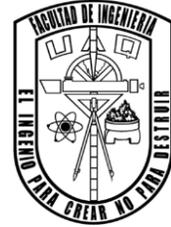




Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electromecánica



Análisis de los efectos generados por cargas no lineales de baja potencia en redes eléctricas residenciales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:

Ingeniero Electromecánico (línea terminal Eléctrica)

Presenta:

Andrea Rosas Fonseca

Asesores:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

San Juan del Río, Querétaro, Junio de 2023.



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Análisis de los efectos generados por cargas no
lineales de baja potencia en redes eléctricas
residenciales

por

Andrea Rosas Fonseca

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

Clave RI: IGLIN-265786



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Electromecánica

**Análisis de los efectos generados por cargas no lineales de baja potencia en
redes eléctricas residenciales**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:

Ingeniero Electromecánico (línea terminal Eléctrica)

Presenta:

Andrea Rosas Fonseca

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Presidente

Firma

Dr. David Alejandro Elvira Ortíz

Secretario

Firma

M. en C. Manuel García Quijada

Vocal

Firma

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

Suplente

Firma

Director de la facultad

Directora de investigación y posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio de 2023
México

RESUMEN

Hoy en día una gran parte de las cargas eléctricas que se conectan a diario en las redes eléctricas residenciales son cargas no lineales ya que cuentan en su estructura y se basan en el uso de sistemas electrónicos que provocan alteraciones o bien distorsiones sobre la misma red eléctrica siendo estas imperceptibles por el usuario, sin embargo, sus efectos pueden verse reflejados en no contar con la correcta calidad de la energía e incluso reducir la vida útil de las mismas cargas.

En el presente proyecto de tesis se desarrolló un sistema conformado por sensores de corriente y voltaje económicamente disponibles en el mercado, además del uso del microcontrolador MSP432 para la adquisición de las señales producidas por las cargas no lineales más comunes en una casa habitacional y se analizaron las mismas con la FTT y THD donde se encontró de acuerdo a la norma IEEE-519 exceden en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

ABSTRACT

Today, a large part of the electrical loads that are connected daily in residential electrical networks are non-linear loads, since they are part of their structure and are based on the use of electronic systems that cause alterations or distortions in the network itself electrical. These being imperceptible to the user, however, their effects can be reflected in not having the proper power quality and even reducing the useful life of the loads themselves.

In this thesis project, a system made up of current and voltage sensors economically available in the market was developed, in addition to the use of the MSP432 microcontroller for the acquisition of the signals produced by the most common non-linear loads in a residential house and they were analyzed with the FTT and THD where it was found, according to the IEEE-519 standard, that they exceed the 8% allowed in a network of less than 1000V voltage.

Palabras Clave: cargas no lineales, distorsiones eléctricas, redes eléctricas residenciales, sensor de corriente, sensor de voltaje.

Key words: non-linear loads, electrical distortions, residential electrical networks, current sensor, voltage sensor.

DEDICATORIA

A mi madre y hermanos que siempre me han apoyado durante toda mi formación escolar, personal y me han impulsado a seguir adelante para alcanzar mis sueños.

A Dios por darme la oportunidad de continuar y seguir adelante a pesar de las dificultades.

A mis amigos y las personas que estuvieron como apoyo durante esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro que se ha convertido en mi segundo hogar, donde tuve la oportunidad de desarrollarme académicamente y he podido conocer mis capacidades y habilidades.

A mi director de tesis Dr. Juan José Saucedo que me confió este proyecto de investigación y apoyó durante todo el proceso con sus observaciones, comentarios y guía.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	2
1.2	Objetivos	6
1.2.1	Objetivo general.....	6
1.2.2	Objetivos Particulares	6
1.3	Descripción del problema.....	6
1.4	Justificación.....	7
1.5	Planteamiento general	8
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	10
2.1	Calidad de la energía	10
2.1.1	Disturbios en sistemas eléctricos	10
2.2	Distorsión armónica	11
2.2.1	Interarmónicos	13
2.3	Cargas lineales y no lineales	13
2.3.1	Principales fuentes de armónicos.....	14
2.3.2	Efectos provocados por armónicos	14
2.4	Normatividad.....	15
2.5	Sensor SCT013-030	16
2.6	Sensor ZMPT101B.....	17
2.7	AD620 Módulo amplificador de instrumentación	17
2.8	Microcontrolador msp432 launchpad ti	18
2.9	Instrumentos de medición	19
3	METODOLOGÍA	20
3.1	Instalación eléctrica residencial	20
3.2	Instalación de sensores de corriente y voltaje	22
3.3	Acondicionamiento y calibración de señales de corriente y voltaje	22
3.4	Programación de sistema de monitoreo en microcontrolador MSP432.....	23
3.5	Validación de la adquisición de señales.....	24
3.6	Monitoreo y adquisición de señales de corriente y voltaje	24
3.6.1	Determinación de la matriz de pruebas.....	24
3.7	Procesamiento y análisis de señales adquiridas	25
4	RESULTADOS.....	26
4.1	Sin ningún dispositivo conectado.....	28

4.2	Lavadora.....	30
4.3	Horno de microondas	33
4.4	Licuadaora.....	36
4.5	Pantallas	39
4.6	Cargadores.....	42
4.7	Impresora.....	45
4.8	Refrigerador	48
4.9	Luminarias.....	51
4.10	Combinación.....	54
	CONCLUSIONES	58
	REFERENCIAS.....	59

Índice figuras

Figura 1	Diagrama de planteamiento general del proyecto. (Autoría propia)	9
Figura 2	Corriente y voltaje en un sistema lineal. (Heredia, 1997).	13
Figura 3	Corriente en un sistema no lineal. (Heredia, 1997).	14
Figura 4	Módulo amplificador de instrumentación AD620. (Proto Supplies, 2021).....	18
Figura 5	Diagrama general de metodología. (Autoría propia).....	20
Figura 6	Primera etapa de la suministración de energía eléctrica residencial. (Escobar, 2021)...	21
Figura 7	Segunda etapa de la suministración de energía eléctrica residencial. (Escobar, 2021). 21	
Figura 8	Sistema completo con los sensores conectados a la red eléctrica residencial. (Autoría propia).	22
Figura 9	Diagrama de bloques del código que se usó en el microcontrolador MSP402. (Autoría propia).	23
Figura 10	Diagrama de bloques de tarjeta con sensores de corriente y voltaje. (Autoría propia).25	
Figura 11	Pasos para aplicar la FFT y THD. (Autoría propia).	26
Figura 12	Tarjeta desarrollada de sensores, módulos de acondicionamiento y salidas de las señales. (Autoría propia).	26
Figura 13	Sistema conectado a la red eléctrica residencial. (Autoría propia).	27
Figura 14	Señal adquirida de corriente. (Autoría propia).	28
Figura 15	Señal adquirida de voltaje. (Autoría propia).	29
Figura 16	Transformada de Fourier de corriente. (Autoría propia).	29
Figura 17	Transformada de Fourier de voltaje. (Autoría propia).	30
Figura 18	Señal adquirida de corriente de la lavadora. (Autoría propia).....	31
Figura 19	Señal adquirida de corriente del 8.5s a 8.6s. (Autoría propia).	31
Figura 20	Señal adquirida de voltaje de la lavadora. (Autoría propia).	32
Figura 21	Transformada de Fourier de corriente de la lavadora. (Autoría propia).....	32
Figura 22	Transformada de Fourier de voltaje de la lavadora. (Autoría propia).	33
Figura 23	Señal adquirida de corriente del horno de microondas. (Autoría propia).	34
Figura 24	Señal adquirida de corriente del 10s a 10.1s. (Autoría propia).	34
Figura 25	Señal adquirida de voltaje del horno de microondas. (Autoría propia).....	35
Figura 26	Transformada de Fourier de corriente del horno de microondas. (Autoría propia).	35

Figura 27 Transformada de Fourier de voltaje del horno de microondas. (Autoría propia).....	36
Figura 28 Señal adquirida de corriente de la licuadora. (Autoría propia).	37
Figura 29 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).	37
Figura 30 Señal adquirida de voltaje de la licuadora. (Autoría propia).....	38
Figura 31 Transformada de Fourier de corriente de la licuadora. (Autoría propia).	38
Figura 32 Transformada de Fourier de voltaje de la licuadora. (Autoría propia).....	39
Figura 33 Señal adquirida de corriente de pantallas. (Autoría propia).	40
Figura 34 Señal adquirida de corriente del 15s al 15.1s. (Autoría propia).	40
Figura 35 Señal adquirida de voltaje de pantallas. (Autoría propia).	41
Figura 36 Transformada de Fourier de corriente de pantallas. (Autoría propia).	41
Figura 37 Transformada de Fourier de voltaje de pantallas. (Autoría propia).	42
Figura 38 Señal adquirida de corriente de cargadores. (Autoría propia).....	43
Figura 39 Señal adquirida de corriente del 20s al 20.1s. (Autoría propia).	43
Figura 40 Señal adquirida de voltaje de cargadores. (Autoría propia).	44
Figura 41 Transformada de Fourier de corriente de cargadores. (Autoría propia).	44
Figura 42 Transformada de Fourier de voltaje de cargadores. (Autoría propia).	45
Figura 43 Señal adquirida de corriente de impresora. (Autoría propia).	46
Figura 44 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).	46
Figura 45 Señal adquirida de voltaje de impresora. (Autoría propia).....	47
Figura 46 Transformada de Fourier de corriente de impresora. (Autoría propia).	47
Figura 47 Transformada de Fourier de voltaje de impresora. (Autoría propia).....	48
Figura 48 Señal adquirida de corriente del refrigerador. (Autoría propia).	49
Figura 49 Señal adquirida de corriente del 10s al 10.1s. (Autoría propia).	49
Figura 50 Señal adquirida de voltaje del refrigerador. (Autoría propia).	50
Figura 51 Transformada de Fourier de corriente del refrigerador. (Autoría propia).	50
Figura 52 Transformada de Fourier de voltaje del refrigerador. (Autoría propia).	51
Figura 53 Señal adquirida de corriente de luminarias. (Autoría propia).	52
Figura 54 Señal adquirida de corriente del 10s al 10.1s. (Autoría propia).	52
Figura 55 Señal adquirida de voltaje de luminarias. (Autoría propia).....	53
Figura 56 Transformada de Fourier de corriente de luminarias. (Autoría propia).	53
Figura 57 Transformada de Fourier de voltaje de luminarias. (Autoría propia).....	54
Figura 58 Señal adquirida de corriente de combinación. (Autoría propia).....	55
Figura 59 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).	55
Figura 60 Señal adquirida de voltaje de combinación. (Autoría propia).....	56
Figura 61 Transformada de Fourier de corriente de combinación. (Autoría propia).....	56
Figura 62 Transformada de Fourier de voltaje de combinación. (Autoría propia).	57

Índice tablas

Tabla 1 Matriz de cargas para pruebas.	24
Tabla 2 Valores de THD de corriente y voltaje al no tener nada conectado a la red eléctrica residencial.	30
Tabla 3 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar la lavadora a la red eléctrica.....	33
Tabla 4 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar el horno de microondas a la red eléctrica.	36
Tabla 5 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar la licuadora a la red eléctrica.....	39
Tabla 6 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar las pantallas a la red eléctrica.....	42

Tabla 7 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar cargadores a la red eléctrica.	45
Tabla 8 Valores de THD de corriente y voltaje de la impresora al conectarla a la red eléctrica..	48
Tabla 9 Valores de THD de corriente y voltaje del refrigerador al conectarlo a la red eléctrica.	51
Tabla 10 Valores de THD de corriente y voltaje de luminarias al conectarlas a la red eléctrica.	54
Tabla 11 Valores de THD de corriente y voltaje de una combinación de cargas no lineales al conectarlas a la red eléctrica.	57

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los servicios más importantes y usados hoy en día es la energía eléctrica que sirve para desarrollar tareas diarias en diferentes sectores, tales como el sector social, educativo, privado, industrial, comerciales, entre otros, y en donde la falta de la misma afectaría de manera significativa. Sin embargo, no basta contar con el suministro de la energía eléctrica, sino que esta cuenta con la calidad necesaria que garantiza un funcionamiento confiable en los diferentes dispositivos y equipos, y así mismo evitar que se dañen. En este sentido, se entiende por calidad de la energía cuando la energía eléctrica que se suministra cuenta con las características y condiciones óptimas para que las diferentes cargas conectadas trabajen sin interrupciones y no genere ninguna falla en sus componentes. Por otra parte, debe mencionarse que los disturbios eléctricos pueden originarse por la conexión o desconexión de las cargas que se encuentran en las mismas instalaciones del usuario o pueden ser generadas desde la compañía eléctrica encargada del suministro de energía, y estos se han convertido en un problema que preocupa a los técnicos por el impacto actual y por las condiciones futuras que habrá. Existen diferentes razones por las que el análisis de calidad de la energía debe de realizarse para determinar los factores que generan afectaciones o disturbios en la red eléctrica, algunas de estas razones son:

- La integración de dispositivos electrónicos en la mayoría de las cargas tanto residenciales, comerciales e industriales son más sensibles a variaciones en el suministro de energía eléctrica ya que hacen uso de controles por medio de microprocesadores como lo son las computadoras, diversos aparatos del hogar, etc.
- La implementación y uso de bancos de capacitores para corrección de factor de potencia y reducción de pérdidas que son aplicados en los sistemas eléctricos que cuentan hoy en día con dispositivos de alta eficiencia, como lo son controladores de velocidad.
- Problemáticas de suministro externos que se pueden presentar en el suministro de energía eléctrica con interrupciones en el servicio, transitorios por maniobras, elevaciones de voltaje, entre otros.

Todo lo anterior mencionado nos muestra la necesidad de identificar estos disturbios eléctricos tanto por parte de usuarios y suministradores para que se puedan plantear soluciones. (Harper, 2012). El análisis de calidad de la energía ha sido ampliamente abordado debido a necesidad de identificar y corregir aquellos fallos que producen afectaciones sobre la red eléctrica. Sin embargo, la mayoría de estudios enfocados en lo referente a calidad de la energía han sido enfocados hacia la solución de problemas en el sector industrial.

Por otra parte, aunque se han realizado diversos estudios sobre el análisis de la contaminación armónica en redes eléctricas residenciales y la calidad de la energía, por lo regular se han analizado las fuentes que proveen de energía a las cargas y han dejado fuera del estudio los problemas generados por las propias cargas además que los equipos e instrumentos comerciales que se suelen utilizar o bien son costosos o un tanto complejos en su funcionalidad por lo que en este trabajo de investigación se busca analizar las señales de corriente y voltaje de una manera menos invasiva y de más bajo costo. Por lo tanto, en el presente proyecto se ha planteado realizar un análisis de los efectos generados por cargas no lineales de baja potencia en redes eléctricas residenciales. Dicho análisis se realizará mediante la monitorización del consumo eléctrico que producen diferentes cargas de uso doméstico residencial, la monitorización del consumo eléctrico se efectuará mediante la medición de señales de corriente y voltaje que serán usadas para determinar las afectaciones producidas en redes eléctricas residenciales; específicamente, se determinaran las principales fallas que se inducen tras el uso de las cargas no lineales de baja potencia más comunes en hogares.

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, los avances científicos y tecnológicos han conducido a una significativa evolución de los sistemas eléctricos aplicados en diferentes campos, pero principalmente en la industria. En este sentido, también ha existido el interés por solucionar las diferentes problemáticas asociadas con diferentes tipos de cargas eléctricas, donde, el estudio de la calidad de la energía ha resaltado para determinar los efectos que se producen en los procesos industriales. Aunque el estudio de los efectos asociados a problemáticas de calidad de la energía ha sido ampliamente abordado desde un punto de vista industrial, actualmente una gran parte de las cargas eléctricas que se conectan en redes eléctricas residenciales cuentan y se basan en el uso de sistemas electrónicos que provocan alteraciones sobre la misma red eléctrica, es decir,

generalmente tienden a inducir distorsiones que afectan la calidad de la energía. Así, para analizar las diversas afectaciones en las señales de la energía eléctrica y poder indicar si se encuentran dentro de los parámetros de calidad en la energía existen diversos trabajos que nos ayudan a entender los conceptos y tecnologías desarrolladas para la medición de los mismos.

Localmente, en la misma Universidad Autónoma de Querétaro ya se han realizado varios de estos trabajos, entre ellos se presentan algunos de monitoreo de disturbios. El primer trabajo relacionado (Torres, 2014) propuso la creación de un sistema que facilite el estudio de la calidad de la energía basado en una implementación de hardware haciendo uso de FPGA's (Field Programmable Gate Array, Arreglo de Compuertas Programables de Campo) y de procesamiento de señales, el sistema permite la inyección y monitoreo de los diferentes disturbios en la línea eléctrica y un motor trifásico actúa como carga experimental recibiendo las señales contaminadas, pero aunque en este trabajo se desarrolló una interfaz que permitió visualizar y seleccionar los disturbios a introducir en la señal para probar su funcionalidad como sistema de alimentación en un motor trifásico, hizo falta realizar un análisis más detallado que ayudará a determinar los efectos que se producían sobre el mismo motor de inducción. De forma similar Arteaga (2021) con un sistema de monitoreo se enfoca en el desarrollo de una realidad virtual, dicho trabajo implementó un aula virtual y una subestación de potencia donde se busca capacitar y entrenar a los usuarios interesados en la calidad de la energía e incrementa sus conocimientos hasta en un 21.42% respecto a cursos teóricos, se desarrolló un entorno en la realidad virtual siendo un aula de capacitación y una subestación eléctrica de potencia donde se generan transitorios, desequilibrios de tensión, fluctuaciones, variaciones de frecuencia, entre otros, así como realizar el monitoreo de indicadores de calidad de la energía haciendo uso del unreal engine 4 para el entrenamiento, a pesar de que el trabajo incluye en análisis de algunos de los principales efectos que pueden aparecer en redes eléctricas, carece de análisis e información que indique cuales son los principales efectos que se producen. Por otro lado, fue propuesto un analizador de calidad de la energía por Clemente (2013), quién hace uso de FPGA's y ayuda a la evaluación en sistemas trifásicos ya que las cargas no lineales y motores provocan efectos en la red, el diseño del sistema es capaz de calcular los índices suficientes para una evaluación de la calidad de la energía con motores trifásicos. Se creó un circuito capaz de medir la corriente y voltaje, y este se conecta a la FPGA para la adquisición de datos. La propuesta realizada incluyó el análisis de los efectos provocados en la red eléctrica, sin embargo, el trabajo es limitado únicamente a los efectos producidos por motores de inducción.

Así mismo de manera nacional podemos encontrar más trabajos relacionados, por parte de la Universidad Veracruzana, Reyes (2013) caracterizó el efecto distorsionante en la forma de onda de corriente por cargas no lineales en redes eléctricas residenciales monofásicas, por cada equipo y en conjunto, posteriormente diseñó un filtro pasivo sintonizado con las armónicas de mayor incidencia en la corriente, sin embargo el análisis se realizó mediante el uso del analizador de calidad de la energía PDA 1252 5A. Otro proyecto relacionado a nivel nacional fue el propuesto por Gonzáles et al, (2006) donde la problemática en las redes eléctricas residenciales a causa de las cargas no lineales se ha incrementado en los últimos años ,sin embargo, solo muestra el modelo matemático de Fourier para el análisis de una señal no senoidal periódica y algunas técnicas para la corrección de los armónicos generados por cargas típicas como lo son, sobredimensionamiento del neutro, transformador factor k, bloqueo de la 5ta y 7ma armónica. Así mismo, Ramírez en 2013, menciona que la forma de onda de las señales de corrientes y voltajes en alimentadores y buses se ha contaminado por la aparición de armónicas en los sistemas eléctricos de potencia a causa del incremento de la electrónica de potencia en las industrias, el uso más extenso de hornos de arco usados en fundición de acero y gracias a los equipos electrónicos que usamos día con día, por lo que es indispensable aplicar medidas para contar con una calidad de la energía en las redes eléctricas y de esta manera aprovechar la electrónica a su máximo para tener más productividad, ahorro de energía y comodidad; además muestra diferentes formas para la reducción de armónicas como filtros sintonizados y desintonizados, sin embargo, es todo un estudio enfocado a la industria. Finalmente Mora et al, (2009) muestra el análisis matemático de contenido armónico en la señal de corriente de un circuito que representa a una carga no lineal residencial y con las mediciones se realizó un estudio comparativo de la contaminación armónica con cargas que introducen estos disturbios en la línea eléctrica, sin embargo, fue solo un análisis matemático.

Mientras que de manera internacional en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Gutiérrez (2017) realizó un estudio donde se da a conocer algunos resultados de la propagación y distorsión de los armónicos que contaminan las redes de media tensión utilizando el software de Matlab, donde simulan los armónicos que pueden producir daño tanto en cargas monofásicas y trifásicas para así poder elaborar métodos que ayuden a la disminución, en el caso del experimento realizado, el tercer armónico resultó ser perjudicial para sistemas industriales por el calentamiento

del neutro y para erradicarlo se sugiere realizar ajustes en el tipo de conexión de los transformadores y hacer uso de filtros para tener la calidad en la energía pero como se menciona, el estudio fue enfocado a un sector industrial de media tensión. También, por parte de la Universidad del Bío Bío, Valenzuela et al, (2010) realizaron un estudio de contaminación armónica en la misma casa de estudios teniendo redes que constan de 2 empalmes conectados a una línea de 15kV y 8 transformadores que alimentan luminarias y cargas informáticas, se utilizó un analizador industrial en un tiempo de 8 horas continuas y se determinó que existían puntos que sobrepasaban los límites establecidos por la norma chilena por lo que se establecían posibles propuestas para la mitigación de armónicos, sin embargo, al ver las cargas y la línea eléctrica con la que contaba la universidad es mayor a una red eléctrica residencial. Y también, Velázquez et al, (2017) presentó un sistema de sensores inteligentes que hacen uso de una arquitectura abierta en la tecnología FPGA para de ser necesario se pueda reconfigurar y es capaz de monitorear continuamente la calidad de la energía en instalaciones industriales, residenciales y en edificios, adquiriendo las señales de voltaje y corriente donde calcula valores efectivos, factor de potencia y distorsión armónica total, además, de detectar alteraciones en la calidad de la energía siendo estas como caídas, subidas o interrupciones y, aunque los resultados presentados se enfocan en el análisis de calidad de la energía, es evidente que faltó realizar un análisis más detallado de los efectos que pueden generarse por la conexión de múltiples cargas no lineales en instalaciones eléctricas residenciales.

Aunque ya existen diferentes trabajos que han abordado problemáticas asociadas con calidad de la energía, muy pocos de ellos se han enfocado en el análisis de los efectos que las cargas no lineales pueden producir en instalaciones eléctricas residenciales. Además, la apertura para el desarrollo de este proyecto se base en la utilización de sensores de bajo costo y no invasivos que permitan monitorizar redes eléctricas residenciales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar un análisis de la contaminación armónica en redes eléctricas residenciales mediante el monitoreo de señales de corriente y voltaje para determinar los efectos que producen las cargas no lineales de baja potencia.

