes plataformas de investigación como son los softwares de simulación, esto representa un porcentaje alto de metodologías que se piensan para un sistema llamado fuera de línea (Clarkson M., 2014). Un sistema fuera de línea es aquel donde se tiene un fenómeno y se monitorea bajo ciertos términos para conseguir información que describa dicho fenómeno, posteriormente se llevan diferentes procesos y análisis con los datos que se han adquirido para proponer un modelo o una solución a un problema planteado. Son pocas las metodologías de mitigación que se implementan en un sistema en línea, un sistema donde la adquisición de datos, procesamiento y análisis se llevan a cabo en un solo sistema y en poco tiempo.

En el presente trabajo se propone una nueva metodología para la mitigación de disturbios armónicos y no linealidades en una micro-red utilizando algoritmos inteligentes. Los algoritmos utilizados en este trabajo son las redes neuronales y la lógica difusa, de los más empleados en nuestros días ya que han mostrado su alta eficiencia en diferentes ámbitos. La metodología presenta una alternativa donde el costo computacional se vea disminuido con el fin de implementarla en un sistema digital que se desempeñe en línea. También, con esta metodología se busca enriquecer las alternativas en el área de la mitigación de disturbios. El trabajo está contenido en cinco capítulos, siendo el primero donde se recopilan los antecedentes, la información del problema, justificación, hipótesis y objetivos.

En este primer capítulo se presenta la recopilación antecedente, descripción del problema, justificación, contribución social, hipótesis y objetivos.

En el segundo capítulo se presenta la fundamentación teórica, herramientas teóricas utilizadas para realizar el proyecto.

El capítulo tres se presenta la metodología empleada para resolver el problema, dividida en cada uno de los temas y componentes relevantes dentro de la metodología.

El capítulo cuatro se muestran los resultados del proyecto, lo que se obtuvo basado en los objetivos planteados y la metodología usada.

El capítulo cinco presenta las conclusiones del trabajo, problemáticas del proyecto, así como las perspectivas del presente trabajo.

## **1.2 Antecedentes**

En esta sección se presenta el estado del arte del trabajo, una revisión sobre los antecedentes más relevantes en las tres vertientes principales de este proyecto, detección de disturbios, clasificación de disturbios y mitigación de disturbios; destacando los elementos más importantes, así como las tecnologías dentro de los trabajos de cada área. Al final de este apartado, se llega a una conclusión basada en dichos proyectos.

### **1.2.1 Detección de disturbios**

La calidad de la energía se ha convertido en un concepto sumamente importante tomando cada año más relevancias, esto debido a la tecnología implementada en muchos de los dispositivos utilizados hoy en día y que se han vuelto de vital importancia considerándolos básicos para desarrollar distintos trabajos (Ordóñez G., Ángel M., 2005), como lo son los convertidores o cargadores de PC, celular, entre otros, notándose un aumento en el estudio de fenómenos eléctricos que se presentan como, los disturbios armónicos y no linealidades, tanto en la detección, como clasificación y mitigación de los mismos.

Se han realizado diferentes trabajos e investigaciones con la finalidad de detectar los disturbios eléctricos más comunes mediante el monitoreo de los mismos. Referente a esta vertiente, entre alguno de los más relevantes a nivel local se encuentra el trabajo de Gutiérrez (2014) que desarrolló e implementó un Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos, mediante su inyección a la línea de alimentación comercial y la adquisición de las señales generadas. El sistema estuvo compuesto de un módulo para generación de disturbios y un módulo de monitoreo. El primero consta de una etapa de síntesis de señales (para la generación de los datos correspondientes a las formas de onda de las perturbaciones) y una etapa de inyección (para incorporación de disturbios a la línea). El segundo módulo realiza el monitoreo mediante la adquisición de señales de corriente y voltaje en una carga de prueba. Los disturbios fueron generados empleando la técnica de Síntesis Digital Directa, la cual se realizó por un Arreglo de Compuertas Lógicas Programables en Campo (FPGA). Las señales de voltaje a la salida de una tarjeta de diseño propio del Grupo Hsp-Digital de la UAQ (PLC-UAQ) fueron elevadas en magnitud por un amplificador de audio y su salida fue enviada a un

transformador serie, el cual las inyectó en tres fases de la línea de alimentación. El monitoreo se realizó mediante un módulo de adquisición conformado por la tarjeta PLC-UAQ y una etapa de acondicionamiento de señales; con lo cual se obtuvieron formas de onda de voltaje. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de generar y detectar los disturbios: transitorio oscilatorio, fluctuaciones, armónicos y notching en un motor trifásico de 1 hp usado como carga de prueba. Debido al incremento en la popularidad de la tecnología que se implementa hoy en día con los semiconductores de alta velocidad, los disturbios armónicos y no linealidades se han convertido en uno de los más comunes en las redes eléctricas dando lugar a trabajos especializados en la detección de este importante disturbio. Un trabajo a nivel internacional es el realizado por Song (2012), propuso un algoritmo de detección de isla pasiva basado en los componentes armónicos de la red. Utilizó el hecho de que los componentes armónicos equivalentes en el punto de acoplamiento común (PCC) se cambiaron de acuerdo con el estado de la conexión a la red. Este método mostró una zona de no detección (NDZ) reducida y un tiempo de detección rápido en comparación con el enfoque convencional. El modelado matemático se realizó y verificó mediante resultados experimentales utilizando un controlador de señales digitales de alto rendimiento. Dongdong et al. (2021), presentaron un nuevo método de detección de armónicos basado en el algoritmo del principio ortogonal del triángulo. En comparación con los métodos convencionales de detección de corriente armónica, el método presentado tiene las ventajas de una estructura simple, un cálculo bajo y un tiempo de ejecución rápido. Otra metodología fue la propuesta por Po et al. (2019), quienes introdujeron un método de detección en tiempo real basado en un observador de entrada para la extracción de armónicos de las corrientes de la red en el caso de fluctuación de frecuencia fundamental. El método propuesto presentó las ventajas de una velocidad de detección rápida y una alta precisión de detección, y puede hacer frente a los cambios repentinos en las amplitudes de las corrientes de la red y en la frecuencia fundamental. Su funcionamiento se planteó de la siguiente manera: en primer lugar, se utilizó un bucle de bloqueo de fase para extraer la fase de las corrientes de la red en tiempo real. Luego, se construyó un modelo de espacio de estados con las corrientes de la red y los componentes armónicos como variables de estado desconocidas. Finalmente, con la fase en tiempo real detectada, se diseñó un observador lineal variable en el tiempo basado en el modelo de espacio de estados para estimar las variables de estado desconocidas. Su estabilidad estuvo garantizada por la función de Lyapunov y el principio de invariancia de LaSalle. Así se realiza la extracción de armónicos de corrientes de red. Tanto la simulación como los resultados experimentales muestran que los



componentes armónicos de las corrientes de la red se pueden extraer de forma rápida y precisa mediante el método propuesto, incluso si las corrientes de la red están distorsionadas. Si bien ambos trabajos discuten las diferentes metodologías empleadas para la detección de distorsiones en redes eléctricas, también dan a conocer una de las distorsiones más presentes en la actualidad.

### **1.2.2 Clasificación de disturbios**

A nivel local, en el ámbito de la clasificación de disturbios armónicos y no linealidades uno de los trabajos más destacados es el de Molano (2013) quien desarrolló una metodología utilizada para la realización de un analizador, el instrumento incluye, el diseño de un circuito de acondicionamiento de energía para señales de alta corriente y voltaje que a su vez describe la etapa para aislar la parte de potencia con la electrónica, así también se describieron los protocolos de comunicación para los periféricos como el sistema de adquisición de datos, y el puerto de transmisión de datos. El diseño de hardware fue basado en las normas IEC 61000-4-30 (IEC, 2013) y IEC 61000-4-7 (IEC, 2002), las cuales describen los métodos de medición de calidad de energía de forma técnica y métodos para el cálculo de armónicos e interarmónicos y la instrumentación. El dispositivo realizó el cálculo de voltaje pico, voltaje RMS, corriente pico, corriente RMS, factor de cresta, interarmónicos y la Total Harmonic Distortion (THD) o Distorsión Armónica Total para cada uno de los canales de medición, al igual que el cálculo de potencia activa y potencia aparente para cada par de mediciones de corriente y voltaje. El objetivo principal fue el desarrollo de un analizador de calidad basado en la tecnología FPGA para ayudar a la evaluación de calidad de la energía. Si bien esta es una técnica implementada para el diagnóstico de la red, hay diferentes metodologías y algoritmos que pueden implementarse y cada uno tendrá sus ventajas. Otro trabajo es el de Razo (2019), quien desarrolló una metodología que combina la utilización de algoritmos basados en unidades de medición fasorial (PMU's), y algoritmos de clasificación de disturbios. De los algoritmos PMU se obtiene información fasorial para frecuencias fundamentales, así como para cualquier armónico. Estos algoritmos fueron desarrollados para cumplir la norma IEEE C37.118.2014, sin perder precisión ni el tiempo corto de respuesta requerido. El sistema experto utilizó un algoritmo PMU combinado como un clasificador difuso, con la finalidad de detectar la severidad de la falla bajo diferentes condiciones de carga y de condiciones reales como son

desviación de frecuencia, cambios en magnitud, presencia de cambios abruptos como escalones, entre otras. Todas las ventajas beneficiaron el monitoreo del sistema eléctrico, la operación y diagnóstico de las micro-redes de manera automática, en línea y en tiempo real. En este caso, son muy claras las ventajas de la implementación de estos algoritmos, aunque el autor deja en claro que todavía tienen áreas de oportunidad, las cuales pueden ser el desarrollo de nuevos y mejores algoritmos enfocados en el diseño, mejora en la carga computacional, mayor precisión, entre otras. El trabajo realizado a nivel internacional es el presentado por Padmavithi et al. (2021) quienes propusieron un modelo de clasificación de conjuntos de apilamiento para clasificar las diferentes Disturbios en la Calidad de la Energía (PQD) en la red eléctrica integrada fotovoltaica (FV). En la etapa de preprocesamiento, se utilizó la técnica de Transformada de Onda Discreta para extraer las características de diferentes PQD. Las características extraídas se utilizaron para entrenar los clasificadores base (Regresión logística (LR), Naïve Bayes y árbol de decisión J48) en el nivel base (nivel 0). Las predicciones de los clasificadores base se utilizaron para aprender el meta clasificador (LR) en el siguiente nivel (nivel 1) para obtener las predicciones finales. El modelo de conjunto propuesto alcanza una precisión de clasificación más alta que los clasificadores base en condiciones de prueba estándar (92,22%) y condiciones ambientales dinámicas de la energía solar fotovoltaica (91%) y la adición de ruido en el clasificador (89,33%). Además, el método propuesto ofreció un rendimiento superior que los clasificadores base en términos de evaluación de índices de rendimiento. Suganthi et al. (2021) propusieron un método de inteligencia basado en probabilidades para detectar y clasificar PDQ con mayor precisión en una micro-red. Se aplicó una técnica de procesamiento de señales basada en la Transformada de Onda Discreta (DWT) para extraer las características de las múltiples señales PQD. Las características obtenidas se utilizaron para entrenar los clasificadores basados en inteligencia computacional, como la red neuronal de perceptrón multicapa (MLP), la máquina de vectores de soporte (SVM) y Naive Bayes (NB). Los resultados obtenidos indicaron que el clasificador NB y SVM ofrecido podría predecir PQD en la red con una precisión de clasificación del 100%, mientras que el MLP da una precisión de clasificación del 66,7%. Además, la robustez de los clasificadores se evaluó utilizando índices de rendimiento (PI) del estadístico Kappa, error absoluto medio y error cuadrático medio. Otro modelo desarrollado para la clasificación de diferentes perturbaciones de la calidad de la energía en una micro-red (MG) fue el presentado por Arangarajan et al. (2021), propuso un método de votación del modelo de clasificación de conjuntos junto con el análisis de Transformada de Onda Discreta (DWT). El modelo de clasificación de conjuntos propuesto

fue útil para clasificar parámetros de la calidad de la energía más comunes (caída de voltaje, aumento de voltaje y armónicos) en la micro-red aislada. Para este estudio, se desarrolló un modelo de MG integrado fotovoltaico en el entorno de software Matlab / Simulink con la introducción de diferentes PQD. El resultado obtenido revela que el rendimiento del modelo 2 de clasificación por conjuntos propuesto (combinación de red bayesiana, clasificadores de perceptrón multicapa (MLP) y árbol de decisión J48 (JDT)) alcanzó una mayor precisión de clasificación (100%) en comparación con otros clasificadores de conjuntos.

Si bien estos trabajos tienen la pauta para detectar las diferentes no linealidades y armónicos, se han hecho también varias investigaciones donde su tema principal es la mitigación de estas distorsiones. Al igual que los sistemas de detección, que son una parte sumamente importante en la mitigación, existen diferentes tipos de algoritmos o metodologías que se han implementado con el fin de mejorar la calidad de la energía eliminando estas distorsiones.

### **1.2.3 Mitigación de disturbios**

En cuanto a los trabajos de mitigación, se tiene el de Sujith y Padma (2020) quienes desarrollaron una Red Neural Lineal Adaptativa (ADALINE) para la estimación de armónicos. Para hacer que el contenido de armónicos fuera más insignificante y así mejorar la calidad de la potencia de cargas, se utilizó un filtro de potencia activa (APF). Diseñaron un controlador basado en un modulador de ancho de pulso (PWM). Además, las redes de retroalimentación (entrenadas por el algoritmo de retro programación) funcionaron como un comparador de banda de histéresis. Se realizó un diseño de control APF con red ADALINE en el cual se analizaron la carga y la corriente junto con el voltaje y luego el controlador calculaba la señal de control considerando la corriente de compensación de referencia. El trabajo propuesto se comparó con el método de salida que comprende Shunt Active Power Filter (SAPF) con ADALINE para percibir su rendimiento. Este método resultó ser efectivo en términos de muchos parámetros como voltaje de carga, corriente de carga, voltaje, potencia reactiva, potencia real y especialmente el valor THD. Si bien el algoritmo implementado en este trabajo es muy novedoso no es el único que se ha estado implementando para esta problemática. Otro trabajo

es el realizado por Weinsier et al. (2019), quienes diseñaron un modelo que es problema complicado de optimización de números enteros mixtos no lineales a gran escala que se usó de una nueva etapa multi computacional, un algoritmo multidimensional de búsqueda de melodías múltiples no homogéneas o un algoritmo de búsqueda de orquesta sinfónica (SOSA), es decir ampliamente utilizando y seguido de un enfoque de satisfacción difusa para determinar una solución óptima final. Este algoritmo imitó los procedimientos musicales y la relación interactiva entre los miembros de una orquesta sinfónica. La SOSA está organizada por múltiples reproductores de música homogéneos y no homogéneos con la improvisación en tres etapas. Se desarrolló esta técnica probabilística de flujo de potencia armónica desacoplada con el fin de analizar las características probabilísticas de un nuevo modelo tecno económico multiobjetivo para la planificación de filtros armónicos híbridos, teniendo en cuenta la incertidumbre de la demanda y la calidad de corrientes armónicas inyectadas por carga no lineales. En este estudio, los autores analizaron cuatro objetivos del problema: El costo asociado con los filtros de armónicos híbridos asignados; y la distorsión armónica total relacionada con el voltaje, la corriente y la pérdida de la línea de transmisión que surgen de los armónicos en la optimización. Chmielewski et al. (2021) desarrollaron un método de control repetitivo modificado para inversores trifásicos conectados a la red mediante una aplicación de filtros de peine digital. El método propuesto proporciona compensaciones de múltiples armónicos, implementación y diseño simples. Consiste en complementar el control Proporcional - Resonante (PR) con un filtro de peine adecuadamente sintonizado, lo que resulta en la mitigación de los armónicos de corriente de salida y reducción de THD. Se han propuesto de dos tipos de filtro peine como compensadores de armónicos, a saber, estructuras de retroalimentación y alimentación directa. El compensador incluía un filtro de respaldo pasa bajas FIR adicional para una mayor robustez. Estas propuestas son enfocadas en las diversas técnicas que se emplean en la mitigación de disturbios armónicos y no linealidades, con el uso de redes neuronales adaptativas, implementación de filtros adaptación de filtros digitales de peine, entre otras técnicas, se han reportado resultados satisfactorios. Otra estrategia para la mitigación de disturbios armónicos fue la presentada por Elham et al. (2020) quien propuso una nueva estrategia de control utilizando los conceptos de admitancia virtual variable (VVA) y filtros activos en serie capaces de mejorar la mitigación de armónicos y la estabilidad en inversores conectados a la red. La magnitud y el ángulo de fase del VVA se determinan de forma adaptativa de acuerdo con la variación de carga local. Además, el filtro activo en serie inyecta un voltaje en serie para reducir el efecto de impedancia de la red. El método de control propuesto se puede implementar simplemente, donde la corriente

sinusoidal inyectada en la red y la tensión de carga local sinusoidal también se pueden lograr bajo una variación de carga local y una condición de red débil. El enfoque teórico se verifica mediante varios estudios de casos de simulación en el software Matlab / Simulink. Estos trabajos se implementaron y llevaron a cabo fuera de línea donde los resultados obtenidos se presentan a través de simulaciones en softwares especializados en sistemas eléctricos o en softwares especializados en sistemas modelados de forma matemática. Uno de los rasgos característicos que se quieren destacar en el presente proyecto es la propuesta de un diferente método de control basado en lógica donde el peso computacional se disminuya para implementar un sistema en línea.

El nicho con mayor oportunidad es el dedicado a la mitigación de distorsiones, esto debido a la poca difusión que se tiene sobre el tema. Tanto la detección como la clasificación tienen una cantidad de trabajos relacionados a este tema bastante extensa pero los trabajos desarrollados para la mitigación son muy pocos ya que la gran mayoría se concentran principalmente en la detección y clasificación de disturbios presentados en la red.

### **1.3 Descripción del problema**

México, así como muchos países del mundo, están enfrentando un problema en el sector de la energía eléctrica debido al exceso de cargas no lineales, como son televisores, equipo de cómputo, cargadores y cualquier otro componente electrónico que use semiconductores de alta velocidad. El uso de estos dispositivos y tecnología ocasionaron la presencia de disturbios en la red eléctrica. Los armónicos y no linealidades se han convertido en las distorsiones más frecuentes en la red teniendo como resultado un mal funcionamiento de los elementos conectados a ella o fallas totales.

Los dispositivos electrónicos se han vuelto sumamente sofisticados y las redes eléctricas, en algunos casos, se han vuelto muy complejas. La calidad de la energía es una necesidad que se tiene que cumplir para garantizar un correcto funcionamiento en las cargas que tengamos en la red, gracias a estas problemáticas se ha trabajado en la búsqueda de la calidad de la energía (Esparza et al., 2006). En los últimos años se han presentado trabajos e investigaciones de este tema que han entregado resultados satisfactorios, aunque la gran mayoría de estos solamente eran enfocados en la detección y clasificación de disturbios. Si bien ahora conocemos cuales son los disturbios más

frecuentes y las posibles causas que los ocasionan, no brindan un método o alternativa para mitigar los disturbios.

Se han desarrollado proyectos y metodologías con el fin de mitigar dichos disturbios, las alternativas presentadas son pocas a comparación de las otras vertientes. Se han explorado diferentes técnicas de control en la detección y clasificación de disturbios, pero en la mitigación se han presentado pocas alternativas que van desde el uso de redes neuronales, hasta técnicas más convencionales como controladores basados en PWM. Aún hay muchas más técnicas de control que se pueden aplicar y aun no se han explorado, se tienen que proponer más métodos con el fin de encontrar el más apropiado para esta aplicación en particular. Otra problemática atada a las metodologías presentadas hasta ahora, es que la mayoría tienen en común el alto costo computacional que presentan, por lo que se presentan como sistemas fuera de línea.

## **1.4 Justificación y contribución social**

### **1.4.1 Justificación**

Con el presente trabajo, se busca proporcionar una nueva metodología en línea para la detección, caracterización y mitigación de los disturbios ocasionados en una micro-red por las cargas no lineales conectadas a ella. Con la implementación de una nueva propuesta de mitigación se seguiría aumentando la difusión que tiene el área, esta aumentará su importancia en un futuro ya que la calidad de la energía cada vez será más relevante para los diversos procesos que se lleven a cabo en los sectores particulares e industriales (Holguin y Gomezcoellon, 2010). A la par, se seguirá promoviendo unas de las vertientes más importantes dentro de calidad de la energía como son la detección y clasificación de disturbios en línea, que a pesar de que han sido ampliamente estudiadas siguen siendo esenciales para los sistemas eléctricos e industriales. También, se busca ampliar la oferta de metodologías de mitigación robusta en línea, debido a que la mayoría de las metodologías en la literatura son fuera de línea, estas técnicas de alto costo computacional son presentadas y representan la mayoría de los trabajos relacionados con el tema hasta estos días.

Los disturbios armónicos, causados por semiconductores de alta velocidad, tienen una naturaleza dinámica, estos pueden ser ocasionados por diferentes factores (Tejada, 2010). Se propone una nueva metodología en línea basada la transformada rápida de Fourier (FFT) para la detección de disturbios, redes neuronales para la clasificación de los mismos y una nueva propuesta en la técnica empleada para el control basado en lógica difusa. Con esto se busca producir una nueva metodología en línea que ofrezca un sistema lo suficientemente robusto que logre mitigar los disturbios armónicos y no linealidades sin importar la posible causa del disturbio.

A la par con el tema de la calidad de la energía, se busca ayudar a las redes que implementen energías renovables ya que estas presentan diversos problemas relacionados con este tema, como lo son también los armónicos y no linealidades. Al presentar una propuestas para mejorar la calidad en la energía en una red o micro-red eléctrica que utilice energía renovable se busca ayudar a que exista una cultura de las energías renovables más amplia y que su empleo siga aumentando en un mediano y largo plazo, para alcanzar las metas que se tienen con el medio ambiente qué, como lo menciona la Agenda 2030 en cuanto a desarrollo sostenible, se plantea que para el 2030 el 37.3% de la energía en México sea generada con energía limpia y 50% para el 2050 (Agenda 2030, 2017).

#### **1.4.2 Contribución social**

En el día a día una de las fuentes de energía que más se utiliza es la energía eléctrica, con el pasar del tiempo también se ha presentado nuevos desafíos como la necesidad de la calidad de la energía. Esta calidad es en beneficio de los consumidores ya que ofrece ventajas con las que todo consumidor de energía se puede beneficiar como la disminución en el consumo de energía traducida a un gasto económico menor y el aumento de la vida útil de los dispositivos conector a la red (Sánchez, 2010). También se busca participar en un evento de divulgación de transferencia tecnológica donde se pueda dar a conocer los proyectos y los temas que abordan. Participación en los congresos presentados por Academia Journals México, con la finalidad de buscar proyectos capaces de ser transferidos a la industria, los interesados pueden conocer el proyecto y más sobre la temática del mismo.

## **1.5 Hipótesis y objetivos**

### **1.5.1 Hipótesis general**

Con la implementación de algoritmos inteligentes para gestión de la energía será posible mitigar las distorsiones armónicas y no linealidades causadas por semiconductores de alta velocidad en una micro-red eléctrica conectada al suministro de red.

### **1.5.2 Objetivo General**

Desarrollar e implementar una metodología basada en algoritmos inteligentes para mitigar las distorsiones (respecto a la onda base en amplitud de la señal y contenido armónico) de la micro-red eléctrica causadas por semiconductores de alta velocidad.

### **1.5.3 Objetivos Específicos**

1. Adquirir las señales de corriente y voltaje de la micro-red para caracterizar los armónicos y no linealidades causadas por su alimentación y cargas, implementando un sistema de adquisición de datos.
2. Diseñar un algoritmo inteligente basado en redes neuronales, para la detección y clasificación de los armónicos y no linealidades de la micro-red eléctrica.
3. Analizar e implementar la detección, clasificación y mitigación de armónicos y no linealidades fuera de línea.
4. Analizar e implementar la detección, clasificación y mitigación de armónicos y no linealidades en línea.
5. Diseñar una etapa de potencia que permita interactuar la etapa electrónica aislada con la micro-red eléctrica.



# CAPÍTULO 2:

## 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El trabajo presenta una metodología para la mitigación de disturbios armónicos y no linealidades presentes en una micro-red causados por cargas no lineales. Una de las partes más destacadas es el uso de energías limpias (fotovoltaicas y eólicas) como fuente de respaldo. Se discutirán los diferentes conceptos que se manejarán en las diversas secciones de la metodología. Comenzando con la definición de una micro-red, posteriormente las fuentes de energía eléctrica y las diferentes técnicas de control y algoritmos ocupados.

### 2.1 Micro-redes

Una micro-red es un sistema independiente distribuido en pequeña escala que utiliza gran cantidad de tecnología eléctrica moderna. Estos se apoyan de equipos que generan energía renovable o limpia como lo son, generadores eólicos, paneles fotovoltaicos, pilas de combustible, entre otros y trabajan de forma paralela para conseguir un mejor rendimiento de la red, como se muestra en la Figura 1. Uno de los equipos más importantes dentro de una micro-red son los equipos de almacenamiento de energía ya que se requiere tener energía cuando los generadores de electricidad, por su propio principio de funcionamiento, generen una menor cantidad de electricidad (Gonzales et al., 2013). La micro-red puede ser como una unidad debajo del control en la grande red eléctrica, se puede satisfacer la demanda desde la red eléctrica de transmisión y de distribución en algunos segundos; en el aspecto de consumidor, la micro-red también puede satisfacer la demanda de diversificación, por el ejemplo, mantener la estabilidad de voltaje, aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico, disminuir la pérdida eléctrica de transmisión y utiliza la energía térmica a suministrar electricidad o calentarse en una alta eficiencia (Shi, 2016).