1.2.2 Objetivos Particulares

1. Realizar el acondicionamiento de señales para los sensores de corriente y voltaje mediante circuitos electrónicos para reducir y ajustar los niveles de corriente y voltaje medidos en una red eléctrica residencial.
2. Calibrar los sensores de corriente y voltaje mediante pruebas controladas de laboratorio para asegurar la correcta medición del consumo de energía energético en la red eléctrica residencial.
3. Desarrollar la descripción del código de programa en software de compilación C++ para programar un sistema de adquisición de señales basado en el microcontrolador MSP432.
4. Validar el funcionamiento del sistema de monitoreo mediante la adquisición de señales de corriente y voltaje para su implementación en redes eléctricas residenciales.
5. Realizar pruebas de monitoreo a través de la adquisición de señales de corriente y voltaje para registrar el de consumo energía que se producido en una red eléctrica residencial por cargas no lineales de baja potencia.
6. Analizar las señales de corriente y voltaje con diferentes técnicas para estimar el espectro de frecuencias y la distorsión armónica y determinar las afectaciones producidas por cargas no lineales de baja potencia.

1.3 Descripción del problema

Al realizar la revisión de los Antecedentes relacionados con este proyecto de tesis se encontraron las siguientes problemáticas, donde destacan:

- Una gran parte de los trabajos se enfocan en el desarrollo de sistemas para la generación de disturbios eléctricos para ser inducidos en un sistema eléctrico y

posteriormente analizar los efectos producidos sobre las cargas como los motores de inducción.

- La mayoría de los sistemas comerciales de monitoreo de calidad de la energía existentes son costosos o bien, son de arquitectura cerrada lo que hace que los análisis sean más complejos y que se requiera de experiencia para su comprensión.
- Se han analizado los efectos que producen problemas de calidad de la energía en algunas cargas como motores de inducción, sin embargo, los efectos adversos que los dispositivos están generando pueden tener consecuencias como problemas en el funcionamiento de los mismos dispositivos, interferencias, sobrecalentamiento en los equipos, efectos de resonancia, entre otros.
- La mayoría de los estudios de calidad de la energía son enfocados a sector industrial y muy pocos de ellos se han centrado en el análisis que las cargas no lineales de baja potencia producen en las mismas redes eléctricas residenciales.

1.4 Justificación

A continuación, se muestran las oportunidades y avances que aporta el proyecto las cuales justifican su elaboración.

- Este trabajo se enfoca en realizar un análisis de los efectos que producen las cargas no lineales de baja potencia sobre las redes eléctricas residenciales.
- Para la monitorización de las señales eléctricas se utilizan sensores y herramientas de bajo costo de y de arquitectura abierta que permitan realizar una buena interpretación y análisis de calidad de la energía.
- Se busca analizar los efectos adversos en las cargas no lineales que se producen por los disturbios eléctricos que son introducidos en la red eléctrica residencial por las mismas cargas.

- Se busca analizar las principales cargas no lineales más comunes que se encuentran en un hogar para saber cuál de ellas es la que más afectación provoca en la red eléctrica residencial.

1.5 Planteamiento general

El desarrollo para el presente proyecto se muestra a través de la Figura 1, donde se enumeraron por etapas para alcanzar los objetivos planteados. El primer punto es desarrollar los sistemas de acondicionamiento de los sensores que obtienen las señales de corriente y voltaje estas deben de alcanzar un rango de 0 a 3.3V ya que serán obtenidas por medio del microcontrolador y este es el voltaje soportado por la tarjeta. Para ello se hace utilización de un módulo amplificador de instrumentación donde las señales se colocaron como su cero en 1.65V y una amplificación menor a 3.3V. Como segundo paso se realizó la descripción del programa en el software de Code Composer para el microcontrolador y de esta manera guardar las señales en matrices para posteriormente analizarlas por medio de otro software. Las pruebas de monitoreo se definieron de acuerdo a los dispositivos eléctricos y electrónicos más comunes que las personas tienen en el hogar y se decidió que se analizarán los primeros 30s donde al encender los aparatos normalmente tienen un mayor consumo de corriente y el arranque de los mismos es más visible en la señal. Como penúltimo paso se conectaron los sensores al sistema de acondicionamiento y a la salida de este, se conectó el microcontrolador que tenía el programa anteriormente descrito para obtener las señales y por medio de una interfaz se guardaron las señales de cada una de las pruebas planteadas. Finalmente se realiza el análisis de las señales de corriente y voltaje obtenidas de cada una de las pruebas y se analizaron por medio del software de Matlab donde se determinaron su componente fundamental y el análisis armónico total de la señal.



Figura 1 Diagrama de planteamiento general del proyecto. (Autoría propia)

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para el desarrollo del siguiente proyecto de investigación es necesario conocer que es la calidad de la energía, las fuentes de disturbios en sistemas eléctricos, la distorsión armónica, los interarmónicos, las cargas lineales y no lineales y otros temas que ayudarán a comprender los conceptos técnicos del proyecto a realizar, estos temas se presentan a continuación.

2.1 Calidad de la energía

La calidad de la energía de acuerdo a (Harper, 2012) se puede definir como “una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario”, la cual afecta a la estabilidad que se tiene en el voltaje, frecuencia y continuidad del suministro eléctrico.

El término calidad de la energía ha tomado importancia entre usuarios y suministradores, ya que el incremento de cargas sensibles se ven afectadas por un suministro contaminado. Por ello, se puede concluir que el objetivo de la calidad de la energía es encontrar diferentes maneras para corregir los disturbios y variaciones de voltaje en parte de los usuarios y por parte de los suministradores corregir las fallas del sistema que se puedan presentar y de esta manera lograr una energía eléctrica de calidad. (Harper, 2012).

2.1.1 *Disturbios en sistemas eléctricos*

Los disturbios eléctricos son fenómenos que distorsionan las señales de voltaje o corriente e incluso el ángulo de desfase. Se pueden presentar de diversas maneras y entre los más comunes son:

- Fluctuaciones de voltaje: La magnitud del voltaje rms tiene una disminución momentánea que va desde 10 ms a 2.5 seg. dado por alguna falla en el sistema de potencia. Las elevaciones de voltaje se denominan “swells”. Estas fallas se pueden presentar durante desconexiones de cargas o sobrecargas respectivamente.

- **Sobretensiones transitorias:** Estas fallas se presentan como impulsos de corta duración menor a 2 ms sobrepuestos en la señal de alimentación. Se pueden presentar dado descargas atmosféricas, maniobras de interruptores, desconexión y conexión de capacitores que ayudan a la corrección de factor de potencia.
- **Interrupciones de energía:** Estos disturbios pueden durar hasta varios ciclos y son provocados por fallas en el sistema de potencia, fallas de generadores o transformadores, accidentes dentro de la red de distribución o sobrecargas en la red de baja tensión.
- **Ruido eléctrico:** Es una señal no deseada de interferencia que se suma a la principal y la altera.
- **Armónicas:** La señal senoidal de corriente o voltaje no es pura, tiene una o más ondas armónicas sobre la fundamental. Su existencia en la red de distribución puede causar pérdidas en equipos por efecto Joule, sobre esfuerzo en aislamientos, aumento de temperatura y disturbios por interferencia en circuitos de control, protecciones o telecomunicaciones. (Harper, 2012).

2.2 Distorsión armónica

Si la señal de voltaje o corriente se encuentra distorsionada con respecto a la señal senoidal pura que se debería tener en el sistema medido, se puede decir que la señal está contaminada por armónicos. La definición de armónicos viene dada por el teorema de Fourier, ya que nos muestra que una función periódica se puede considerar integrada por una suma de funciones senoidales, siendo la primera armónica (señal fundamental) de la misma frecuencia y período que la función original, y el resto de frecuencias son múltiplos exactos de la fundamental. A estas se les denomina armónicas de la función periódica fundamental. (Ramírez, 2010).

El modelo matemático que presenta Fourier para analizar una señal periódica no senoidal es de acuerdo a la siguiente ecuación de la forma trigonométrica:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} ak\cos(k\omega_1 t) + bk\sen(k\omega_1 t)$$

Donde:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega_1 t) dt$$

Representa a las componentes senoidales pares de la señal y b_k las componentes impares.

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega_1 t) dt$$

$k=1$ es la señal fundamental y $k>1$ representa a los armónicos. (González et al, 2006).

La distorsión armónica puede darse en:

- Fenómenos transitorios: Sucesos como arranques de motores, tormentas, conmutación de capacitores o fallas por cortocircuito, etc.
- Condiciones permanentes que van relacionadas a armónicas en estado estable. (Ramírez, 2010).

La distorsión armónica puede caracterizarse por el espectro armónico con magnitudes y ángulos de fase de cada una de las componentes armónicas. La distorsión armónica total (THD) es una medida de la magnitud de la distorsión armónica, es el valor eficaz de las armónicas relativas a la fundamental y de esta manera se puede determinar el contenido armónico en las ondas periódicas de voltaje o corriente, su ecuación matemática es:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} M_h^2}}{M_1} \times 100$$

M_h representa el valor rms de la componente armónica h de la cantidad M . Los voltajes armónicos se refieren al valor de la señal fundamental, el voltaje cambia en un pequeño porcentaje la cantidad de THD es un valor significativo; con corriente si se tiene un valor pequeño el de la THD es muy alto sin ser riesgo en el sistema. (González et al, 2006).

2.2.1 Interarmónicos

Las señales de corriente y voltaje pueden contener componentes que no son múltiplos enteros de la frecuencia del sistema, se les denomina interarmónicos y para medirlos es necesario medir un periodo más largo que un ciclo. (Torres, 2014).

2.3 Cargas lineales y no lineales

Si se aplica voltaje senoidal a cargas como resistencias, capacitores, inductancias o alguna combinación de ellos la corriente es proporcional y senoidal, a este tipo de cargas se les denomina lineales.

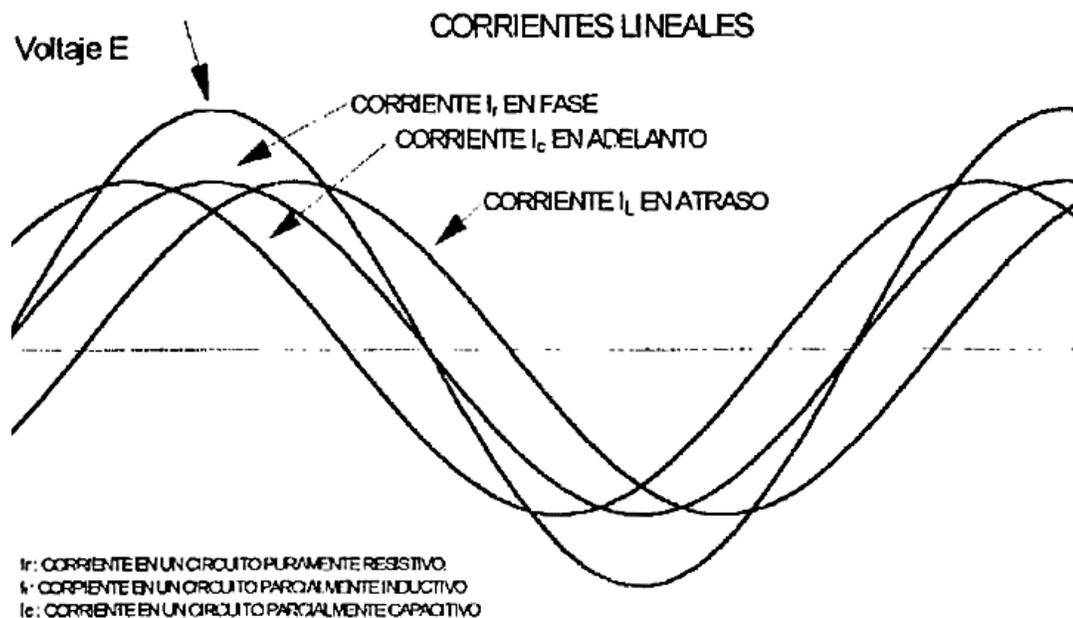


Figura 2 Corriente y voltaje en un sistema lineal. (Heredia, 1997).

Sin embargo, si la corriente y el voltaje no es lineal, no son proporcionales y resulta una señal distorsionada respecto a la senoidal, es una carga no lineal. Este tipo de cargas contaminan a la red con distorsión armónica e incluso puede afectar a otros usuarios que tienen cargas lineales. (Ramírez, 2010).

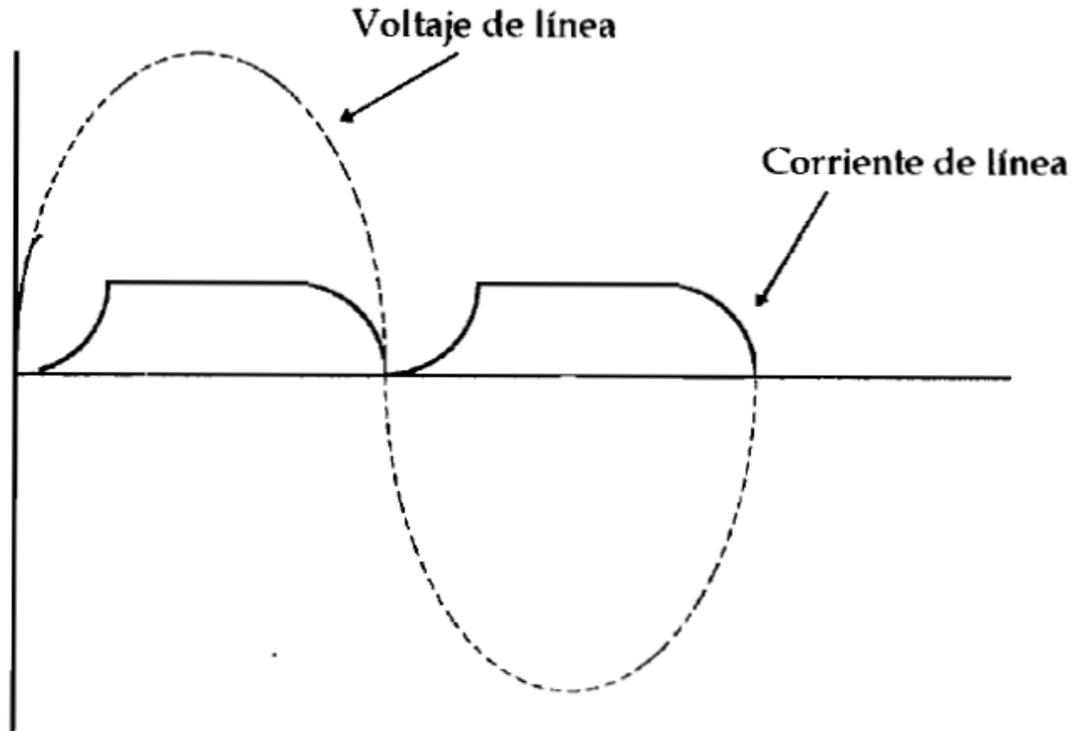


Figura 3 Corriente en un sistema no lineal. (Heredia, 1997).

2.3.1 Principales fuentes de armónicos

Las cargas no lineales pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- 1) Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, reguladores, fuentes de alimentación, cargadores de baterías, etc.)
- 2) Dispositivos productores de arcos eléctricos y descargas eléctricas (hornos de arco, lámparas fluorescentes y ahorradoras de energía, máquinas soldadoras, etc.)
- 3) Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, motores de inducción, reactancias para limitar los arcos de descarga etc.)
- 4) Motores eléctricos que mueven cargas de par torsor bruscamente variable (molinos de laminación, trituradoras, etc.). (González et al, 2006).

2.3.2 Efectos provocados por armónicos

Entre algunos de los efectos de los armónicos son:

- Interferencia en sistemas de control que producen operaciones en falso de los mecanismos que trabajan a control remoto como podría ser el caso de protecciones, control de carga y metrología.
- Fallas en bancos de capacitores a causa de una ruptura dieléctrica o a sobrecargas de potencia reactiva.
- Sobrevoltajes y excesivas corrientes en el sistema a causa de la resonancia de los voltajes o corrientes en el sistema.
- Errores en medidores de energía.
- Excesivas pérdidas y sobrecalentamientos de máquinas de inducción y sincrónicas.
- Interferencia en sistemas de telecomunicaciones.
- Ruptura dieléctrica de cables aislados a causa de sobrevoltajes de la red.
- Interferencia con controladores de motores y sistemas de excitación de generadores.
- Interferencia y mal funcionamiento en relés sobre todo en sistemas de control por estado sólido y microprocesadores.
- Oscilaciones mecánicas de máquinas sincrónicas y de inducción.
- Inestabilidad en la operación de circuitos de disparo que usan conmutación por detección de cruce por cero.
- Las corrientes armónicas causan sobre calentamiento en los componentes de un sistema de potencia como lo son conductores y transformadores, también causan distorsiones de voltaje en sentido que estas fluyen por las impedancias de los equipos. (Heredia, 1997).

2.4 Normatividad

Entre la normativa y estándares que regulan la calidad de la energía se encuentran las siguientes normas internacionales:

- La norma IEEE 1159-2019 - Práctica recomendada por IEEE para monitorear la calidad de la energía eléctrica. Se enfoca en el monitoreo de sistemas de energía de CA monofásicos y polifásicos. Describe las condiciones nominales y desviaciones de las mismas que se pueden originar dentro de la fuente de suministro o equipo de carga o bien, entre la interacción del suministro y las cargas. Analiza los dispositivos

de monitoreo de la calidad de la energía, técnicas de aplicación y la interpretación de los resultados del monitoreo.

- El estándar IEC 61000-4-30 define el método de medición, precisión y agregación de tiempo a la veracidad de los parámetros de calidad de potencia en 3 clases de rendimiento para obtener resultados repetibles y comparables.
- La norma europea EN 50160, define varios parámetros de tensión y los correspondientes márgenes de desviación permisibles en sistemas de distribución de baja y media tensión en condiciones de funcionamiento normales. (Arteaga, 2021).

2.5 Sensor SCT013-030

Estos sensores son utilizados para la medición de corriente alterna. Funcionan como transformadores por el principio físico de inducción electromagnética. Su manejo y acoplamiento es muy fácil de manejar ya que se coloca como pinza alrededor de la instalación sin necesidad de realizar trabajos de alto voltaje.

Especificaciones técnicas:

- Corriente de entrada (inducción): 0-30A AC
- Modo de salida: 0-1V
- No linealidad: $\pm 1\%$
- Resistencia (RL): 62Ω
- Temperatura de operación: -25°C a 70°C
- Fuerza dieléctrica (entre la carcasa y la salida): 1000V AC/1min 5mA
- Longitud del cable: 1m
- Tamaño abierto: 13mm x 13mm. (Unit Electronics, 2021).

2.6 Sensor ZMPT101B

Es un sensor de voltaje alterno utilizado para medir la tensión de fase. Está diseñado a partir de un transformador. Reduce el voltaje alterno de entrada a un voltaje menor que pueda ser leído por cualquier microcontrolador y solo se recomienda calibrar la salida antes de conectar un dispositivo.

Especificaciones técnicas:

- Voltaje de alimentación: 5V – 30V DC
- Voltaje alterno de entrada máx: 250V AC
- Voltaje alterno de salida máx.: 5V AC
- Dimensiones: 51.7 mm x 21.6 mm

Transformador

- Corriente nominal de entrada y salida: 2mA
- Ratio entrada-salida 1000:1000
- Voltaje de suministro: 5 VCD
- Diferencia de fase: $<30^\circ$ (a 50ohm)
- Rango lineal: 0-3mA (a 50ohm). (Unit Electronics, 2021).

2.7 AD620 Módulo amplificador de instrumentación

El módulo amplificador de instrumentación AD620 proporciona una amplificación de pequeñas señales de corriente alterna o directa de sensores analógicos y dispositivos similares. Cuenta con circuitos integrados de instrumentación AD620A y un convertidor de voltaje 7660, un amplificador operacional LM358 y diversas resistencias y condensadores.

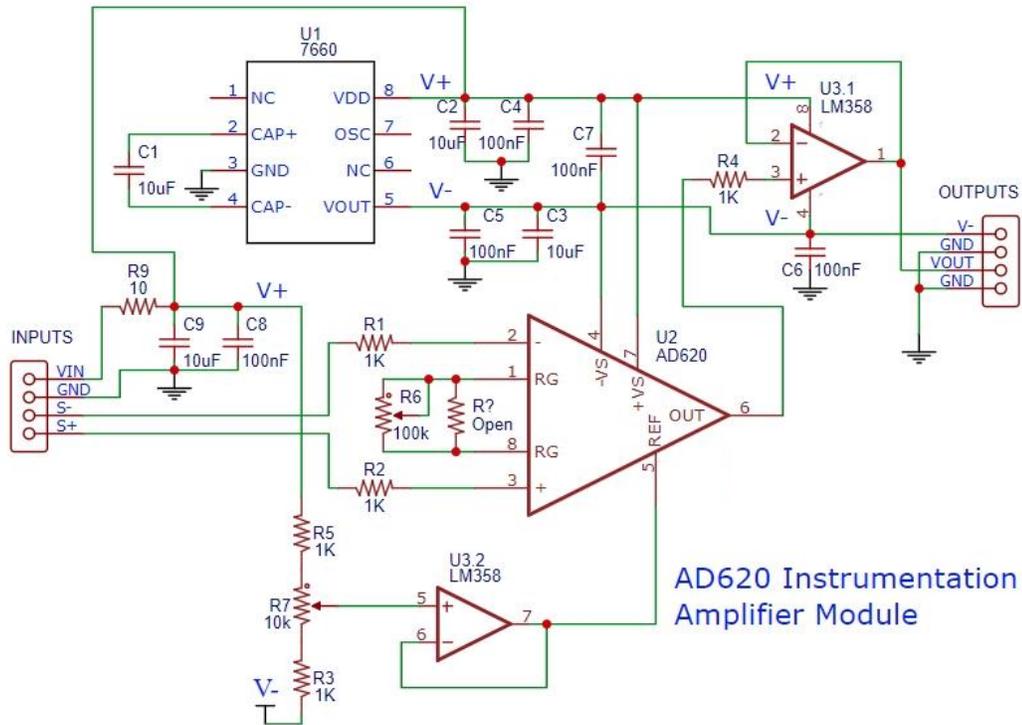


Figura 4 Módulo amplificador de instrumentación AD620. (Proto Supplies, 2021)

El módulo se puede alimentar de 3.5 a 10V y pasa por una resistencia donde se conecta en el AD620. El convertidor de voltaje 7660 toma voltaje y genera uno negativo para darle al AD620 voltajes tanto positivos como negativos, además, de alimentar al LM358.

La ganancia del AD620 se ajusta usando un potenciómetro de 100K y para el ajuste de compensación en cero se usa otro potenciómetro de 10kΩ y una resistencia en serie de 1kΩ. (Proto Supplies, 2021).

2.8 Microcontrolador msp432 launchpad ti

El microcontrolador msp432p401R es de bajo consumo y optimiza el consumo de energía sin bajar su rendimiento. Permite desarrollar aplicaciones de ultra baja potencia de consumo e integrarlos en el campo que sea necesario. (Braga, 2021).

Cuenta con las siguientes características:

- CPU ARM Coter-M4F.
- Frecuencia 48 MHz
- Memoria de programa 256 KBytes

- Memoria RAM de 64 KBytets.
- Memoria ROM de 32 KBytes con librerías de periféricos.
- RTC (Real Time Clock)
- 4 Timers de 16 Bits
- 2 Timers de 32 Bits
- Conversor analógico para digital de 14 bits (ADC).
- 2 Comparadores analógicos. (Braga, 2021).

2.9 Instrumentos de medición

En la actualidad existen algunas tecnologías e instrumentos comerciales que nos ayudan a medir la calidad de la energía entre ellos se encuentra el Fluke 434-II el cual está diseñado para ayudar a minimizar el tiempo de trabajo e identificar fácilmente los problemas de calidad de la energía eléctrica. Este instrumento mide simultáneamente varios parámetros y los muestra en formatos que dan a conocer el estado general de calidad eléctrica para que de esta manera se pueda tomar lo más pronto posible una solución. Además, muestra los valores digitales, gráficos, las formas de onda o los diagramas fasoriales. Entre algunas de las funciones con las que cuenta están:

- Calculadora de pérdida de energía eléctrica, permite identificar los problemas y calcular las pérdidas de energía en un ámbito económico.
- Estudio avanzado de estado de la calidad eléctrica, elabora un resumen de la calidad de la energía y proporciona un panorama general de los problemas en tiempo real.
- Eficiencia de inversor de potencia, sirve para entender fácilmente el rendimiento del inversor de potencia.
- Y entre otras funciones avanzadas de calidad eléctricas. (FLUKE, 2021).

Entre otros instrumentos de calidad de la energía se encuentran varios de la misma marca Fluke con diferentes funcionalidades, yendo desde sencillos con las funcionalidades más básicas hasta los más sofisticados, sin embargo, a pesar de que pueden ser de gran ayuda una de sus características es que son equipos económicamente costosos.

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta el proceso metodológico del trabajo de tesis desarrollado donde se propone un método no invasivo en la red eléctrica residencial para el monitoreo de las señales y detectar los disturbios generados por las cargas no lineales. En la Figura 5 se muestra el diagrama general de la metodología y se detallan los pasos a seguir para este proyecto.

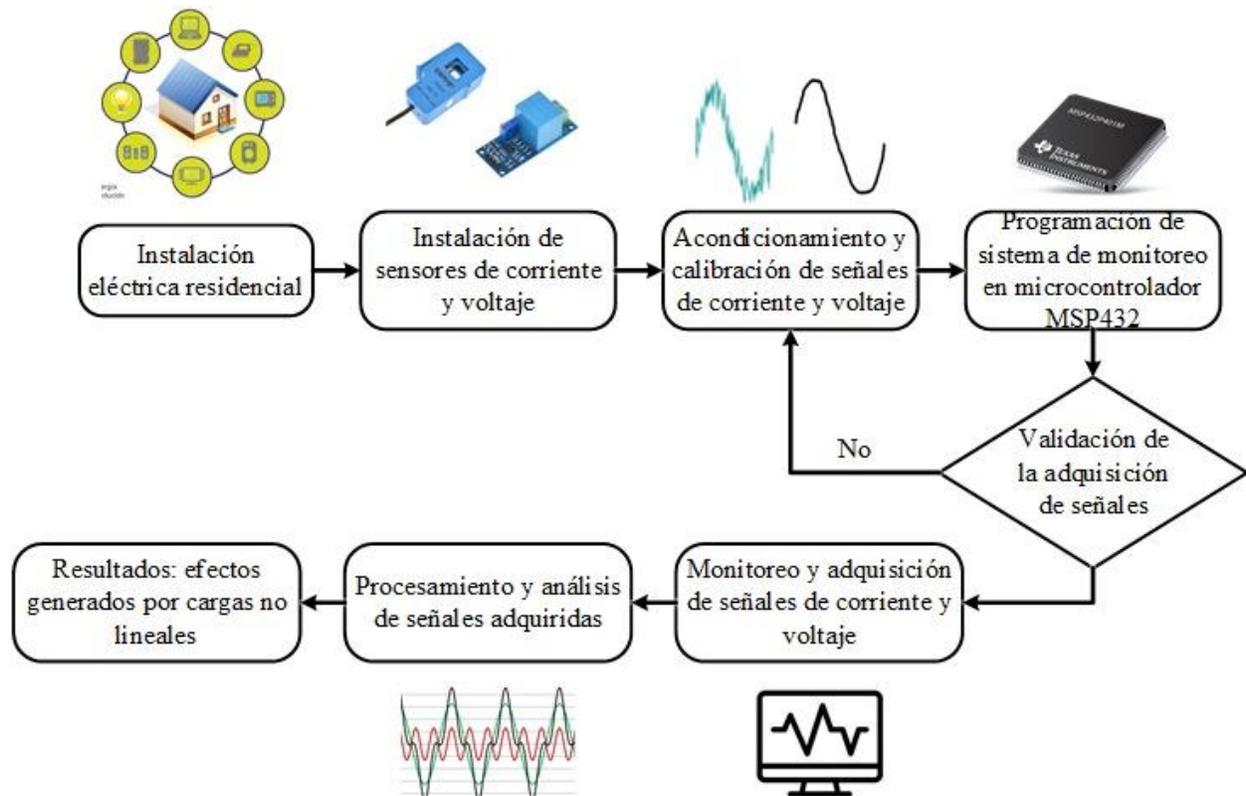


Figura 5 Diagrama general de metodología. (Autoría propia)

3.1 Instalación eléctrica residencial

Primeramente, se debe definir una instalación eléctrica residencial donde de acuerdo a (Escobar, 2021). “Una instalación eléctrica residencial es un conjunto de obras e instalaciones realizadas con el fin de hacer llegar electricidad a todos los aparatos eléctricos de una casa” y esta se divide en dos etapas del suministro de energía eléctrica en el hogar.

En la Figura 6 se observa que se refiere a la conexión exterior al hogar hacia el interior, donde la suministración viene de la alimentación principal pasando por el transformador y por medio de la acometida eléctrica del hogar llega al tablero eléctrico principal del hogar.

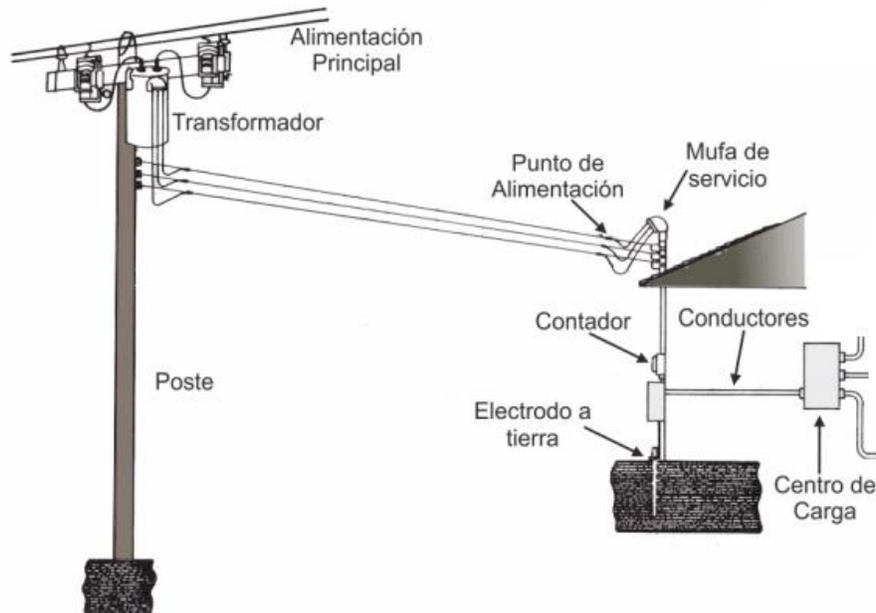


Figura 6 Primera etapa de la suministración de energía eléctrica residencial. (Escobar, 2021)

Para la segunda etapa se puede observar en la Figura 7 que es la instalación eléctrica interior del hogar donde se pueden conectar los diferentes componentes electrónicos, lámparas, interruptores que están conectados directamente al centro de carga.

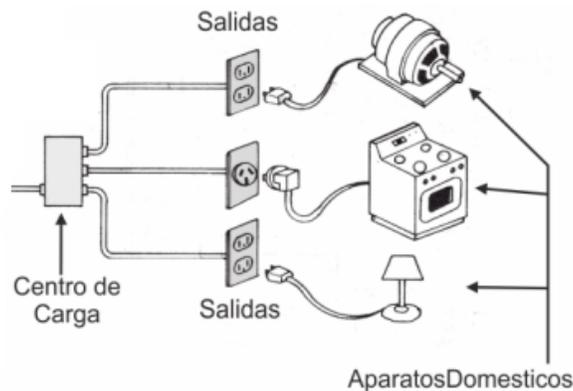


Figura 7 Segunda etapa de la suministración de energía eléctrica residencial. (Escobar, 2021).

Por lo que en este proyecto se analizaron las señales de corriente y voltaje de acuerdo a la segunda etapa de suministración de energía eléctrica en el hogar ya que es donde se puede observar

el consumo de los aparatos del hogar esto, por medio de analizar las señales de corriente y voltaje medidas gracias a los sensores SCT013-030 y ZMPT101B, además que se deben realizar los acondicionamientos de las señales para ser procesadas haciendo uso de la placa MSP432 LaunchPad-Ti.

3.2 Instalación de sensores de corriente y voltaje

En la instalación de los sensores fue necesario realizar los siguientes procesos. Para el sensor de corriente SCT013-030 se separaron los cables de salida con los que contaba en tierra y la de la señal, además, se comprendió su funcionamiento. Para el sensor de voltaje se tuvo que alimentar con una fuente conmutada de 3.3V y se agregó una clavija a la entrada para poder conectarla y que el sensor funcionará de la manera correcta, además, se realizó una pequeña extensión con la señalización de neutro y línea para la lectura y facilitar el proceso.

En la Figura 8 se muestra el diagrama general de la conexión desde el centro de carga hasta la PC donde se analizarán las muestras tomadas.

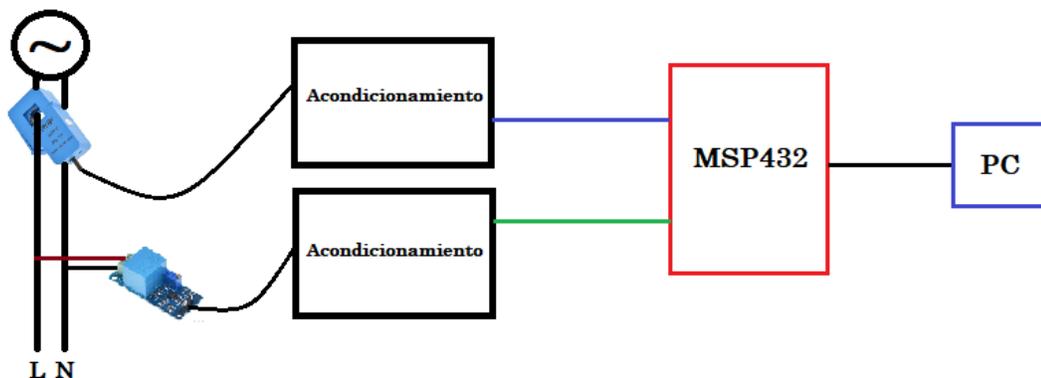


Figura 8 Sistema completo con los sensores conectados a la red eléctrica residencial. (Autoría propia).

3.3 Acondicionamiento y calibración de señales de corriente y voltaje

Para el acondicionamiento de las señales de corriente y voltaje leídas se hizo uso del AD620 módulo amplificador de instrumentación donde, se tuvo que modificar el offset y amplificación de la señal en el rango que el microcontrolador MSP402P401R puede leer que es de 0 a 3.3V.

De esta manera las señales de corriente y voltaje se movieron para que quedarán montadas como su cero en el valor de 1.65V. Y su amplificación en caso de voltaje como máximo fue en

2.64V y para el caso de corriente es de mencionarse que el sensor entrega un valor de voltaje y su amplificación en su señal más grande fue de 3.2V.

3.4 Programación de sistema de monitoreo en microcontrolador MSP432

El sistema de adquisición de datos está basado en un microcontrolador MSP432 de Texas Instruments, donde particularmente se está usando la tarjeta de desarrollo MSP432P401R Launchpad anteriormente descrita.

Para la programación del sistema de adquisición de datos se hizo la descripción del código en el software Code Composer Studio el cuál, es propio de del desarrollador Texas Instruments.

La descripción del código corresponde al diagrama de bloques que se muestra en la Figura 9, donde se puede observar que desde la PC se manda por el puerto serial una señal de Inicio a la máquina de estados (FSM) e internamente la máquina de estados se encarga de generar una señal de inicio (STR) para el convertidor analógico digital (ADC) y tras leer un número de muestras N se envían los datos de vuelta a la PC por el mismo puerto serial y cada que el proceso se repite, vuelve a comenzar desde el inicio.

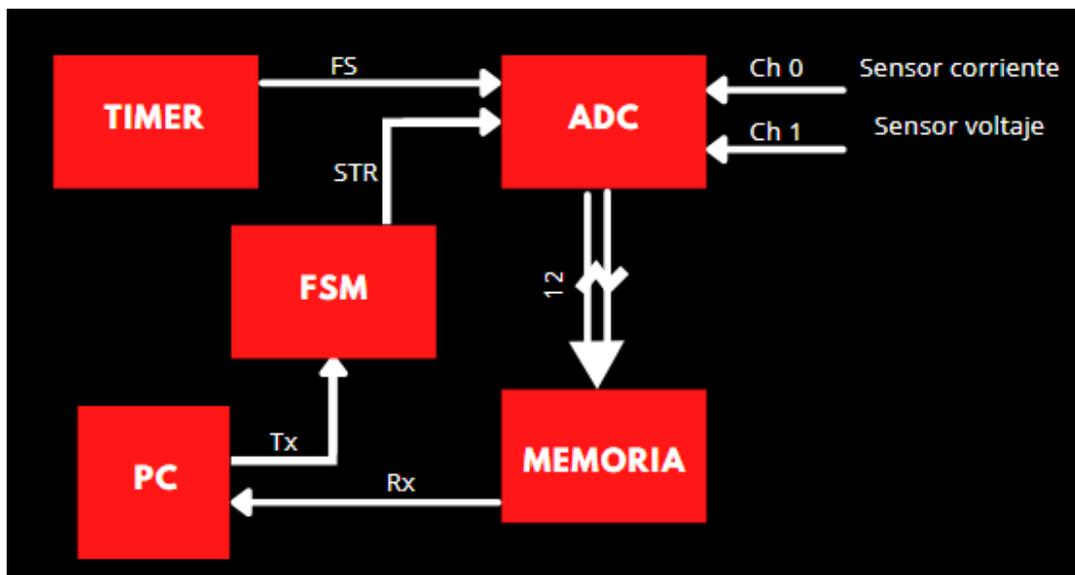


Figura 9 Diagrama de bloques del código que se usó en el microcontrolador MSP402. (Autoría propia).

3.5 Validación de la adquisición de señales

Para comprobar que los valores y señales que se estaban adquiriendo de la red eléctrica a través del microcontrolador eran correctas se hicieron pruebas con un osciloscopio y se conectó una carga no lineal, en este caso un horno de microondas. Las señales obtenidas se graficaron en el software Matlab y de esta manera se podía observar si los valores obtenidos correspondían a los que nos mostraba el osciloscopio y poder validar el sistema y la adquisición de datos.

3.6 Monitoreo y adquisición de señales de corriente y voltaje

3.6.1 Determinación de la matriz de pruebas

En la siguiente tabla se pueden observar las cargas que se definieron para las pruebas y el número de repeticiones de cada una de ellas, además, las cargas son dispositivos con los que normalmente todas las personas tienen en sus hogares.

Tabla 1 Matriz de cargas para pruebas.

Carga	Potencia (W)	Corriente (A)	Repeticiones
1. Horno de microondas	950	7.48	5
2. Lavadora	680	5.35	5
3. Refrigerador	258	2.03	4
4. Licuadora	550	4.33	5
5. Cargadores	267	2.10	5
6. Pantallas	210	1.65	5
7. Impresora	65	0.51	5
8. Luminarias	540	4.25	5
9. Pantalla, refrigerador, lavadora y foco.	1098	8.65	5
			TOTAL 44 pruebas

A continuación, en la Figura 10 se muestra el diagrama a bloques de la placa que se desarrolló donde se colocaron los sensores y sus módulos correspondientes de acondicionamiento y de esa manera se obtuvieron las señales de corriente y voltaje al conectar el microcontrolador MSP432P401R, esto durante 30 segundos.

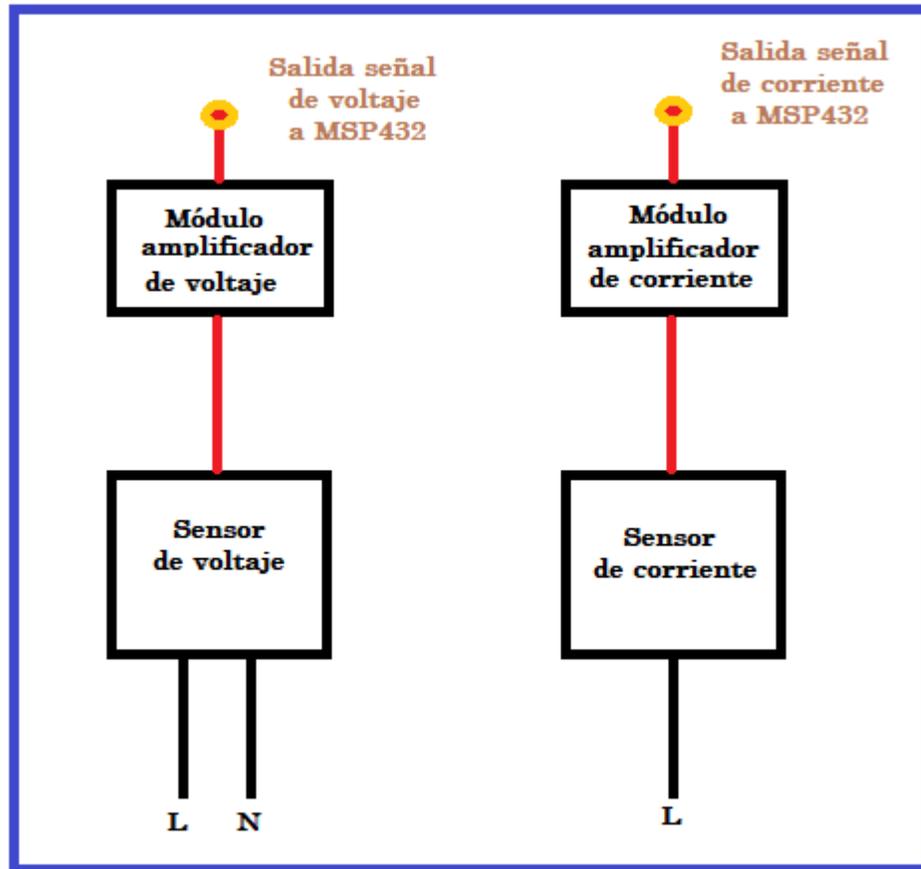


Figura 10 Diagrama de bloques de tarjeta con sensores de corriente y voltaje. (Autoría propia).

3.7 Procesamiento y análisis de señales adquiridas

Para las señales adquiridas se desarrolló un programa en Matlab donde se procesaron y se elegían los segundos donde la señal estaba en estado estable de acuerdo al funcionamiento del dispositivo. En la Figura 11 se muestra el diagrama de flujo donde primero se seleccionan ventanas de 1 segundo en el tiempo estable elegido y gracias a funciones ya establecidas en el propio Matlab se obtuvieron las FFT y THD de las señales. Además, se grafican cada una de las ventanas obtenidas. El proceso fue el mismo tanto para la señal de corriente como la de voltaje.

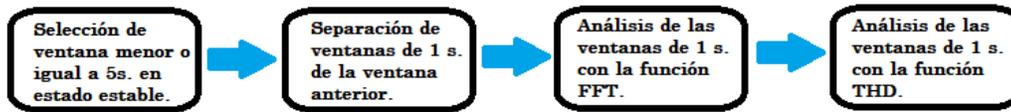


Figura 11 Pasos para aplicar la FFT y THD. (Autoría propia).

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

En este capítulo se muestra todo el sistema desarrollado conectado a la red eléctrica residencial y los resultados obtenidos de las diferentes pruebas y el procesamiento realizado de las mismas señales de corriente y voltaje.

En la figura 12 se visualiza la tarjeta que se realizó haciendo las conexiones necesarias entre los sensores de corriente y voltaje a sus correspondientes módulos de amplificación para que se pudieran obtener las señales y directamente mandarlas a un canal de la tarjeta MSP432 y poder analizarlas.

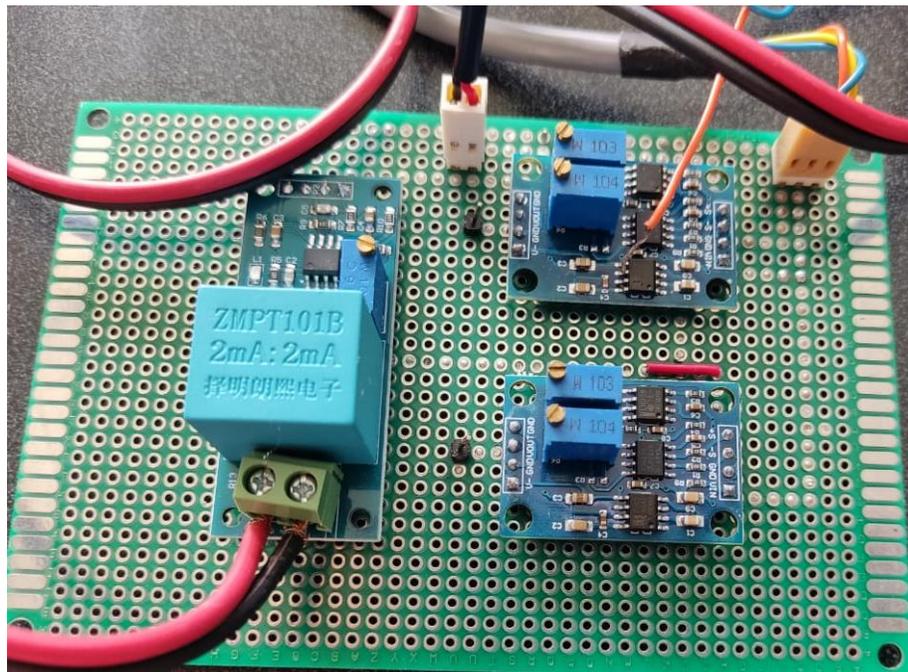


Figura 12 Tarjeta desarrollada de sensores, módulos de acondicionamiento y salidas de las señales. (Autoría propia).