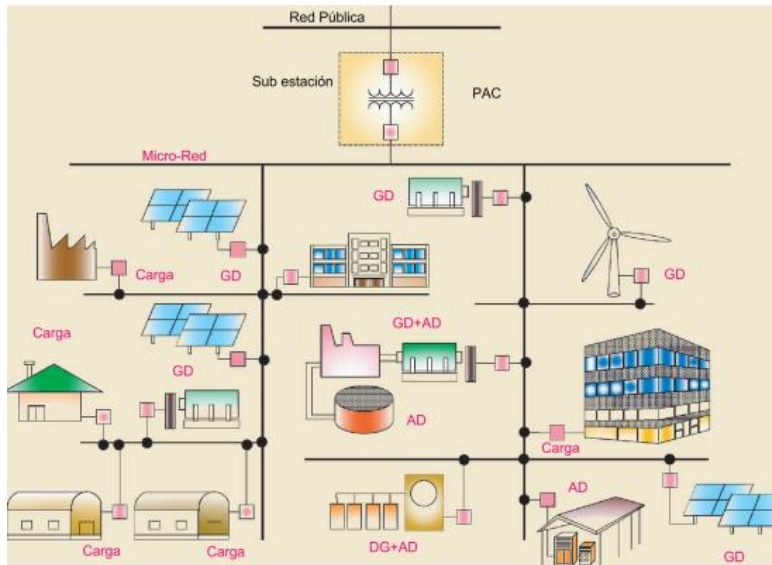


Figura 1.- Estructura básica de una micro-red (Medina R., 2014)

La gestión de la micro-red debe orientarse para responder a los requisitos técnicos y económicos tanto de la propia micro-red como del operador de la red principal (Álvaro et al., 2020) Según su enfoque, alcance o propósito, las microrredes pueden clasificarse de la siguiente manera:

Micro-redes comerciales/industriales. Se construyen generalmente con el objetivo de reducir la demanda y los costos durante la operación normal de las RGD. Aunque su operación durante interrupciones de suministros es también importante, especialmente para funciones críticas de centros de datos. Algunos ejemplos de micro-redes son los siguientes:

Micro-redes de comunidades/empresas de servicio. Se diseñan generalmente para la mejorar la confiabilidad y también promueven la participación de la comunicad.

Micro-redes de campus/institucionales. La mayoría de los campus ya tienen recursos de generación distribuida (GD), con tecnología de micro-red ligándolos juntos. Son usualmente grandes y pueden vender un exceso a la red eléctrica.

Micro-redes militares. Se enfocan en la seguridad física y la ciberseguridad, tanto para bases fijas como para bases de operaciones de avanzada.

Micro-redes remotas. Están permanentemente desconectadas de otras redes eléctricas y operan en modo isla.

## **2.2 Red convencional**

La red eléctrica está compuesta por las fases de generación, transmisión y distribución. La generación de electricidad se lleva a cabo mediante la conversión de los recursos energéticos como el carbón, petróleo, gas, la energía hidroeléctrica o nuclear en electricidad. Por su parte, la transmisión y distribución se encargan de transportar la energía generada para hacerla llegar a los usuarios finales (Figuroa y Guerrero, 2019). Este sistema de distribución o transmisión, desde el punto de vista de la ingeniería, incluyen lo siguiente:

1. Subestación principal de potencia. Ésta recibe la potencia del sistema de transmisión y la transforma al voltaje de subtransmisión. Los voltajes pueden ser de 230 Kilovoltios (KV), 400 KV y superiores. La potencia de la subestación es normalmente de cientos de megawatts (MW).
2. Sistema de subtransmisión. Son las líneas que salen de la subestación (SE) principal para alimentar las SE de distribución. Los voltajes de esta sección son de 115 KV y menos, aunque ya existen de 230 KV. El sistema de subtransmisión tiene normalmente potencias de cientos de MW.
3. Subestación de distribución. Se encarga de recibir la potencia de los circuitos de subtransmisión y de transformarla al voltaje de los alimentadores primarios. Maneja potencias de decenas de MW.
4. Alimentador primario. Son los circuitos que salen de las SE de distribución y llevan el flujo de potencia hasta los transformadores de distribución. La potencia de los alimentadores depende del voltaje de distribución, pero puede ser entre 2 a 8 MW.
5. Secundarios y servicios. Disminuyen la energía del secundario del transformador de distribución a los usuarios del servicio. Las potencias van desde 5 hasta 300 KVA en las redes aéreas y hasta 750 KVA y más en redes subterráneas (Juárez, 2005).

### 2.3 Transformada Rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier, conocida por la abreviatura FFT (del inglés Fast Fourier Transform) es un algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa. La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general a la resolución de ecuaciones en derivadas parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros. Cuando se habla del tratamiento digital de señales, el algoritmo FFT impone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante ya que la señal muestreada y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos (Riaño et al., 2012).

La expresión matemática para calcular la FFT se muestra en la ecuación 1

$$E(F) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{\frac{-2\pi i F n}{N}} \quad (1)$$

Donde  $F$  es la frecuencia,  $n$  es el número de muestras,  $N$  es el número total de muestras y  $f(n)$  es el valor obtenido al evaluar la función. La mayoría de los analizadores de FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo (K.R. Rao et al, 2010). Uno de los resultados que puede generar la FFT es calcular las componentes frecuenciales y sus amplitudes que se encuentran una señal. Esta es una de las aplicaciones más utilizadas debido a su gran desempeño y su alta confiabilidad.

Cuando se realiza la transformada FFT de una señal, esta es representada por un espectro en el dominio de frecuencia que cuenta con una serie de puntos que sobresalen al resto, estos representan la amplitud de las frecuencias que componen una señal en tiempo. En la Figura 2a se tiene una señal la cual es la suma de 13 señales más de distintas amplitudes y fases (señal  $Y_1$ ), cuenta con una señal fundamental sinusoidal de 60Hz con una amplitud de 60 (señal  $Y_2$ ). Esta señal tiene una forma distinta a la fundamental ya mencionada debido a la alteración presentada al sumar distintas señales. En la Figura 2b se tiene la representación gráfica de la transformada FFT de la señal  $Y_1$ , cada

una de las columnas o puntos que sobresalen al resto representan la amplitud de la señal que está en la señal en tiempo. También, la ubicación de estos puntos en la Figura 2c entrega la frecuencia de la señal.

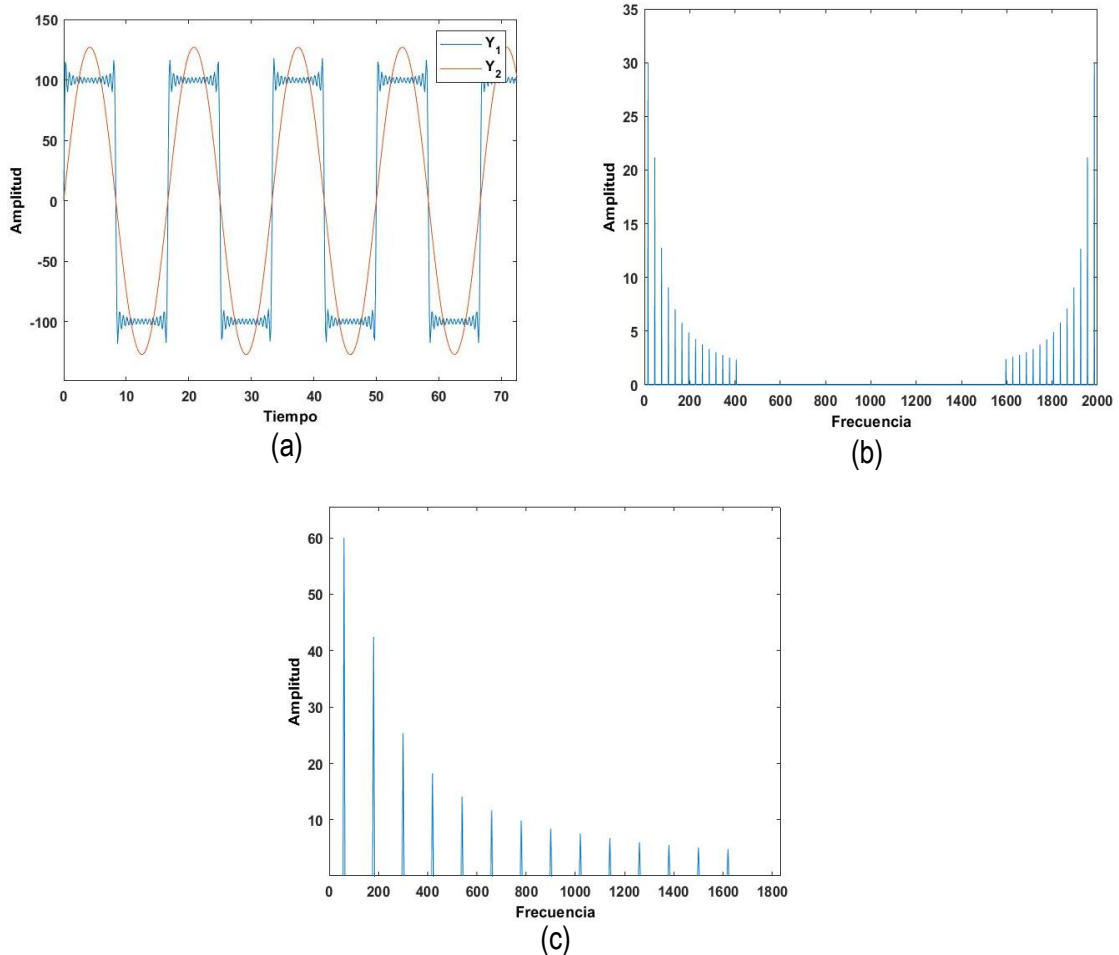


Figura 2.- Señal original en tiempo (a), con su correspondiente espectro armónico (b) y representación final FFT (c)

En general, las gráficas de la Figura 2 representan la transformada FFT de una señal senoidal, aunque cada una de las secciones tiene características puntuales. La Figura 2a es la gráfica de una señal senoidal en el dominio del tiempo ( $Y_2$ ), también muestra esta misma señal, pero con contenido armónico ( $Y_1$ ). La Figura 2b representa la transformada FFT de la señal  $Y_1$ , sin embargo, está grafica no es la representación final deseada. Para garantizar una correcta representación, donde se conserve la potencia total de la señal original y las amplitudes de cada armónico sean las adecuadas, se debe

de considerar únicamente la mitad del espectro de frecuencias y multiplicar el valor de cada amplitud por dos, como se muestra en la Figura 2c. Si bien la sección b y c son en esencia la misma en general, se deben de tener las ya mencionadas consideraciones para garantizar un correcto resultado de la transformada FFT (Spilsbury y Euceda, 2016).

## **2.4 Redes neuronales**

Existen numerosas formas de definir a las redes neuronales; desde las definiciones cortas y genéricas hasta las que intentan explicar más detalladamente qué son las redes neuronales. Las redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico (Matich, 2001).

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro humano. Por ejemplo, son capaces de aprender y generar experiencia, utilizar información aprendida previamente para realizar una tarea nueva, discernir o separar información esencial o información irrelevante a partir de las entradas establecidas, entre otros. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté implicando en múltiples áreas. Las ventajas que incluye su uso son:

1. **Aprendizaje adaptativo.** Capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial.
2. **Auto-organización.** Una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje.
3. **Tolerancia a fallos.** La destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura; sin embargo, algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.

4. Operaciones en tiempo real. Los cálculos neuronales pueden ser realizados en paralelo; para esto se diseñan y fabrican máquinas con hardware especial para obtener esta capacidad
5. Fácil inserción dentro de la tecnología existente. Se pueden obtener chips especializados para redes neuronales que mejoran su capacidad en ciertas tareas. Ello facilitará la integración modular en los sistemas existentes (Berzal, 2019).

El elemento básico en las redes neuronales es el perceptrón, este elemento es la representación de una neurona biológica, pero es la pieza fundamental en una red neuronal, este elemento posee una serie de elementos que lo conforman.

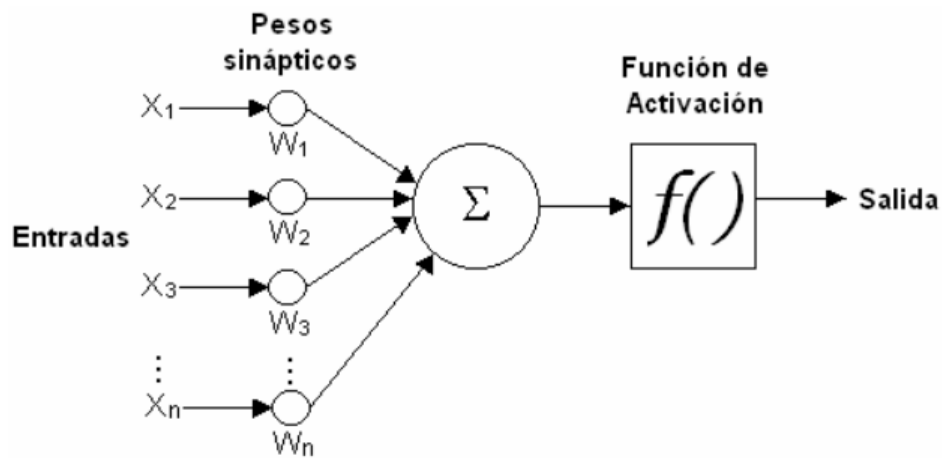


Figura 3.- Estructura de un perceptrón simple (Castro, 2016)

Este perceptrón cuenta con los siguientes elementos

- **Entradas.** Esta es la información que recibe el perceptrón, pueden ser elementos básicos como colores, texturas, números o formas. Cada característica diferente conforma una nueva entrada.
- **Pesos.** Estos son valores numéricos que se encargan de definir el peso o influencia de una entrada en la salida deseada. Un ejemplo podría ser la salud de una persona como salida, si las entradas están relacionadas a enfermedades del corazón, enfermedades en la piel o caída de cabello, cada una tiene distinta importancia, pero cada una aporta diferente información

por lo que los pesos serán la relación entre si una entrada es más importante que las otras, si este es el caso, esta tendrá más peso y viceversa.

- Bias. Este es un parámetro que solamente tienen algún tipo de redes neuronales en específico. Este permite encontrar con facilidad la separación entre posibilidades de salida de una red neuronal en específico. Un ejemplo de redes que cuentan con este parámetro son las redes de tipo perceptrón.
- Función de activación. Esta es una función matemática la cual tiene como principal labor determinar un valor de salida una vez que se haya procesado cada una de las entradas. Hay diferentes funciones de activación y cada una tiene diferentes rangos de valores y dependiendo de cada configuración estas pueden funcionar mejor para determinada tarea, dependerá completamente de la implementación (Castro, 2016).

## 2.5 Distorsión armónica total

La THD es una medida de cuánto distorsiona o se cambia la forma de onda del voltaje o de la corriente de su forma de onda sinusoidal convencional. La energía proviene de su suministrador eléctrico en forma de onda sinusoidal limpia. A medida que atraviesa diferentes tipos de cargas, el voltaje y la corriente se utilizan a diferentes tasas, lo que provoca que la distorsión se refleje desde la carga hacia el sistema (Téllez, 2014). Este término es uno de los más importantes al momento de evaluar la distorsión armónica en una onda senoidal ya que es causante de muchos problemas relacionados al rendimiento de los equipos electrónicos, dicho parámetro se calcula siguiendo la norma IEC-61000-4-7.

La distorsión ocurre principalmente en múltiplos de la frecuencia de la portadora de 60 Hz que se conocen como armónicos. En la tabla 1, se muestran primeros 25 armónicos impares en una señal de características similares a las antes mencionadas al igual que sus respectivas frecuencias.

No. De armónico	3°	5°	7°	9°	11°	13°
Frecuencia	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz



No. De armónico	15°	17°	19°	21°	23°	25°
Frecuencia	900 Hz	1020 Hz	1140 Hz	1260 Hz	1380 Hz	1500 Hz

Tabla 1.- Frecuencia de los primeros 25 armónicos impares de una frecuencia fundamental de 60 Hz.

La THD es el porcentaje acumulado de distorsión para todos los tipos de armónicos en relación a la potencia total. La distorsión se mide por separado para la corriente (THDi) y el voltaje (THDv) (Lincango, 2015).

La expresión matemática para calcular la TDHV se muestra en la ecuación 2

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V} \quad (2)$$

Donde  $V_h$  es la amplitud de los armónicos y  $V$  es la amplitud de la frecuencia fundamental. En este caso la frecuencia fundamental es de 60 Hz.

La expresión matemática para calcular la TDHI se muestra en la ecuación 3

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I} \quad (3)$$

Donde  $I_h$  es la amplitud de los armónicos y  $I$  es la amplitud de la frecuencia fundamental. En este caso la frecuencia fundamental es de 60 Hz. La causa de la distorsión armónica es casi todas las cargas no lineales. Estos tipos de cargas incluyen la iluminación no incandescente, computadoras, suministros de energía ininterrumpida, equipos de telecomunicaciones, equipo periférico computacional, cargadores de baterías y dispositivos con un convertidor de energía de CA a CC de estado sólido. Distorsiones en la corriente provocan distorsiones en voltajes (García, 2013).

# CAPÍTULO 3:

## 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se detallará el proceso necesario para desarrollar el sistema de mitigación de disturbios armónicos. Se darán a conocer las características del material empleado, así como el diseño, la validación e implementación de los componentes fundamentales del sistema de control: red de sensores en la micro-red, el sistema de detección y clasificación de disturbios, la red neuronal y el controlador difuso. Al final del capítulo se presentarán los resultados previos obtenidos

### 3.1 Panorama general del proyecto

Para realizar el objetivo principal, se propone un sistema que detecte, clasifique y mitigue los disturbios de la micro-red planteada. El sistema se basará en la metodología mostrada en la Figura 4, la cual muestra los pasos a seguir para estas tareas. La metodología se separa en estas tres principales áreas y en cada una de ellas se emplearon estrategias matemáticas y algoritmos específicos.



Figura 4.- Metodología general del sistema

En la Figura 4, se presentan los 8 bloques principales las diferentes partes que conforman el proyecto. En cada uno, lleva a cabo un proceso en específico y cuentan con una secuencia o pasos a seguir en especial. Sin embargo, se tiene que dejar en claro una parte importante de la metodología que se presentara a continuación. Cada uno de los bloques detallados y la metodología en general esta pensaba para realizarse e implementarse en un sistema en línea, sin embargo, para realizar esto, se llevó a cabo cada uno de los pasos y la metodología completa fuera de línea. Esta consideración se propuso de esta manera debido a que se buscaba probar cada uno de los bloques, algoritmos y partes que componen todo el proyecto antes de realizar la implementación final en línea. También se realizó de esta forma ya que, en algunos bloques en específico, se buscó que los datos calculados y resultados obtenidos fuera de línea sirvieron como principio para optimizar la implementación en línea. Cada uno de los pasos que se siguieron se detallarán a continuación en cada una de las siguientes secciones.

### **3.2 Micro-red eléctrica**

Como ya se discutió en el capítulo 2 de fundamentación teoría, hay diferentes tipos de micro-redes eléctricas y cada una de ellas tiene condiciones en específico que se definen según el trabajo que desempeñarán, cada una puede o no tener distintos tipos de elementos, pero todo dependerá del uso o aplicación que se le dé. Para este proyecto se contempló una micro-red que tuviera una carga resistiva que simulara una carga convencional, a esta carga se le sumaron diferentes elementos como son resistivos, inductivos y semi conductores, con el fin de observar la distorsión armónica generada por estos elementos y la cual llegará a la carga. En la Figura 5 se observa el diagrama eléctrico de la micro-red, tanto los elementos que se utilizaron para su construcción, así como las colecciones de dichos elementos.

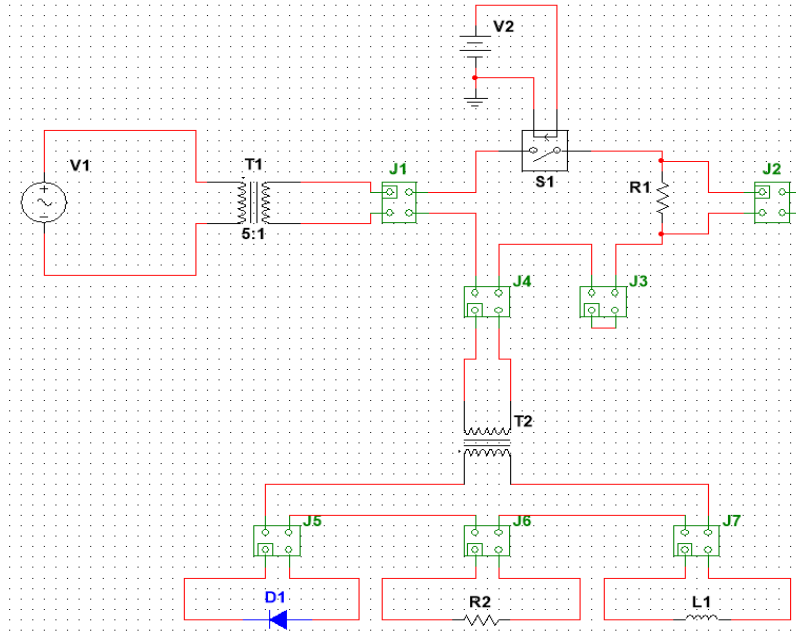


Figura 5.- Diagrama eléctrico de la micro-red

En la Figura 5 se observan los componentes principales que se requirieron para hacer la micro-red que se utilizó en el presente proyecto. En la tabla 2 se enlistan los elementos de la Figura 5 así como el valor y especificaciones básicas que tiene cada uno.

Elemento	Número de etiqueta	Valor
Fuente de voltaje	V1	127 Vrms, CA
Fuente de voltaje	V2	5 V, CC
Transformador	T1	Relación 5:1
Transformador	T2	Relación 5:1
Relevador	S1	5 V
Diodo	D1	1N4007
Resistor	R1	10 Ohms
Resistor	R2	20 Ohms
Inductor	L1	1880 uH

Tabla 2.- Elementos eléctricos de la micro-red

En la tabla 2 se observan cada uno de los eléctricos componen la micro-red y están denotado en la Figura 5. Comenzando por la fuente de voltaje V1, esta representa la energía eléctrica que entrega Comisión Federal de Electricidad (CFE) que es la empresa encargada de suministrar la

electricidad a la mayoría del país. La CFE se encarga de suministrar esta señal eléctrica, señal sinusoidal de 60 Hz que cuenta con un voltaje de 127 Vrms y, como se observó en la Figura 5, esta fuente de voltaje es la encargada de energizar la micro-red. Si bien se tienen en cuenta que estos parámetros son los ideales o los oficiales, se sabe que estos pueden variar (López R., 2013).

El transformador T1 tiene una relación de 5:1 haciendo que el voltaje que alimenta la red sea de 24V y solo cumple esta función, bajar el voltaje de entrada de la micro-red a un voltaje más pequeño, de 127Vrms dado por V1 a 24V bajando la potencia presente en la micro-red. La fuente de voltaje V2 es una fuente de corriente continua de 5V, esta fuente funciona para cerrar el switch S1, este funciona solamente para encender o apagar la micro-red con el fin de tener más control sobre ella al poder apagar y encender el sistema con mayor rapidez. La resistencia R1 es la resistencia que presenta la micro-red, si bien esta resistencia es la carga no solo esta se verá presente en la red ya que lo que se busca es observar la distorsión armónica presente en ella y que es ocasionada por las cargas D1, R2, y L1.

El transformador T2, a diferencia del transformador T1, no se utiliza principalmente para disminuir el voltaje de los elementos conectados a su devanado secundario, el transformador T2 se utiliza para conectar las cargas D1 (carga semiconductor), R2 (carga resistiva) y L1 (carga inductiva) en su devanado secundario y así generar diversas distorsiones armónicas que se verán reflejadas en la señal eléctrica que presente R1. Con esta micro-red se espera que con sus distintas cargas D1, R2 y L1 se generen distorsiones armónicas en la carga R1 y que al hacer diferentes combinaciones entre si se podrán lograr distintos armónicos.

En la Figura 6 se observa los elementos que se mostraron en la Figura 5 y en la tabla 2, se recreó el diagrama de dicha figura de forma física, respetando cada elemento y conexión, sin embargo, se observan algunos elementos que no se detallaron en la Figura 5, pero no en la tabla 2 que son las borneras. Estas se emplearon para realizar las conexiones entre distintos elementos de la micro-red y tener dicha conexión más segura. Estos elementos (J1, J2, J3, J4, J5, J6 Y J7) al no pertenecer propiamente al circuito, sino ser elementos que se utilizan principalmente para conectar distintos nodos del mismo, no fueron destacados en la tabla 2, pero si están presentes de forma física en el circuito empleado para realizar el proyecto.