En la figura 13 se muestra la forma en la que se conectó todo el sistema para la obtención de las señales. La tarjeta descrita con los sensores ya acondicionados en la anterior figura se conectó directamente al centro de carga de la red eléctrica residencial, a su vez, las salidas de los sensores de la tarjeta desarrollada se conectaron a dos canales del microcontrolador MSP432 para obtener las señales de corriente y voltaje al conectar las diferentes cargas no lineales anteriormente planteadas.

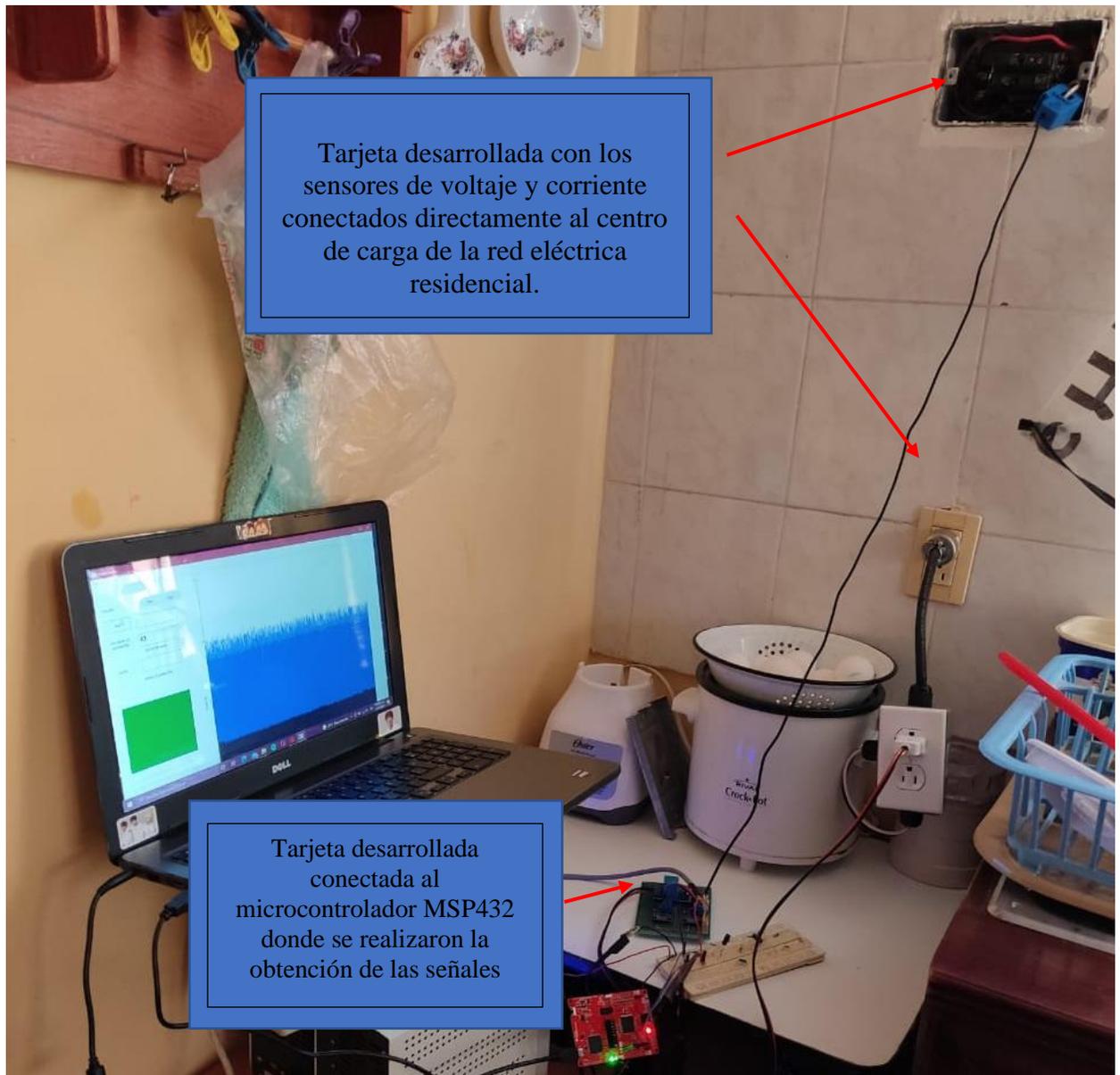


Figura 13 Sistema conectado a la red eléctrica residencial. (Autoría propia).

Al monitorear y adquirir las señales de corriente y voltaje necesarias se procedió a realizar el análisis de las mismas con las funciones FFT y THD que consumen cada uno de los dispositivos que se conectaron a la red eléctrica residencial de acuerdo a la matriz de pruebas.

4.1 Sin ningún dispositivo conectado

Primeramente, se debía conocer el estado de la red eléctrica residencial por lo que se decidió tomar estas muestras. En las siguientes figuras 14 y 15 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 20 al 25, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 16 y 17 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

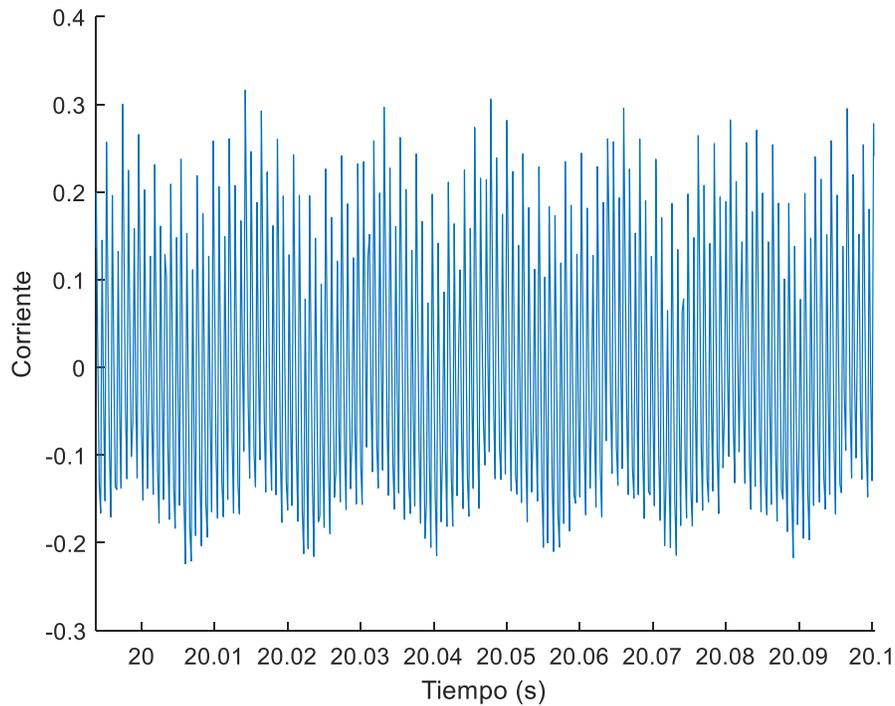


Figura 14 Señal adquirida de corriente. (Autoría propia).

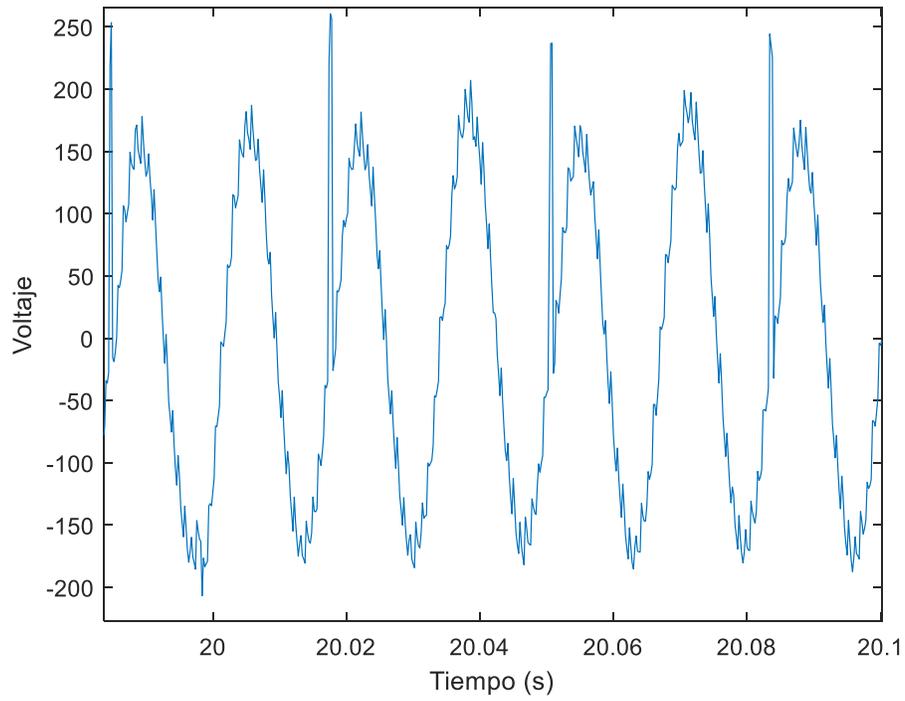


Figura 15 Señal adquirida de voltaje. (Autoría propia).

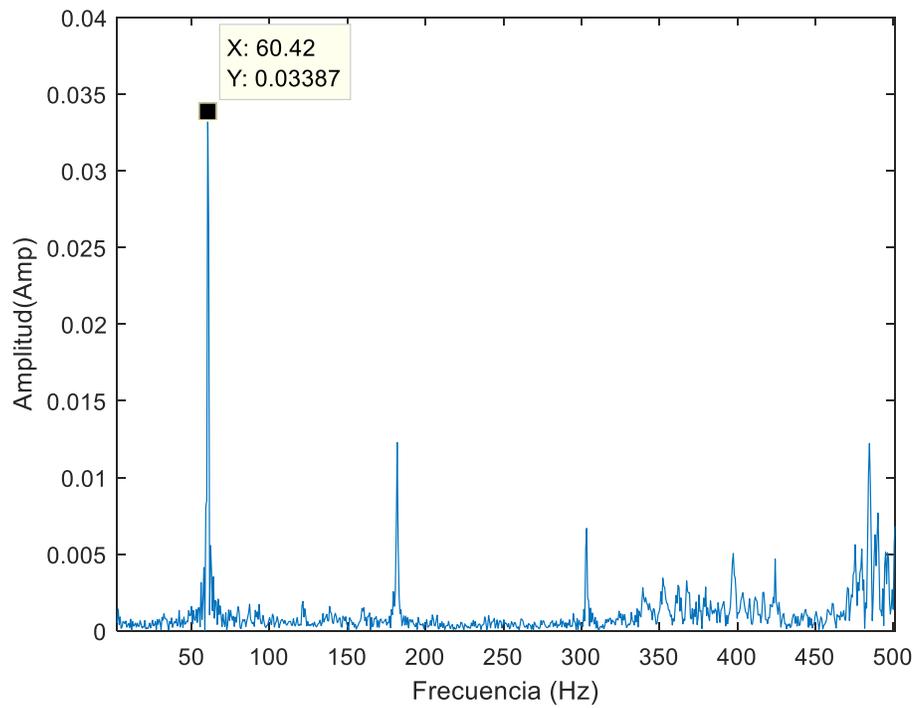


Figura 16 Transformada de Fourier de corriente. (Autoría propia).

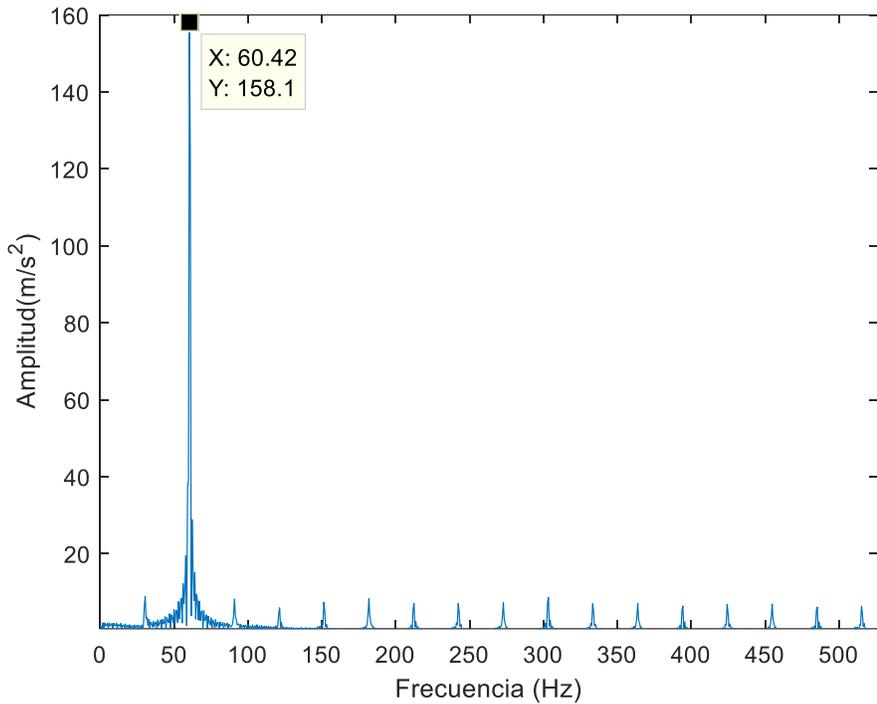


Figura 17 Transformada de Fourier de voltaje. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 2 Valores de THD de corriente y voltaje al no tener nada conectado a la red eléctrica residencial.

THI (%)	0	0	0	0	0
THV (%)	16.5046	16.5616	16.2756	16.0982	16.9064

4.2 Lavadora

En las siguientes figuras 18 y 20 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 8.5 al 11.5, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 21 y 22 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

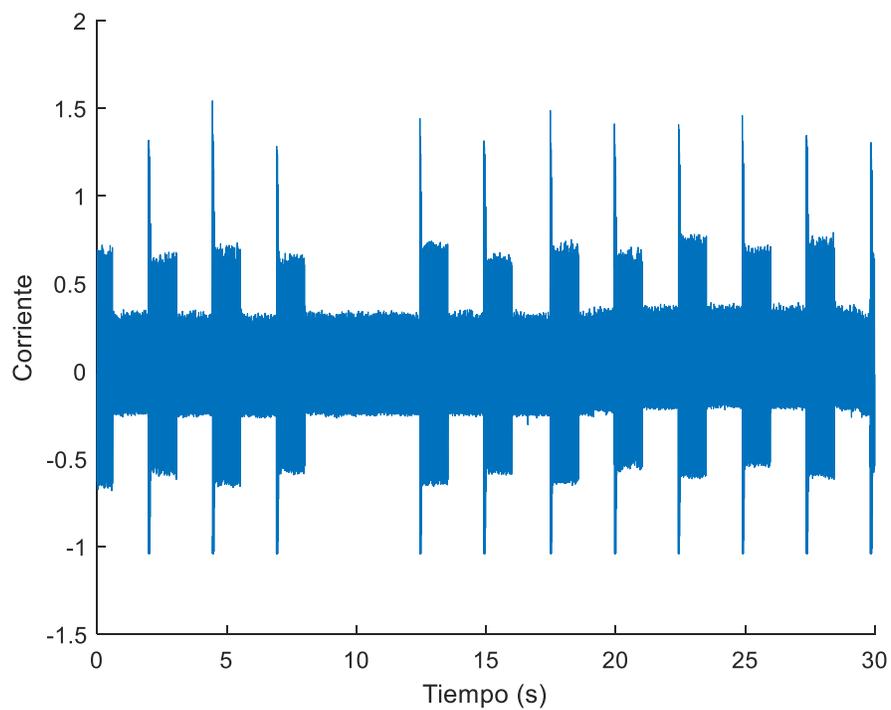


Figura 18 Señal adquirida de corriente de la lavadora. (Autoría propia).

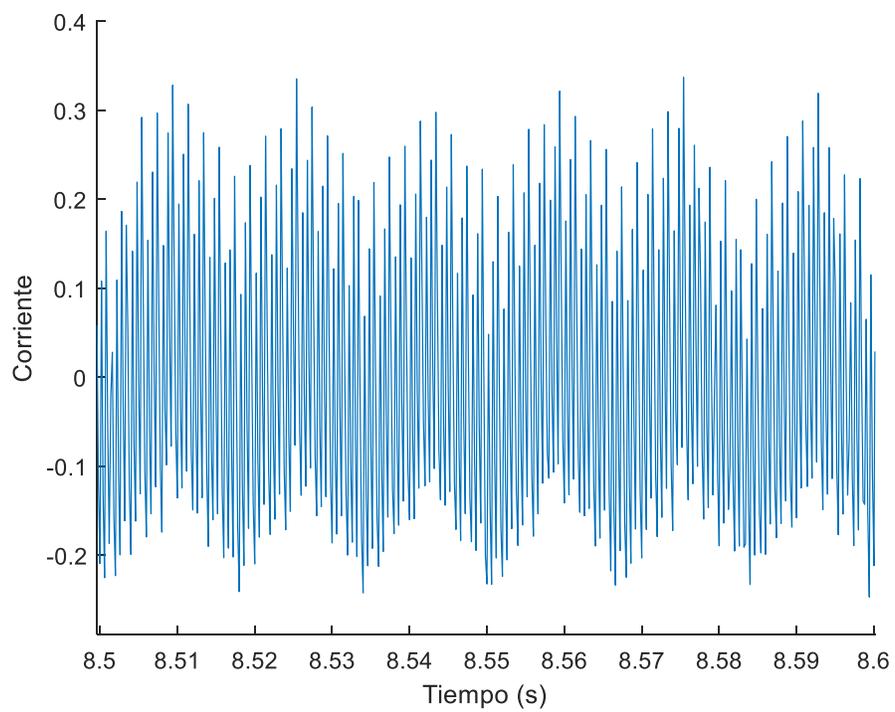


Figura 19 Señal adquirida de corriente del 8.5s a 8.6s. (Autoría propia).

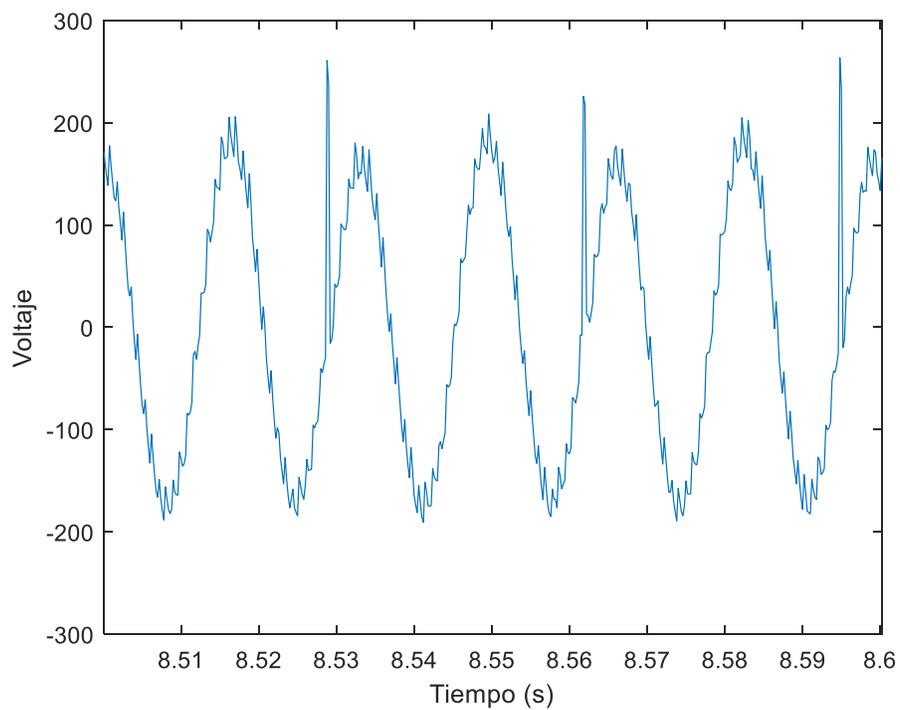


Figura 20 Señal adquirida de voltaje de la lavadora. (Autoría propia).

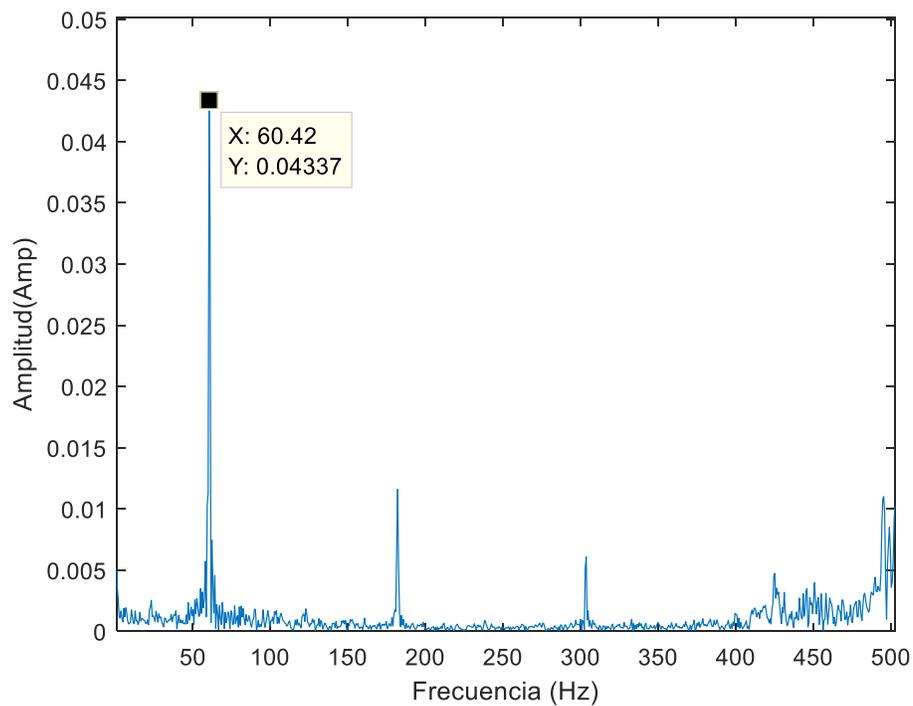


Figura 21 Transformada de Fourier de corriente de la lavadora. (Autoría propia).

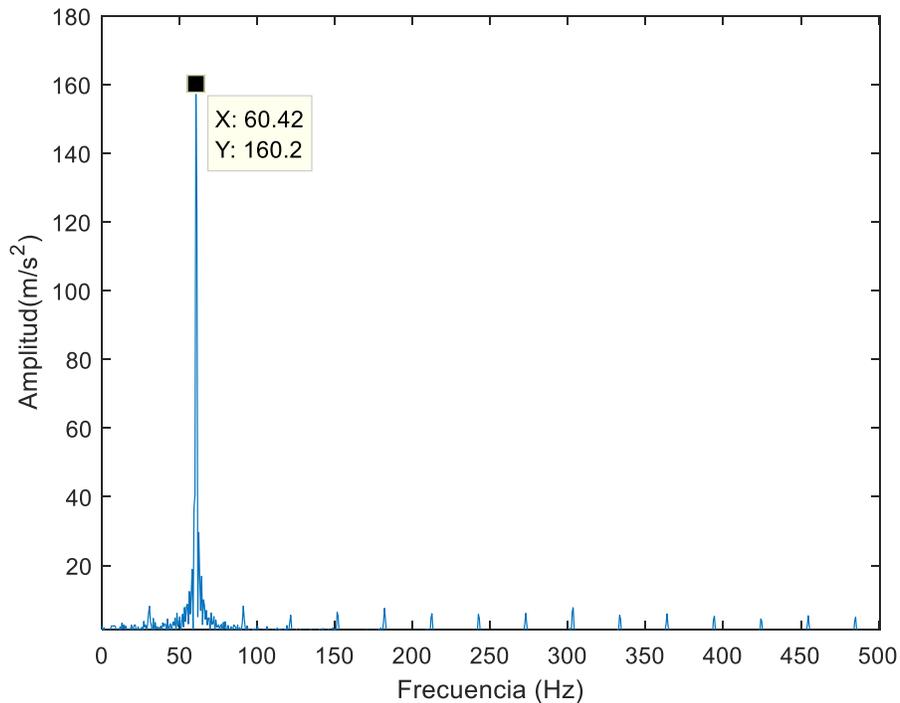


Figura 22 Transformada de Fourier de voltaje de la lavadora. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 3 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar la lavadora a la red eléctrica.

THI (%)	0	0	0
THV (%)	16.8002	16.2093	17.2806

4.3 Horno de microondas

En las siguientes figuras 23 y 25 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 10 al 15, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 26 y 27 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

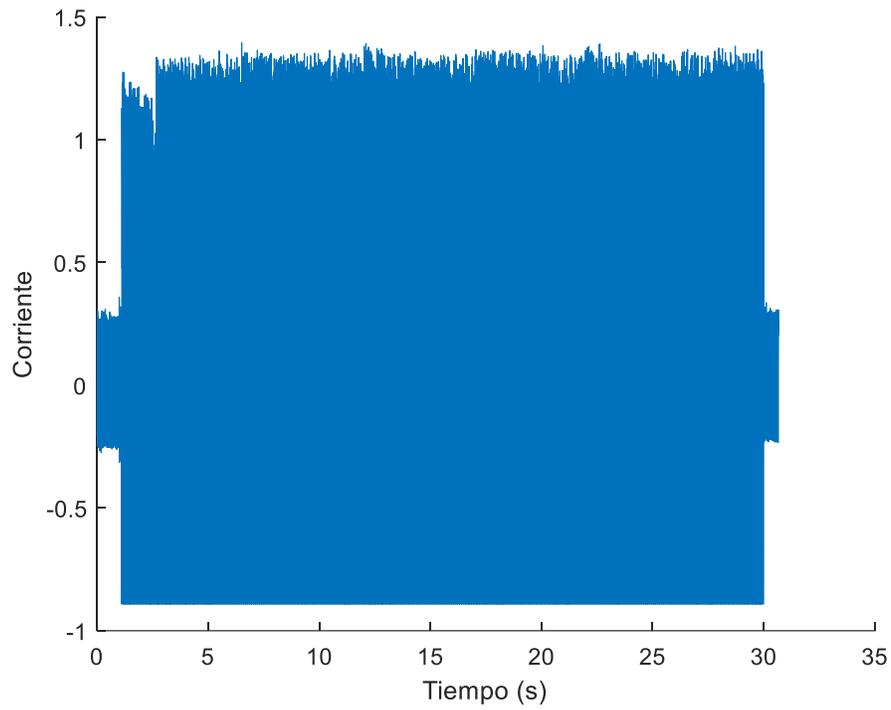


Figura 23 Señal adquirida de corriente del horno de microondas. (Autoría propia).

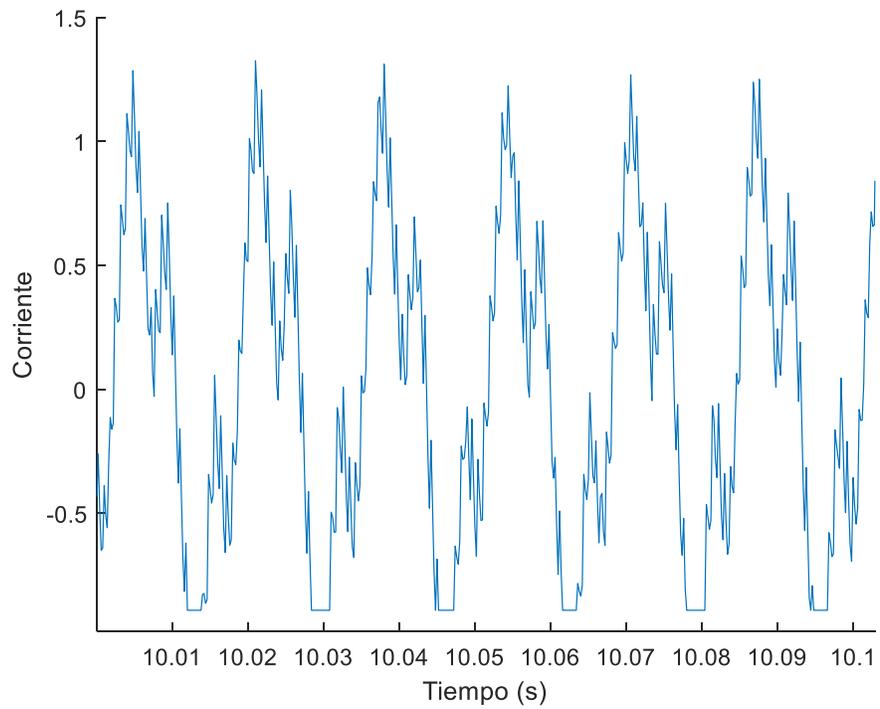
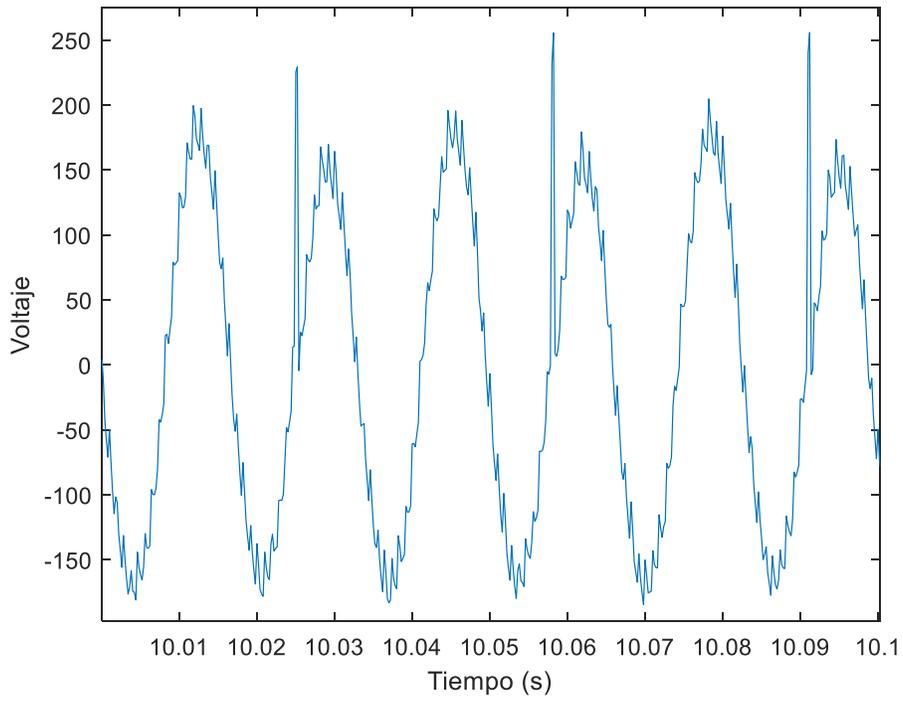


Figura 24 Señal adquirida de corriente del 10s a 10.1s. (Autoría propia).



0

Figura 25 Señal adquirida de voltaje del horno de microondas. (Autoría propia).

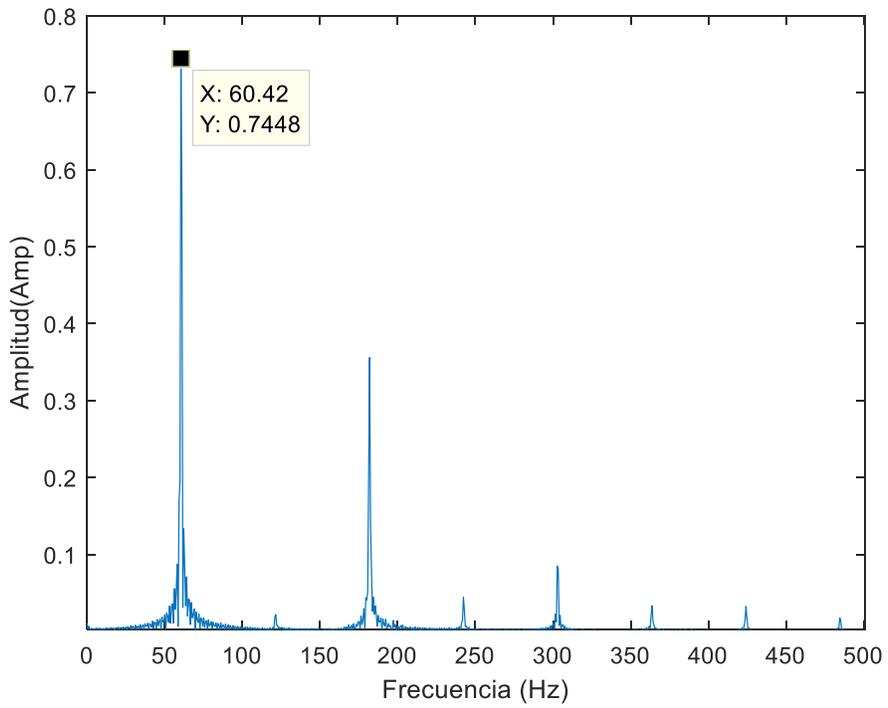


Figura 26 Transformada de Fourier de corriente del horno de microondas. (Autoría propia).

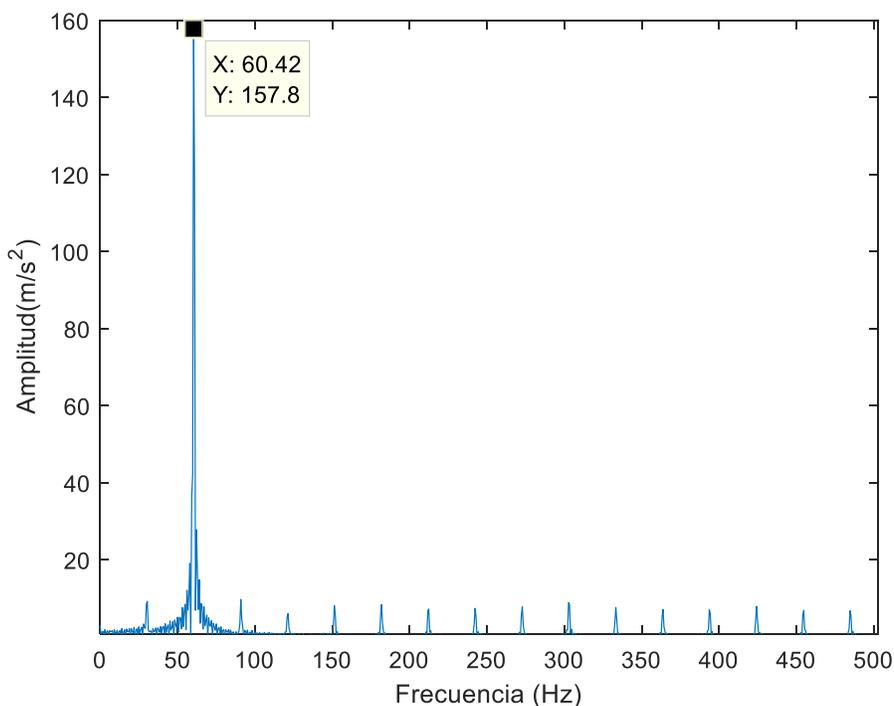


Figura 27 Transformada de Fourier de voltaje del horno de microondas. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje y corriente los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 4 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar el horno de microondas a la red eléctrica.

THI (%)	45.9951	47.3329	45.1426	46.5773	48.0302
THV (%)	16.6896	15.2891	20.8111	17.0881	18.8634

4.4 Licuadora

En las siguientes figuras 28 y 30 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 5 al 10, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 31 y 32 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

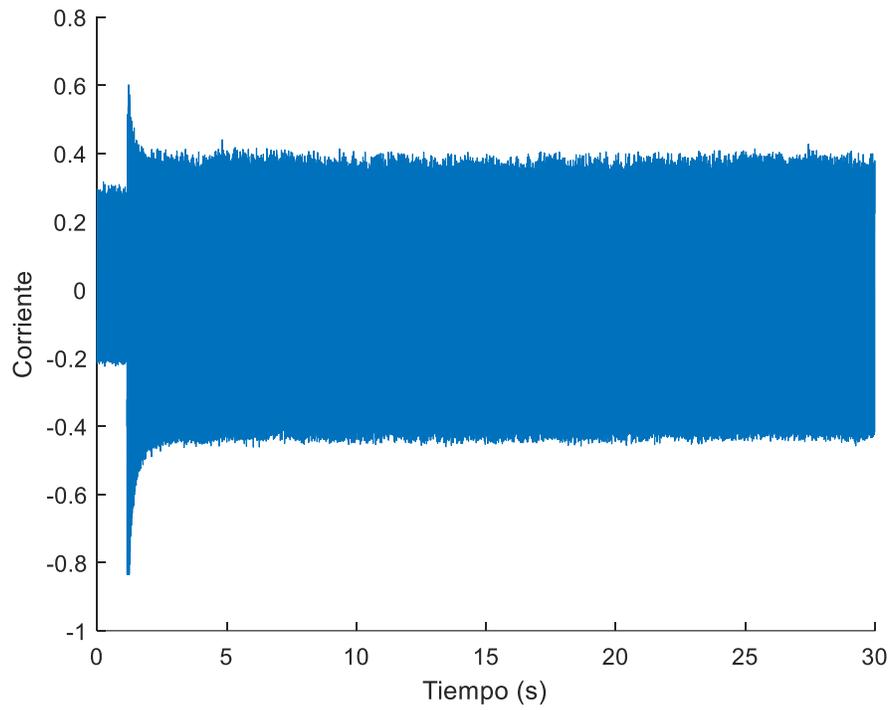


Figura 28 Señal adquirida de corriente de la licuadora. (Autoría propia).

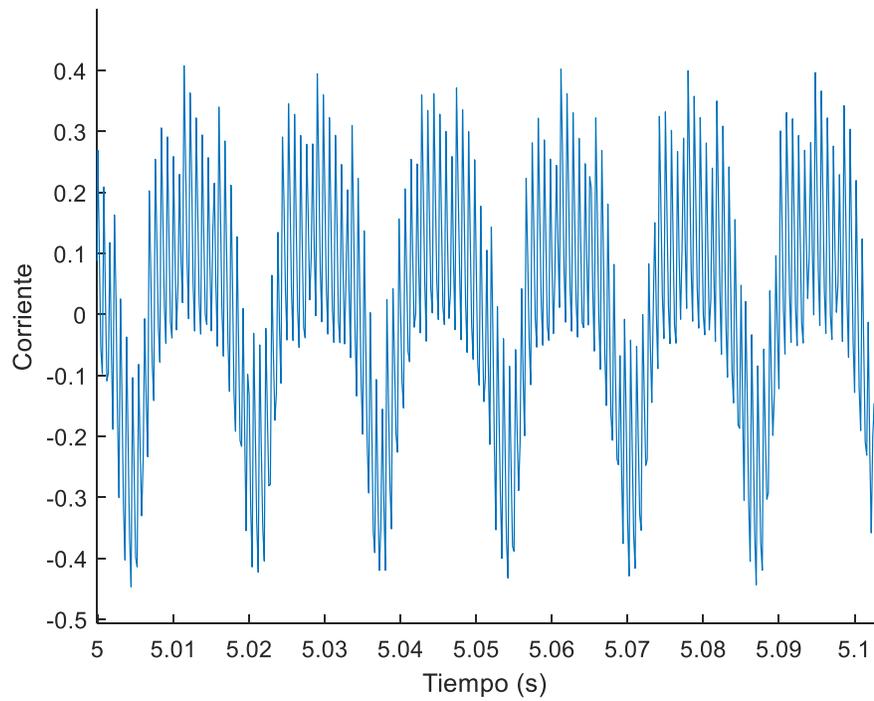


Figura 29 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).

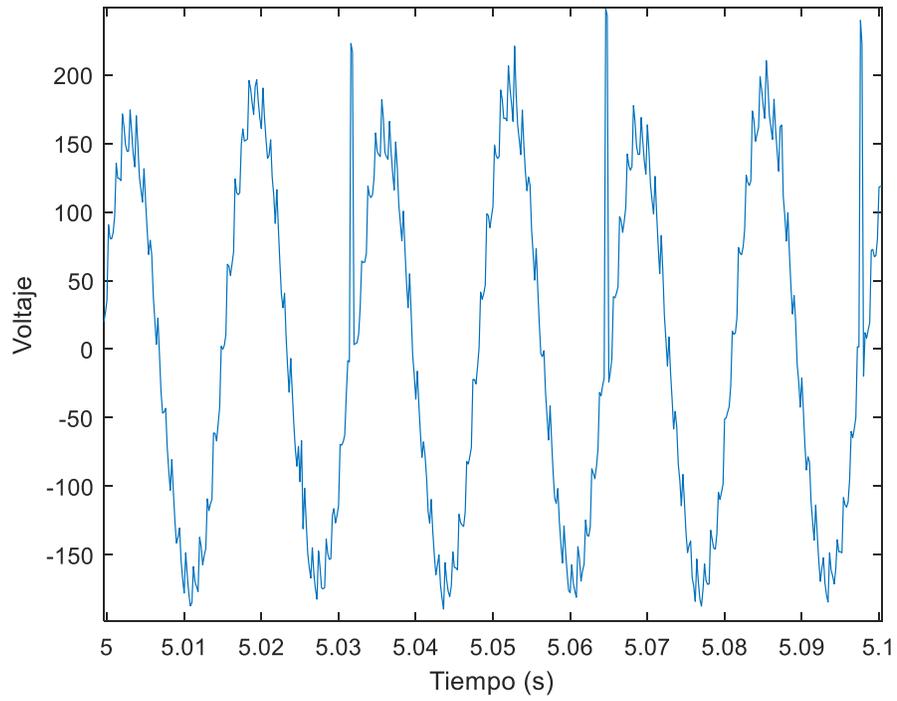


Figura 30 Señal adquirida de voltaje de la licuadora. (Autoría propia).

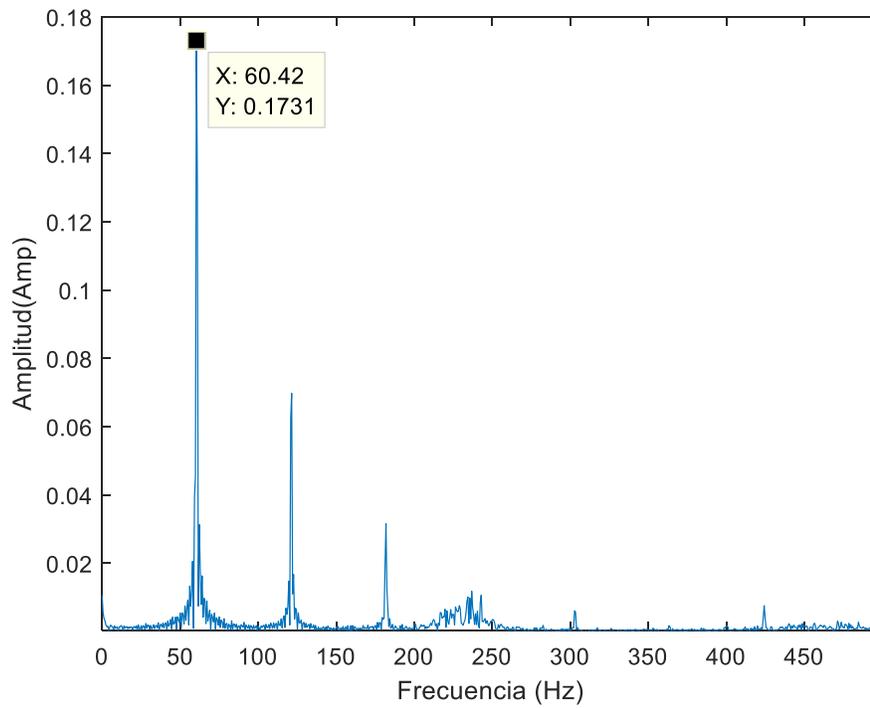


Figura 31 Transformada de Fourier de corriente de la licuadora. (Autoría propia).

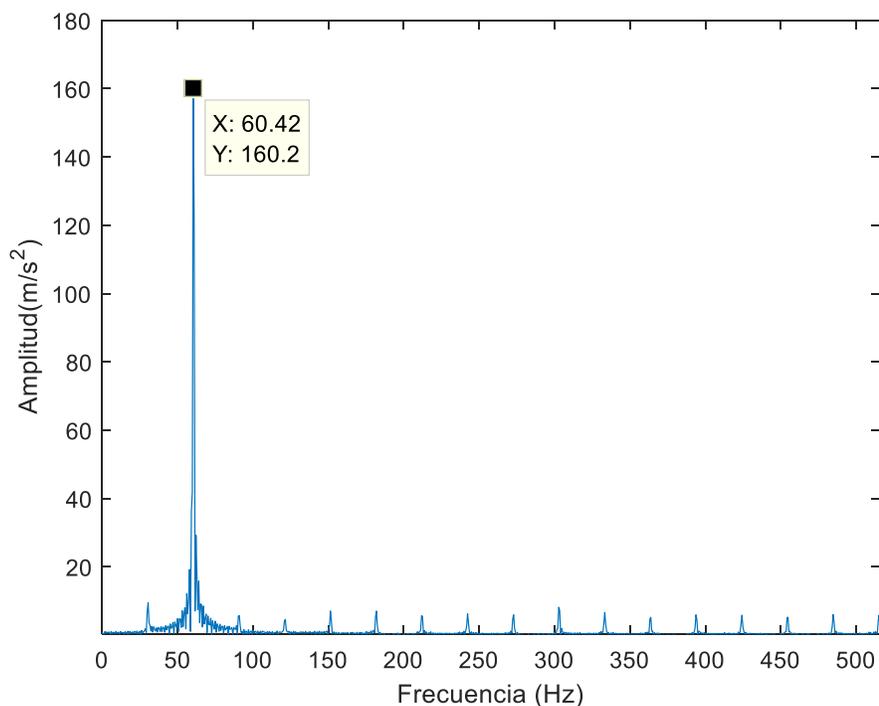


Figura 32 Transformada de Fourier de voltaje de la licuadora. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje y corriente los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 5 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar la licuadora a la red eléctrica.