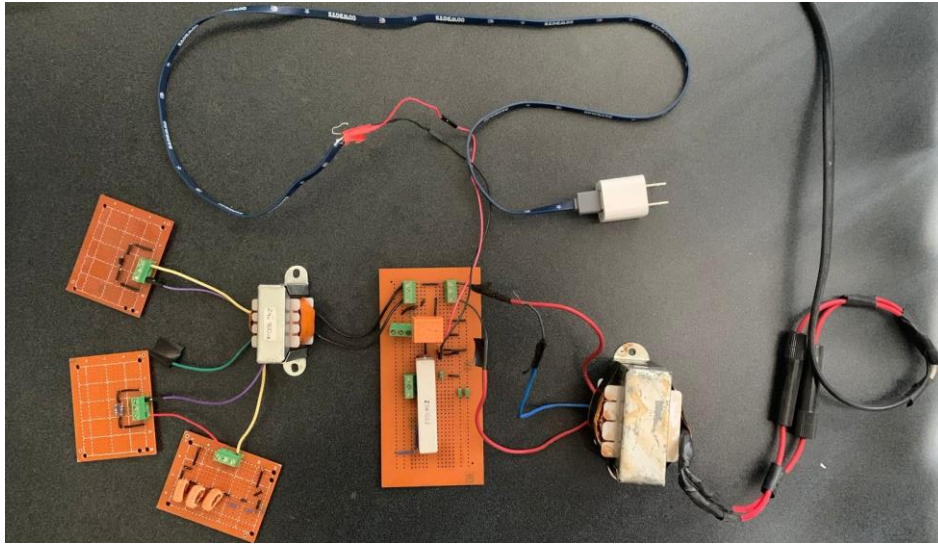


Figura 6.- Micro-red propuesta, circuito físico

En la Figura 6 se observa de forma física los elementos ya descritos tanto en la Figura 5 como en la tabla 2. Todos los elementos mencionados están presentes en esta Figura 6 así como sus conexiones detalladas anteriormente. Cabe mencionar que el único elemento que falta de apreciarse de forma física en la micro-red es la fuente de voltaje V1, como ya se había comentado, esta fuente es la provista por CFE, por lo tanto, es una toma de corriente común, ubicada en el edificio de posgrado F1 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, campus San Juan del Río. Con estos elementos, sumado el diagrama eléctrico de la Figura 5 se tiene el esquema completo de la micro-red eléctrica empleada para este proyecto, también las distintas cargas con las cuales se generarán los disturbios armónicos que serán mitigados al terminar todo el proceso detallado en la Figura 4.-

### 3.2.1 Cargas de la micro-red

El propósito de R2, L1 y D1 es ver su efecto en la señal de voltaje que presenta la carga de la micro-red R1, para esto, se cambió o varió los valores de R2 y L1 para observar el contenido armónico que pudieran llegar a presentar distintas cargas. Para lograr este contenido armónico y, como ya se había mencionado anteriormente, se consideraron diferentes combinaciones en las cargas que se

conectarán en el devanado secundario del transformador T2, las cuales son la resistencia R2, L1 y D1. En la tabla 2, se muestran los valores que tendrán en principio dichos elementos, sin embargo, el fin es conseguir diversas combinaciones de valores, por lo que esos valores variaron y se combinaron con las otras cargas para tener así una matriz de pruebas más robusta. En la tabla 3 se muestran las diferentes combinaciones que se usaron para la matriz de pruebas.

Número de Prueba	Carga	Número de Prueba	Carga
1	Resistencia 10 Ohms	12	Diodo – Resistencia (15 Ohms)
2	Resistencia 15 Ohms	13	Diodo – Resistencia (20 Ohms)
3	Resistencia 20 Ohms	14	Diodo – Resistencia (25 Ohms)
4	Resistencia 25 Ohms	15	Diodo – Inductor (1410 uH)
5	Inductor 1410 uH	16	Diodo – Inductor (1880 uH)
6	Inductor 1880 uH	17	Diodo – Inductor (2360 uH)
7	Inductor 2360 uH	18	Diodo – Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)
8	Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)	19	Diodo – Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)
9	Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH)	20	Diodo – Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)
10	Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 uH)	21	Sin carga

11	Diodo – Resistencia (10 Ohms)
----	----------------------------------

Tabla 3.- Pruebas y cargas en la micro-red eléctrica

La tabla 3 muestra las distintas pruebas que se realizaron con la micro-red de la Figura 6, haciendo diferentes combinaciones analizando y capturando la señal de voltaje de la carga. Se llevaron a cabo 20 pruebas más que las mostradas en la tabla 3 (prueba 22 a 41), sin embargo, estas pruebas son las mismas ya mostradas, solo que ahora se presentan transitorios durante la prueba. Para lograr el evento transitorio en las pruebas, se conmutó el relevador mostrado en la tabla 2 y el diagrama del sistema. Con esto, se tienen pruebas separadas donde cada una contiene diferentes elementos o valores, así como disturbios transitorios en el caso de las pruebas 22 a 41.

### 3.3 Medición y monitoreo

Para el sistema encargado de la detección y el monitoreo en la carga de la micro red se empleó la tarjeta xQDAD233. Esta tarjeta, mostrada en la Figura 7, es una tarjeta basada en tecnología FPGA la cual tiene la capacidad de realizar diferentes procesos dependiendo de la aplicación, esto debido a su hardware. Esta tarjeta cuenta diversos módulos que pueden realizar diversas tareas y los cuales pueden funcionar en conjunto para garantizar un funcionamiento más eficiente y de mayor velocidad. Los módulos que tiene dicha tarjeta y los más destacados para este proyecto son: convertidores ACD/DAC, FFT, SD card, SRAM, entre otros. Cada uno de los módulos son controlados de manera que trabajen a la par para conseguir un resultado satisfactorio. Estos módulos son indispensables para la adquisición de los datos y, posteriormente, para su análisis y procesamiento.



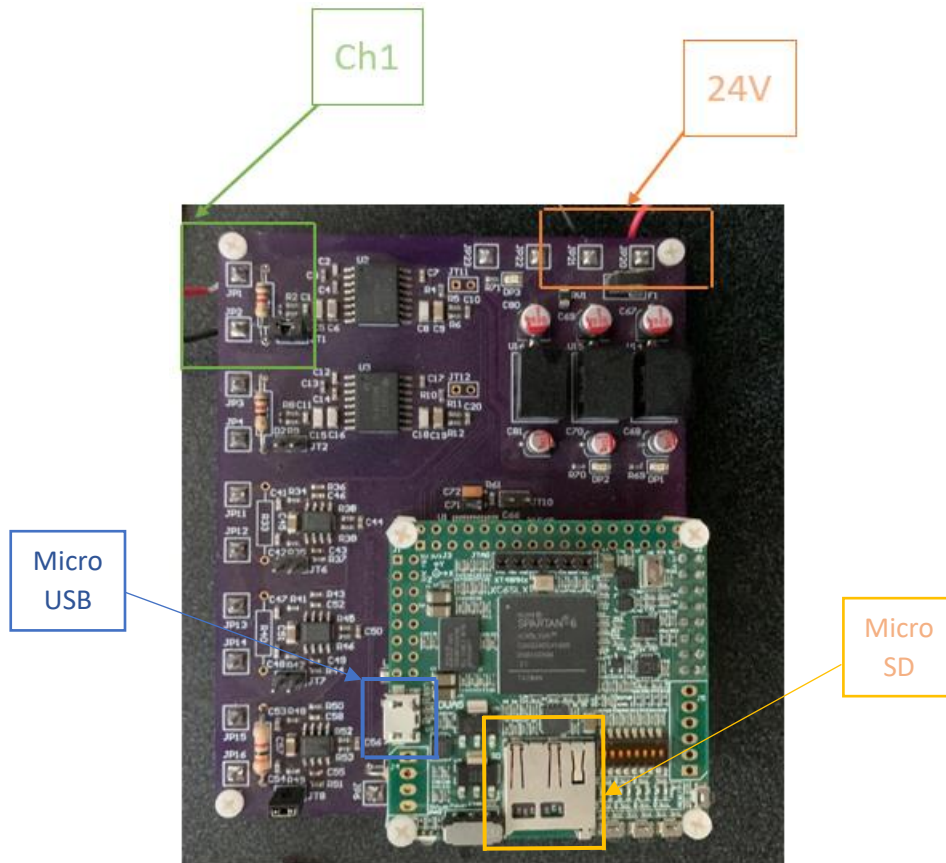


Figura 7.- Sistema de adquisición de datos y control xQDAD233

En la Figura 7 se observa la tarjeta dedicada a la adquisición de datos y posteriormente al control de todo el sistema. Las partes a destacar para esta sección es el canal Ch1, el puerto de alimentación del sistema de 24V, el puerto micro USB por el cual se controla el sistema y la memoria micro SD donde se almacenan todos los datos adquiridos.

La adquisición de la señal de voltaje, donde comenzará todo el proceso para lograr la mitigación de los disturbios presentes en la micro-red se realizará a través del conector J2, mostrado en la Figura 5, y el canal Ch1. En este canal se adquirió la señal de voltaje, esta señal fue muestreada empleando el convertidor analógico-digital presente en la tarjeta, a una frecuencia de 8000 Hz.

Para realizar el correcto empleo del sistema de adquisición se necesitó una fuente de alimentación de 24 Vcc, este voltaje fue suministrado por una fuente adicional externa, así como una resistencia adicional en serie al pin 1 del conector J2. Esta resistencia se empleó ya que el sistema xQDAD233 en el canal 1 tiene una resistencia de 1 KOhms en paralelo que está presente para realizar

un divisor de voltaje y escalar la señal de entrada de Ch1. Esta se tiene que escalar para tener la totalidad de la señal y no tener cortes en la señal en la parte inferior, superior o en ambas. La resistencia utilizada en serie al conector J2 fue de 23.5 KOhms. Para calcular el divisor de voltaje se empleó la ecuación 4.

$$V_{OUT} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{IN} \quad (4)$$

Donde  $V_{OUT}$  es la señal que será muestreada por el canal Ch1,  $R_1$  es la resistencia de 23.5 KOhms,  $R_2$  la resistencia de 1 KOhms y  $V_{IN}$  la señal presente en la carga de la micro-red, este voltaje varió dependiendo de la carga que se sometiera a la micro-red, pero con estos valores  $R_1$  y  $R_2$  se garantizó que en todos los casos se tuviera el total de la señal capturada por el sistema. Para esta sección se a hecho uso solamente del convertidor ADC para la captura de la señal, pero en las siguientes partes de la metodología se emplearán los restantes antes mencionados.

### 3.3.1 Medición y monitoreo fuera de línea

Como ya se mencionó al principio del capítulo 3, cada uno de los bloques, exceptuando el bloque de micro-red detallado en la sección 3.2, tiene una parte fuera de línea y en línea, donde lo desarrollado en la sección fuera de línea es la pauta o da pie la implementación correspondiente en línea. Para la sección de medición y monitoreo, se tomó en cuenta o se realizó todo lo anterior mencionado en el apartado 3.3, para la sección fuera de línea se guardaron las señales de voltaje en una tarjeta SD para la siguiente sección o bloque de la metodología. El sistema de adquisición de datos xQDAD233 guardó cada una de las pruebas realizadas con las cargas de la tabla 3. En cada una de las pruebas se realizaron 5 corridas por lo que se adquirieron 5 señales de voltaje para cada una de las pruebas 1 a 41. El sistema guardó cada una de estas señales en un archivo con extensión MAT, también cada una de las señales tiene 48000 datos, la razón, en la siguiente sección de detección se procesaron estas señales siguiendo la metodología utilizando el software MATLAB, sin embargo, se detallará este proceso en el apartado 3.4.

### **3.3.2 Medición y monitoreo en línea**

El sistema de medición y monitoreo comienza con el circuito integrado encargado de la adquisición de los datos ADS13F08, con este componente se adquieren los datos de las señales que se estarán monitoreando a lo largo del funcionamiento del proyecto. Posteriormente, los datos adquiridos serán almacenados en el módulo de memoria SRAM con el cual cuenta la tarjeta xQDAD233. Las especificaciones de este monitoreo serán las señaladas en la sección 3.3 y 3.3.1. La ventana de adquisición que se definió para este proyecto fue de tamaño 4096, tomando el tamaño como una potencia de 2, teniendo en cuenta que, según la metodología presentada, se realizará la FFT a la señal para definir la entrada a la sección de clasificación del disturbio. También, se determinó esta ventana para ser lo suficientemente pequeña para optimizar la sección de procesamiento, pero teniendo el tamaño suficiente.

### **3.4 Detección de disturbios**

La detección de los disturbios se realizó a través de la transformada FFT. Esta transformada permite conocer la amplitud de los armónicos presentes en una señal, a partir de los números complejos que representa dicha transformada, pero para esta metodología se va a contemplar solo los números complejos. Para la metodología, se planteó un siguiente bloque o sección donde, a partir de la salida de la transformada, se puedan clasificar y calcular los parámetros de los primeros 13 armónicos impares presentes en la señal con el uso de una red neuronal que será descrita en la siguiente sección 3.5. Se consideraron los primeros 13 armónicos impares ya que este trabajo está apegado a la norma IEC 61000-1, la cual, es una norma internacional que trata sobre la calidad de la energía eléctrica tanto en el ámbito empresarial como doméstico.

Esta norma menciona, en el caso de los armónicos presentes en una red eléctrica, los armónicos relevantes o que pueden ocasionar algún daño a los equipos electrónicos, son los armónicos impares hasta el armónico 40. Siguiendo lo que menciona esta norma, se consideraron los primeros 13 armónicos impares, esto debido a que, realizando diversas pruebas, se logró tener contenido armónico hasta el armónico de orden 27, después de este, los armónicos de mayor orden no están presentes en la micro-red propuesta.

### **3.4.1 Cálculo de amplitud y fase en los armónicos**

Tenido en cuenta únicamente los primeros 13 armónicos de las señales a analizar, se realizó la transformada FFT, obteniendo una serie de números complejos de tamaño igual a la señal original. Estos números complejos cuentan con parte real y parte imaginaria, las cuales serán la entrada al siguiente bloque de clasificación realizado por una red neuronal. En la sección de monitoreo se mostraron tanto la frecuencia de muestreo, el tamaño del vector de datos en la medición de la señal fuera de línea y el tamaño de la ventana en línea. Al saber el tamaño de la ventana y la frecuencia de los armónicos (tabla 1), se pueden localizar los puntos donde se encuentran las amplitudes de los armónicos. Para cada una de las formas, tanto fuera de línea como en línea se localizan estos puntos, pero su posición cambia dependiendo de cada forma. Sin embargo, se tiene que tener en cuenta un factor importante para representar cada armónico de forma correcta utilizando la transformada FFT, este factor es conocido como chorreo espectral.

### **3.4.2 Chorreo espectral**

En la Figura 2c se muestra la representación gráfica de la transformada FFT de una señal en tiempo, sin embargo, al realizar esta representación se debe de tener en consideración el chorreo espectral ya que, como se mencionó en la sección 2.3, es sumamente importante el tener la representación total de la amplitud de una componente para tener un resultado correcto o satisfactorio. Este es un fenómeno presente al desarrollar la FFT a una señal en tiempo, éste ocasiona que el punto que representa la potencia o la amplitud de una componente de frecuencia no sea el correcto. Esto debido a que, en lugar de ser solo un punto en donde la posición de X representa la frecuencia de la componente y la posición en Y la amplitud, este se vea afectado debido a que este valor en Y se dispersa en los valores laterales del eje X. Gráficamente, esto se apreciar analizando la Figura 8, donde, en lugar de tener una columna que representa la amplitud de un punto, se tiene esta misma columna, pero con un tamaño mayor en la base, resultando en un cálculo incorrecto.

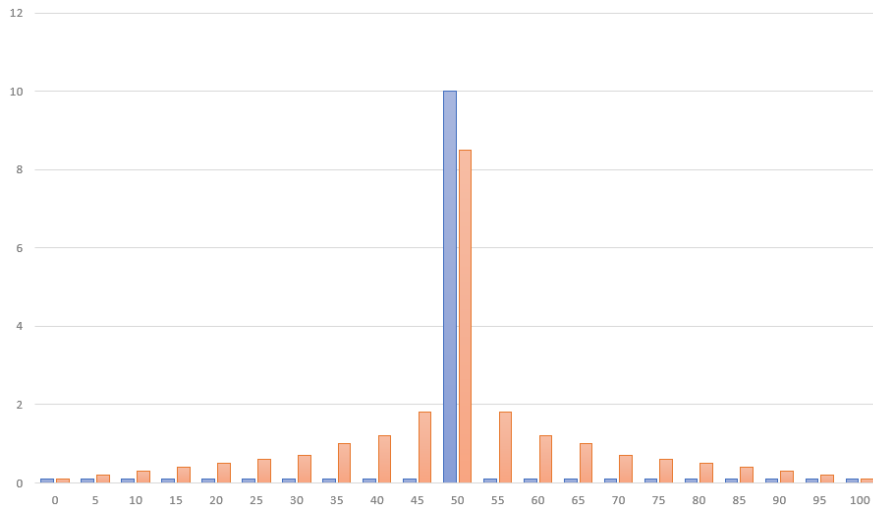


Figura 8.- Representación de chorreo espectral

La señal en color azul en la Figura 8 es la representación esperada cuando se analiza un punto en la FFT, manteniendo el punto máximo que representa la amplitud de una componente, sin embargo, en la señal en color rojo se aprecia de manera gráfica del chorreo espectral. Las consecuencias de este efecto son notables, se observa una disminución en la amplitud que representa esa señal. Al realizar la FFT se busca obtener la representación exacta de la señal original, por lo cual hay que tener muy en cuenta este fenómeno. Una forma de conservar la potencia o amplitud total al tener una transformada que presente chorreo espectral, es tomar los valores o bins que estén en el rango de la señal a analizar y sumarlos, con esto se garantiza tener un valor exacto de amplitud. Cada bin representa 5 Hz, esto siguiendo lo estipulado en la norma IEC 61000-4-7, una de las secciones de la norma internacional a la cual este trabajo esta apegado.

### 3.4.3 Detección de disturbios fuera de línea

En este caso en particular, al analizar las señales fuera de línea se utilizó el software MATLAB para realizar la transformada FFT. Al definir o conocer el tamaño del vector de la señal, en este caso 48000 puntos o datos, se pueden localizar los puntos que representan cada uno de los armónicos. En el caso del análisis fuera de línea del sistema, la ubicación de los armónicos se representa en la tabla

4. Esta contiene el punto de inicio y final que se sumarán para conocer exactamente el valor del armónico, teniendo la cuenta el chorreo espectral mencionado en la sección 3.4.2.

Armónico	Punto de inicio	Punto de termino
3°	1075	1085
5°	1794	1804
7°	2513	2523
9°	3232	3242
11°	3951	3961
13°	4670	4680
15°	5390	5400
17°	6109	6119
19°	6828	6838
21°	7547	7557
23°	8266	8276
25°	8985	8995
27°	9706	9716

Tabla 4.- Datos que representan cada armónico (fuera de línea)

Con la tabla 4, se tienen los puntos donde se realizará la suma desde el punto de inicio hasta el punto de termino por cada armónico, esto con el fin de arreglar o eliminar el factor de error del chorreo espectral. Con esto, se tendrá solo un numero complejo que represente de forma correcta cada uno de los armónicos, esto con el fin que las 13 partes reales y las 13 partes imaginarias sean la entrada al siguiente bloque de clasificación de disturbios.

#### 3.4.4 Detección de disturbios en línea

Para realizar la FFT en línea, se hará uso del módulo con el que cuenta la tarjeta xQDAD233. Este módulo realiza dicha transformada a los datos obtenidos en la sección de medición y monitoreo.

Como se mencionó en esa sección, los datos adquiridos por el sistema se almacenaron en la memoria SRAM del sistema, por lo tanto, el módulo FFT realizara esa labor a los datos almacenados en la memoria SRAM. Una vez realizada dicha transformada, se volverá a almacenar los resultados en la memoria SRAM, por esto se tiene un manejo importante de memoria en esta sección ya que se tiene que leer y almacenar datos. A diferencia de la sección 3.4.3, los puntos que representan cada armónico no se encuentran en la misma ubicación, esto ocurre debido al tamaño de la ventana que se definió para la sección en línea de la metodología, esta ventana de tamaño 4096 es una ventana que tiene menos elementos que la señal de la sección fuera de línea por lo que cambia la ubicación de los armónicos. En la tabla 5 se muestran los puntos de inicio y final de cada armónico.

Armónico	Punto de inicio	Punto de termino
3°	175	185
5°	295	305
7°	415	425
9°	535	545
11°	655	665
13°	775	785
15°	895	905
17°	1015	1025
19°	1135	1145
21°	1255	1265
23°	1375	1385
25°	1495	1505
27°	1615	1625

Tabla 5.- Datos que representan cada armónico (en línea)

Al conocer las frecuencias de cada uno de los armónicos de interés que conforman las señales que se analizaron, se logran localizar fácilmente cada uno de los puntos de inicio y final donde se realizará la suma de estos valores para eliminar el error del chorreo espectral. Una vez realizada esta suma y, como ya se mencionó anteriormente en la sección 3.4.3, con este método se logra una

correcta representación de cada armónico y con esto 13 números complejos los cuales, su parte imaginaria y real, serán las entradas del siguiente bloque de clasificación.

### 3.5 Clasificación de disturbios

Para la clasificación de disturbios se presentó un algoritmo inteligente, donde se busca separar los armónicos dependiendo de su orden y frecuencia. Al realizar la transformada de la señal, este resultado será la entrada de una red neuronal con la que se calculó tanto la amplitud como la fase del armónico, parámetros sumamente importantes para calcular el complemento del disturbio y, posteriormente, lograr la mitigación. Para mostrar de una mejor forma la metodología en esta sección en particular se muestra el siguiente diagrama a bloques, donde se detalla la importancia de cada una de las partes.

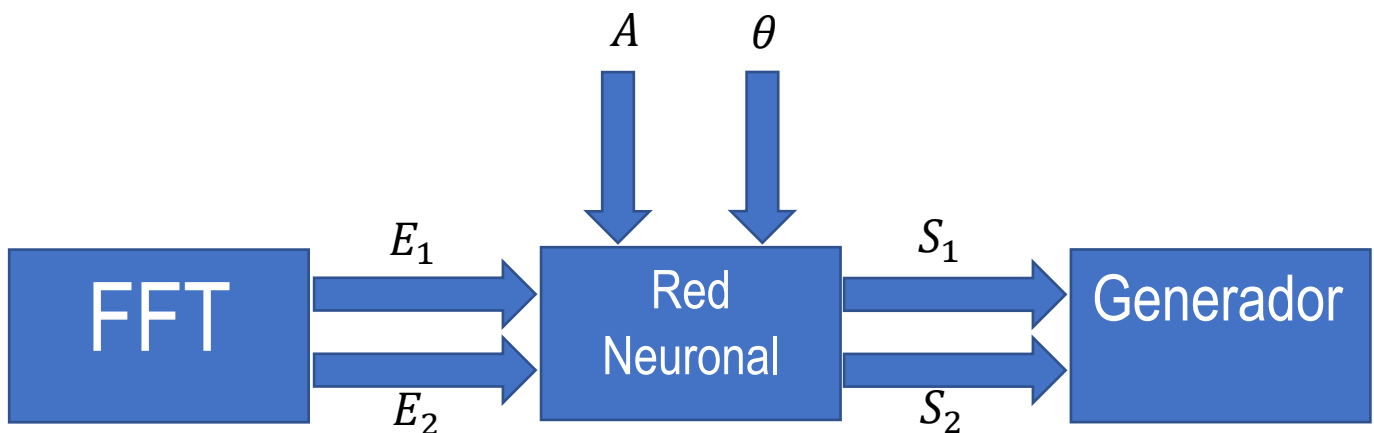


Figura 9.- Diagrama de metodología de clasificación de disturbios

El diagrama de la Figura 9 representa las principales etapas en esta parte de la metodología, donde el bloque FFT representa la entrada a la sección de clasificación, el bloque red neuronal, adicional a las entradas desde el bloque FFT cuenta con 2 entradas más y por último se tiene el bloque Generador, este bloque es la etapa siguiente después de la red neuronal. A continuación, se detallarán cada uno de estos bloques de manera más profunda al igual que sus respectivas entradas y salidas.



### 3.5.1 Bloque FFT

El bloque FFT representa la sección 3.4 detección de disturbios, donde se realiza la transformada FFT de cada una de las pruebas realizadas en la tabla 3. Como se mencionó anteriormente, al realizar esta transformada esta será la entrada al siguiente bloque de la red neuronal. Este bloque tiene como salida  $E_1$  y  $E_2$ , siendo  $E_1$  las 13 partes reales de los armónicos y  $E_2$  las 13 partes imaginarias. En total se tendrán 26 salidas de este bloque ya que se espera que con estos parámetros se calcule la amplitud de los armónicos, en caso de las primeras 13 salidas o partes reales, y la fase en caso de las 13 últimas salidas o partes imaginarias. Cabe mencionar que estos 13 armónicos representados gracias a la FFT como números complejos, ya tienen en consideración el chorreo espectral por lo que estos 13 números complejos son el resultado de la suma entre los puntos presentados en las tablas 4 y en la tabla 5.

### 3.5.2 Red Neuronal

Para este proyecto se propuso una hipótesis por la cual se desarrolló o planteó una red neuronal para la clasificación de los parámetros de amplitud y fase de los armónicos. Esta hipótesis menciona que, una red neuronal es lo suficientemente robusta y es más resiliente en casos donde se presente alguna fluctuación, cambios repentinos o desperfecto, en comparación a solo tomar los valores obtenidos por la transformada FFT. Esto quiere decir que, es más confiable el tener este algoritmo en comparación al solo tomar los valores de la FFT. A la par, se necesita calcular de forma precisa la fase de los armónicos presentes en las señales ya que, de no ser de esta forma, el contenido armónico, y por ende la deformación de la onda fundamental, aumentaría en lugar de disminuir. Por estas razones, se decidió incluir este algoritmo inteligente en la metodología.