THI (%)	48.5428	47.1490	47.2248	46.6653	48.9345
THV (%)	16.8362	17.5015	15.5502	17.1574	17.5552

4.5 Pantallas

En las siguientes figuras 33 y 35 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje de dos pantallas que se encendieron al mismo tiempo, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 15 al 20, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 36 y 37 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

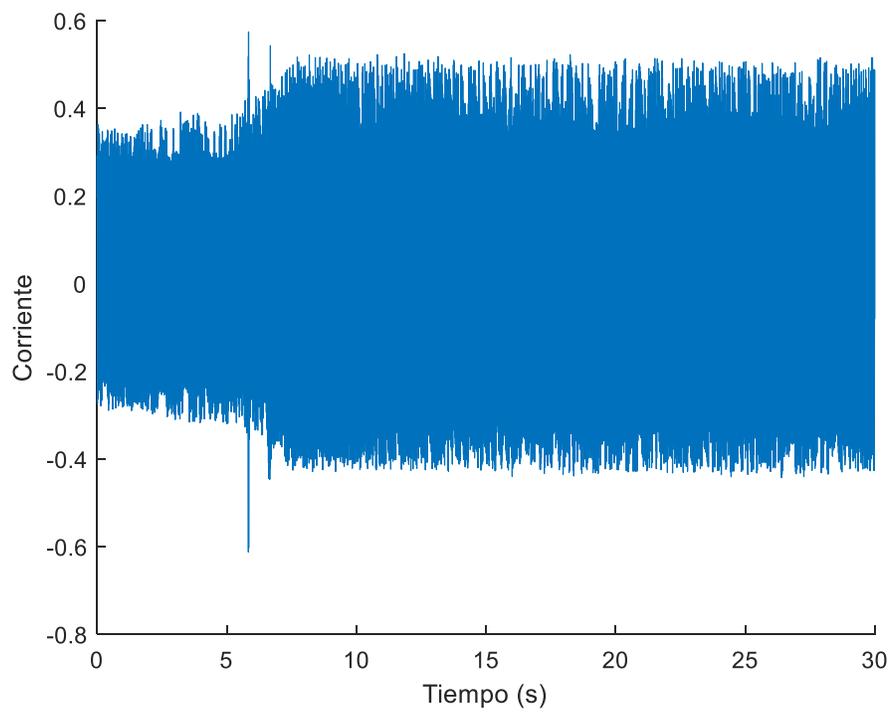


Figura 33 Señal adquirida de corriente de pantallas. (Autoría propia).

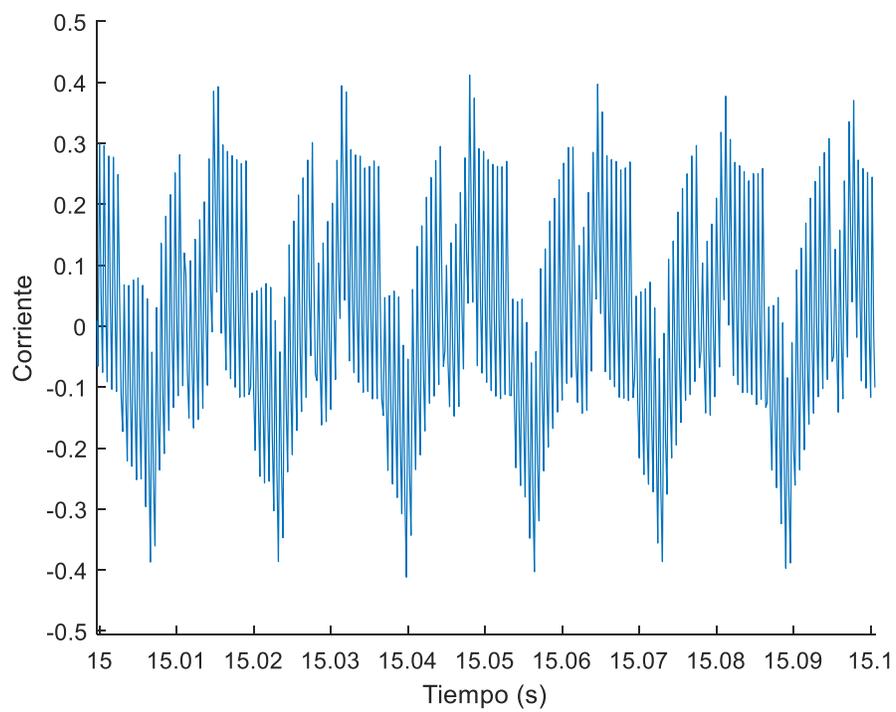


Figura 34 Señal adquirida de corriente del 15s al 15.1s. (Autoría propia).

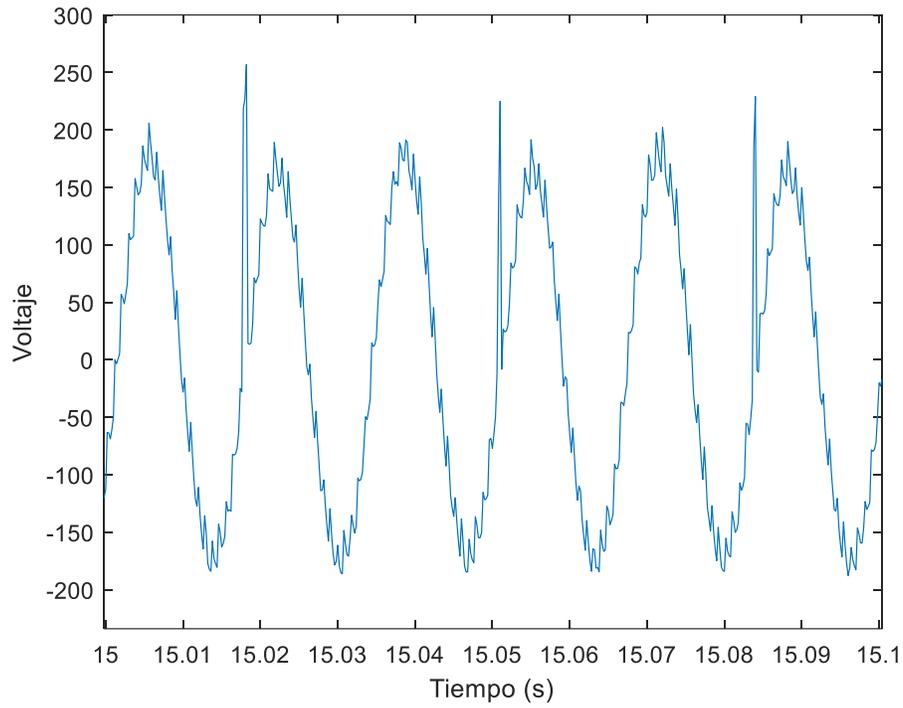


Figura 35 Señal adquirida de voltaje de pantallas. (Autoría propia).

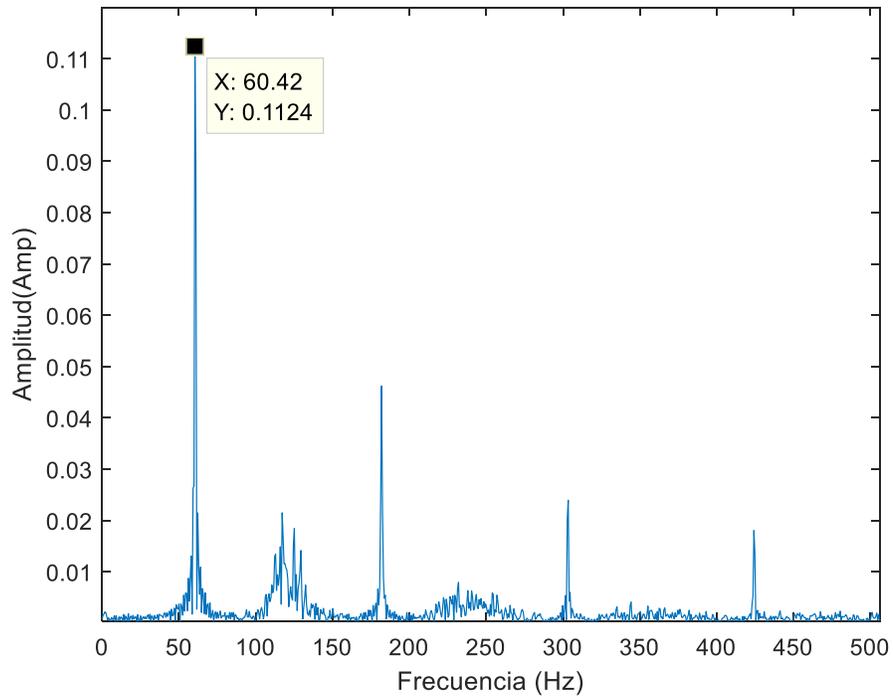


Figura 36 Transformada de Fourier de corriente de pantallas. (Autoría propia).

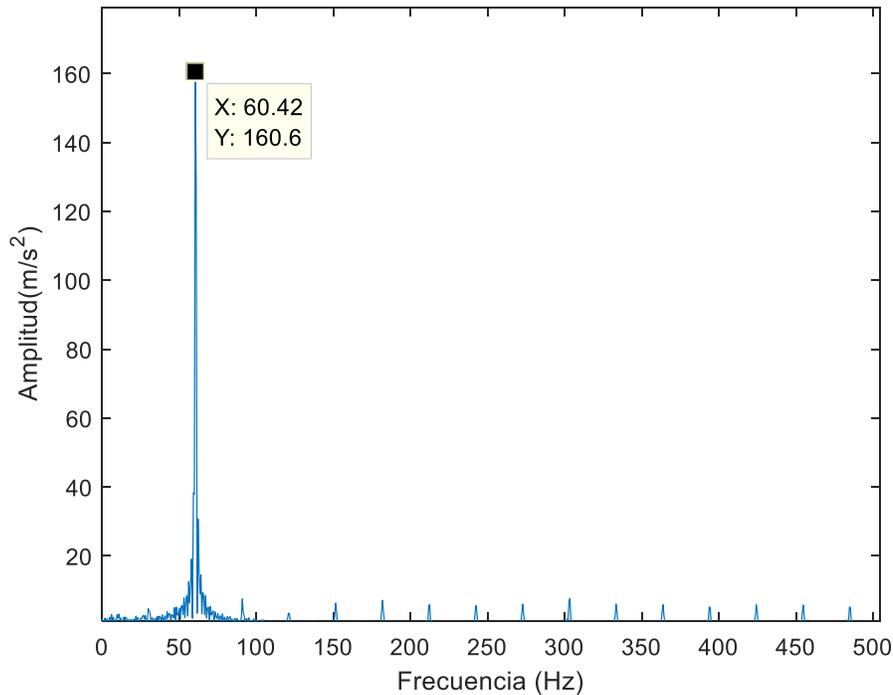


Figura 37 Transformada de Fourier de voltaje de pantallas. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 6 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar las pantallas a la red eléctrica.

THI (%)	0	0	0	0	0
THV (%)	16.2533	14.8098	15.2670	14.0751	13.8549

4.6 Cargadores

En las siguientes figuras 38 y 40 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje de cuatro cargadores para celular y tres cargadores de laptop que se encendieron al mismo tiempo, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 20 al 25, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 41 y 42 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

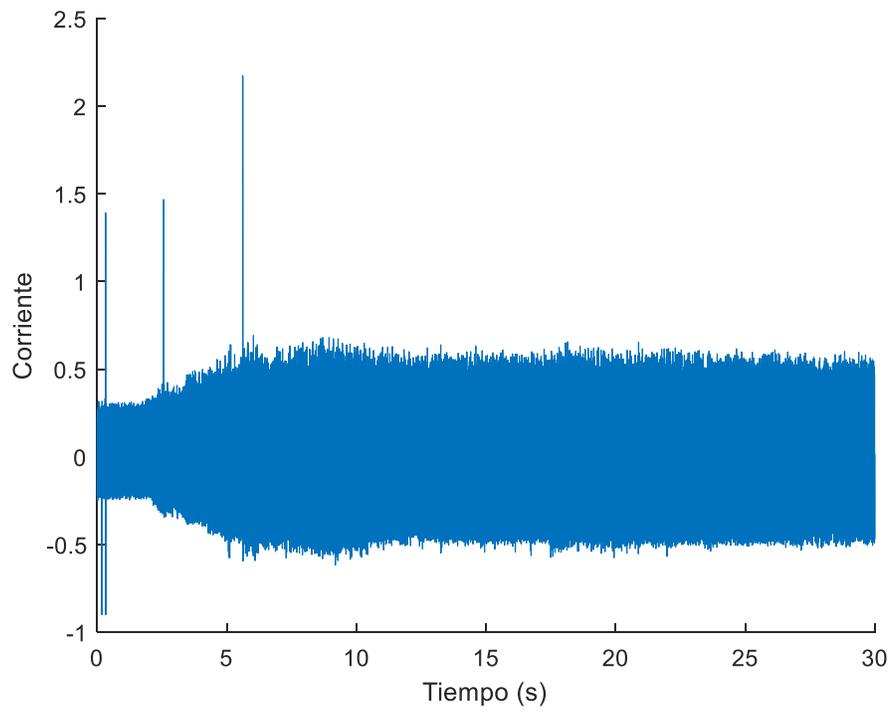


Figura 38 Señal adquirida de corriente de argadores. (Autoría propia).

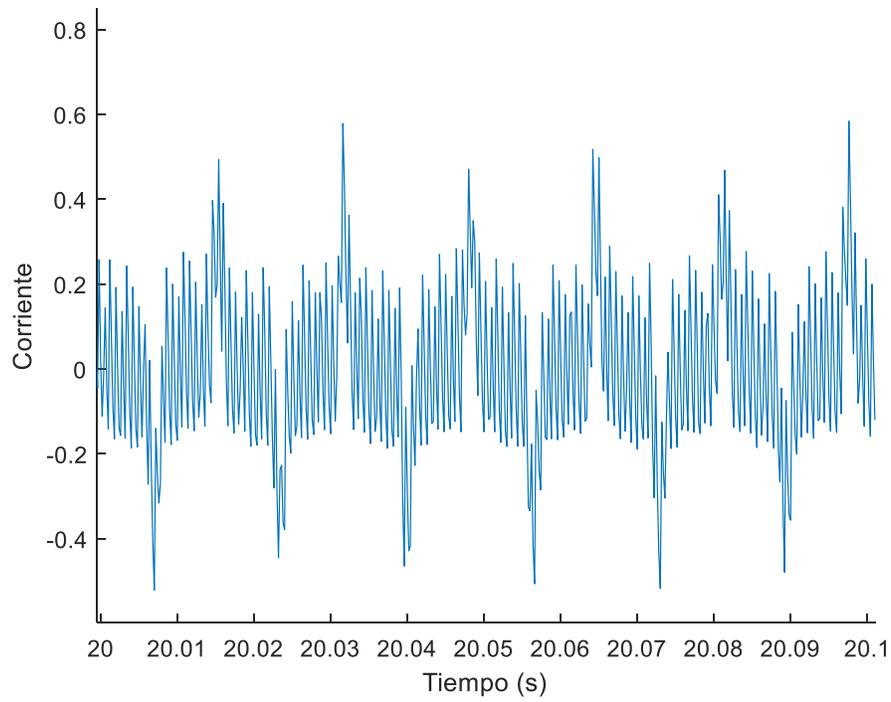


Figura 39 Señal adquirida de corriente del 20s al 20.1s. (Autoría propia).

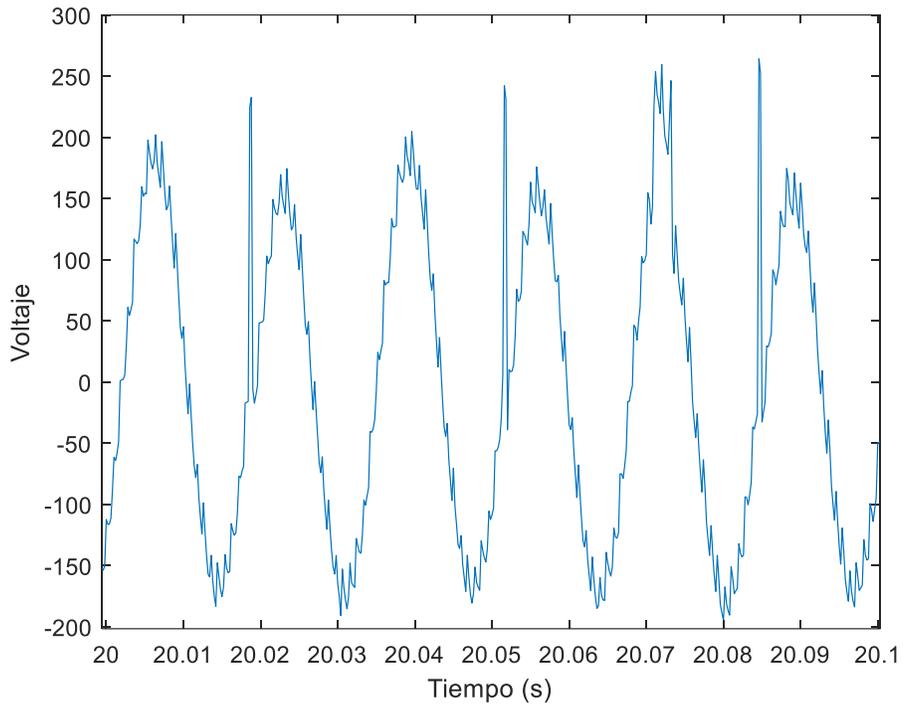


Figura 40 Señal adquirida de voltaje de cargadores. (Autoría propia).

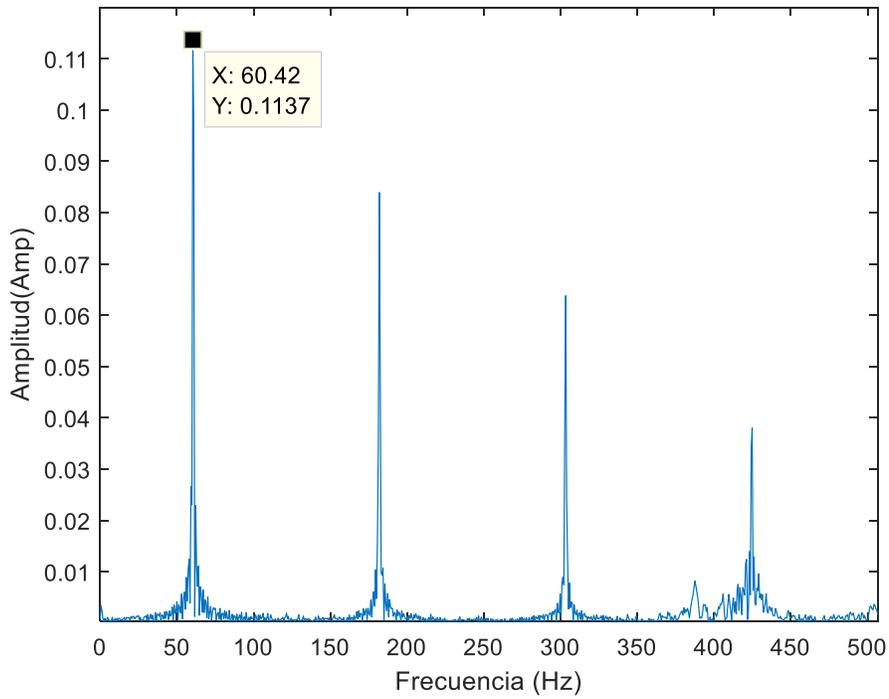


Figura 41 Transformada de Fourier de corriente de cargadores. (Autoría propia).

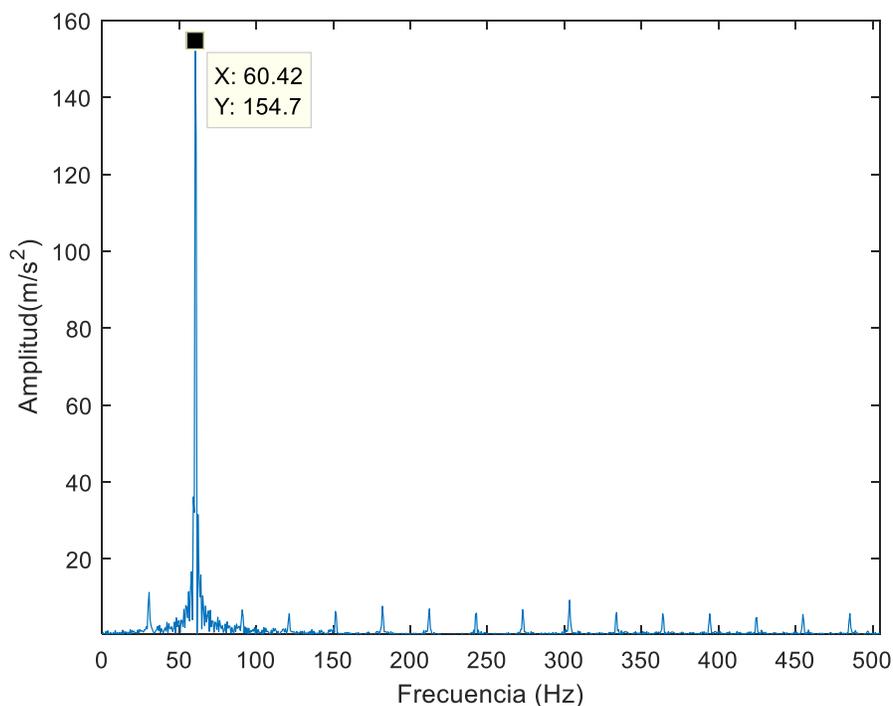


Figura 42 Transformada de Fourier de voltaje de cargadores. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 7 Valores de THD de corriente y voltaje al conectar cargadores a la red eléctrica.

THI (%)	0	0	0	0	0
THV (%)	15.4117	15.6595	17.2483	16.8128	16.0116

4.7 Impresora

En las siguientes ilustraciones 43 y 45 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 5 al 10, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 46 y 47 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

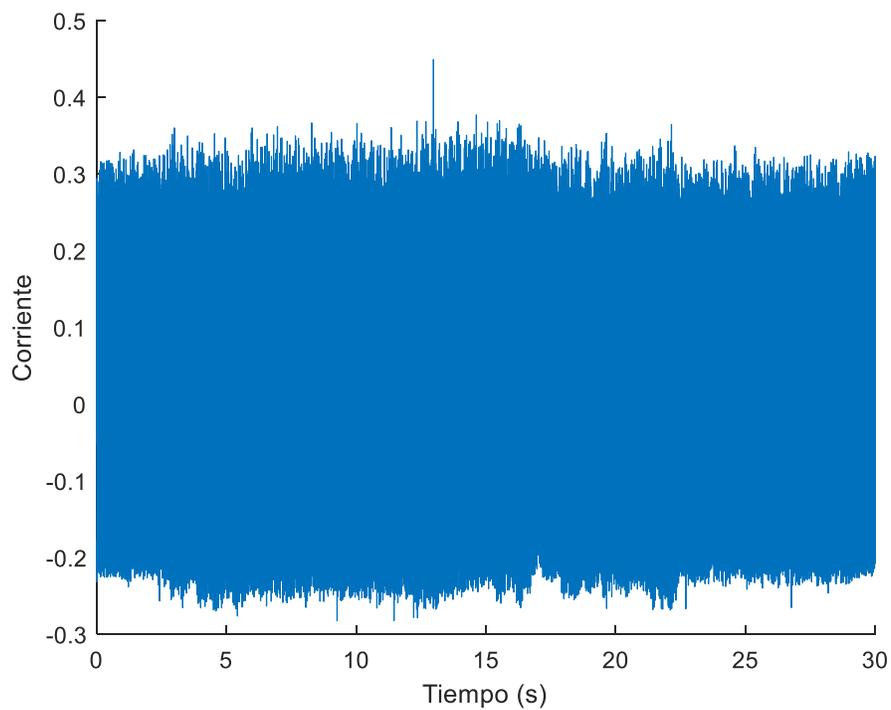


Figura 43 Señal adquirida de corriente de impresora. (Autoría propia).

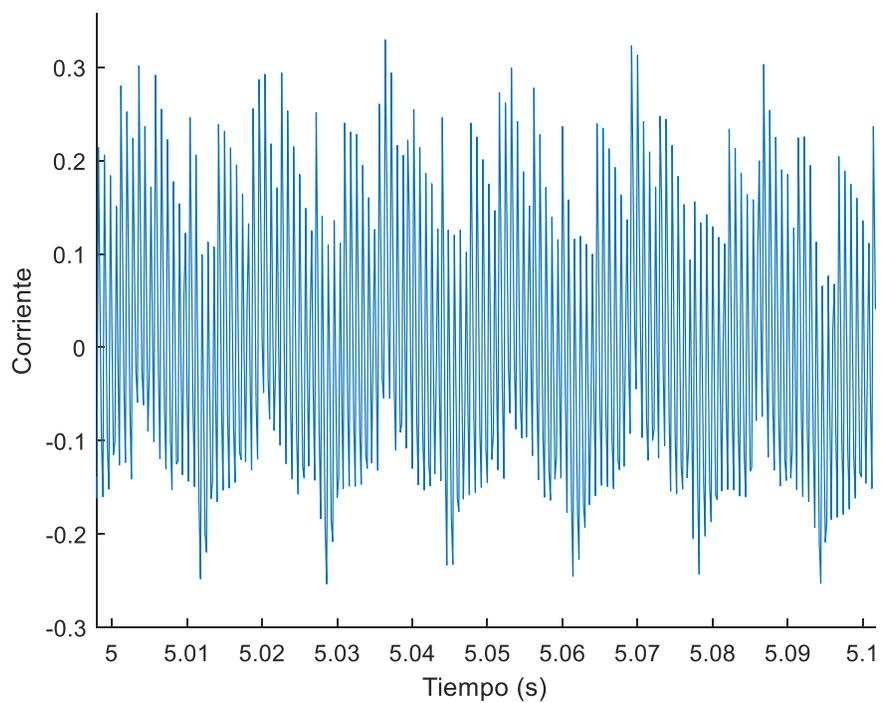


Figura 44 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).

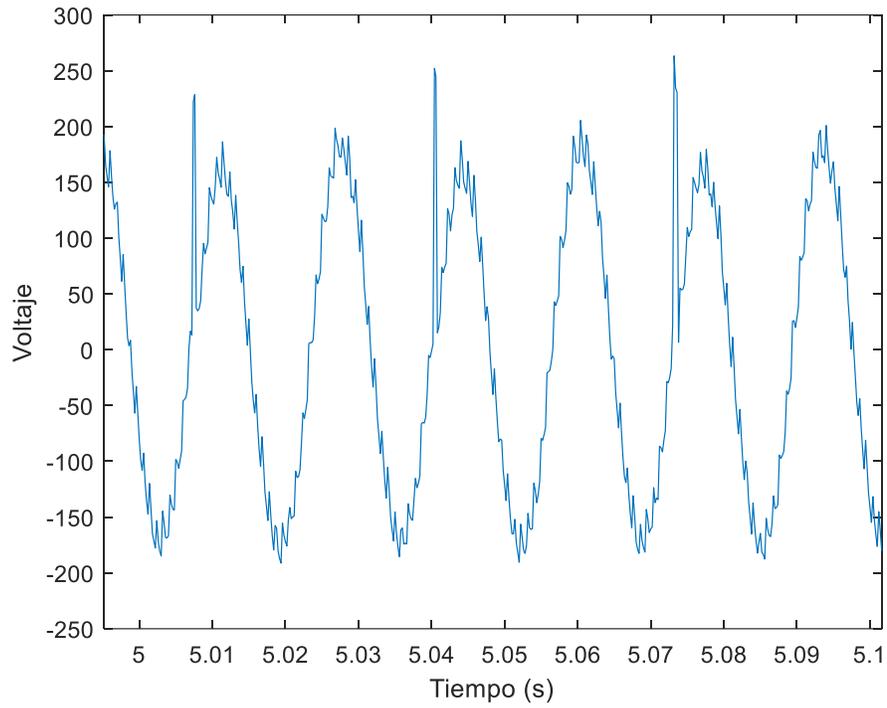


Figura 45 Señal adquirida de voltaje de impresora. (Autoría propia).

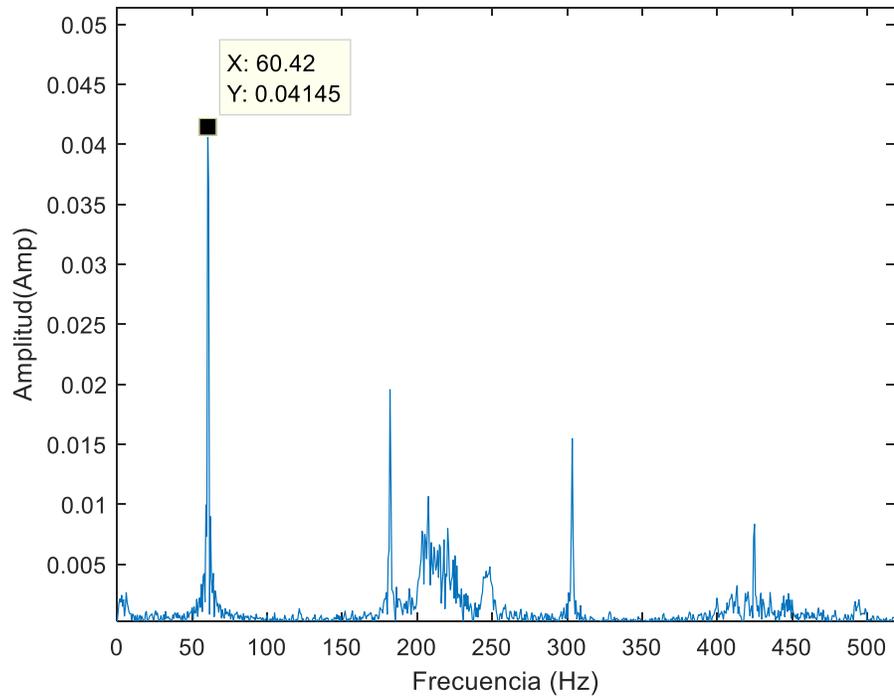


Figura 46 Transformada de Fourier de corriente de impresora. (Autoría propia).

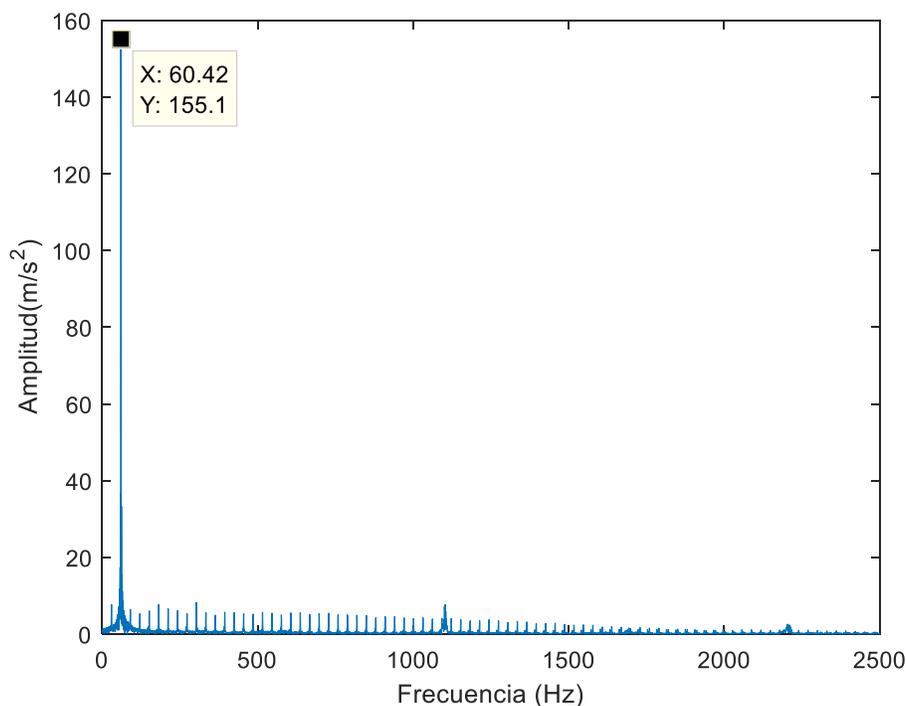


Figura 47 Transformada de Fourier de voltaje de impresora. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 8 Valores de THD de corriente y voltaje de la impresora al conectarla a la red eléctrica.

THI (%)	0	0	0	0	0
THV (%)	17.9779	14.2879	15.3725	15.5108	15.5547

4.8 Refrigerador

En las siguientes figuras 48 y 50 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 10 al 15, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 51 y 52 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

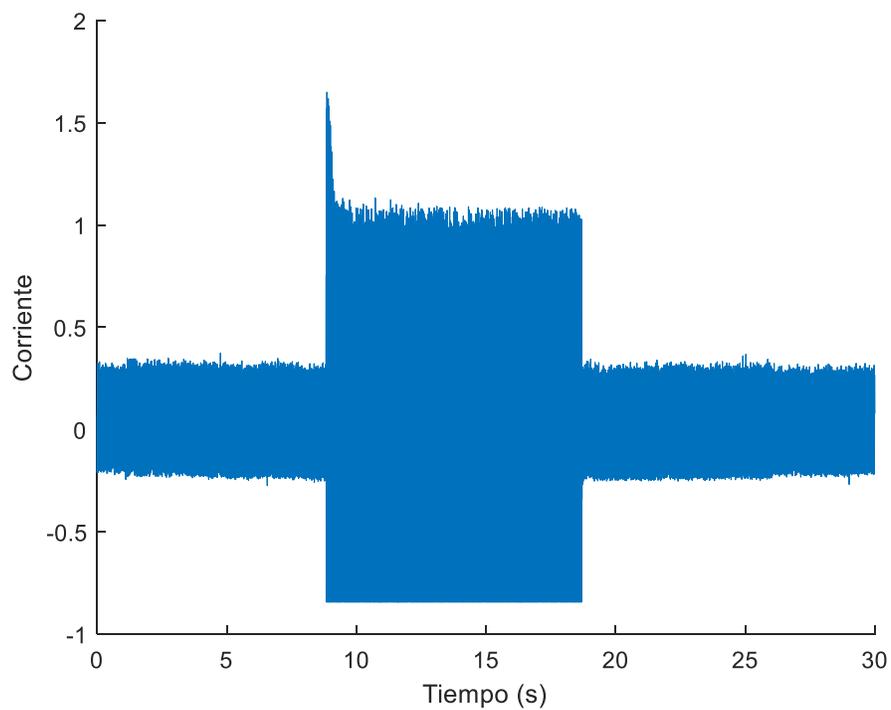


Figura 48 Señal adquirida de corriente del refrigerador. (Autoría propia).

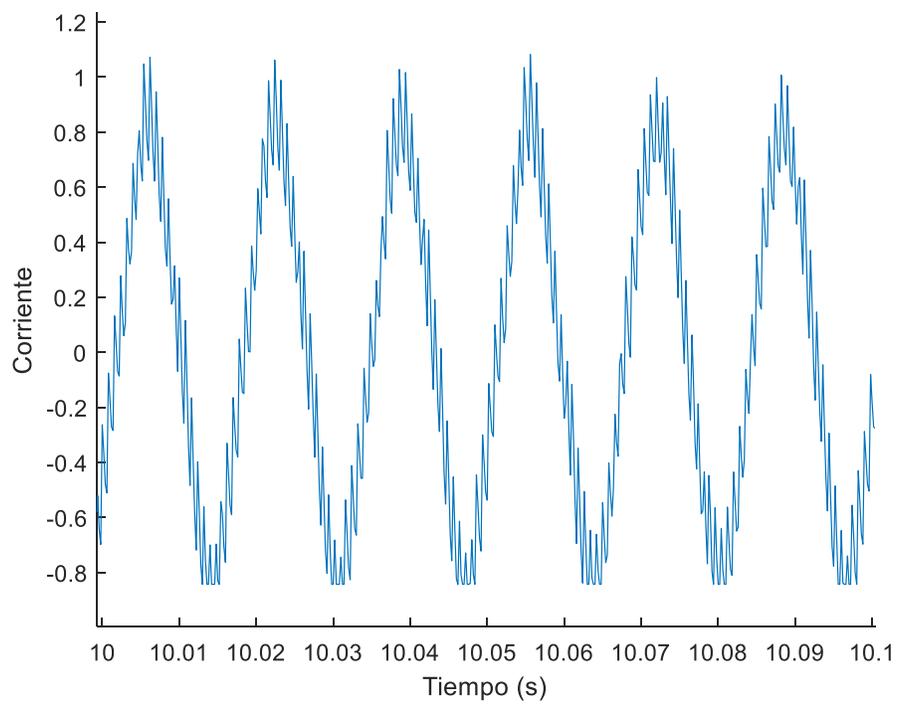


Figura 49 Señal adquirida de corriente del 10s al 10.1s. (Autoría propia).

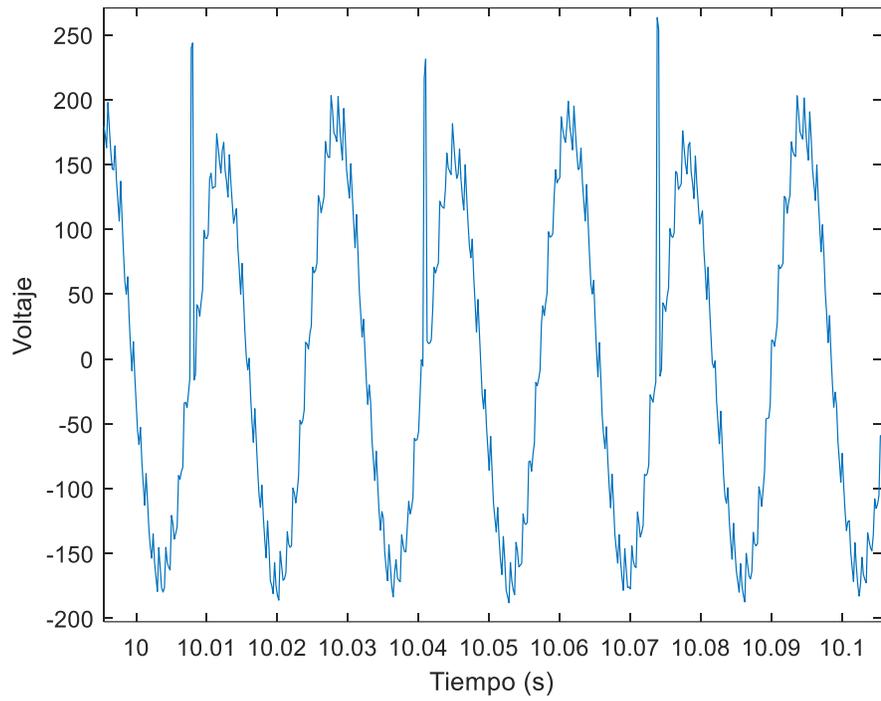


Figura 50 Señal adquirida de voltaje del refrigerador. (Autoría propia).

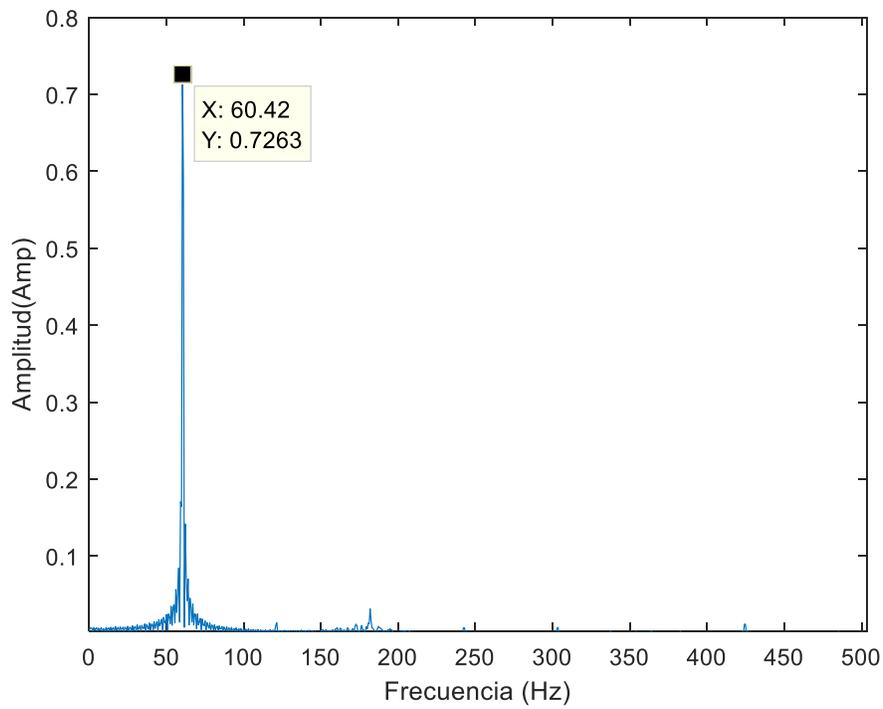


Figura 51 Transformada de Fourier de corriente del refrigerador. (Autoría propia).

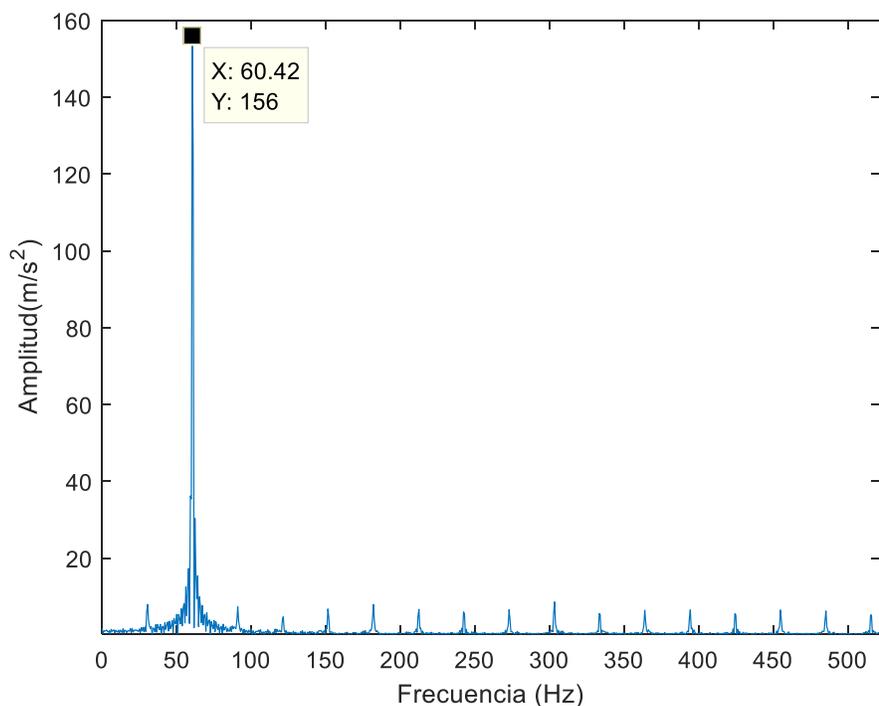


Figura 52 Transformada de Fourier de voltaje del refrigerador. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 9 Valores de THD de corriente y voltaje del refrigerador al conectarlo a la red eléctrica.

THI (%)	5.5379	5.6731	7.7197	4.9671	5.3734
THV (%)	15.8415	16.5370	15.1369	16.5204	16.4947

4.9 Luminarias

En las siguientes figuras 53 y 55 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 10 al 15, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 56 y 57 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

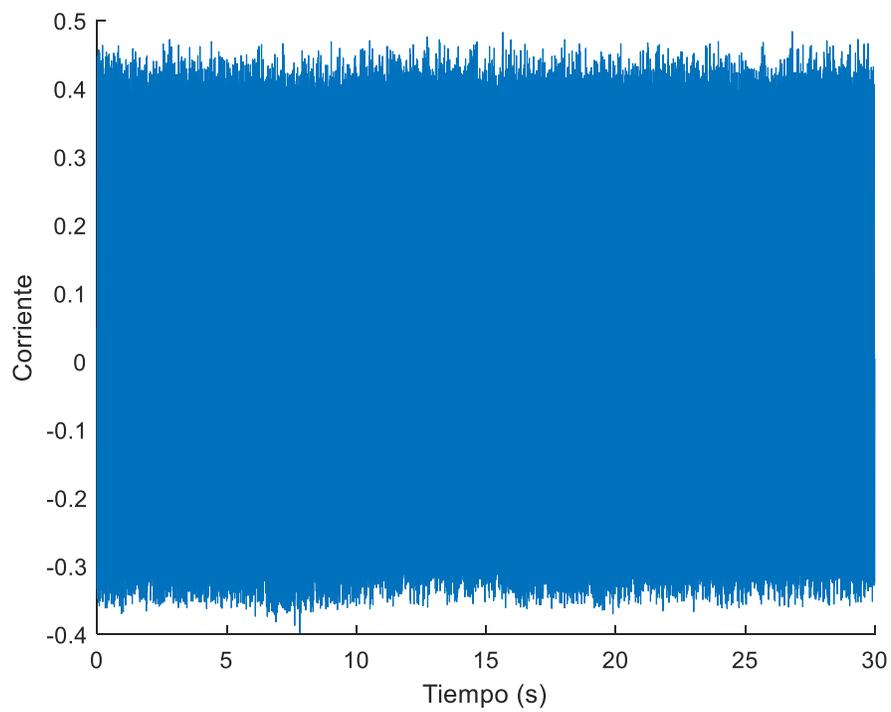


Figura 53 Señal adquirida de corriente de luminarias. (Autoría propia).