Para modelar o proponer una red neuronal se debe de tener en cuenta las características que se busca cumplir con esta red, al igual que el número de entradas y salidas que tiene. En este caso, se propuso una red neuronal de tipo perceptrón que cuenta con 26 neuronas en la capa de entrada, estas entradas las antes mencionadas en el punto 3.5.1, 16 neuronal es la capa oculta y 26 neuronas en la capa de salida.

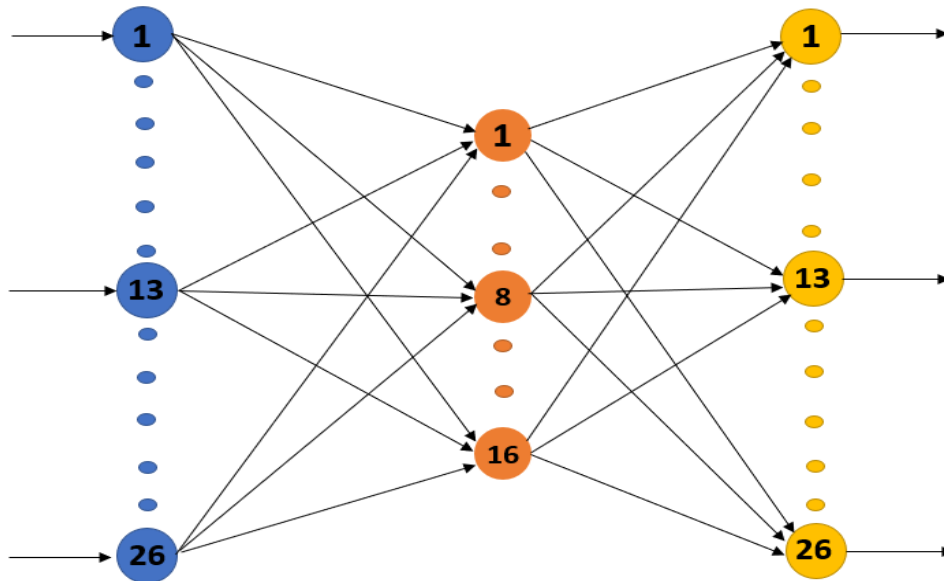


Figura 10.-Diagrama de la red neuronal propuesta

El diagrama presentado en la Figura 10 representa la estructura que tendrá la red neuronal en esta sección. La sección en color azul representa la capa de entrada. En esta capa, se tienen como entrada los valores que previamente se definieron, en este caso, desde la entrada 1 hasta la entrada 13, serán las partes reales de los números complejos que representan los 13 armónicos que se propusieron anteriormente y en las entradas 14 a 26 las entradas serán las partes imaginarias. La sección de color naranja será la capa oculta de la red neuronal, dependiendo de la configuración elegida podrá tener una o más capas ocultas, pero para este caso, solo se considera una, tomando en cuenta que el fin de esta red neuronal es no tener un costo computacional alto, pero ser lo suficientemente robusta. Por último, la sección de color amarillo es la capa de salida, esta tiene 26 salidas, donde la salida 1 a 13 serán las amplitudes de los 13 armónicos y, las salidas 14 a 26 serán las fases.

Una de las características importantes en esta red neuronal es que las funciones de activación de cada neurona es la función TANSIG. Se definió esta función ya que, debido a la naturaleza de los valores que se están buscando, principalmente en el caso de la fase, los valores pueden ser tanto positivos como negativos, caso contrario a los valores amplitud que serán todos positivos. Esta función tiene la propiedad de tener valores entre -1 y 1, por lo que, para garantizar un correcto funcionamiento, los números que serán tanto la entrada como la salida de cada perceptrón o neurona, deberá de estar

dentro de este rango. Para estar seguros en este caso, se realizó un paso extra entre el bloque de FFT y las entradas de la red neuronal. Se tomaron estos valores y se dividieron entre un valor para garantizar que estuvieran todos los valores entre el rango ya antes mencionado, en el caso de las amplitudes, la parte real de los 13 armónicos que serán las entradas 1 a 13 de la red neuronal, se dividieron entre 127 y, la parte imaginaria de los 13 armónicos que serán la entrada 14 a 26, se dividieron entre 180. Con esto se puede decir que tendrá un correcto desempeño la red neuronal. Se determinaron estos valores debido a la implementación de dicha red neuronal tanto fuera de línea como en línea.

### **3.5.3 Clasificación de disturbios fuera de línea**

La implementación fuera de línea esta sección comienza una vez realizada tanto la separación de los 13 números complejos que representan cada armónico, y la división entre los factores que se mencionaron en la sección 3.5.2. Al tener estos 26 valores entre -1 y 1, ahora se podrá implementar esta sección de red neuronal, para esto, se usó el software MATLAB. Este software cuenta con el "Neural Network (NN) Toolbox", herramienta que facilita la implementación de este algoritmo al realizar la estructura de la red neuronal deseada definiendo las entradas, función de activación, número de neuronas en la capa de entrada, número de neuronas en la capa oculta y número de neuronas en la capa de salidas. Uno de los factores más importantes dentro de la implementación de las redes neuronales es el entrenamiento que debe de llevarse a cabo para contar con un correcto funcionamiento. Para realizar el entrenamiento en este caso, se utilizaron señales sintéticas. Estas señales son comúnmente usadas debido a que, como son señales en las que se saben todos los parámetros y propiedades de las mismas, se tiene un completo conocimiento y control sobre ellas, por lo que son las más indicadas para el entrenamiento de una red neuronal, aunado a su fácil elaboración en cualquier software especializado en análisis de sistemas como lo es MATLAB. Para realizar el entrenamiento de una red neuronal se usan estas señales sintéticas, sin embargo, estas deben de tener propiedades muy similares a las señales reales o las capturadas con el sistema de adquisición. Para realizar el entrenamiento y calcular el desempeño de la red o performance, se tiene que definir las señales de entrenamiento, cuáles serán las entradas de la red y cuáles serán los objetivos o targets de la red, posteriormente se necesitan las señales de validación.

Para las señales de entrenamiento se propusieron 500 señales diferentes donde se consideraron los pasos anteriores para tener una implementación igual a la antes mencionada en cada una de las secciones, por lo tanto, se siguieron los siguientes pasos

1. Se generaron señales sintéticas donde la señal fundamental es una señal sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de 127. A esta señal fundamental se sumaron sus armónicos, señales de diversas amplitudes y con una frecuencia dependiendo el orden del armónico, estas frecuencias son mostradas en la tabla 1. Las señales tienen un tamaño de 48000 datos con una frecuencia de muestreo de 8000 Hz.
2. Se tomo una ventana de 4096 datos para realizar la transformada FFT.
3. Se tomaron los puntos de inicio y final de la tabla 5 para realizar la suma de cada uno de los armónicos y prevenir el chorreo espectral.
4. Obteniendo los 13 números complejos que representan cada armónico en la señal, se separó la parte real y parte imaginaria de cada número. La parte real se dividió entre 127 y la parte imaginaria entre 180.
5. Las entradas 1 a 13 de la red neuronal serán la parte real de los armónicos 1 a 13 y las entradas 14 a 26 serán la parte imaginaria de los armónicos 1 a 13.

Con esto se tiene definidas las entradas de la red neuronal teniendo en cuenta cada uno de los factores antes mencionados en el capítulo 3. Sin embargo, también se necesitan definir los targets de la red. Estos targets son representados en la Figura 9 como  $A$  la amplitud de cada uno de los armónicos y  $\theta$  como la fase de cada armónico. Al trabajar con señales sintéticas, estos valores son conocidos al momento de generar cada señal, por lo cual solo se tienen que ingresar a la red y definirlos como los objetivos. Con esto se espera que, al presentar a la red neural los números complejos, calcule la amplitud y la fase de cada uno de los armónicos. Para garantizar esto, se tiene que entrenar a la red con estas señales, en este caso, se realizaron 500 señales siguiendo cada uno de los pasos antes mencionados para el entrenamiento. También, se consideraron 50 datos de entrada

donde, ya una vez entrenada la red, estos datos arrojaran el desempeño o performance del algoritmo. Es sumamente importante definir cada uno de los parámetros de las señales sintéticas de entrenamiento ya que estas serán la pauta para tener una red neuronal correcta, en este caso se realizaron 4 diferentes propuestas para estas señales de entrenamiento y se determinó cual tuvo el mejor desempeño.

Al entrenar la red neuronal con el NN toolbox de Matlab, esta red cuenta con los pesos propios de cada neurona en cada una de las capas que conforma la total de la red, al igual que el bias correspondiente. Estos factores son los que definen a la red y a su funcionamiento, al fin de este proceso, todas las consideraciones hechas a lo largo de este capítulo están inmersas en cada uno de estos valores. Entonces, al entrenar la red neuronal con la propuesta 4, detallada en la siguiente sección, garantizamos mayor robustes en el sistema de clasificación, terminando con los pesos y bias de cada neurona en la red.

### **3.5.3.1 Señales sintéticas de entrenamiento**

En este caso, se realizaron señales sintéticas las cuales tenían como onda fundamental una señal de sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud de 127, esta amplitud representa el voltaje de la señal. Pero, se realizaron diferentes métodos para recrear los armónicos de esta señal fundamental, esto con el fin de tener una mayor robustes en la red neuronal, recordando que desempeño de esta depende del correcto entrenamiento y por ende de una correcta implementación de las señales sintéticas. La primera propuesta realizada para este fin fue sumar a la señal fundamental señales con un valor aleatorio entre 1 y 127 como amplitud y como fase un valor aleatorio dentro del rango de -90 a 90. Los valores aleatorios son muy comunes al proponer señales sintéticas que entrenarán a una red neuronal, ya que con estos se logra tener una mayor cantidad de valores posibles dentro de la red lo cual ofrece un mejor desempeño. Con esta primera configuración de valores los armónicos pueden tener una tanto una amplitud y fase igual a la onda fundamental, ocasionando una mayor deformación como se observa en la Figura 2a, sin embargo, estos armónicos tienen un comportamiento similar al de la Figura 2c en donde, entre mayor sea el orden del armónico, menor será su amplitud. Teniendo esto en cuenta, se propuso una segunda configuración. En esta

segunda propuesta, los valores de amplitud cambiaron dependiendo el orden del armónico, con esto se tiene una representación más cercana a la realidad o cómo se comportan comúnmente los armónicos. En la tabla 6, se observan el rango de las amplitudes de cada armónico en la señal sintética.

Orden del armónico	Amplitud
3°	120
5°	112
7°	104
9°	96
11°	89
13°	81
15°	73
17°	65
19°	58
21°	50
23°	42
25°	34
27°	26

Tabla 6.- Amplitud de armónicos en la señal sintética, propuesta 2

El rango de amplitud ahora será entre 1 y el valor mostrado en la tabla 6 dependiendo del orden de cada armónico, con esto, las señales tienen un comportamiento más parecido al comportamiento común de los armónicos en una señal, como se muestra en la Figura 2c. Con esta propuesta se tuvo un mejor resultado a comparación con la propuesta uno. El rango de esta fase cambio al igual que la amplitud, en este caso, se cambió a un rango de entre -180 a 180, con este cambio, se tiene un mayor margen en la fase que pueden presentar los armónicos.

En la tercera propuesta, se tomaron en cuenta todos los valores mencionados en la segunda propuesta, pero con un cambio. Los valores de amplitud y fase siguieron entre los mismos rangos, pero a estos se les aplicó ruido gaussiano de 10 decibeles (dB). El ruido gaussiano es un error el cual se colocó en cada uno de los valores de amplitud y fase de la red, teniendo como consecuencia, una variación en estos parámetros. Esto se realizó para ayudar a la robustez del sistema, a que si se entrena el sistema con señales que presentan error o cambios en sus parámetros, como son los

sistemas en la vida real, se tendrá un mejor rendimiento al trabajar con señales reales (Fernández, 2015).

En la cuarta propuesta, se tomaron las mismas consideraciones que en la propuesta 2 y se realizó el mismo principio de la propuesta 3 el cual es añadir ruido gaussiano de 10 dB, sin embargo, el cambio es que, en lugar de añadir el ruido a los parámetros de la señal, el ruido se añadió a la señal misma.

$$S = A \sin(2 * \pi i * 60 * n + \left(\frac{\theta}{180}\right) * \pi i) \quad (5)$$

La ecuación 5 es la ecuación general de las señales sintéticas ( $S$ ) que se realizaron para esta sección. Esta ecuación los parámetros conocidos de  $A$  amplitud,  $\theta$  fase y  $n$  el orden del armónico, 1 en caso de la señal fundamental, son los parámetros que dan las propiedades específicas de cada señal. En la propuesta 2 se determinaron los valores en los cuales estos parámetros variaban según el orden del armónico. Sin embargo, en la propuesta 3 y 4 se agrega un error en los parámetros, en el caso de la propuesta 3 y un error en la propia señal en la propuesta 4, esto con el fin de hacer un algoritmo más robusto y por ende un cálculo más preciso en los parámetros de amplitud y fase. En la ecuación 6 y ecuación 7 se observa la ecuación que representan estas dos propuestas.

$$A = awgn(A_1) ; \theta = awgn(\theta_1) \quad (6)$$

En la ecuación 6 se observa el caso extra que se mencionó en la propuesta 3, tomando como principio la ecuación 5, en este caso, antes de sustituir estos valores en la ecuación, el parámetro  $awgn$  representa el ruido gaussiano de 10 dB presentes en la  $A_1$  (amplitud antes de aplicar el ruido) y  $\theta_1$  (fase antes de aplicar el ruido). En la ecuación 6 representa la propuesta 4.

$$S_1 = awgn(S) \quad (7)$$

En la ecuación 7, a diferencia de la ecuación 6 donde también se presenta ruido en la señal sintética, ahora el ruido no es aplicado a los parámetros de amplitud y fase, sino a la señal total. La propuesta 4 que describe la ecuación 7, fue la que tuvo mejor desempeño o performance al evaluar las señales sintéticas de validación en las redes neuronales entrenadas con las 4 propuestas. Con esto se aumentó la robustez de esta sección de clasificación, sumamente importante debido a que estos factores serán sumamente importantes al momento de realizar la mitigación del sistema. Para corroborar esta aseveración, se planteó un esquema diferente en donde el bloque de clasificación del disturbio, a diferencia de lo antes mencionado, será sustituido por ecuaciones dedicadas para el cálculo de la amplitud y fase a partir de los números complejos.

### 3.5.3.2 Clasificación de disturbios a partir de ecuaciones

En esta sección se hablará de una propuesta diferente a la antes mencionada para el cálculo de los parámetros de amplitud y fase a partir de los números complejos que describen cada armónico. Esta nueva propuesta se realiza para llevar a cabo una comparación entre el método antes mencionado de clasificación a partir de un algoritmo inteligente y el resultado de implementar dos ecuaciones muy conocidas para calcular la amplitud y fase de un número complejo a partir de su parte real y su parte imaginaria. Esta nueva propuesta se desarrolla para corroborar la robustez de la red neuronal planteada en la sección anterior en comparación a una forma menos robusta y más propensa a errores en el cálculo. Para esta comparación se tomaron en cuenta las mismas entradas y salidas al módulo de clasificación mostrado en la Figura 9 pero con un cambio.

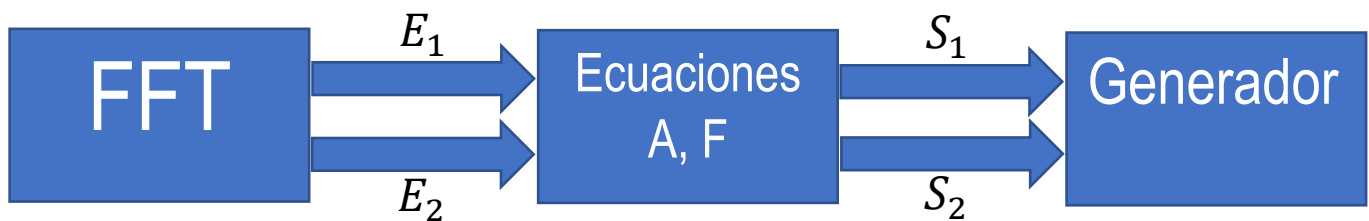


Figura 11.- Diagrama de metodología de clasificación de disturbios, a partir de las ecuaciones de amplitud y fase



La Figura 11 muestra el diagrama que sigue esta propuesta, donde cada una de las entradas  $E_1$  y  $E_2$  son las mismas entradas propuestas en el diagrama de la Figura 9 de la sección 3.5 al igual que las salidas  $S_1$  y  $S_2$  que también fueron explicadas en dicha sección. La principal diferencia a comparación del diagrama de la Figura 9 es la ausencia de los parámetros de entrada  $A$  y  $\theta$  que representan la amplitud y la fase respectivamente. Estos parámetros son los objetivo o targets al entrenar la red neuronal con las señales sintéticas definidas en la sección anterior. Dichas entradas no son requeridas ya que únicamente se hará uso de las ecuaciones para calcular directamente la amplitud y la fase de los 13 armónicos presentes en la señal, esto a través de las ecuaciones 8 y 9.

$$am = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (9)$$

En la ecuación 8 se observa la ecuación para calcular la amplitud donde  $am$  es la amplitud,  $a$  es la parte real del número complejo y  $b$  es la parte imaginaria del número complejo. En la ecuación 9 se observa la ecuación para calcular la fase ( $\alpha$ ) a partir de una identidad trigonométrica, como lo es el arco tangente, y los parámetros  $a$  y  $b$ . Como las entradas serán las mismas, teniendo en consideración la serie de pasos descritos en la sección 3.5.3, y las salidas también serán las antes mencionadas, se espera que en esta sección se tengan los mismos resultados a los proporcionados en la sección anterior, son embargo, hay que tener en cuenta algo sumamente importante, lo cual es la hipótesis planteada al usar una red neuronal como clasificador de disturbios.

La hipótesis planteada en este capítulo fue que, a diferencia de hacer uso únicamente de la amplitud y fase de los armónicos calculados a partir de la FFT, la red neuronal, debido a sus propiedades al entrenar esta red de forma correcta, puede proporcionar una mayor robustez a la sección al ser más resiliente a diferencia de solo usar la FFT o implementar ecuaciones, como en este caso. Esta sección se realizó con la intención de precisamente demostrar esta hipótesis. En el capítulo 4 se presentarán los resultados de ambas propuestas, pero se puede adelantar que la propuesta que tuvo mejores resultados fue la propuesta de la red neuronal. Al ser mejor la propuesta de la red

neuronal, esta será la pauta para la sección de clasificación de disturbios en línea detallada en la siguiente sección.

#### **3.5.4 Clasificación de disturbios en línea**

Esta sección de clasificación de disturbios en línea estará sumamente ligada a la sección donde se detalla el proceso de clasificación fuera de línea al igual que las demás en este capítulo, sin embargo, esta relación será aún más relevante debido a la metodología presente en esta sección. En el punto 3.5.3, se detalló la forma en que los procesos de medición, detección y clasificación se conectan entre sí y como trabaja uno con otro, sin embargo, en el punto 3.5.3.1 se determinó el cómo se realizó el proceso completo de clasificación de disturbios fuera de línea y justamente este punto será la parte esencial en esta sección.

Después de determinar cómo se realizaba el entrenamiento de la red para tener una mejor clasificación fuera de línea, todas las propiedades y puntos a tomar en cuenta del capítulo se resumieron en definir las entradas y salidas del bloque de clasificación y a su vez, este bloque está totalmente definido en los valores de peso y bias de cada una de las neuronas que conforman la red. Se puede acceder a dichos valores con la herramienta de NN toolbox de Matlab lo cual es la parte principal para realizar la implementación en línea ya que se utilizaron estos valores para generar la red en línea.

Dada la estructura de la tarjeta xQDAD233, la implementación de cada una de las secciones es sencilla ya que, como se vio, esta cuenta con el hardware dedicado a cada una de las secciones del proyecto, por lo que solamente se tiene que controlar este hardware con el uso del FPGA y esta sección no es la excepción. Esta red neuronal fue implementada en un módulo dedicado de la tarjeta xQDAD233 por lo que el costo computacional es menor a una estructura más compleja. Al no gastar recursos de procesamiento por no integrar la red neuronal completa en el dispositivo y sustituirlo por los valores calculados en la sección de clasificación fuera de línea, el costo y tiempo de procesamiento se ve optimizado lo cual es uno de los fundamentos de este proyecto para lograr una metodología completa y en línea en la tarjeta xQDAD233.

La configuración del módulo dedicado para la clasificación es simple, debido a que solamente se tiene que especificar las principales propiedades de la red neuronal como lo son: número de neuronas en la capa de entrada, número de neuronas en la cada oculta, número de neuronas en la capa de salida y el valor del peso y bias de cada neurona. El otro parámetro o propiedad que es muy importante para definir el comportamiento de la red es la función de activación que se determinó para la misma, en la sección 3.5.2 de menciono que esta fue la función TANSIG para el caso mencionado en el punto 3.5.3 y, como se tomaron estos valores para definir la red neuronal de forma en línea, este parámetro debe de ser el mismo por lo que los dos comparten todas sus características. Con esto, se puede definir un diagrama de la metrología en línea hasta este punto, en la Figura 12 se tiene este diagrama donde se detalla cada uno de los procesos definidos hasta ahora.

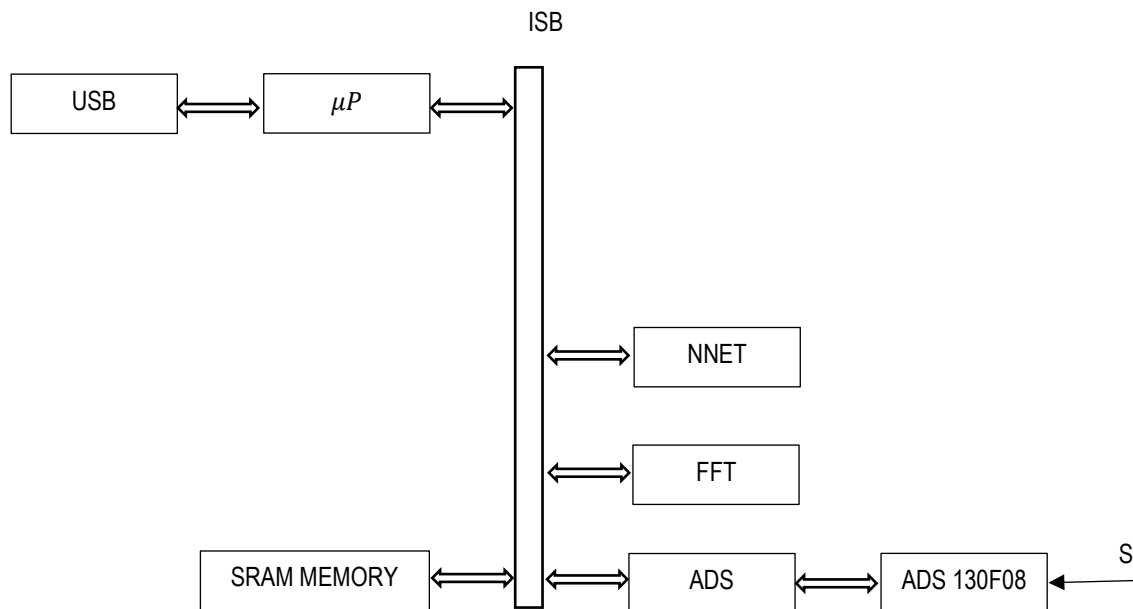


Figura 12.- Diagrama del sistema de clasificación en línea

En cada una de las secciones del capítulo 3 se ha detallado la tarea y el método por el cual se utilizaron cada uno de los módulos de la tarjeta xQDAD233, sin embargo, la Figura 12 es la representación del sistema de clasificación en línea. Este diagrama es la suma de todas las tareas, procesos y consideraciones hasta ahora se han hecho. S es la señal de entrada del sistema, tomada desde el conector J2 mostrado en el diagrama. El convertidor ADS desarrolla su labor de convertir los datos de la señal S de analógico a digital, posteriormente estos se guardarán en la SRAM MEMORY. Este bloque es sumamente importante ya que su manejo será con cada uno de los módulos ya que,

posteriormente, la FFT se realizará a la señal guardada al igual que el resultado de esta transformada, al final de este proceso se realizará la suma de los puntos mostrados en la tabla 5 y se guardarán nuevamente en la memoria SRAM. Estos 13 valores se separaron en parte real e imaginaria para tener las 26 entradas a la red neuronal (NNET), por último, los 26 datos de salida que arrojó la red fueron guardados en la memoria. Este proceso dará como resultado final los 26 datos que caracterizan los primeros 13 armónicos de la señal a analizar. Todos estos bloques y los procesos dentro de cada uno de ellos son controlados por el micro controlador ( $\mu P$ ) a través del ISB. El ISB es el bus por el cual se mandan las señales de control de cada uno de los módulos, así como las banderas para el inicio y termino de los procesos que se estén llevando a cabo en un determinado momento. Se podría decir, a manera de ejemplo, que el ISB es un camino por el cual se conectan todos los módulos que se necesitan para llevar a cabo un determinado proceso o tarea, mas todo lo antes mencionado. Por último, el USB es el método de comunicación del sistema con una PC, esta servirá para programar la tarjeta xQDAD233 con el programa necesario para realizar las labores determinadas. También, este puerto servirá para la comunicación bilateral entre la tarjeta xQDAD233 y la PC.

### **3.6 Mitigación de disturbios**

En esta última parte de la metodología se presentará el método por el cual se realizará la mitigación del disturbio, tanto fuera de línea como en línea. En esta sección se detallarán los últimos dos bloques de la Figura 4, siendo la inyección del complemento el último paso para mitigar los armónicos en la señal de voltaje presente en la carga de la micro-red.

Para eliminar este contenido armónico, como se planteó al inicio del capítulo 3, como muestra la Figura 4, sumar el complemento del disturbio a la micro-red. Este complemento es calculado por la red neuronal que, como se describió anteriormente, esta recibiera como parámetros de entrada la parte real y la parte imaginaria de los números complejos que representan cada armónico, teniendo como salida la amplitud y la fase de cada armónico. Con estos dos parámetros se puede recrear el componente armónico que tiene la señal fundamental de voltaje de cada uno de los casos mencionados en la tabla 3. Al tener dicha componente, se plantea que, al restar cada una de las

componentes armónicas de la señal, se logre tener únicamente la señal fundamental deseada, eliminando todo el contenido armónico presente en ella.

Para realizar la mitigación de esta manera, aunque se escuche un poco simple, tiene que tener por detrás una serie de consideraciones muy importantes, estas consideraciones o parámetros deben de ser iguales para garantizar una correcta mitigación ya que, de otra manera, se aumentará el contenido armónico de la señal fundamental, además se harán presentes más disturbios, dando como resultado mayor deformación en la señal fundamental, algo totalmente contrario a lo que busca esta metodología. Para comenzar, se tiene que conocer la estructura básica de la señal, dicho de otra forma, la ecuación que describe la señal de voltaje en tiempo. Esta descripción ya fue mostrada en la ecuación 5, siendo la forma básica de la señal de voltaje presente en la micro-red. Por otra parte, se necesita conocer la amplitud de la señal de voltaje de la señal. En la sección de medición y monitoreo, se plantearon todas las configuraciones de cargas presentes en la micro-red y, como se mencionó también en ese capítulo, se realizaron 5 mediciones por cada caso, estas mediciones fueron precisamente para determinar dicha amplitud. El otro parámetro a determinar es la frecuencia, pero debido a que la señal de alimentación de la micro-red, el voltaje V1 es la señal eléctrica proporcionada por la CFE, se conoce que la frecuencia de dicha señal es de 60 Hz, con esto se definen las principales características que definen la señal fundamental, señal que será el objetivo principal en esta sección.

A diferencia del capítulo anterior dedicado a la clasificación de disturbios, esta sección no tiene tantas consideraciones ya que dichas consideraciones fueron previamente contempladas a lo largo de cada sección de metodología. Sin embargo, hay un término el cual es importante para esta sección ya que ahora se busca inyectar el complemento de la red y este tendrá que estar totalmente sincronizado con la señal de voltaje para evitar las complicaciones antes mencionadas.

### **3.6.1 Cruce por cero**

El cruce por cero es un factor importante al trabajar con señal senoidales en sistemas que trabajan en línea. Este factor ayuda a sincronizar una señal con algún proceso determinado ya que dicho cruce muestra el inicio y final de cada semi ciclo de dicha señal (Sánchez, 2016).

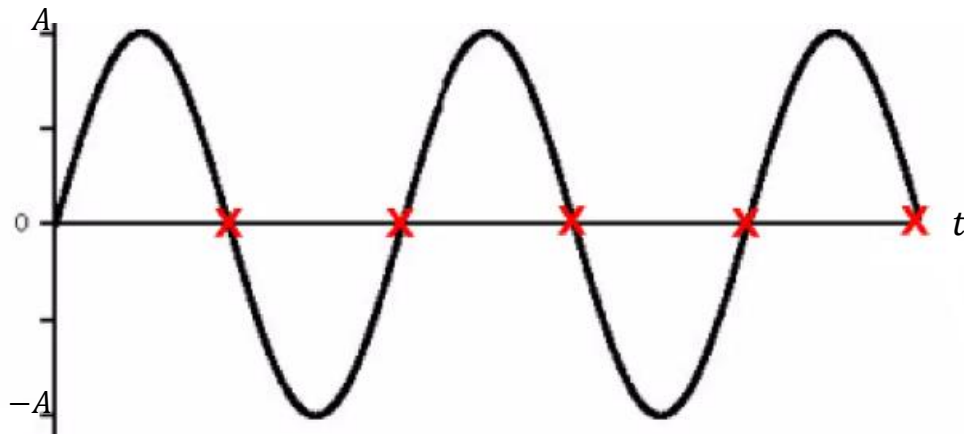


Figura 13.- Representación del cruce por cero (Loflin, 2018)

La Figura 13 muestra la representación del cruce por cero de una señal senoidal de amplitud  $A$ . Cada una de las marcas en el eje de  $t$  (tiempo) representa el cruce por cero de la señal. En este caso se conoce la frecuencia de la señal, 60 Hz, con el uso de una ecuación fundamental, la cual es la ecuación 10, se puede calcular el tiempo de cada cruce por cero.

$$t = \frac{1}{f} \quad (10)$$

Con esta ecuación se calcula el tiempo de cada cruce por cero en cada ciclo completo o cada semi ciclo de la señal. En este caso, se cuenta con un ciclo cada 0.016666 segundo, o 16.6 milisegundos (ms), por lo que podemos determinar que un cruce por cero será cada 8.35 ms (loflin, 2018). Con este tiempo se podría determinar cada cuando se debe de realizar la suma del complemento del armónico para así obtener la señal fundamental deseada. Sin embargo, si bien se puede conocer dicho tiempo, es necesario sincronizar la suma del complemento con cada inicio de ciclo, con el fin de realizar la operación sin ningún desfase y así evitar inyectar a la red más contenido armónico o deformaciones.

Sumando esta consideración a las antes mencionadas en caso de la mitigación, se puede determinar la forma en la que se desarrollara la mitigación del disturbio en cada uno de los casos, mitigación fuera de línea y mitigación en línea.

### **3.6.2 Mitigación de disturbio fuera de línea**

Para este caso, se realizaron todos los pasos anteriores, ya que este es el último paso de la metodología. El proceso comenzó con la medición y monitoreo de la señal de voltaje presente en la carga de la micro-red, realizando cada una de las pruebas mencionadas en la tabla 3, teniendo en cuenta las pruebas 22 a 41, y se creó un banco de pruebas. Si bien se tomaron 5 muestras de cada una de las combinaciones de cargas, solo se tomó en cuenta una señal de cada prueba. Posteriormente, se tomó una señal del banco de pruebas, a esta señal se le aplicó la transformada FFT y se realizó el proceso de chorreo espectral teniendo en cuenta los puntos de la tabla 4.

Al contar con los 13 armónicos presentes en la señal, representados por 13 números complejos, se definieron las 26 entradas de la red neuronal y, desarrollando la red como se explica en toda la sección 3.5, se encontraron las amplitudes y las fases de los 13 armónicos. Con esto, utilizando la ecuación 5 se generaron las señales de cada uno de los armónicos con el fin de restar cada uno de la señal fundamental. Para esto, se realizaron señales sintéticas con los parámetros calculados por la red neuronal y generando cada señal con la ecuación 5 y con un tamaño igual al de la señal original. Estas 13 señales se sumaron para generar una señal de tamaño igual a la señal original y con todo su contenido armónico, esta señal también fue llamada señal complemento. Para tener en consideración el cruce por cero, se buscó el primer cruce por cero de la señal original y, desde este punto, se realizó la resta de la señal original y la señal complemento. Por último, se sumaron estas dos señales para tener como resultado la señal fundamental.

Al llevar a cabo toda la metodología fuera de línea, el resultado antes de tener en cuenta lo mencionado en el presente capítulo, es la señal complemento, señal que cuenta con todo el contenido armónico presente en la señal original. Esta señal es la buscada desde un inicio ya que modela o contiene la distorsión armónica de la señal. Esta señal es el resultado de todos los pasos y consideraciones planteadas hasta ahora. Con esto en cuenta, los últimos pasos son tener en

consideración el cruce por cero y realizar la resta de estas señales. Con esto se busca tener como resultado la señal fundamental sin contenido armónico o con un porcentaje significativo de mitigación. Esto se verá de forma gráfica al tener la comparación de la señal original y la señal resultante de esta metodología, pero para tener un valor exacto se necesita calcular el THDv. Este parámetro cuantificará cual fue la distorsión armónica total de la señal original y la señal resultante con esto se medirá de forma correcta la eficiencia de esta metodología.

Para calcular este parámetro se necesita conocer la amplitud de cada armónico presente en una señal por lo que, al finalizar la sección de detección de disturbios ya se cuenta con esta información de la señal original y, en el caso de la señal resultante, se realizó una transformada a esta señal, teniendo en cuenta el chorreo espectral, para conocer este factor y saber el porcentaje de mitigación obtenido.

Este es el último paso de la metodología fuera de línea, los resultados de cada una de las secciones fuera de línea se mostrarán en el capítulo 4 donde se discutirán los resultados obtenidos de esta metodología.

### **3.6.3 Mitigación de disturbios en línea**

Siendo esta la última sección de la metodología, se detallará algo que se ha hecho a lo largo de todo el capítulo lo cual es hacer algo sumamente parecido a lo explicado en la sección fuera de línea de esta sección. En la sección 3.6.2 se explicaron los pasos para desempeñar la mitigación completa en línea, teniendo en cuenta cada una de las consideraciones marcadas hasta ahora, en esta sección se realizará un procedimiento muy parecido, dicho procedimiento se muestra en el diagrama de la Figura 14 donde se muestran todas las secciones y el tratamiento que lleva la señal de inicio hasta el final.



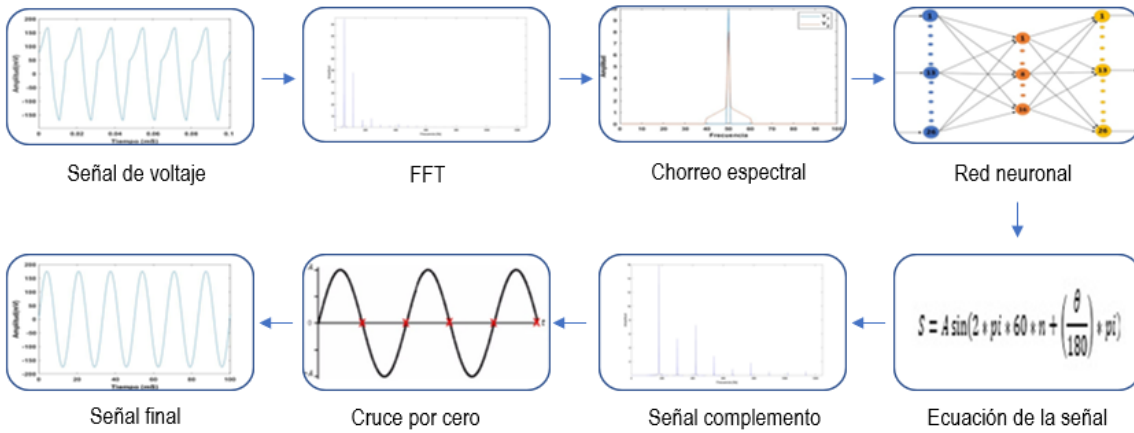


Figura 14.- Mitigación de disturbios en línea

En la Figura 14 se observa el diagrama que describe el tratamiento de la señal a lo largo de toda la metodología. Cada uno de los bloques ya han sido detallados en sus respectivas secciones, pero esta figura muestra cada tratamiento y la totalidad de la metodología fuera de línea y en línea.

# CAPÍTULO 4:

## 4 Resultados

Este capítulo es dedicado a presentar los resultados de la metodología de mitigación de disturbios, estos se observarán de manera grafica en cada una de las secciones antes expuestas. Se mostrarán las gráficas relacionadas a las secciones de medición, detección, clasificación y mitigación del contenido armónico de la señal de voltaje en la carga de la micro-red eléctrica. Al final del capítulo se mostrará el THDv de cada uno de los casos y se medirá la eficiencia del proyecto.

Esta sección comienza mostrando los resultados de la sección de medición y monitoreo. En esta parte se obtendrán las señales de voltaje en la carga R1 desde el conector J2 mostrado en la Figura 5. Estas señales cambiarán dependiendo de la carga sometida en el devanado secundario del transformador T2. Las señales cuentan con una frecuencia de muestreo de 8 KHz y un tamaño de 48000 datos.

### 4.1 Resultados de Medición y monitoreo

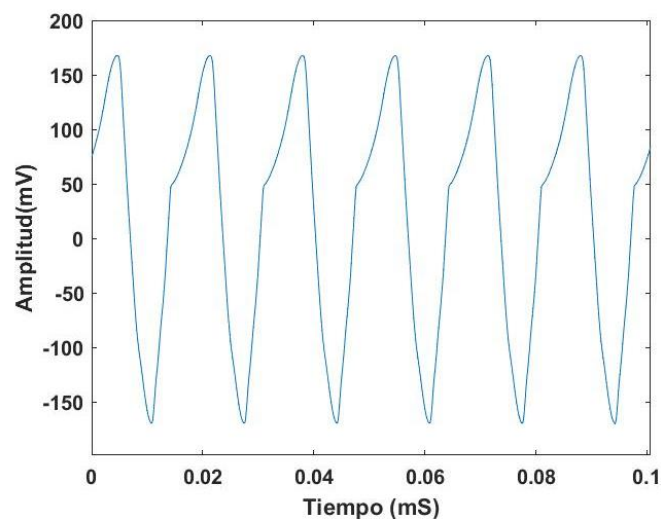
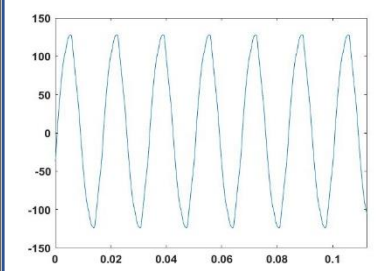
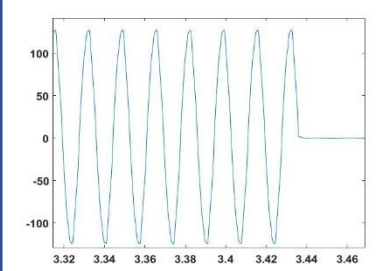
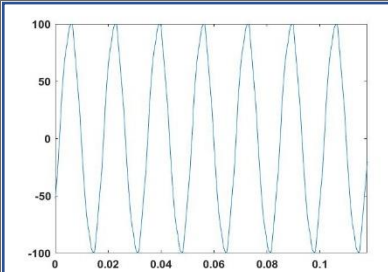
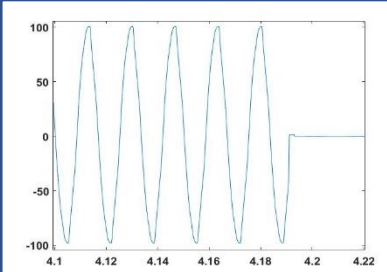
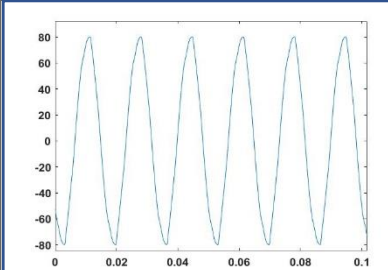
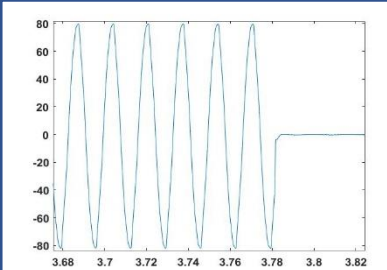
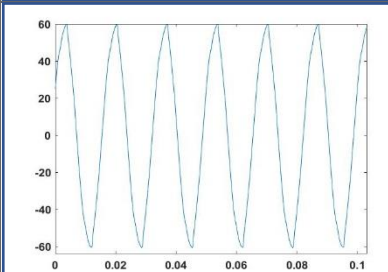
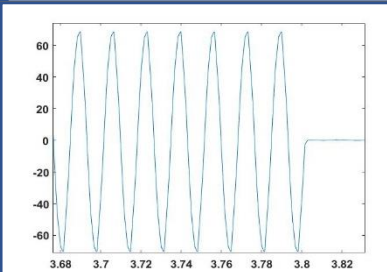
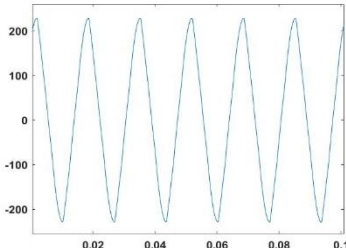
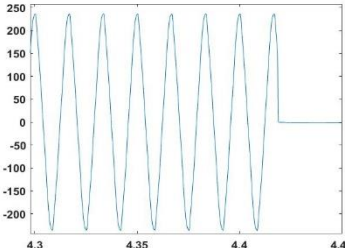
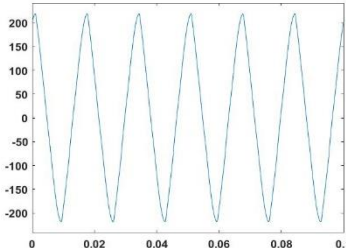
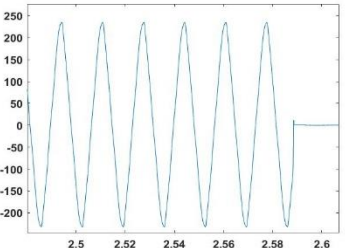
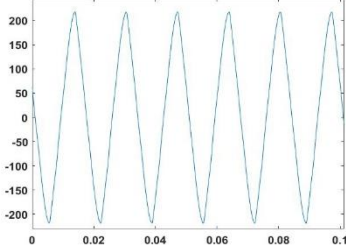
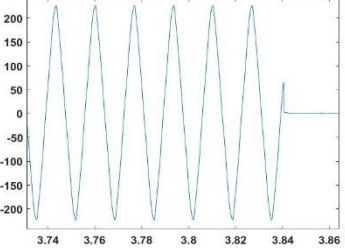
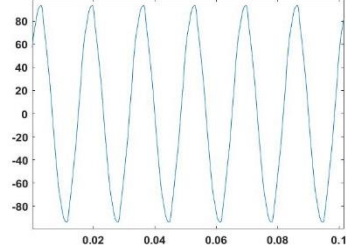
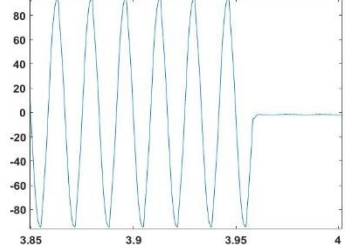
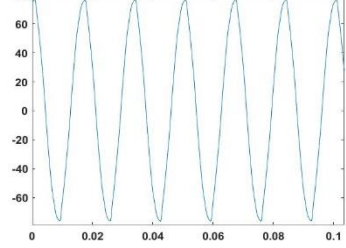
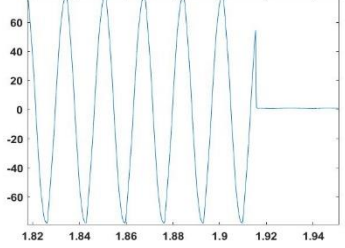
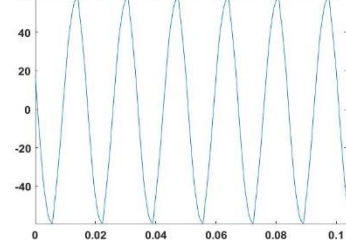
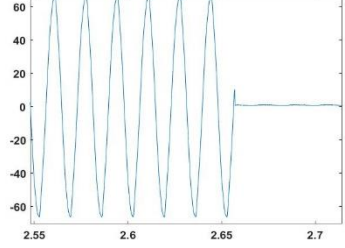
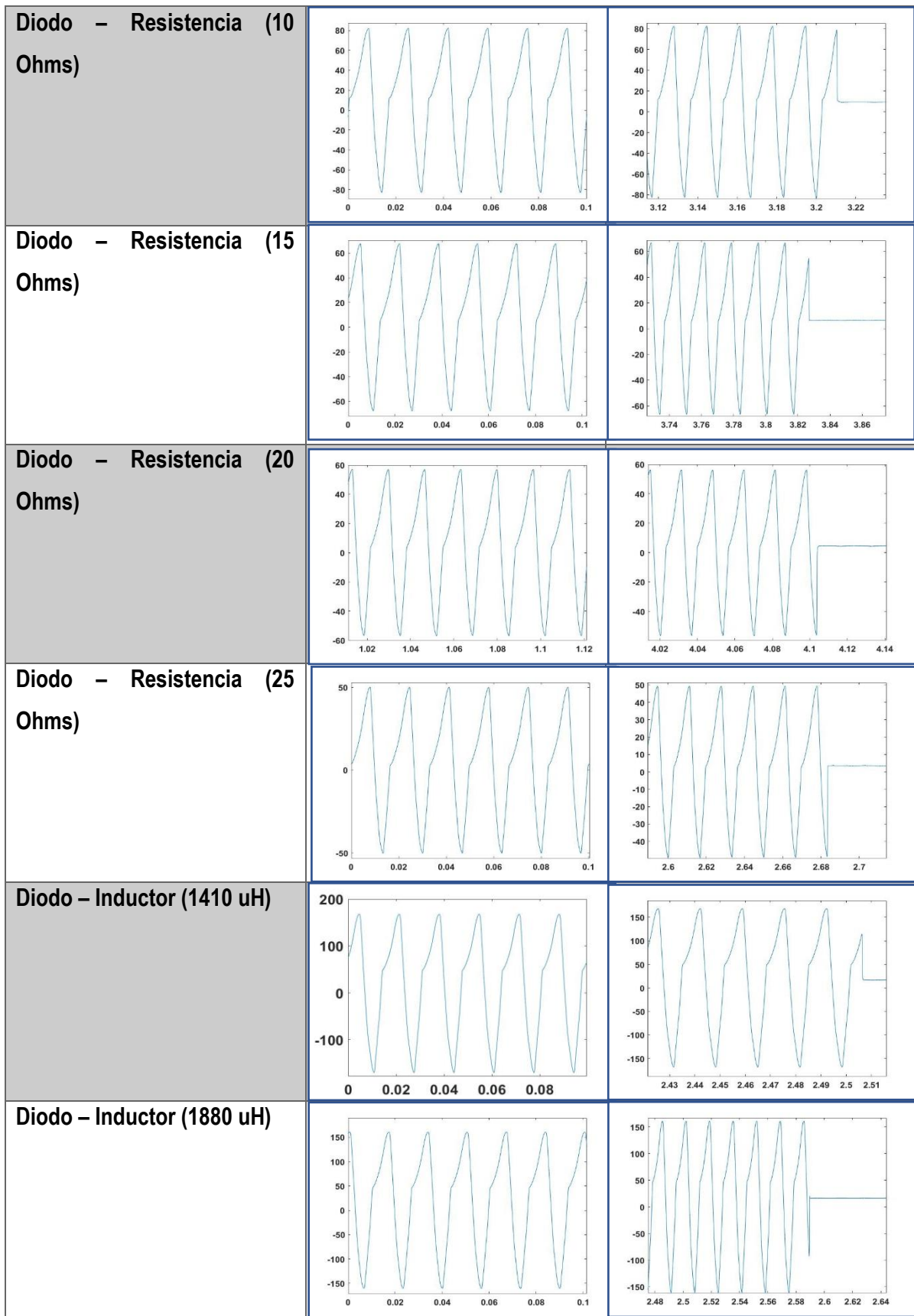


Figura 15.- Señal de voltaje en la carga de la micro red, Diodo-Inductor (1410 uH)

La Figura 15 muestra una de las señales capturadas en el sistema, esta señal presenta deformación en su señal fundamental debido a las cargas inyectadas en la red, en este caso, es la combinación de cargas inductivas, gracias al Inductor de 1410 uH, y semiconductoras debido a un diodo 1N4007. Esta carga indujo una deformación en específico debido a sus cargas, dependiendo de estas la deformación podría cambiar. En la tabla 6 se muestran el resto de las señales de cada uno de los casos descritos en la tabla 3.

Cargas	Sin Disturbio Transitorio	Con disturbio Transitorio
<b>Resistencia 10 Ohms</b>		
<b>Resistencia 15 Ohms</b>		
<b>Resistencia 20 Ohms</b>		
<b>Resistencia 25 Ohms</b>		

<p><b>Inductor 1410 <math>\mu</math>H</b></p>		
<p><b>Inductor 1880 <math>\mu</math>H</b></p>		
<p><b>Inductor 2360 <math>\mu</math>H</b></p>		
<p><b>Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 <math>\mu</math>H)</b></p>		
<p><b>Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 <math>\mu</math>H)</b></p>		
<p><b>Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 <math>\mu</math>H)</b></p>		



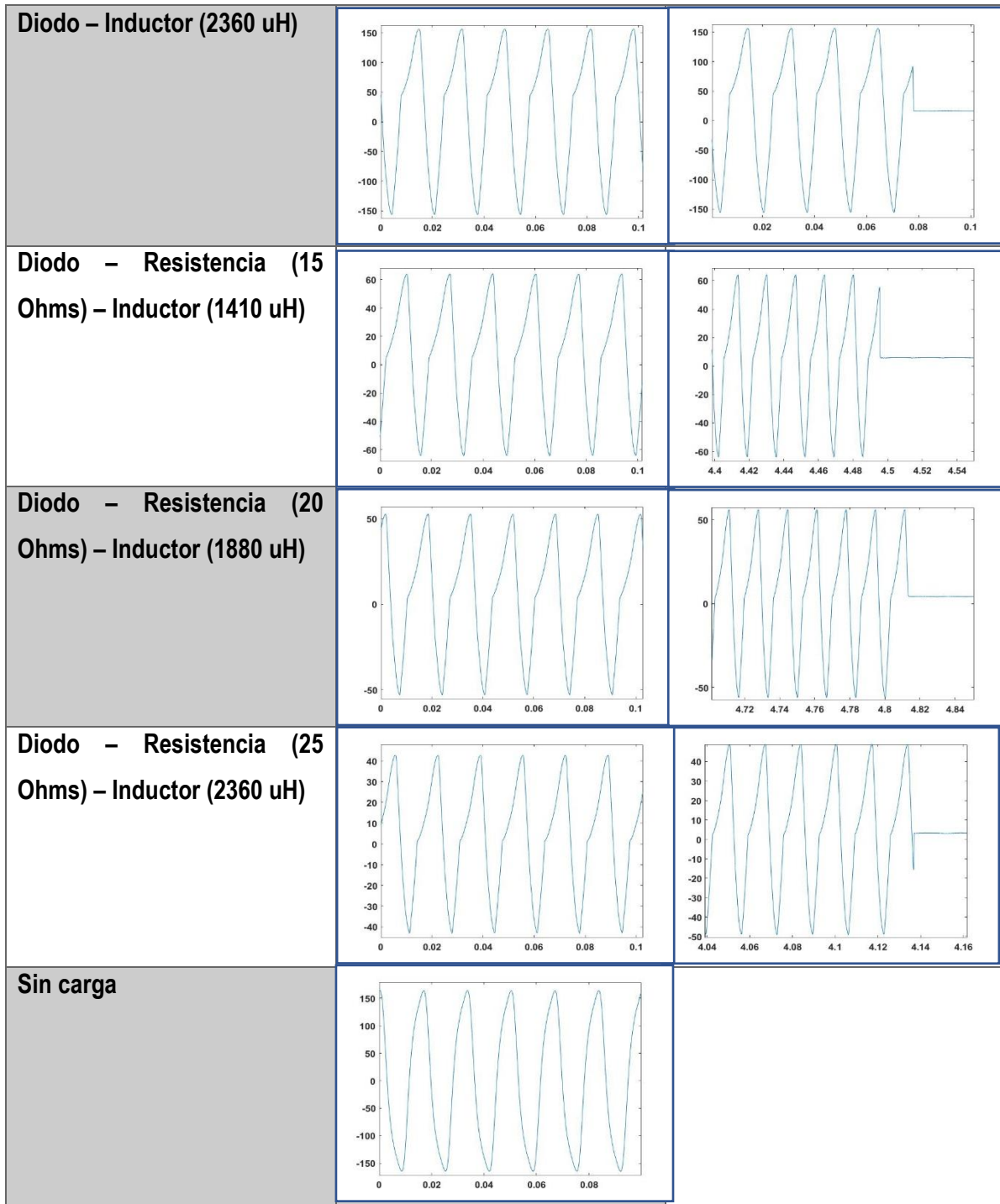


Tabla 7.- Monitoreo de la señal de voltaje presente en la carga R1

En la tabla 6 se observan todas las pruebas realizadas en la micro-red, estas pruebas son divididas entre señales que tienen contenido transitorio y las pruebas que no cuentan con este disturbio. En el eje X de las señales se tiene el tiempo (mS) y en el eje Y la amplitud de la señal (mV)

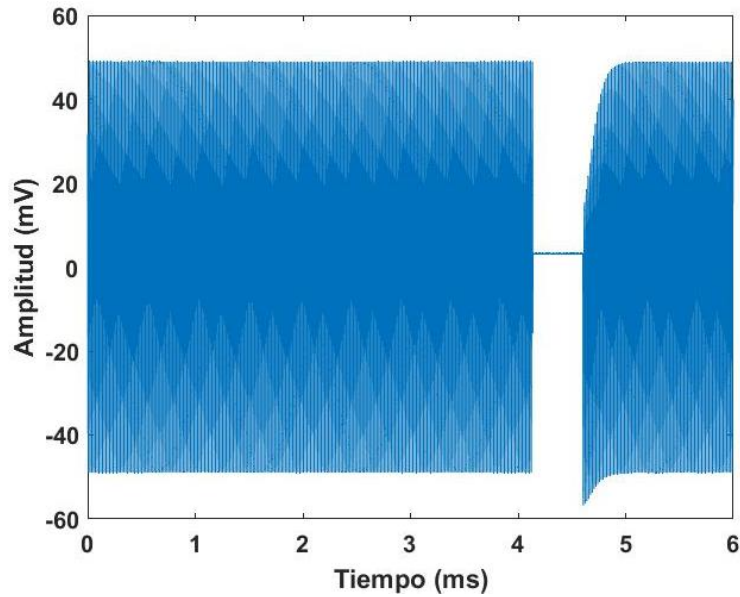


Figura 16.- Señal de voltaje en la carga de la micro red, Diodo-Inductor (1410  $\mu$ H) con disturbio transitorio

La Figura 16 muestra un evento transitorio en la señal de voltaje cuando se presenta una carga Diodo-Inductor (1410  $\mu$ H). Este evento es considerado en todo momento y en cada prueba se observa este disturbio en cada prueba de la tabla 6. Dependiendo del tipo de carga que se esté conectando a la micro-red se consiguen distintas distorsiones en la señal fundamental. Estas distorsiones son principalmente caídas en el voltaje de la señal o amplitud, ocasionando una deformación de la señal senoidal. Esta deformación se observa de forma evidente cuando se cuentan con cargas con semiconductoras, dicha carga introduce más distorsión a la señal en comparación a las demás cargas, ya que las cargas resistivas e inductivas, si bien también añaden distorsión a la señal, estas ocasionan una disminución notable en la amplitud de la señal. La distorsión ocasiona la presencia de contenido armónico y, siguiendo la serie de pasos explicados en la Figura 14, se aplicará la transformada FFT para calcular el contenido armónico.

En cada uno de los casos presentes en la tabla 6 se realizaron 5 pruebas para cada uno. Esto fue debido a que, para la siguiente parte de clasificación, es sumamente importante conocer los rangos en los cuales pueden estar los valores de cada armónico. Teniendo esto en cuenta, se aplicará la transformada FFT a cada una de las pruebas, por lo que en total se realizará 205 veces esta transformada.

## 4.2 Resultado de Detección de disturbios

Con el banco de pruebas mostrado en la tabla 6 y, teniendo en cuenta todas las consideraciones realizadas en la metodología, se mostrará a continuación el resultado de las FFT aplicada a cada señal.

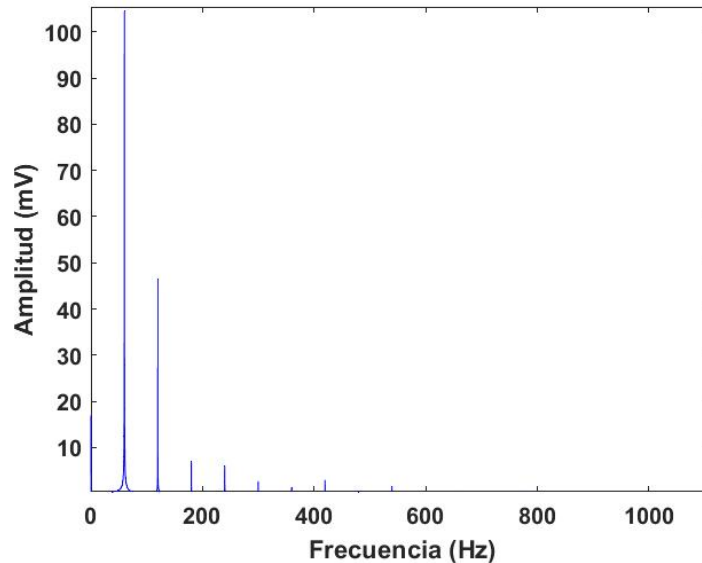
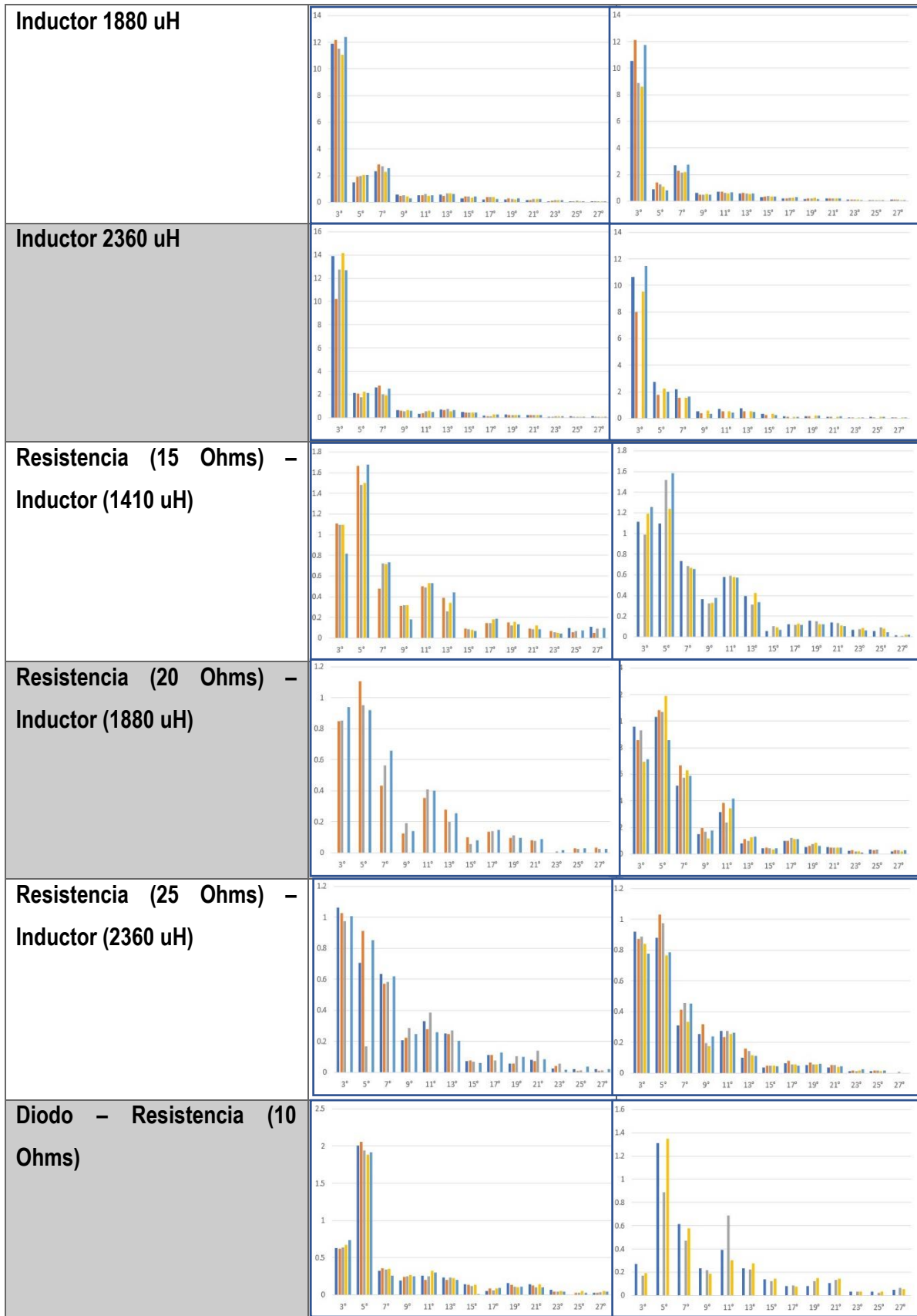


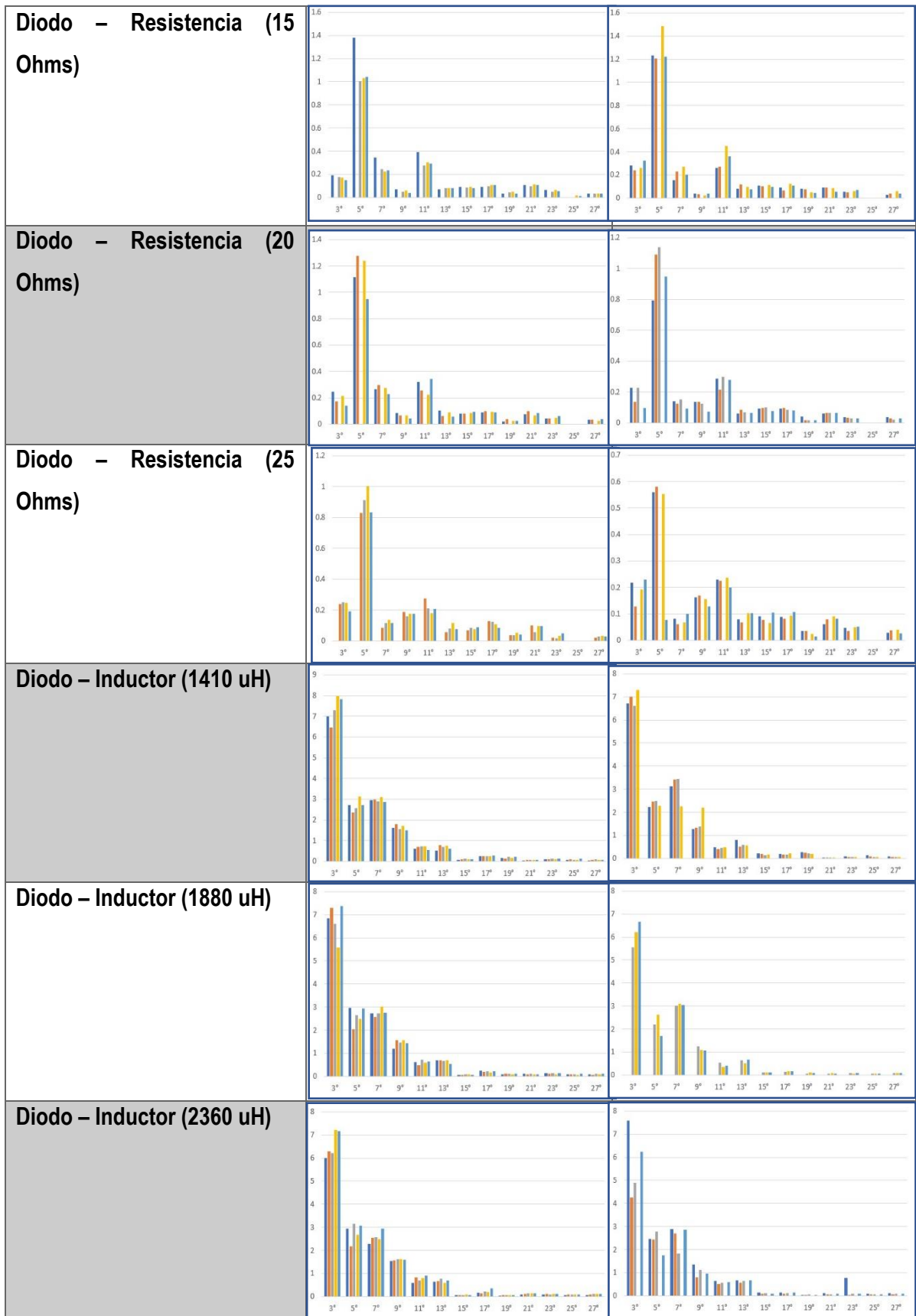
Figura 17.- Transformada FFT, prueba Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio

La Figura 17 es la FFT aplicada a la señal mostrada en la Figura 15, esta transformada representa la prueba realizada con las cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio. En este punto, únicamente se ha realizado la prueba ya que, como se observa en la parte inferior de la Figura 17, todavía se cuenta con correo espectral en esta figura. En esta sección se realizará la transformada FFT a las 205 pruebas realizadas a la micro-red sin considerando el correo espectral. A continuación, en la tabla 7 se mostrarán los resultados de esta sección en cada una de las pruebas, mostrando las amplitudes de los diferentes 13 armónicos presentes en las señales.



Cargas	Sin Disturbio Transitorio	Con disturbio Transitorio
<b>Resistencia 10 Ohms</b>		
<b>Resistencia 15 Ohms</b>		
<b>Resistencia 20 Ohms</b>		
<b>Resistencia 25 Ohms</b>		
<b>Inductor 1410 uH</b>		





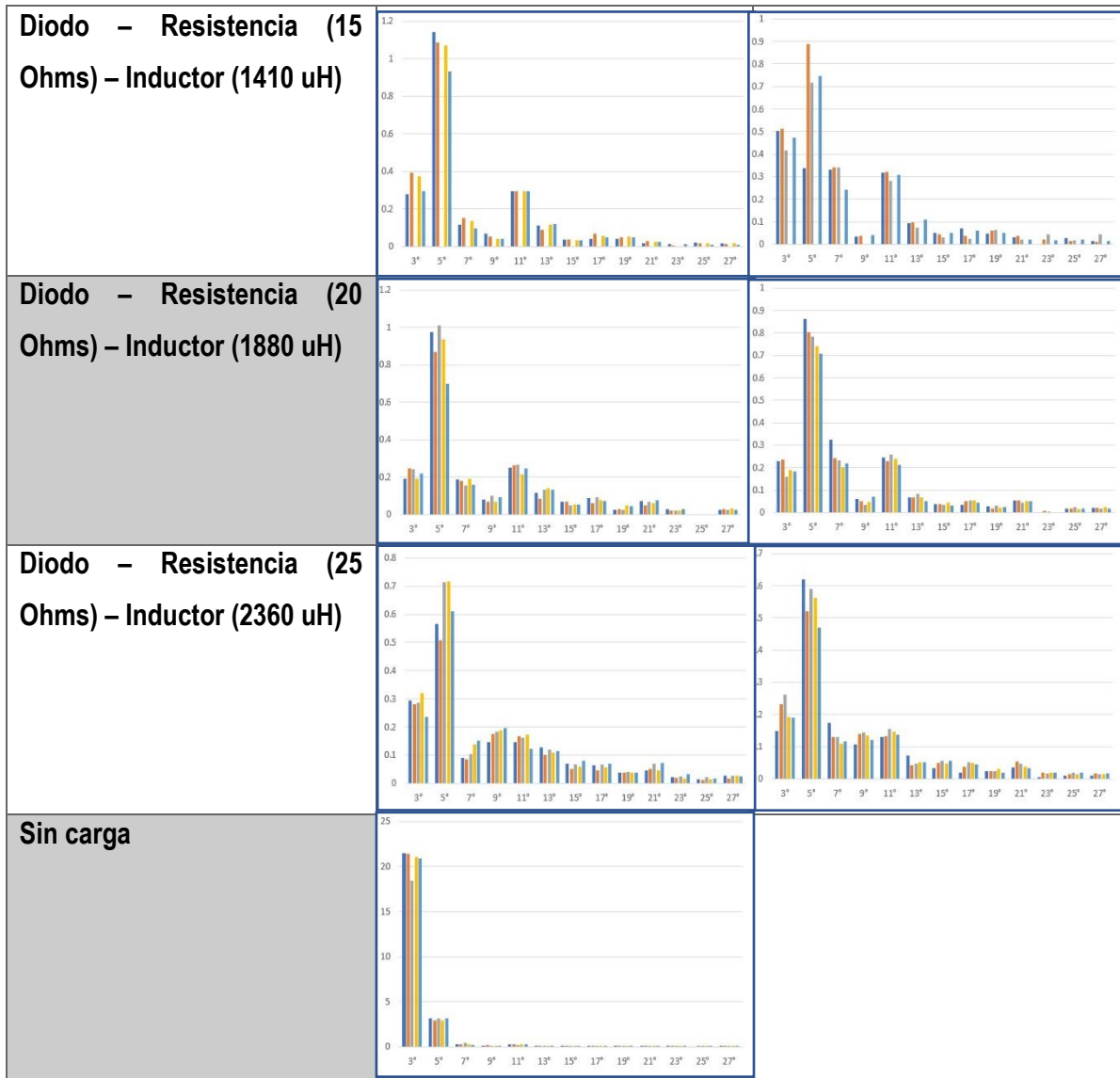


Tabla 8.- Amplitud de los armónicos presentes en las distintas pruebas

La tabla 7 muestra la comparación de las amplitudes de los armónicos presentes en las pruebas realizadas con las distintas cargas en la micro-red. En alguno de los casos, no se muestran las 5 pruebas planteadas desde un inicio, esto es debido a que el sistema de adquisición no tenía un correcto desempeño en algunos casos, por lo tanto, no podía capturar la totalidad de todas las pruebas. Este error presente en la tarjeta xQDAD233 provocaba que las señales no se pudieran capturar en su totalidad, esto se traducía en señales de menor duración o con un menos número de datos. Debido a este problema, y tomando en cuenta que la longitud de la señal es importante debido

a la metodología planteada, provocaba que dichas pruebas no pudieran ser útiles para el resto del proyecto, por lo que se desecharon.

Restando las pruebas que no se pudieron realizar debido al fallo de la tarjeta xQDAD233, el sistema de adquisición presentó una eficiencia del 86.87% de efectividad. A continuación, se observa en la Figura 18 una de las gráficas presentes en la tabla 7 y se detalla las propiedades de cada grafica.

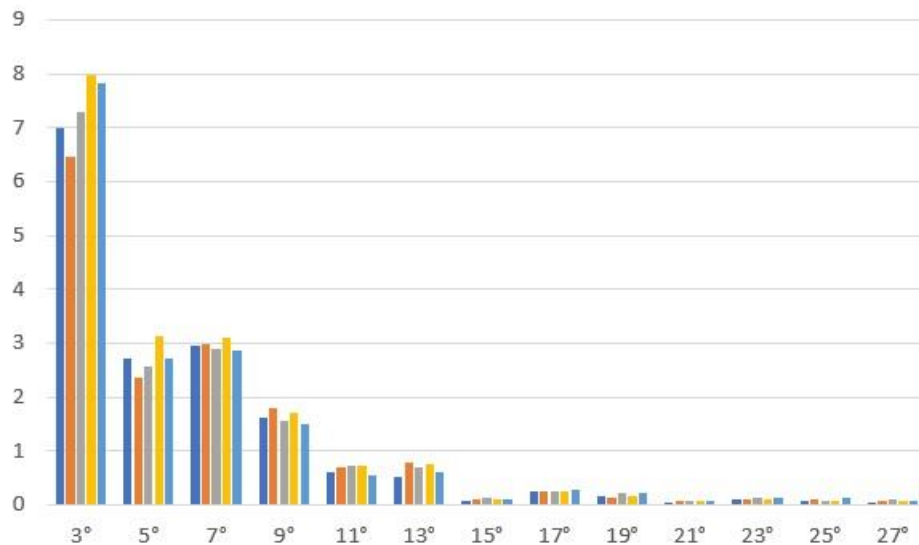


Figura 18.- Transformada de las 5 pruebas realizadas con las cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio

La transformada FFT entrega como resultado las amplitudes de los armónicos presentes en la señal de voltaje en la carga R1, en la Figura 18 observamos el resultado de la transformada de las 5 pruebas con las cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio sin haber tomado en consideración el chorreo espectral. Si bien las 5 pruebas se realizaron para conocer los rangos de las amplitudes de los armónicos y corroborar la constancia de este valor, también sirvió para conocer el comportamiento del contenido armónico en la señal. En la sección de metodología, se planteó que los armónicos tienen un comportamiento similar a la Figura 2c y, en el caso particular de estas cargas, se puede determinar que esta aseveración fue correcta.

En las distintas pruebas que conforman la tabla 7, el comportamiento de los armónicos varía dependiendo de las cargas, en algunos casos, el armónico principal o que tiene mayor presencia es el armónico 3, como en la prueba de la Figura 18, sin embargo, en las pruebas con las cargas Diodo-Resistencia (20 Ohms) el armónico con esta característica es el armónico 5. Este comportamiento

puede verse repetido en los armónicos de mayor orden, donde conforme mayor sea el orden el mismo menor es su amplitud, pero en algunos casos el valor de los armónicos de mayor orden es mayores a los primeros armónicos. Por ejemplo, la carga Diodo – Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH) en los armónicos 15 y 17.

Si bien estos casos son ejemplos donde propuesto cambia respecto a lo planteado con la Figura 2c, el comportamiento general sigue siendo el mismo, esto quiere decir que la amplitud de la señal fundamental es mayor a cualquier amplitud de los armónicos. Estudiando este comportamiento y verificándolo con las 178 pruebas realizadas, ahora se puede plantear un correcto entrenamiento para la red neuronal que será el algoritmo de clasificación del disturbio.

### **4.3 Resultados de Clasificación de disturbios**

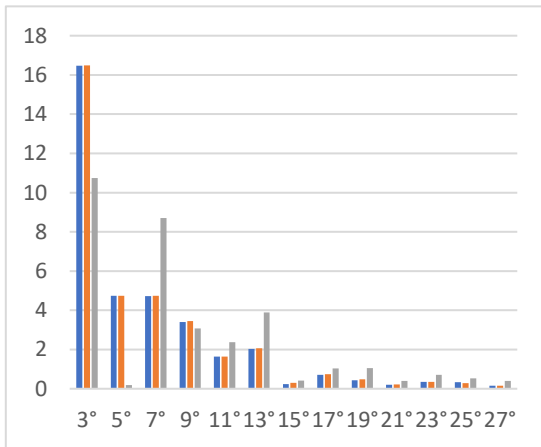
El correcto entrenamiento de la red neuronal es el factor principal para tener un rendimiento positivo del algoritmo. Una vez definiendo las características principales de la red como las neuronas en capa de entrada, neuronas en capa oculta, neuronas en la capa de salida y la función de activación, el siguiente paso es determinar los vectores o señales de entrenamiento al igual que los targets u objetivos. Como ya se mencionó, la red neuronal propuesta en esta ocasión fue una red neuronal con 26 neuronas tanto en la capa de entrada como en la capa de salida, 16 neuronas en la capa oculta y la función de activación tipo TANSIG. Definiendo estos parámetros, junto con las señales de entrenamiento, se entrenó la red neuronal con 500 señales sintéticas siguiendo todos los pasos y consideraciones descritos en el capítulo 3. Al definir el vector de 26X500, tanto de entradas como targets con el uso del NN toolbox, el entrenamiento culmina con cada una de las neuronas en cada capa con un peso y bias en específico. Estos pesos son los que definen el comportamiento de la red y dependiendo de las señales de entrenamiento estos pueden variar, aunque se consideren las mismas características.

Para mostrar el desempeño o performance de la red, se tendrá que realizar los pasos para la mitigación también mencionados en el capítulo 3, con esto se podrá comparar cada una de las propuestas de red que se plantearon y su eficiencia al calcular tanto la amplitud y la fase de cada uno

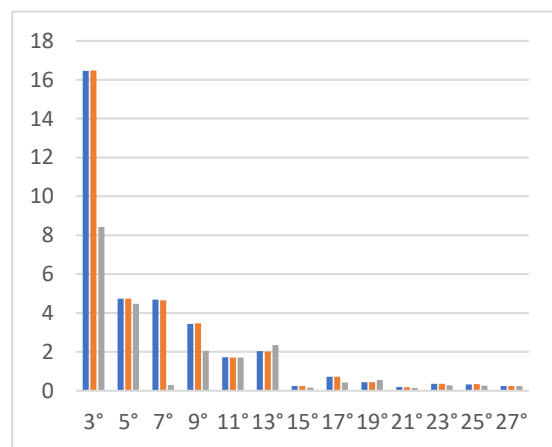
de los armónicos presentes en las diferentes pruebas realizadas a la micro-red. Para realizar esta comparación, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El chorreo espectral de cada una de las gráficas de la tabla 7 y la Figura 18
2. Las características de las señales de entrenamiento de la red fueron definidas en la sección 3.5.3.1.
3. La ecuación para generar las señales de compensación fue la ecuación 5.
4. Se sumaron la totalidad de los armónicos para calcular la señal complemento y se realizó la transformada FFT de esa señal teniendo en cuenta también el chorreo espectral. En este punto se espera que la FFT de la señal complemento y la señal original sea la misma.
5. Realizando la resta de la señal original y la señal complemento teniendo en consideración el cruce por cero, se tendrá como resultado una señal mitigada.
6. Aplicando la FFT a la señal mitigada, también considerando en todo momento el chorreo espectral, se espera que esta señal mitigada presente menor contenido armónico.

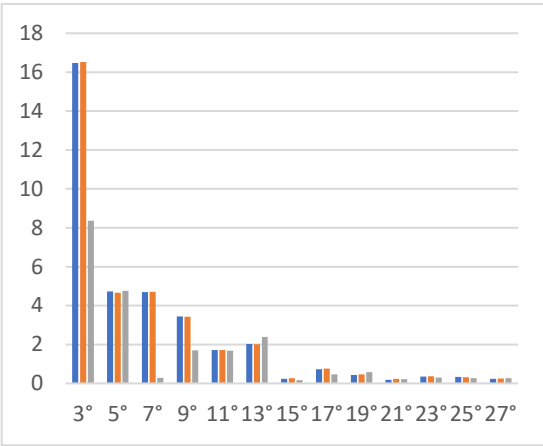
En la Figura 19 se muestran los resultados de la transformada FFT de la señal original, la FFT de la señal complemento y, por último, la FFT de la señal mitigada. Estos resultados corresponden a cada una de las cuatro propuestas realizadas en el entrenamiento de red neuronal.



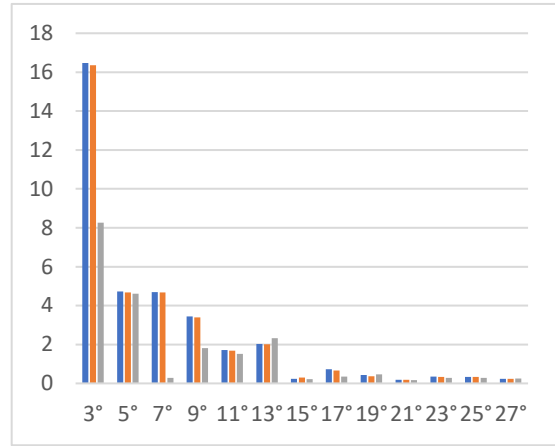
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 19.- Resultados de la implementación del algoritmo de clasificación de disturbios, (a) propuesta 1, (b) propuesta 2, (c) propuesta 3, (d) propuesta 4, cargas Diodo-Inductor (1410 uH) sin transitorio

En la Figura 19 se encuentra el resultado de las 4 propuestas distintas al implementar la metodología de clasificación de disturbios. Siendo la primera barra de cada figura el resultado de la FFT de la señal original, la segunda barra el resultado de la FFT de la señal complemento y la tercera barra el resultado de la FFT de la señal mitigada. Cabe aclarar que, la representación de la Figura 19, se ha tomado en cuenta el chorreo espectral y puede verse de forma gráfica su resultado. Al analizar la Figura 18 se denota que es la misma prueba que el de la Figura 19 y la Figura 17, sin embargo, al analizar el valor de la amplitud de cada armónico, estos aumentan de valor en el caso de la Figura 19 a comparación de las Figuras 17 y 18, este aumento es el resultado del chorreo espectral.

En las gráficas de la tabla 7, las Figuras 17 y 18, todas las figuras muestran la amplitud en mili volts (mV) en el eje Y, y el orden del armónico en el eje X. Al analizar estas figuras se encuentra un aumento en la amplitud o mV en los armónicos, esto es debido a que hasta el punto 4.3 se tomó en cuenta el chorreo espectral y se realizó la corrección explicada en la sección 3.4.2. Al realizar esta acción se tiene como resultado un aumento en la amplitud mostrada en la FFT debido a que ya se toma en consideración la total de la potencia de la señal o disturbio. Es paso se realizó a las 3 señales mostradas en la Figura 19 y en cada uno de los casos a, b, c y d.



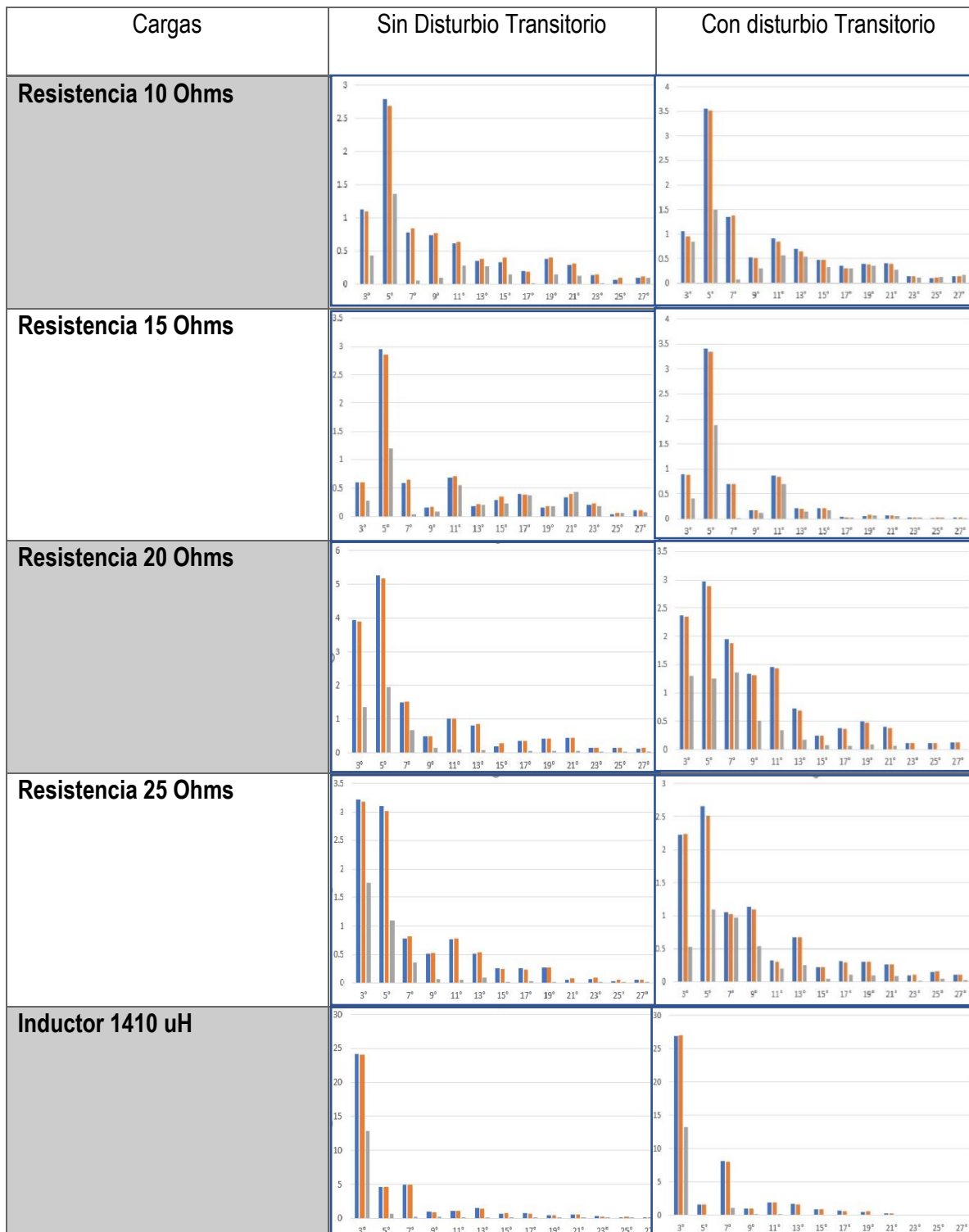
Ya se aclararon las diferencias entre las propuestas de red neuronal, sin embargo, la Figura 19 se muestran de forma gráfica los resultados que cada una de las propuestas generó. En la primera propuesta se tiene un cálculo muy preciso de la amplitud de los armónicos, esto se nota al analizar las dos primeras barras del caso (a), pero al analizar la tercera barra del mismo caso se observa que en algunos casos, si bien se tuvo mitigación del contenido armónico en alguno de los casos, también hubo aumento en el caso del armónico 5° y 13°. Esto es debido al error causado al calcular la fase del armónico que, como ya se mencionó, este factor al no ser calculado de forma correcta puede aumentar el contenido armónico en lugar de mitigarlo. Al realizar los cambios pertinentes a cada propuesta se obtuvieron los resultados presentes en los casos (b), (c) y (d) de la Figura 19, estos cambios dieron como resultado un aumento en la eficiencia del algoritmo de clasificación, esto se puede observar al analizar la amplitud de cada uno de los armónicos. A diferencia del caso (a), no hay aumento en alguno de los armónicos y la amplitud de estos baja, aumentando la eficiencia del algoritmo y de la metodología en general. Al ser muy parecidas estos 3 últimos casos, para ver estos resultados de forma exacta se calculó la THDv de la señal mitigada en cada uno de los casos. Este valor determina cual es la mejor propuesta realizada. Al implementar la ecuación 2 se calcula este parámetro y los resultados son mostrados en la tabla 8.

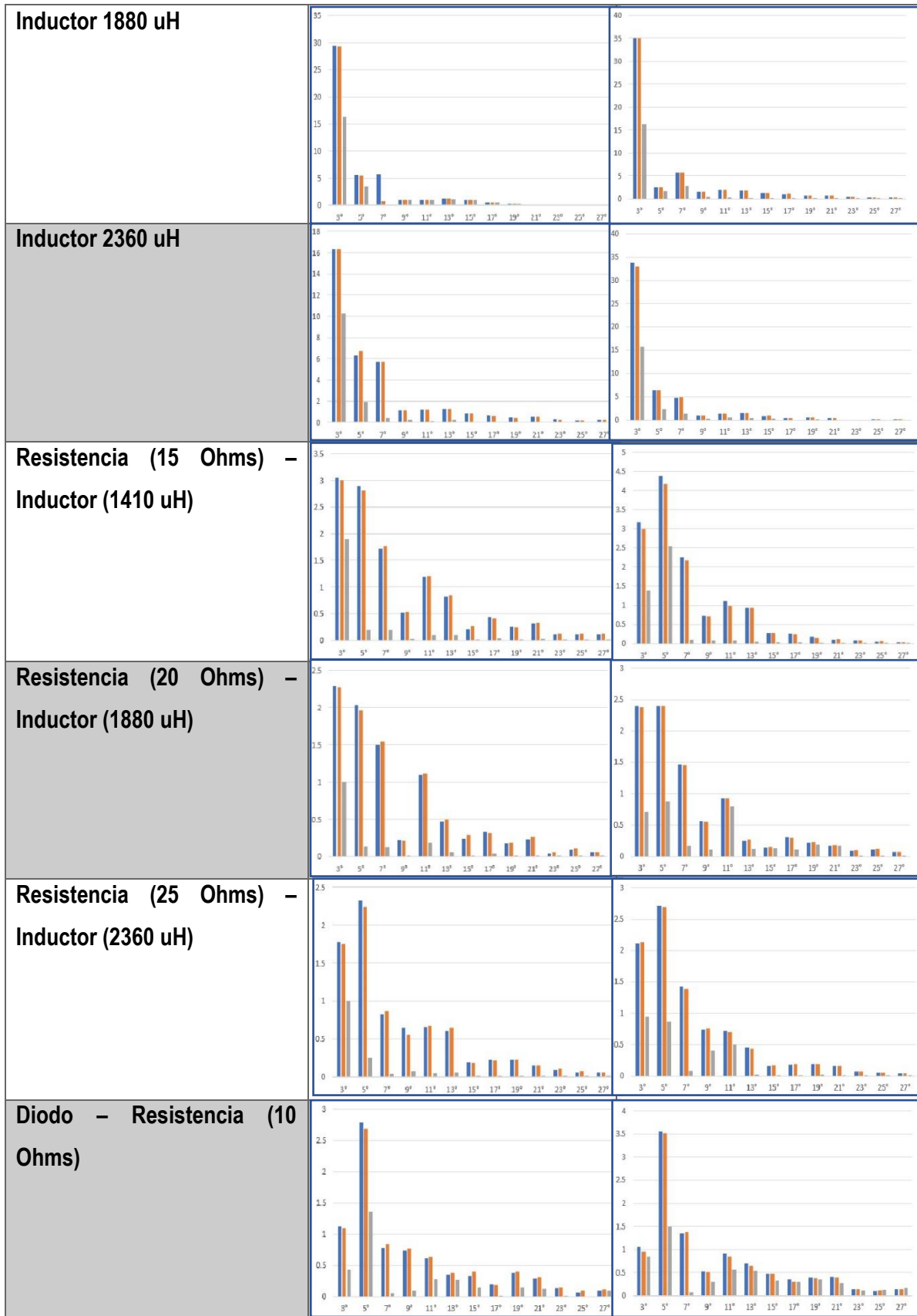
Red Neuronal	THDv original	THDv mitigación	Porcentaje de mitigación
Propuesta 1	12.6882	10.7430	18.1067
Propuesta 2	12.6882	7.3208	44.1939
Propuesta 3	12.6882	7.3327	44.1032
Propuesta 4	12.6882	7.2076	45.1148

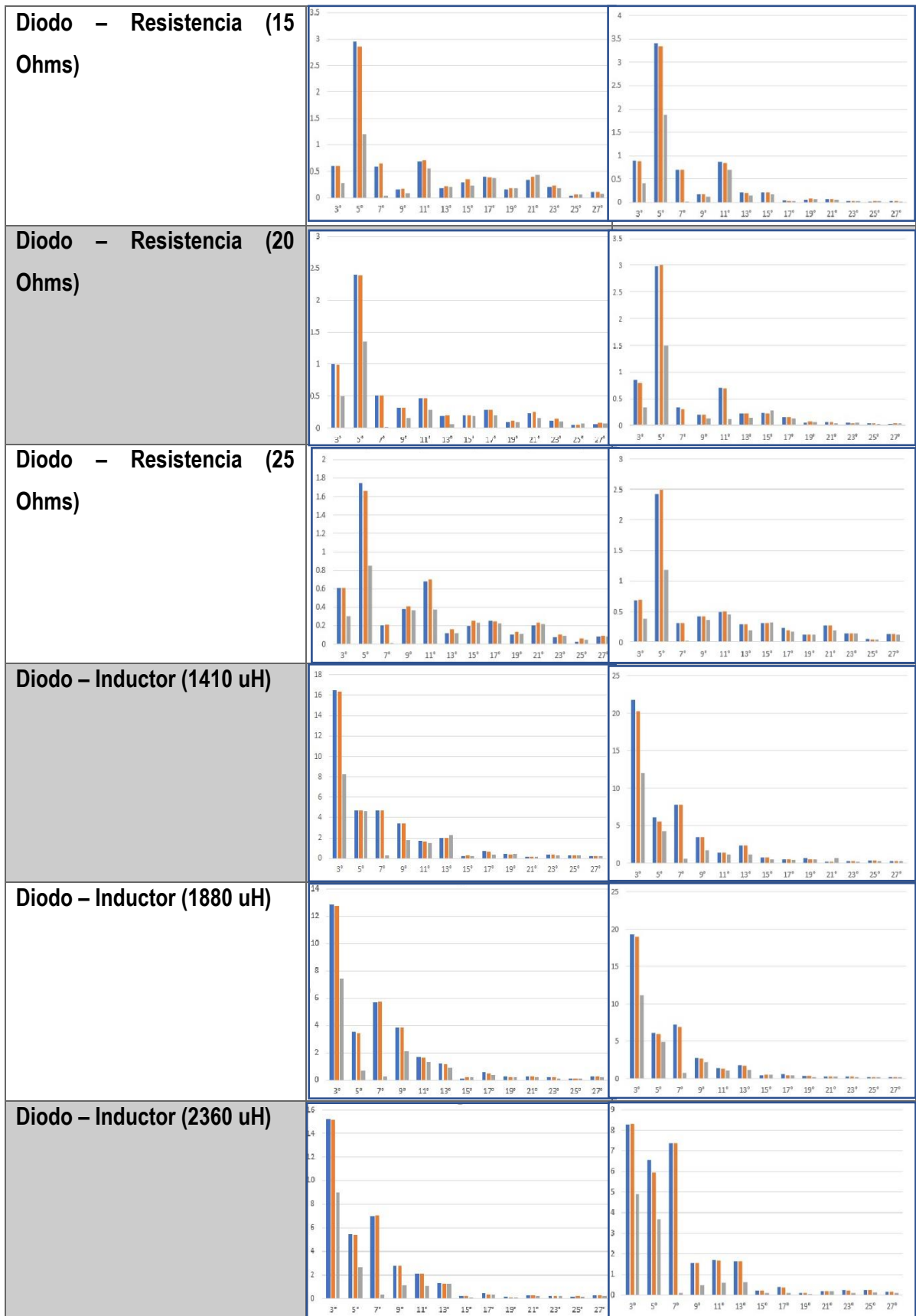
Tabla 9.- Resultado del algoritmo de clasificación y mitigación de disturbio

La tabla 8 muestra los resultados al implementar las 4 propuestas diferentes en la clasificación del disturbio, también hace un adelanto en la eficiencia lograda al desarrollar toda la metodología. La propuesta 1 es la menos eficiente de todas al conseguir un porcentaje menos de mitigación a comparación de las demás propuestas, sin embargo, la cuarta propuesta resulta ser la más eficiente al contar con un porcentaje de mitigación superior al 45%. La propuesta 4 fue la elegida para formar realizar la metodología al presentar un mayor porcentaje de mitigación. En la tabla 9 se muestra el

resultado en forma de graficas de las demás pruebas realizadas en la micro-red y, posteriormente, se mostrarán los diferentes porcentajes de mitigación logrados con esta metodología en la sección 4.4.







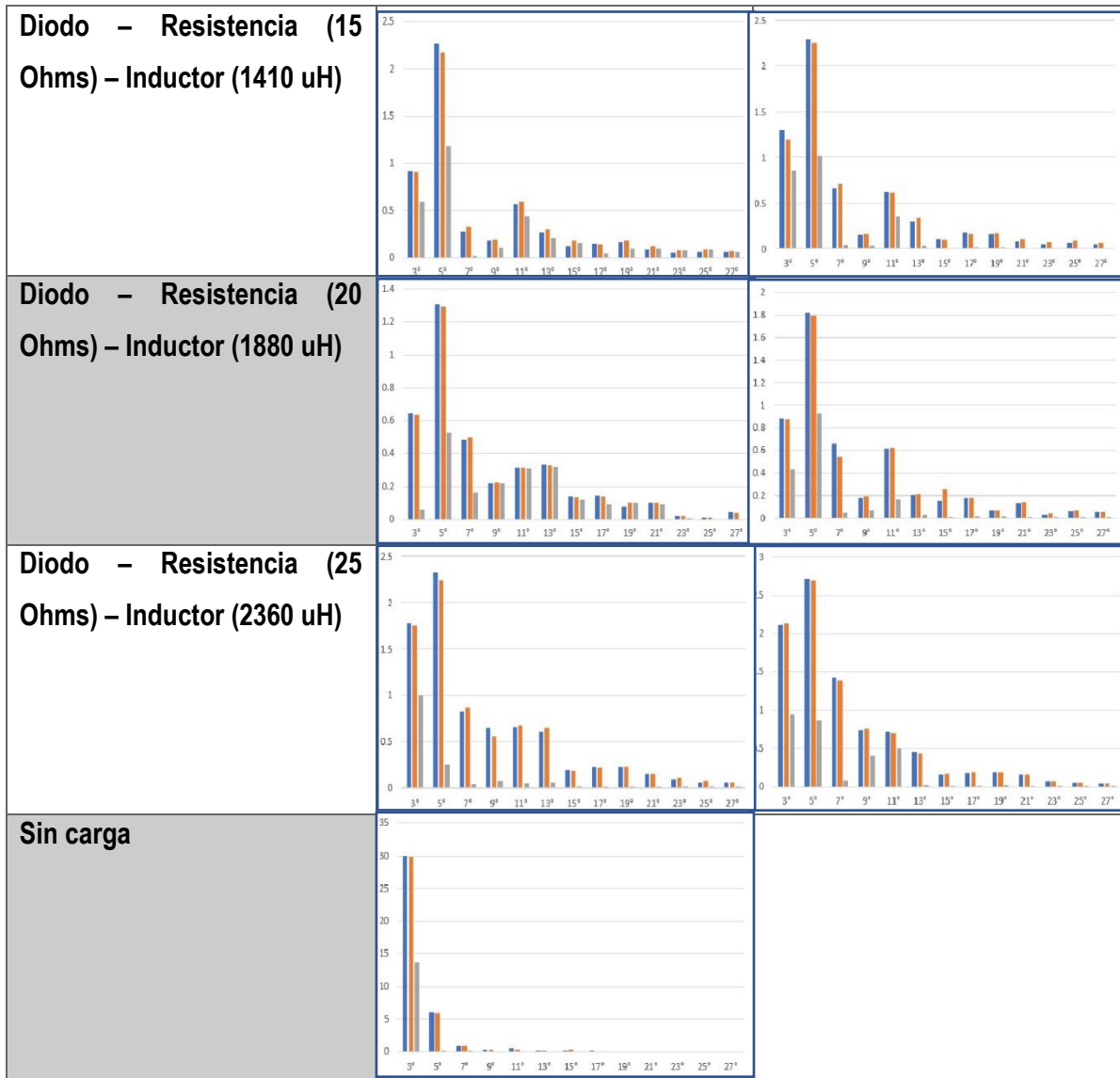
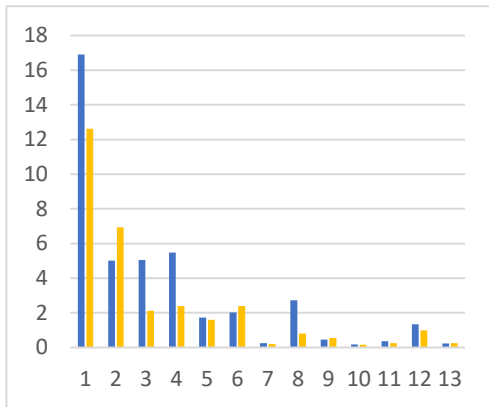


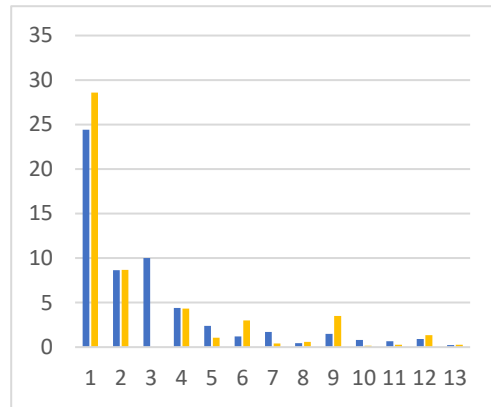
Tabla 10.- Resultados de clasificación y mitigación de disturbios

Al comprobar que la propuesta 4 era la mejor opción gracias a su porcentaje de mitigación, esta propuesta fue la elegida para realizar la clasificación en la metodología. Los resultados pueden observarse en la tabla 4, donde cada una de las gráficas está conformada de la misma manera que la Figura 19. El THDv de la señal original y de la señal mitigada serán presentados en la siguiente sección de los resultados de mitigación de los disturbios, sin embargo, en esta sección, se observa de forma gráfica la comparación entre el contenido armónico de las diferentes señales. Desde este punto, se puede concluir que el método de clasificación elegido fue la mejor opción, esto debido a buscar siempre una mejora en la robustez de la red neuronal.

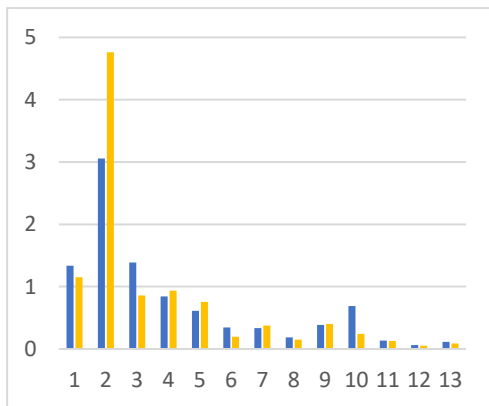
En la sección de metodología se presentó una propuesta diferente a la antes mencionada, utilizando las ecuaciones 8 y 9. El resultado de esta propuesta se observa en la Figura 20, cada grafica en esta figura muestra dos barras donde la primera son las amplitudes de los armónicos de la señal complemento hecha por los parámetros calculados por estas dos ecuaciones. En la segunda barra se muestra el contenido armónico de la señal mitigada.



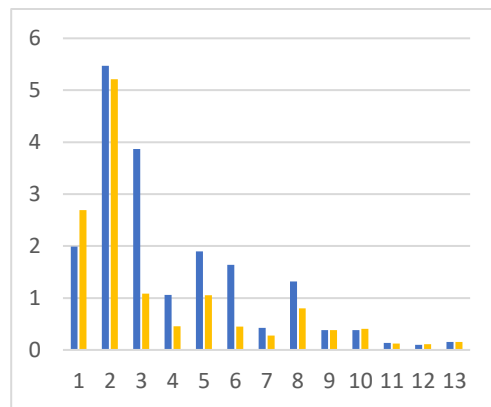
(a)



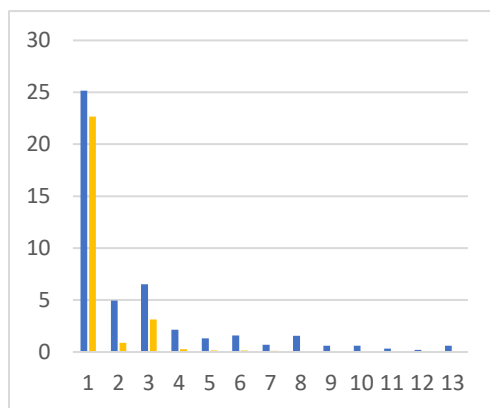
(b)



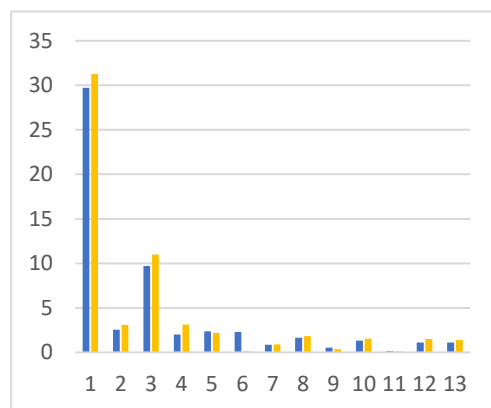
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 20.- Resultados de clasificación y mitigación de disturbios utilizando las ecuaciones 8 y 9

La tabla 9 muestra las pruebas de las gráficas a, b, c, d, e y f de la Figura 20 al igual que el TDHv de la señal original, la señal complemento y la señal mitigada. Sin embargo, analizando las gráficas de cada prueba se puede determinar que estas tienen un funcionamiento deficiente al calcular la señal complemento y, por ende, al mitigar los armónicos de la señal mitigada. En algunos casos, como en las gráficas c y f hay un aumento en el contenido armónico. Se esperaba un comportamiento parecido al utilizar las ecuaciones 8 y 9, pero se realizaron para ejemplificar la hipótesis presentada en esta sección la cual fue, que el algoritmo inteligente de clasificación tiene mayor robustez al presentarse alguna anomalía o cambio en los parámetros de entrada, demostrando la resiliencia que tiene la red neuronal.

Carga	Grafica	TDHv original	TDHv complemento	TDHv mitigada
Diodo – Inductor (1410 uH)	a	13.1183	7.2076	14.4492
Diodo – Inductor (1410 uH) - Transitorio	b	6.9212	3.8686	13.2543
Diodo – Resistencia (10 Ohms)	c	3.9841	1.8	4.1797
Diodo – Resistencia (10 Ohms) - Transitorio	d	10.2184	4.9142	14.8666
Inductor (1410 uH)	e	13.3	6.7718	13.0794
Inductor (1410 uH) - Transitorio	f	15.4733	7.274	18.3803

Tabla 11.- Comparación de THDv utilizando las ecuaciones 8 y 9

El colocar el THDv de la señal complemento se hizo para ejemplificar como desde este punto no es igual el contenido armónico al de la señal original. Con esto se demuestra que esta propuesta de clasificación no es lo suficientemente buena a comparación de la propuesta 4 de la red neuronal. En la tabla 8, se puede observar el THDv de la señal complemento de forma gráfica y se observa que es muy parecido, por eso se pudo mitigar un porcentaje mayor del contenido armónico en la señal

original. Por último, en la siguiente sección se mostrarán los resultados de la sección de mitigación y la metodología propuesta.

#### 4.4 Resultado de mitigación de disturbios

En la tabla 10 se muestra el THDv de la señal de voltaje presente en la carga R1 utilizando diferentes cargas sin contenido transitorio.

Carga	THDv original	THDv resultante	Porcentaje de mitigación
Resistencia 10 Ohms	10.5345	5.2463	49.8011
Resistencia 15 Ohms	3.565	1.8944	53.0838
Resistencia 20 Ohms	8.283	3.9831	48.0876
Resistencia 25 Ohms	5.6115	2.5266	46.0256
Inductor 1410 uH	13.3001	6.7718	50.5194
Inductor 1880 uH	18.9879	10.4119	45.1657
Inductor 2360 uH	9.8024	5.4998	53.1046
Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)	5.7161	3.1668	53.313
Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH)	4.3129	2.2230	51.543
Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 uH)	3.8482	1.9859	51.6059
Diodo – Resistencia (10 Ohms)	3.9841	1.8	45.179
Diodo – Resistencia (15 Ohms)	2.0012	0.9448	52.788
Diodo – Resistencia (20 Ohms)	1.7144	0.9504	45.5612



Diodo – Resistencia (25 Ohms)	1.2830	0.7055	45.0011
Diodo – Inductor (1410 uH)	17.5259	9.6279	45.07
Diodo – Inductor (1880 uH)	9.4186	4.9453	47.4938
Diodo – Inductor (2360 uH)	11.2139	5.9737	46.387
Diodo – Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)	6.9212	3.8686	53.895
Diodo – Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH)	4.4248	2.2812	51.5548
Diodo – Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 uH)	4.6281	2.4236	52.6369
Sin carga	23.0641	12.3704	53.6348

Tabla 12.- Resultados de mitigación del disturbio armónico sin contenido transitorio

La tabla 10 muestra el resultado final de toda la metodología donde se muestra de manera cuantitativa cuanto mejoró el contenido armónico de la señal original respecto a la señal mitigada. La eficiencia del proyecto es del 45 al 54 por ciento en las pruebas donde no se tenía presencia de disturbios transitorios. Por otra parte, en la tabla 11 se muestran los resultados de mitigación del disturbio armónico cuando hay presencia de contenido transitorio

Carga	THDv original	THDv resultante	Porcentaje de mitigación
Resistencia 10 Ohms	9.5793	4.8048	50.1586
Resistencia 15 Ohms	4.9019	2.7846	56.9055
Resistencia 20 Ohms	9.1108	4.0938	45.3944
Resistencia 25 Ohms	4.9656	2.7143	54.692
Inductor 1410 uH	15.4733	7.474	48.3025

Inductor 1880 uH	19.5	10.0159	54.3635
Inductor 2360 uH	9.0676	4.7658	52.5585
Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)	7.317	3.4809	47.5737
Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH)	4.6657	2.5247	54.1119
Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 uH)	4.6963	2.2252	47.3817
Diodo – Resistencia (10 Ohms)	10.2185	4.9142	48.0912
Diodo – Resistencia (15 Ohms)	8.9168	4.9653	55.6857
Diodo – Resistencia (20 Ohms)	7.7507	4.3886	56.6219
Diodo – Resistencia (25 Ohms)	6.4455	3.515	54.5341
Diodo – Inductor (1410 uH)	18.3926	9.2101	50.075
Diodo – Inductor (1880 uH)	15.4222	7.5467	48.934
Diodo – Inductor (2360 uH)	13.4164	7.2464	54.0115
Diodo – Resistencia (15 Ohms) – Inductor (1410 uH)	6.7641	3.2931	48.6849
Diodo – Resistencia (20 Ohms) – Inductor (1880 uH)	5.3881	2.5040	46.4727
Diodo – Resistencia (25 Ohms) – Inductor (2360 uH)	4.567	2.5402	55.6702

Tabla 13.- Resultados de mitigación del disturbio armónico con contenido transitorio

El porcentaje de mitigación del contenido armónico en las pruebas donde se presentó contenido transitorio es de 46 a 57 por ciento. En comparación al porcentaje de mitigación mostrado en la tabla 10 el rango de mitigación es muy parecido, sin embargo, subió en estos casos un 1 por

ciento. Con estos resultados se muestra un correcto desempeño en cada una de las secciones que conforman el proyecto ya que el contenido armónico en los armónicos generados por las cargas presentadas.

# CAPÍTULO 5:

## 5 Conclusiones y prospectivas

### 5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos al implementar la metodología del proyecto fueron satisfactorios ya que entre el 45 al 57 por ciento del contenido armónico presente en las señales de voltaje en la carga de la micro-red fue mitigado. Estos resultados fueron obtenidos gracias a todas las consideraciones tomadas a lo largo cada una de las secciones de la metodología, sin embargo, el elemento más importante dentro de esta fue el bloque de clasificación de disturbios. Este bloque tiene una injerencia muy grande dentro de qué porcentaje de los armónicos se mitigan. Como se mostró en la tabla 8, dependiendo del tipo de entrenamiento en la red neuronal, así como la definición de sus parámetros principales, tienen un peso muy alto en el porcentaje de mitigación del sistema completo. En las gráficas de la Figura 19 se observan los resultados al implementar cada una de las propuestas de la red neuronal, pero si se tiene especial atención en la segunda barra de cada gráfica, barra que representa la transformada FFT de la señal complemento, el resultado de esta sección es prácticamente igual a la original en todos los casos. Esto quiere decir que, el cálculo de la amplitud dentro de las demás propuestas de la red neuronal, es muy exacto en cada caso.

Al calcular de forma correcta las amplitudes de cada armónico, pero teniendo diferente eficiencia al calcular el THDv que proporciona cada propuesta, se llega a la conclusión que el parámetro donde más exactitud se tiene es en la fase de cada armónico. Este es uno de los parámetros más importantes para mitigar los disturbios porque, si bien la mitigación obtenida en este proyecto es satisfactoria, este porcentaje corresponde a la capacidad de la micro-red de calcular la fase de cada señal de forma correcta.

Si se comparan los resultados de mitigación al emplearla propuesta de usar las ecuaciones 8 y 9 para el cálculo de amplitud y fase, se encuentra en primera instancia un cálculo incorrecto al calcular dichos parámetros, esto se puede observar al analizar las gráficas de la Figura 20, donde el

cálculo de la FFT de la señal complemento, entrega valores erróneos en la amplitud de cada armónico, esto ocasiona que al implementar la mitigación en las pruebas mostradas en la tabla 9, el contenido armónico aumenta en lugar de disminuir. Esto es debido a que no solamente fallan estas dos ecuaciones al calcular la amplitud, sino que también falla al calcular la fase de cada señal, dando como resultado un aumento en el THDv de la señal mitigada con esta propuesta. Esto demuestra que la capacidad de cálculo y la resiliencia de la red neuronal da como mucho mejor alternativa su uso que usar únicamente ecuaciones para calcular estos parámetros o usar directamente el parámetro de amplitud entregado por la FFT. Este último caso de usar únicamente la FFT como argumento de entrada, no puede ser posible debido a que la red no solo es menos robusta como las ecuaciones 8 y 9, sino que la FFT no entrega la fase de cada señal por lo que se descarta esta posibilidad.

Se tuvieron que realizar muchas consideraciones y tomar en cuenta fenómenos presentes en una red real ya que en el tipo de señales que entrega este tipo de red, a diferencia de las señales sintéticas, estas tienen una serie de características definidas que no pueden ser cambias, también, tienen una serie de cambios no provistos que no se pueden controlar ya que esto está relacionado directamente a la calidad de la energía suministrada por la compañía de electricidad. Aunque este proyecto sea dedicado a aumentar la calidad de la energía, no se pueden modificar las características de que suministra dicha red, ya que esto no está al alcance de los consumidores, es trabajo de la compañía que suministra esta señal el eliminar en la medida de lo posible estos desperfectos o errores que pueden tener un efecto negativo en la propiedad de los consumidores.

## **5.2 Prospectivas**

Durante el trabajo de tesis se notaron áreas a mejorar para tener un mejor resultado en algún proyecto en el futuro, siendo uno de ellos el uso en micro-redes que estén alimentadas a través de energías renovables. Estas energías, debido a la naturaleza de su funcionamiento, presentan un elevado contenido armónico, así como disturbios transitorios (Locón, 2020), por lo que una metodología donde se pudiera aumentar la calidad de la energía en este tipo de micro-redes, puede ayudar a aumentar este factor, aumentando la eficiencia de la red.

También se tiene una gran área de oportunidad en la búsqueda de algoritmos dedicados o especializados en calcular o encontrar la fase de una señal. Si bien se obtuvieron porcentajes de

mitigación entre 45 y 57 por ciento, se demostró que este factor es importante para aumentar estos resultados. El cálculo de la amplitud de los algoritmos se pudo realizar con resultados muy satisfactorios, sin embargo, para aumentar la eficiencia de la metodología, se pudieran buscar técnicas o algoritmos basados en el factor de la fase, con esto, se lograría tener un aumento en la mitigación.

Otra área de oportunidad que podría investigarse es la busca de una propuesta nueva para la mitigación de los disturbios de otra naturaleza. Si bien en esta ocasión se atacaron los disturbios armónicos, hay una gran variedad de disturbios capaces de presentarse en redes eléctricas. El aumento en la difusión en el tema de mitigación de disturbios debe seguir creciendo para tener una mayor y mejor calidad de proyectos relacionados al tema de la calidad de la energía.

## Literatura citada

- Agenda 2030, (2017) Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sustentable, Naciones Unidas.
- Álvaro R., Menéndez J., (2020) Caso de microrredes, instituto Vasco de Competitividad, pp V-VII.
- Arangarajan V., Veerapandiyam V., Padmavathi R., Maheswari S., Kalaivani R., (2021) An ensemble approach of classification model for detection and classification of power quality disturbances in PV integrated microgrid network, Applied soft Computing.
- Berzal F., (2019), Redes neuronales & Deep Learning – Volumen 1: Entrenamiento de redes neuronales artificiales.
- Castro J, (2016) Fundamentos para la implementación de red neuronal perceptrón multicapa mediante software, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Clarkson M., (2014) Data structures and Funcional Programing, Cornell University Computer Science.
- Chmielewski T., Jarzyna W., Zielinski D., Gopakumar K., Chmielewska M., (2021) Modified repetitive control base on comb filters for harmonics control in grid-connected applications (Abstr.).
- Dongdong C., Long X., Wenduan Y., Yan L., Yinbian G., (2021) A harmonics detection method base on triangle ortogonal principle for shunt active power filter, 6th Internacional Conference on Advances on Clean Energy Research, ICACE, Barcelona, Spain, (Abstr.)
- Elham S., Hamid R., (2020) An improved method for harmonic mitigation and stability improvement of the grid-connected inverters under local load variation and weak grid condition, International Journal of Electrical Power & Energy Systems (Abstr.).
- Esparza M., Mata J., Castañeda L., (2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones. Conciencia Tecnológica.
- Fernández N, (2015). Introducción a la visión artificial, Departamento de informática y Análisis Numéricos, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Córdoba.
- Figuerola J., Guerrero J., (2019) Protección y Cálculo de Instalaciones Eléctricas, Buenos Aires, Argentina.
- García F., (2013) Aplicación y especificación de filtros de armónicas en sistemas eléctricos en potencia, Tesis de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica.
- Gonzales R., Jiménez H., Lagunas J., (2013) Sistemas fotovoltaicos conectados a la red, Boletín IIE, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gutiérrez C. (2014) Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.

- Holguín M., Gomezcoellon D., (2010) Análisis de calidad de energía en el “Nuevo Campus” de la Universidad Politécnica Salesiana, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- IEC-International Electrotechnical Commission. (2002) Electromagnetic compatibility (EMC). IEC 61000-4-07.
- IEC-International Electrotechnical Commission. (2013) Electromagnetic compatibility (EMC) IEC 61000-4-30.
- Juárez J., (2005) Sistemas de distribución de energía eléctrica, Universidad Autónoma Metropolitana (1ra. Ed.), CDMX, México, pp 11-12.
- K. R. Rao, Jae Jeong Hwang, Do Nyeon Kim (2010) Fast Fourier Transform, Algorithms and Application, Springer.
- Lincango E., (2015) Modelación del THD en los sistemas de alimentación residenciales, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Locón R., (2020) Detección y corrección de armónicos en inversores de energía solar, implementando sistemas embebidos en tiempo real, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Loflin L, (2018) Circuitos y aplicaciones de detectores de cruce por cero.
- López R., (2013) Calidad de la potencia eléctrica, Comité Electrotécnico Mexicano (IEC) Centro Nacional de Metrología, secretaria de Economía.
- Matich D., (2001) Redes Neuronales: Conceptos Básicos y aplicaciones, Universidad Tecnológica Nacional, Rosario, Argentina, 8p.
- Medina R., (2014) Microrredes basadas en electrónica de potencia: características, operación y estabilidad, INGENIUS revista de ciencia y tecnología
- Molano M., (2013) Desarrollo e implementación de un analizador de calidad de energía con base en FPGA para motores trifásicos, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Ordóñez G., Ángel M., (2005) Calidad de la energía eléctrica: diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interruptores y caídas de tensión.
- Padmavathi R., Kalaivani R., Arangarajan V., Veerapandiyan V., (2021) A stacking ensemble classification model for detection and classification of power quality disturbances in PV integrated power network, (Abstr.).
- Po L., Wentoa J., Ruiyu L., Mingjie G., (2020) Harmonics detection via input observer with grid frequency fluctuation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems (Abstr.).
- Razo J., (2019), Desarrollo de sistemas expertos para diagnóstico en micro redes eléctricas mediante unidades de monitoreo fasorial sincronizadas, Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro.



- Riaño J., Ladino C., Martínez F., (2012) Implementación de la transformada FFT sobre un FPGA orientada a su aplicación en convertidores electrónicos de potencia, Revista Tekhne, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Sánchez, K., (2010) Calidad de la energía eléctrica, Instituto Tecnológico de Puebla, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Puebla, México
- Sánchez, K., (2016) Detector de cruce por cero como atenuador y como rectificador, EIECRI, ESPOCH
- Saucedo D., Taxis J., (2008) Factores que afectan la calidad de la energía y su solución, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.
- Shi Z., (2016) Estudio de funcionamiento y control en micro red, Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla, España
- Song K., (2012) Islanding Detection Technique using Grid-Harmonic Parameters in the Photovoltaic System, Energy Procedia (Abstr.).
- Spisbury M., Euda A., (2016) Transformada Rápida de Fourier, Universidad Nacional de Honduras, Revista de la escuela de física, UNAH, Vol IV, No. 2, 45-52, Honduras.
- Suganthi S., Arangarajan V., Veerapandiyam V., Deepa A., Abouhawwash M., Thirumeni M., (2021) Detection and classification of multiple power quality disturbances in microgrid network using probabilistic based intelligent classifier (Abstr.).
- Sujith M., Padma S., (2020) Optimization of harmonics with active power filter base on ADALINE neural network (Abstr.).
- Tejada A., Llamas A., (2010) Efecto de los armónicos en sistemas eléctricos, Tecnológico de Monterrey.
- Téllez E., (2014), Distorsión Armónica, Automatización, productividad y calidad S.A de C.V., Puebla, México.
- Weinsier P., Kian-Moghaddam M., Shivaie M., (2019) A techno-economic multi-objective model for hybrid harmonic filter planning considering uncertainty in non-linear loads (Abstr.).



Figura 21.- Reconocimiento Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals Chiapas 2022

## Detección de disturbios eléctricos utilizando morfología matemática, transformada wavelet y transformada rápida de Fourier conforme a la norma IEC 61000-1

Ing. Julio Arturo Caudillo Olmedo<sup>1</sup>, Dr. Luis Morales Velázquez<sup>2</sup>

**Resumen**— Los disturbios eléctricos son fenómenos presentes en las señales de corriente y voltaje debido a diversos factores. Estos disturbios ocasionan daños en los elementos conectados a la red eléctrica. En el presente trabajo, se implementaron las herramientas de transformada wavelet y morfología matemática para detectar disturbios de corta duración y la transformada rápida de Fourier (FFT) para detectar las componentes armónicas de la señal. El objetivo principal es determinar la amplitud, duración del evento y contenido armónico, detectando y clasificando estos disturbios. Con la combinación de la morfología matemática y la transformada wavelet, se detectaron de forma detallada los eventos transitorios y con la implementación de la FFT se detectaron las componentes armónicas de la señal, así como el cálculo de la distorsión armónica total (THD). Estas herramientas detectaron los disturbios eléctricos más representativos de la señal eléctrica conforme a la norma IEC 61000-1 con tiempos de cálculo mínimos.

**Palabras clave**— Disturbios eléctrico, morfología matemática, transformada wavelet, FFT, THD.

### Introducción

Los eventos transitorios y disturbios en las redes eléctricas son causados por los efectos de diferentes dispositivos. Uno de los disturbios más importantes en la actualidad son los armónicos presentes en la red a causa del uso de semiconductores de alta velocidad debido a sus diferentes aplicaciones, como fuentes conmutadas que encontramos en muchos dispositivos que tenemos en edificios residenciales y no residenciales. En la actualidad, las alteraciones en la calidad de energía, power quality disturbances (PQD) es un tema muy importante para los investigadores debido a su creciente influencia y las consecuencias que tiene en distintos procesos la presencia de armónicos como fallas y recorte en la vida útil en los dispositivos conectados a la red eléctrica.

La detección de estos disturbios es posible gracias a diferentes metodologías y técnicas como la transformada discreta de Fourier (DFT), transformada Gabor y la transformada S que; necesitan diversos parámetros de la señal eléctrica como la frecuencia o amplitud entre otros para su implementación.

En un entorno real, la señal eléctrica presenta diversos disturbios como cambios de polaridad, cambios de amplitud o ruido, debido a esto, no se recomienda el uso de técnicas, como las antes mencionadas, para el análisis de señales eléctricas en estado estacionario. En el caso de la transformada de Fourier de corto tiempo (STFT) se ha destacado como una técnica para el análisis de perturbaciones en tiempo y frecuencia o perturbaciones armónicas, aunque tiene un alto costo computacional. Este problema desarrolla nuevas técnicas que ayuden a la clasificación y detección de disturbios. Se han desarrollado metodologías utilizando la morfología matemática o combinaciones de dos o más técnicas. Una de las más populares debido a su alta eficiencia es la transformada wavelet.

El uso de la morfología matemática en la detección de eventos transitorios se ha empleado de diversas formas y técnicas. Por ejemplo, Safdar et al. (2021) desarrollaron una metodología para clasificar la eficiencia de un sistema de potencia mediante la comparación de 6 parámetros diferentes, se empleó la morfología para considerar todas las posibles situaciones de funcionamiento entre en las que destacan los eventos transitorios. Manohar et al. (2019) propusieron un esquema de protección diferencial inteligente para una micro-red eléctrica combinando una técnica de máquina de aprendizaje extremo (extreme learning machine) y morfología. La morfología se utilizó como técnica de extracción de características de las señales de la micro-red. Ou-yang et al. (2021) desarrollaron un trabajo de detección de huecos basado en la morfología para medir con precisión parámetros característicos de una señal de voltaje como la magnitud, duración, salto de ángulo y de fase entre otros. Eluri et al. (2022) propusieron una técnica de filtro basado en morfología de combinación mejorada multiescalar adaptativa (AMICMF) para disminuir las perturbaciones de calidad de energía (PQ) en una micro-red de energía fotovoltaica. P. K. Dash et al. (2022) propusieron un filtro morfológico de combinación de promedio mejorado multiescalar adaptativo para analizar las señales de voltaje capturadas en el punto de acoplamiento común de la microrred de corriente continua integrada

<sup>1</sup> El Ing. Julio Arturo Caudillo Olmedo es estudiante de la Maestría en Ciencias (Mecatrónica) en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro, México. [jcaudillo36@alumnos.uaq.mx](mailto:jcaudillo36@alumnos.uaq.mx)

<sup>2</sup> El Dr. Luis Morales Velázquez es Profesor e Investigador en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro, México. [luis.moralesv@uaq.mx](mailto:luis.moralesv@uaq.mx)

Figura 22.- Artículo de investigación