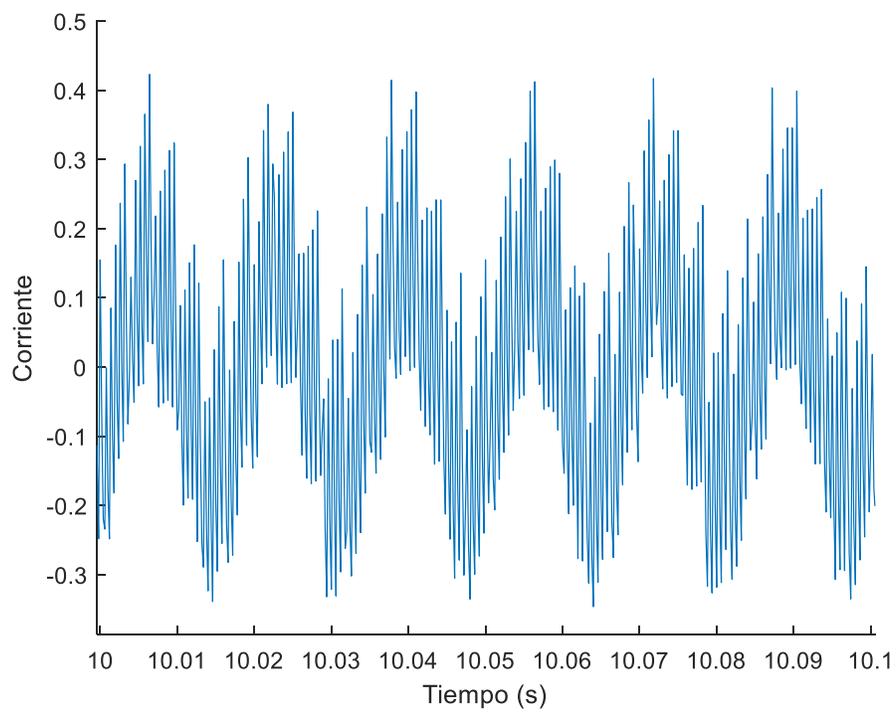


Figura 54 Señal adquirida de corriente del 10s al 10.1s. (Autoría propia).

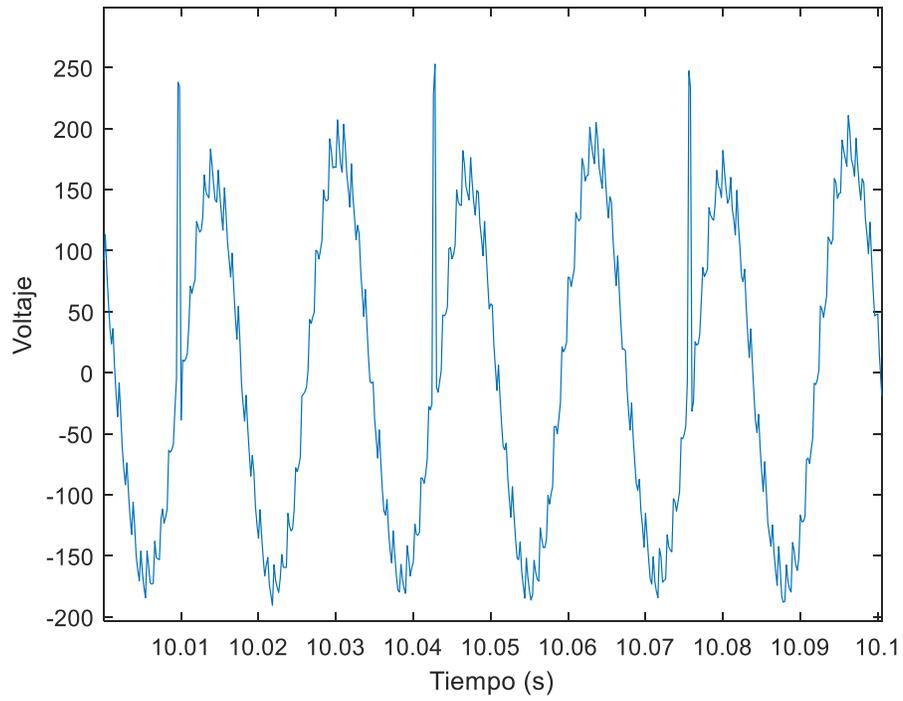


Figura 55 Señal adquirida de voltaje de luminarias. (Autoría propia).

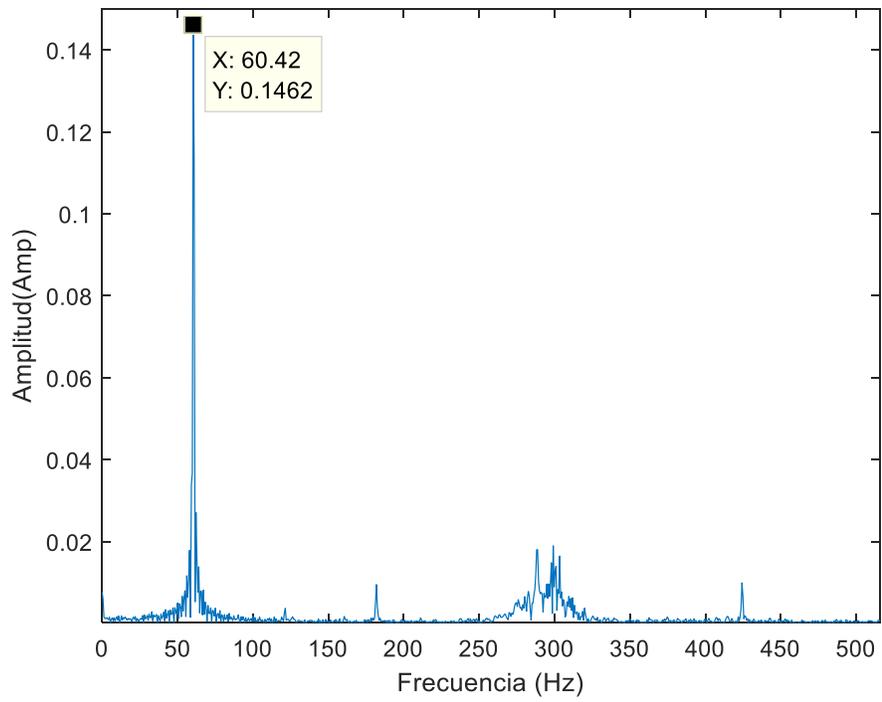


Figura 56 Transformada de Fourier de corriente de luminarias. (Autoría propia).

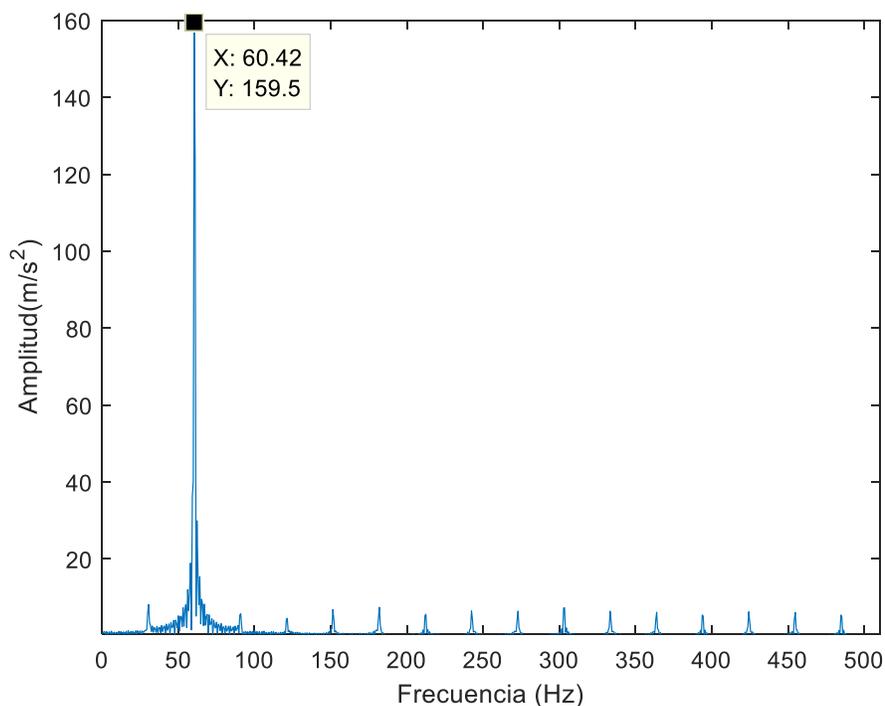


Figura 57 Transformada de Fourier de voltaje de luminarias. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje y corriente los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 10 Valores de THD de corriente y voltaje de luminarias al conectarlas a la red eléctrica.

THI (%)	0	0	30.2270	0	0
THV (%)	17.1043	16.5869	17.8449	16.3816	17.6467

4.10 Combinación

En las siguientes figuras 58 y 61 se puede observar que se obtuvieron las señales de corriente y voltaje de una combinación de dispositivos en los que se encontraban el refrigerador, la lavadora, una pantalla y una luminaria, además de que la ventana de tiempo más estable se eligió del segundo 5 al 10, y esta se separó en ventanas individuales de 1 segundo. Las figuras 62 y 63 muestran las gráficas de FFT de una ventana de 1 segundo ya que todas son muy similares.

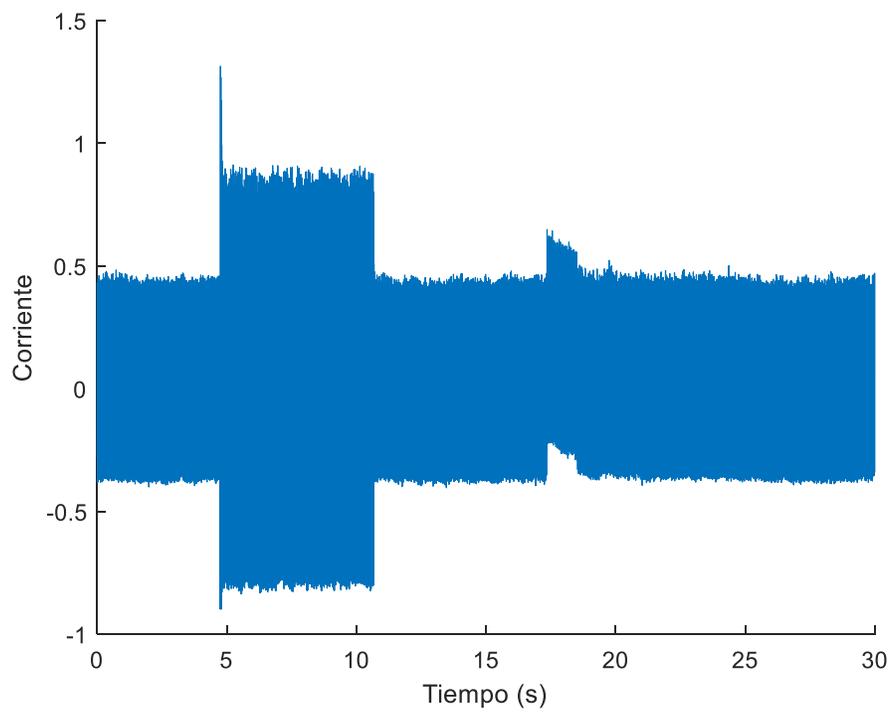


Figura 58 Señal adquirida de corriente de combinación. (Autoría propia).

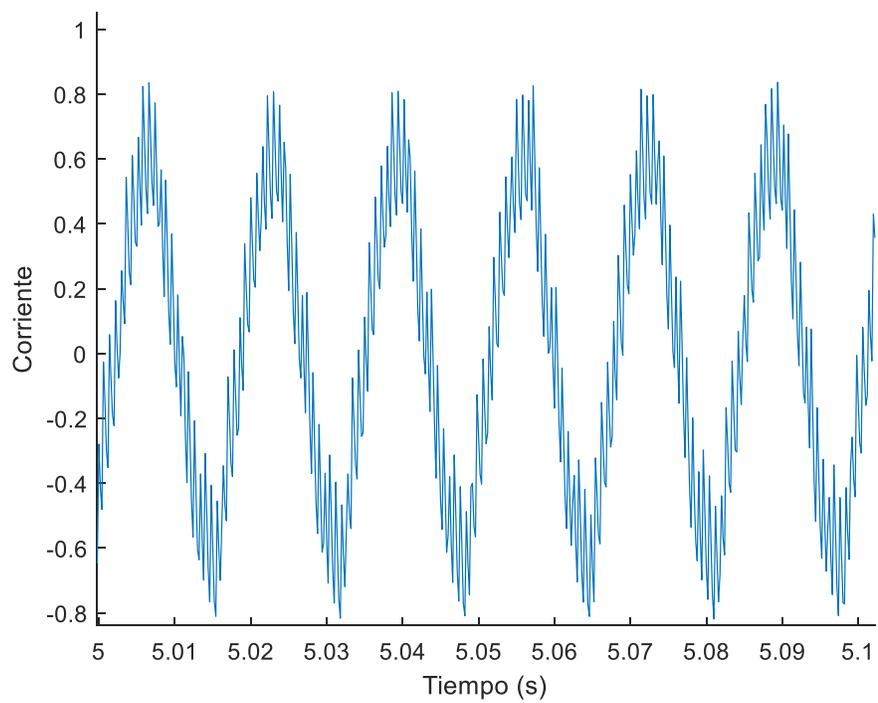


Figura 59 Señal adquirida de corriente del 5s al 5.1s. (Autoría propia).

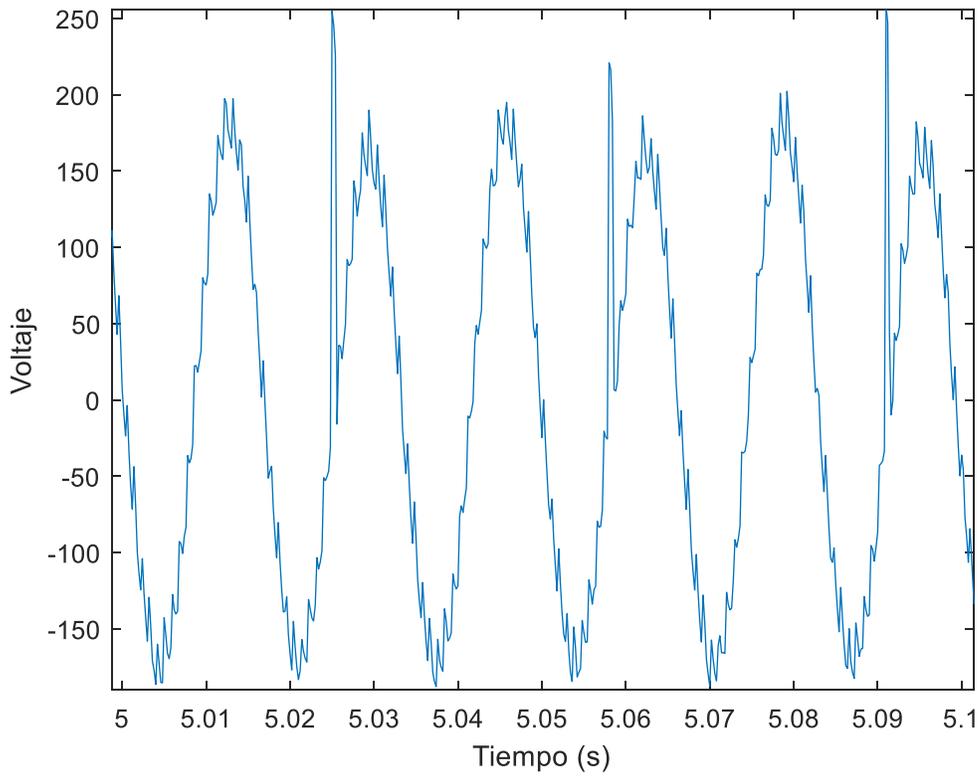


Figura 60 Señal adquirida de voltaje de combinación. (Autoría propia).

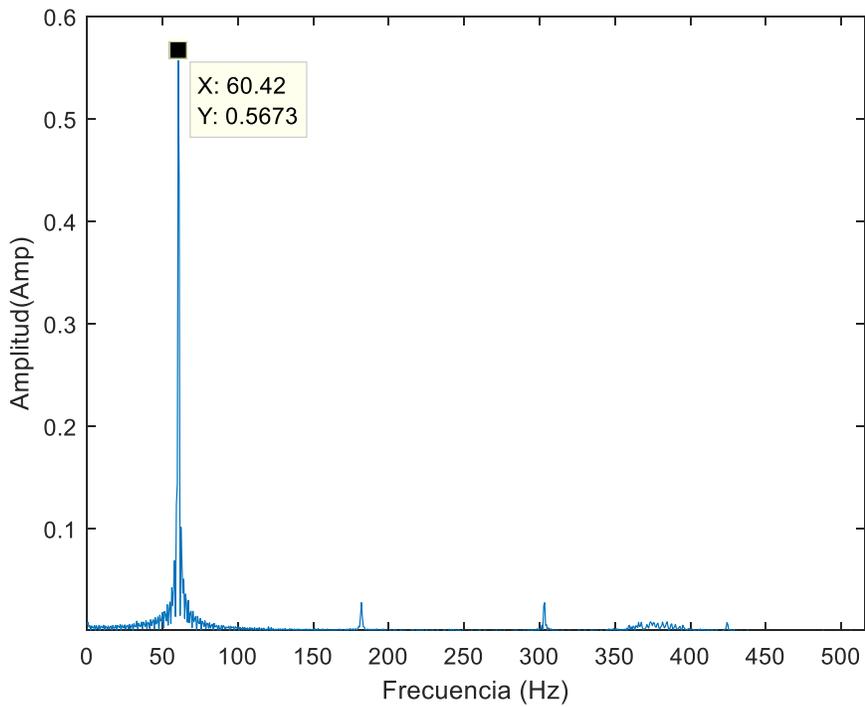


Figura 61 Transformada de Fourier de corriente de combinación. (Autoría propia).

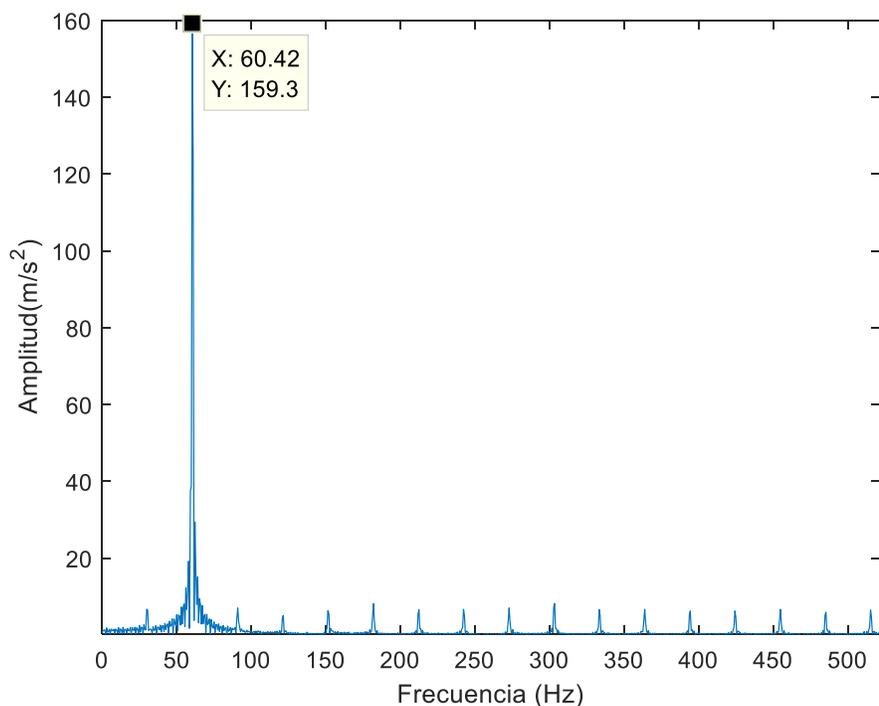


Figura 62 Transformada de Fourier de voltaje de combinación. (Autoría propia).

A continuación, se muestran los valores de la distorsión armónica total de corriente y voltaje en valor de porcentaje y donde se puede observar que de acuerdo a la norma IEEE-519 excede en voltaje y corriente los 8% permitidos en una red menor a 1000V.

Tabla 11 Valores de THD de corriente y voltaje de una combinación de cargas no lineales al conectarlas a la red eléctrica.

THI (%)	9.4983	11.3187	10.9681	9.4073	13.7704
THV (%)	17.7647	15.5052	15.0981	15.9375	14.9484

CONCLUSIONES

Después de analizar todo el procesamiento de las señales de corriente y voltaje de las diferentes cargas no lineales de baja potencia se llegaron a las siguientes conclusiones.

Los valores obtenidos por medio de la función de THD mostró que los niveles de distorsión armónica total (THD) están por encima de los marcados por la norma IEEE-519, ya que esta norma nos indica que los valores máximos permitidos en sistemas menores a 1000V no deben sobrepasar el 8%.

Se logró determinar que la mayoría de las cargas eléctricas de baja potencia que se utilizan a diario en los hogares introducen disturbios eléctricos en la red eléctrica residencial debido a que en su construcción incluyen algunos dispositivos electrónicos.

Como conclusión general se puede mencionar que todos los objetivos propuestos fueron cubiertos ya que el sistema diseñado y los sensores empleados fueron bastante sencillos de utilizar y el presupuesto utilizado fue mínimo, además, que no se tuvo que abrir la línea para poder realizar las pruebas.

Como prospectiva es de señalar que hay que ampliar el campo de estudio al análisis de transitorios de arranque de las mismas cargas eléctricas residenciales ya que solo se analizaron las partes estables. Además, de realizar las pruebas a diferentes horas para ver si las señales obtenidas se modifican ya que se observó desde el inicio que la red ya estaba contaminada.

REFERENCIAS

- Arteaga, D. J. (2021). Sistema de entrenamiento de realidad virtual para el monitoreo de indicadores de calidad de la energía en subestación eléctrica. *Tesis Maestría*. Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río.
- Clemente, M. J. (2013). Desarrollo e implementación de un analizdor de calidad de energía con base en FPGA para motores trifásicos. *Tesis Maestría*. Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario.
- Cristián Valenzuela V., R. V. (2010). Estudio de contaminación armónica en la Universidad del Bío-Bío. *Tesis*. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- FLUKE. (22 de 09 de 2021). *FLUKE*. Obtenido de <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435>
- Gutiérrez, J. L. (2017). Análisis de propagación y distorsión de armónicos en redes eléctricas de media tensión con cargas no lineales utilizando Matlab. *Tesis*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Harper, G. E. (2012). El ABC de la calidad de la energía eléctrica. México: Limusa.
- Heredia, J. C. (1997). Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador .
- Luis Morales Velázquez, R. d. (2017). Red de sensores inteligentes para el control de la calidad de la energía en instalaciones eléctricas. Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río.
- Mario Salvador Esparza González, J. A. (2006). Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones. *Nota de Divulgación*. Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Mora Barajas M.A., B. S. (2009). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Artículo*. Universidad de las Américas, Puebla.
- Ramírez, E. T. (2010). Distorsión armónica. *Programa de ahorro de energía*. Automatización, productividad y calidad S.A. de C.V., Puebla, Puebla.
- Reyes, V. F. (2013). Caracterización del efecto de distorsión armónica en instalaciones eléctricas residenciales monofásicas por cargas no lineales. *Tesis Maestría*. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.
- Torres, C. G. (2014). Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario.