

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN**  
**CURRICULAR, MODALIDAD PRESENCIAL**

**TEMA:**

**SIMULACIÓN DE TRANSFORMADOR EN ZIG-ZAG PARA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS GENERADOS POR LA ESTACIÓN DE SOLDADURA ELECTRÓNICA EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD.**

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**Línea de investigación:** Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

**AUTOR:**

Acero Caragolla Denis Alejandro

**DIRECTOR:**

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

Ibarra, julio 2024



## 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100462783-0		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Acero Caragolla Denis Alejandro		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Tungurahua y Del Pinzón 1-21		
<b>EMAIL:</b>	daaceroc@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0988513022

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	SIMULACIÓN DE TRANSFORMADOR EN ZIG-ZAG PARA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS GENERADOS POR LA ESTACIÓN DE SOLDADURA ELECTRÓNICA EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD.
<b>AUTOR (ES):</b>	Acero Caragolla Denis Alejandro
<b>FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA</b>	23/07/2024
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero(a) Eléctrico(a)
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Isabel Quinde MSc.

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 23 días del mes de julio de 2024

### EL AUTOR:

Acero Caragolla Denis Alejandro

C.I.: 100462783-0



## CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Isabel Marina Quinde Cuenca en calidad de director del señor estudiante Acero Caragolla Denis Alejandro certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "SIMULACIÓN DE TRANSFORMADOR EN ZIG-ZAG PARA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS GENERADOS POR LA ESTACIÓN DE SOLDADURA ELECTRÓNICA EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD".

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

  
.....  
Ing. Isabel Quinde MSc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mi Familia, mi hijo Neythan que con su cariño incondicional hace que todo sea posible, a Mishell que es mi acompañante de vida que con su apoyo, amor y confianza no me permite darme por vencido.

A mis padres que son mi pilar fundamental, que con su ardua labor me han sabido guiar, aconsejar y enseñarme que nunca debo darme por vencido pese a los obstáculos, que con dedicación y esfuerzo todo es posible, gracias por creer en mí.

Acero Caragolla Denis Alejandro.



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por tenerme con vida, salud.

A mi familia Neythan y Mishell que son el motor que me ayuda a seguir creciendo cada día y no darme por vencido.

A mis padres, quienes están a mi lado día a día, compartiendo su sabiduría y enseñándome a nunca rendirme y siempre salir a delante.

A mi tutora la MSc. Isabel Quinde, gracias por su paciencia, su virtud y constancia en el desarrollo este trabajo.

A los docentes de la carrera de Electricidad, por haber compartido sus experiencias y conocimientos a lo largo de mi preparación profesional, a ustedes queridos maestros les debo mis conocimientos.

A todos, siempre estaré agradecido en mi trayecto profesional.



**INDICE DE CONTENIDOS**

**INDICE DE CONTENIDOS ..... 6**

**RESUMEN ..... 13**

**ABSTRACT ..... 14**

**CAPITULO I**

**INTRODUCCIÓN ..... 15**

    El problema ..... 15

    1.1 Problema de investigación..... 15

        1.1.1 Formulación de la pregunta de investigación ..... 16

    1.2 Objetivos..... 17

        1.2.1 Objetivo General..... 17

        1.2.2 Objetivos Específicos ..... 17

    1.3 Alcance y delimitación ..... 18

    1.4 Justificación ..... 19

**CAPITULO II**

**MARCO TEÓRICO..... 20**

    2.1 Antecedentes..... 20

    2.2 Bases teóricas ..... 22

    2.3 Energía Eléctrica..... 22

        2.3.1 Calidad de la energía eléctrica ..... 23

        2.3.2 Aspectos importantes de la calidad de energía eléctrica..... 25

    2.4 Perturbadores de la calidad de la energía eléctrica..... 25

        2.4.1 Transitorios ..... 26

        2.4.2 Variaciones de voltaje de corta duración ..... 26

        2.4.3 Variaciones de voltaje de larga duración ..... 27

        2.4.4 Desbalance de voltaje ..... 27

        2.4.5 Deformación de onda ..... 27

        2.4.6 Fluctuaciones de voltaje..... 28

        2.4.7 Variaciones de frecuencia ..... 28

    2.5 Tipos de cargas en un sistema eléctrico ..... 29



2.5.1	Carga lineal .....	29
2.5.2	Carga no lineal .....	30
2.6	Armónicos .....	30
2.6.1	Causas producidas por los armónicos .....	31
2.6.2	Efectos producidos por los armónicos .....	32
2.7	Métodos de mitigación de los armónicos .....	32
2.7.1	Filtros pasivos .....	34
2.7.2	Filtros activos.....	34
2.7.3	Transformadores con arrollamientos en triangulo .....	34
2.7.4	Transformadores con distinto grupo de conexión.....	35
2.7.5	Inductancias de choque, aislamiento o amortiguamiento .....	35
2.7.6	Transformadores en Zig-Zag .....	36
 <b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>38</b>
3.1	Enfoque y tipo de investigación .....	38
3.2	Diseño de la investigación materiales, equipos y software .....	39
3.2.1	Estación de soldadura electrónica YAXUN V83.....	39
3.2.2	Analizador de red METREL Power Q4 Plus.....	40
3.2.3	PowerView v3.0.....	43
3.2.4	Matlab – Simulink .....	43
3.2.5	Cálculo de la función de transferencia para estación de soldadura electrónica.....	44
3.3	Transformador en ZIG – ZAG .....	47
3.3.1	Estructura y conexiones internas .....	48
3.4	Métodos, técnicas e instrumentos.....	50
3.5	Procedimiento y análisis de datos.....	52
 <b>CAPITULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>		<b>56</b>
4.1	Análisis de resultados obtenidos por el analizador de red.....	56
4.1.1	Voltaje.....	58



4.1.2	Corriente .....	60
4.1.3	Potencia.....	62
4.2	Diseño del transformador en Zig-Zag .....	63
4.3	Extrapolación de estación de soldadura electrónica.....	77
4.4	Simulación de transformador en Zig – Zag para mitigar los armónicos generados por estación de soldadura electrónica.....	83
4.4.1	Extrapolación de estación de soldadura electrónica sin transformador en Zig – Zag .....	84
4.4.2	Extrapolación de estación de soldadura electrónica con transformador en Zig – Zag .....	87
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>95</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>97</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....</b>		<b>98</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>107</b>



## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Espectro de armónicos en onda fundamental.....	31
Fig. 2 Estación de soldadura electrónica YAXUN V83.....	39
Fig. 3 Analizador de red Metrel Power Q4 Plus. ....	41
Fig. 4 Configuración de conexión del instrumento. ....	42
Fig. 5 Tipo de Sistema y la forma de la Salida del sistema para una entrada escalón unitario. ....	44
Fig. 6 Señal de sistema sub amortiguado vs señal de corriente del Sistema. ....	45
Fig. 7 Diagrama general del transformador Zig – Zag. ....	48
Fig. 8 Transformador de puesta a tierra en Zig – Zag a) devanados del núcleo, b) conexión del Sistema. ....	49
Fig. 9 Diagrama de procedimiento de TIC.....	53
Fig. 10 Conexión del analizador de red a fuente y carga. ....	57
Fig. 11 Conexión de analizador de red en el laboratorio de Electrónica de Potencia. ...	58
Fig. 12 Voltaje de estación de soldadura en funcionamiento.....	59
Fig. 13 Distorsión armónica en voltaje.....	59
Fig. 14 Corriente de carga instalada. ....	60
Fig. 15 Espectro de armónicos de corriente en %. ....	61
Fig. 16 Distorsión de onda de corriente debido a armónicos inyectados. ....	61
Fig. 17 Potencia aparente de carga conectada.....	63
Fig. 18 Elementos metálicos del transformador, Sn, b, h.....	65
Fig. 19 Parte de laminaciones para núcleos.....	66
Fig. 20 Dimensión del carrete para transformadores.....	68



Fig. 21 Configuración en Zig – Zag. ....	75
Fig. 22 Parámetros en transformador Zig - Zag. ....	76
Fig. 23 Elementos que conforman la función de transferencia para observar el consumo de la estación de soldadura. ....	78
Fig. 24 Visualización del consumo en [A] de la estación de soldadura .....	79
Fig. 25 Extrapolación de la estación de soldadura electrónica.....	79
Fig. 26 Consumo de tres estaciones de soldadura con ayuda el bloque "Add" .....	80
Fig. 27 Estación de soldadura en bloques de Simulink para generación de armónicos en sistema monofásico en AC. ....	81
Fig. 28 Espectro de armónicos en sistema monofásico. ....	81
Fig. 29 Extrapolación de estación de soldadura en un sistema monofásico.....	82
Fig. 30 Espectro de armónicos. ....	83
Fig. 31 Extrapolación de estación de soldadura en sistema trifásico AC.....	84
Fig. 32 Onda de voltaje en sistema trifásico con carga instalada .....	85
Fig. 33 Onda de corriente con presencia de armónicos generados por extrapolación de estación de soldadura.....	85
Fig. 34 Espectro de armónicos en las líneas L1, L2 y L3.....	86
Fig. 35 Extrapolación de estación de soldadura conectado al transformador en Zig – Zag. ....	88
Fig. 36 Onda de corriente después de hacer uso del transformador en Zig – Zag. ....	89
Fig. 37 Espectro de armónicos de corriente después de hacer uso del transformador en Zig – Zag. ....	90
Fig. 38 Implementación de Filtro Pasivo.....	91



Fig. 39 Onda de Corriente con Filtro Pasivo en transformador en Zig – Zag ..... 92

Fig. 40 Espectro de armónicos en L1, L2, L3 con uso de filtro pasivo después de utilizar el Transformador Zig – Zag ..... 93



**INDICE DE TABLAS**

**TABLA I** Métodos de mitigación de armónicos ..... 33

**TABLA II** Características técnicas de estación de soldadura YAXUN V83 ..... 40

**TABLA III** Número total de cantidades registradas en la norma EN 50160 ..... 42

**TABLA IV** Resumen General de la norma EN 50160 ..... 53

**TABLA V** Parámetros físicos de la estación de soldadura electrónica ..... 57

**TABLA VI** Mediciones de armónicos individuales de corriente ..... 62

**TABLA VII** Valor de rendimiento en relación de la potencia ..... 65

**TABLA VIII** Estándar de mediciones de Chapas ..... 67

**TABLA IX** Medidas de laminaciones en mm ..... 67

**TABLA X** Medida de carretes plásticos ..... 68

**TABLA XI** Estándar número de galga de cable requerido..... 70

**TABLA XII** Valores correspondientes a laminación N° 600..... 73

**TABLA XIII** Datos calculados para el diseño del Transformador..... 74



## RESUMEN

El presente estudio se centra en el desarrollo de la simulación de un transformador en Zig-Zag para mitigar armónicos generados por la estación de soldadura electrónica, cuyo objetivo es la mitigación de armónicos generados por la estación de soldadura en la red del laboratorio de electrónica de potencia. Para ello se describieron las causas y afectos de los armónicos y los métodos de mitigación. La obtención de datos se realizó mediante medición experimental entregados por el analizador de red, mientras que el diseño del transformador se basó en métodos matemáticos para obtener las ecuaciones que ayuden al diseño del transformador y así obtener los parámetros que se ingresan en el entorno de simulación de Simulink. Se empleó la extrapolación proporcional lineal para modelar la estación de soldadura y el método correlacional para comparar los resultados con y sin el transformador Zig-Zag. Las simulaciones mostraron que la extrapolación de la estación de soldadura aumenta el espectro de armónicos considerablemente. Sin embargo, el transformador en Zig – Zag mitigó de manera correcta las corrientes homopolares y redujo significativamente el THD [%] total como individual. Por lo tanto, es recomendable realizar simulaciones con cargas que se asemejen a la realidad a fin de establecer viabilidad en el entorno de simulación al hacer uso de cualquier método de mitigación.

**Palabras clave:** Armónicos, transformador Zig – Zag, mitigación, extrapolación, simulación, THD.



## ABSTRACT

This study focuses on the development of a Zig – Zag transformer simulation to mitigate harmonics generated by an electronic soldering station. The objective is the mitigation of harmonics produced by the soldering station in the power electronics laboratory network. The causes and effects of harmonics and various mitigation methods were described. Data acquisition was performed using experimental measurement delivered by the network analyzer, while the transformer design was based on mathematical methods to derive the equations and parameters necessary for the Simulink simulation environment. Proportional linear extrapolation was used to model the soldering station and the correlational method was used to compare the results with and without Zig – Zag transformer. Simulations showed that soldering station extrapolation significantly increases the harmonics spectrum. However, the Zig – Zag transformer effectively reduced zero sequence currents and significantly reduced the total an individual THD [%]. Therefore, it's recommended to perform simulations whit realistic loads to establish feasibility in the simulation environment when using any mitigation methods in the simulation environment.

**Keywords:** Harmonics, Zig – Zag Transformer, mitigation, extrapolation, simulation, THD.



## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

#### **Tema:**

Simulación de transformador en zig-zag para mitigación de armónicos generados por la estación de soldadura electrónica en el laboratorio de electrónica de potencia de la carrera de electricidad.

#### **El problema**

##### **1.1 Problema de investigación.**

Actualmente, la calidad de energía es un tema primordial en los sistemas eléctricos para el usuario y el proveedor del producto energético, pues como se observa un incremento de equipos electrónicos o cargas no lineales conectadas a la red, se debe determinar que exista una buena calidad en el servicio de energía. Siendo estos dispositivos los generadores de contaminantes eléctricos se tiene como ejemplo los motores, televisores, radios, lámparas fluorescentes y estaciones de soldadura electrónicas.

La existencia de los armónicos eléctricos al ser señales de frecuencia múltiplo entero se suman a la onda principal de voltaje o corriente, las corrientes armónicas no generan un trabajo útil dentro del sistema eléctrico, por lo tanto, esto se interpreta como pérdidas de potencia y energía, el efecto se traduce en un mal funcionamiento de aparatos que sirven para la sincronización de ciertos sistemas, apagones repentinos, calentamiento de los conductores y reduciendo la vida útil de algunos dispositivos electrónicos y



eléctricos, también causan un mal funcionamiento en equipos de comunicación debido a disturbios en las líneas de alimentación.

Tomando en cuenta cada uno de estos aspectos se plantea una forma de mitigar los armónicos una vez conocido cual es la carga no lineal que genera esta perturbación. La estación de soldadura electrónica está conformada por varios elementos no lineales, que producen un cambio de voltaje según sea requerido por el usuario, este cambio podría generar una distorsión armónica ya que el voltaje y corriente es diferente al voltaje nominal y por ende afecta a la onda sinusoidal, produciendo cambios en la red que afectan a aparatos electrónicos y eléctricos.

### ***1.1.1 Formulación de la pregunta de investigación***

¿Cómo diseñar el transformador que disminuya los efectos de los armónicos en el laboratorio de electrónica de potencia provocados por la estación de soldadura electrónica?



## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 *Objetivo General*

Simular un transformador en ZIG-ZAG para la mitigación de armónicos generados a la red del laboratorio de electrónica de potencia por la estación de soldadura electrónica, mediante el análisis de métodos de mitigación y elaboración del diseño en Simulink de Matlab.

### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Describir causas y efectos principales que producen los armónicos y los métodos de mitigación.
- Diseñar el transformador para la mitigación de armónicos generados por la estación de soldadura electrónica.
- Simular el transformador en Zig-Zag que mitigue los armónicos generados por la estación de soldadura electrónica.



### 1.3 Alcance y delimitación

El presente trabajo de titulación plantea simular un prototipo de transformador en Zig-Zag que mitigue la contaminación eléctrica generada por la estación de soldadura electrónica del laboratorio de electrónica de potencia y reducir los efectos que producen los armónicos eléctricos en una red eléctrica, respondiendo a varias interrogantes que son producidas en la elaboración del presente trabajo, ¿Cómo se producen los armónicos?, ¿Qué ocasionan los armónicos en una red eléctrica?, ¿Qué métodos de mitigación existen y cuál es el más apto al caso?, para responder estas interrogantes y las que se presenten en el futuro se realizará una investigación bibliográfica de libros, artículos científicos, revistas, tesis y otros documentos que ayuden con la información necesaria para la realización de este proyecto.

Para obtener datos se usará un analizador de red para verificar la existencia de esos contaminantes, para lo que se tomarán mediciones de la red eléctrica del laboratorio sin que la estación de soldadura electrónica este funcional y otras mediciones cuando esta entre en funcionamiento. Es así que se determinará los posibles contaminantes que podrían ser ruido, huecos de tensión, sobre tensión transitoria y presencia de armónicos.

Una vez analizadas las mediciones se simularán los efectos que producen en la red cuando 3 estaciones de soldadura electrónica estén en uso. Posteriormente se procederá al diseño del transformador en Zig-Zag para mitigar los efectos causados por la contaminación; para la validación del diseño se procederá a realizar la simulación en Simulink de Matlab y así observar si el transformador en Zig-Zag cumple con el objetivo propuesto.



#### 1.4 Justificación

En la actualidad la calidad de energía es un tema primordial en los sistemas eléctricos, esto es principalmente a que existe un gran incremento de cargas no lineales conectadas a la red y el problema que presentan como distorsión en formas de onda de voltajes y corrientes, para determinar si existe una buena calidad en el servicio de energía, se debe conocer con exactitud la magnitud y tipos de armónicos que se encuentran presentes en la red [1].

Con el tiempo este tipo de cargas no lineales van a predominar y por tal motivo se buscan distintas soluciones para la mitigación de contaminación ya que se convierte en un tema relevante, se deben tomar medidas que garanticen la operación en equipos y a la red, pues es necesario garantizar un nivel satisfactorio en el servicio de energía eléctrica dispuesto por la Regulación ARCERNNR- 002/20 [2].

En la estación de soldadura electrónica, utilizada en la misma red eléctrica con varios equipos del laboratorio de electrónica de potencia, se encontraron perturbaciones que generan contaminantes dentro de la red, los principales contaminantes eléctricos encontrados son ruido, huecos de tensión, sobre tensión transitoria y armónicos que producen perturbaciones que causan fallos a los equipos utilizados en la misma red, por lo que es la importancia de verificar la contaminación y mitigar armónicos generados por la estación de soldadura electrónica para conservar un equilibrio en estándares establecidos [3].



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las características de la energía eléctrica, una información fundamental para elaborar el trabajo de integración curricular (TIC), donde se indica una descripción general de tipos de cargas, armónicos, efectos y causas que pueden producirse en un sistema eléctrico y diferentes métodos de mitigación que favorezcan la calidad de energía dentro de una red eléctrica.

#### 2.1 Antecedentes

La calidad del servicio eléctrico es un tema preocupante para empresas y usuarios, debido a las perturbaciones eléctricas que alteran en el funcionamiento de equipos electrónicos instalados, un mal funcionamiento de equipos debido a un amplio espectro de contaminantes y perturbaciones que alteran a la calidad de red y equipos conectados en el mismo sistema eléctrico [4].

Reducir las oscilaciones de potencia reactiva en un sistema eléctrico es esencial para mantener la estabilidad, eficiencia y confiabilidad ya que la calidad de energía describe diversos fenómenos electromagnéticos que distinguen la corriente y el voltaje, este tópico es de vital importancia para las agencias reguladoras de energía eléctrica y grandes consumidores tanto a nivel industrial, comercial y residencial, también a fabricantes de distintos equipos eléctricos y electrónicos por lo que las regulaciones existentes exigen a los proveedores establecer tolerancias de percepción a corto plazo y valores referenciales de forma de onda [5].



La presencia de armónicos en las redes es cada vez mayor, causando una serie de problemas en la calidad de onda de tensión, haciendo necesario de un sobre dimensionamiento de las instalaciones y ocasionando pérdidas significativas, resulta conveniente el filtrado de dichos armónicos ya que permite la optimización de las secciones de cable, potencia de transformadores de distribución y reducir las pérdidas en las instalaciones [6].

En las redes eléctricas actuales, la distorsión armónica constituye a uno de los aspectos permanentes más críticos en el ámbito de la calidad de la energía, también denominado contaminación armónica, la distorsión armónica consiste en que las ondas de forma de onda ideal son contaminadas debido a la circulación de corrientes distorsionadas consumidas por cargas no lineales o inyectadas por fuentes de generación distribuida no lineales [7].

La distorsión de la onda afecta al rendimiento de los transformadores ya que el núcleo se encuentra mayormente saturado, además de aumentar perdidas en los bobinados por efecto Joule, el incremento de armónicos causa interferencias en señales de comunicación, sobretensiones, calentamiento en equipos, sobre carga en los conductores y calefacciones en diferentes componentes que conforman un sistema eléctrico [8].

Los armónicos afectan a los equipos de consumo, ya que afecta a la onda sinusoidal pura, afecta a el funcionamiento de aparatos eléctricos, por ello aparatos cuyo funcionamiento sea considerado crítico, debe estar previsto de fuentes acondicionadas que eviten o mitiguen el contenido armónico a una tasa que sean lo suficientemente tolerables [9].



En el estándar IEEE 519 – 2014 tiene establecido metas de diseño de sistemas eléctricos, estas metas incluyen cargas lineales y no lineales, también se describen las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir sin causar mayor daño a dicho sistema, como también los límites de distorsión de la forma de la onda del sistema [10].

Existen diversas maneras de contrarrestar problemas generados por los armónicos para la mejora de la calidad del servicio eléctrico, varias técnicas que caben mencionar son el uso de transformadores de conexión delta, transformadores con distintos grupos de conexión, transformadores en Zig-Zag, inductancia de choque y filtros [11].

## 2.2 Bases teóricas

En esta sección del TIC se presenta los conceptos fundamentales y principios teóricos que sustentan el desarrollo de este.

## 2.3 Energía Eléctrica

La energía eléctrica al ser indispensable y ampliamente utilizada se ha convertido en una necesidad básica y una de las formas de energía de mayor uso para sectores como la industria, los hogares, el comercio y el transporte. Por lo tanto, es fundamental garantizar que este servicio sea de buena calidad para todos los usuarios [12].

A diferencia de recursos como el gas, petróleo y el agua, el almacenamiento de energía eléctrica en grandes cantidades no es viable debido a su alto costo. Solo se puede almacenar en pequeñas cantidades mediante baterías. Por lo tanto, es crucial que los sistemas de generación, transporte y distribución ajusten continuamente la producción de energía a la demanda requerida, manteniendo valores específicos de tensión y frecuencia [12].



Los principios clave para el uso racional de la energía eléctrica se centra en generar y transportar solo la energía útil (activa). Es importante considerar que más del 50% de la energía consumida para por convertidores electrónicos, como los AC-DC, DC-DC o AC-AC. Estos dispositivos ajustan la tensión, frecuencia y otros parámetros, pero a menudo causan distorsiones y perturbaciones en los sistemas de transporte y distribución [13].

Estas perturbaciones ocasionan una pérdida de rendimiento en la mayor parte de cargas, un deterioro en la calidad de la onda de tensión y la posibilidad de fallo en algunos equipos electrónicos debido a las componentes de alta frecuencia también conocidas como “parásitos” [13].

La calidad de la energía eléctrica, que carece de una definición exacta, incluye tanto la disponibilidad constante del suministro como las características de las ondas de voltajes y corrientes. En este contexto, cualquier distorsión o desviación en la forma de estas ondas es interpretada como un decremento en la calidad del suministro eléctrico [11].

### ***2.3.1 Calidad de la energía eléctrica***

Al no existir un consenso sobre la definición exacta de lo que se refiere a calidad de la energía eléctrica, los estándares internacionales son los que, en gran medida guían la comprensión de dicho termino [14].

- El estándar IEC 61000-4-30 define el término “Calidad de Energía Eléctrica” como las características de la electricidad en un punto dado de



la red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia [14].

- El estándar IEEE 1159/1995 define el término “Calidad de Energía Eléctrica” como la gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica [14].

La energía es un componente fundamental de las estrategias de desarrollo económico y social, lo importante es que se otorgue. Las fuentes de energía son elaboraciones naturales que el hombre ha extraído para realizar un determinado trabajo u obtener alguna utilidad [15].

Para minimizar los problemas de calidad de la energía se busca que la potencia entregada sea constante, se mantenga dentro de los ámbitos de voltaje y frecuencia y posea una onda senoidal libre de contenido armónico [16].

Las características físicas de la calidad de energía eléctrica son las siguientes:

- La amplitud: El nivel de tensión del servicio sea estable entorno a márgenes tolerables [14].
- La frecuencia: se mantenga estable en entorno a unos márgenes respecto a la frecuencia del sistema 60 Hz [14].
- La forma de la señal: que la forma de la onda sinusoidal sea lo más limpia posible, que no se encuentre deformada por algún contaminante que produzca algún tipo de perturbación [14].



- El balance de las fases: que el sistema eléctrico se encuentre equilibrado y, por tanto, que no se encuentre desequilibrado ni por amplitud ni por desfase [14].

### 2.3.2 Aspectos importantes de la calidad de energía eléctrica

La calidad de energía eléctrica abarca aspectos de gran importancia se propone en la siguiente terminología como son:

- Calidad de tensión: Se relaciona con las desviaciones de la tensión respecto a la ideal, la tensión ideal en un sistema trifásico consiste en tres sinusoides equilibradas de secuencia positiva con magnitud y frecuencia constante, también puede ser entendido como la calidad del producto ofrecido por la compañía hacia los consumidores [17].
- Calidad de potencia: combinación entre la calidad de tensión y corriente, por lo que la calidad de potencia se relaciona con las desviaciones de tensión y/o corriente respecto a las de la situación ideal [18].
- Calidad del servicio comercial: Este está basado en la atención al usuario, que tan bueno o malo puede llegar a ser el servicio a un cliente, la precisión de la medida de energía consumida para la impresión de la planilla, trato al cliente [17].

### 2.4 Perturbadores de la calidad de la energía eléctrica

Según el estándar IEEE 1159-2009 [19], las perturbaciones se pueden clasificar según su duración, amplitud, espectro armónico de los fenómenos electromagnéticos, y se clasifican de la siguiente manera:



### 2.4.1 Transitorios

Son conocidos como los cambios bruscos que tiene una señal, duran menor de medio ciclo y se dan en señales de voltaje y corriente.

- **Impulsivo:** Es un incremento en el nivel de tensión que dura microsegundos, se debe principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y maniobras de gran carga (caída directa de un rayo en una estructura) [19].
- **Oscilatorio:** Son cambios bruscos de gran magnitud en la señal de voltaje o corriente con cambio de polaridad. Ejemplo: Conexión de un banco de compensación reactiva [19].

### 2.4.2 Variaciones de voltaje de corta duración

Las variaciones de voltaje son causadas por fallas en las líneas, elevadas corrientes, energización de grandes cargas o fallas en la conexión del sistema [19].

- **Interrupciones:** Es una desaparición o disminución de la amplitud o valor RMS del voltaje del más del 90% con una duración entre medio ciclo y un minuto, no presenta cambios en la frecuencia [19].
- **Huecos de tensión (SAGS):** Son descensos de la tensión entre un 90% y un 10% de su valor nominal, los huecos de tensión son usualmente asociados a cortocircuitos en las líneas, a la energización de grandes cargas, o al arranque de grandes motores [19].



- **Sobretensión momentánea (SWELL):** se trata de elevaciones de tensión entre un 110% y un 180% de su valor nominal con una duración que abarca desde medio ciclo hasta un minuto [19].

### 2.4.3 *Variaciones de voltaje de larga duración*

Dentro de las variaciones de voltaje de larga duración se tienen 3 tipos que se describen a continuación:

- **Sobretensiones:** Consiste en elevaciones de la tensión más allá del 110% de su valor nominal durante más de un minuto [19].
- **Subtensiones:** Son disminuciones de la tensión más allá del 90% de la tensión nominal durante más de un minuto [19].
- **Interrupciones mantenidas:** son cortes absolutos de la alimentación durante periodos superiores a un minuto [19].

### 2.4.4 *Desbalance de voltaje*

Se da cuando existe variación en la amplitud en la onda de voltaje trifásico o de igual manera no existe desplazamiento de  $120^\circ$  eléctricos entre las ondas [11].

### 2.4.5 *Deformación de onda*

Se da cuando las formas de onda de tensión o corriente difieren de la puramente sinusoidal.

- **Armónicos:** Son señales de voltaje o corriente de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental que se suma a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola [20].



- Inter armónicos: Son señales de voltaje o corriente de frecuencia múltiplo no entero de la fundamental que se suman a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola. Estas no generan un trabajo útil por lo que se traduce como pérdidas de potencia y energía [11].
- Componentes DC: Desplazamiento en el eje de las ordenadas sinusoidales, por lo general es decreciente.
- Ruido: es una señal de voltaje de muy alta frecuencia y de pequeña magnitud que se monta sobre la onda fundamental para distorsionar su forma [11].
- Notch: también conocido como muescas o huecos de voltaje, es un calado o protuberancia en la onda de voltaje de pequeña magnitud y duración menor a medio ciclo [11].

#### ***2.4.6 Fluctuaciones de voltaje***

Para Mahay [21], las fluctuaciones de voltaje hacen referencia a “cambios cíclicos de lo envolvente de voltaje que ocasionan una variación en la amplitud de voltaje, que presentan un porcentaje de 10%, la variación de voltaje es un fenómeno de larga duración”.

#### ***2.4.7 Variaciones de frecuencia***

La variación de frecuencia hace referencia a cualquier desequilibrio significativo en el proceso de conexión entre la carga y un generador específico. Esta frecuencia se mantiene dentro del sistema eléctrico por un número determinado de giros del generador de la central, estableciendo normalmente en una frecuencia nominal de 60 Hz [22].



## 2.5 Tipos de cargas en un sistema eléctrico

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia, hay muchas cargas, que pueden clasificarse de distintas maneras según la persona que analice.

Se suelen tener 3 tipos de cargas.

**Convertidores estáticos:** Son los que poseen dentro de ellos electrónica de potencia, controladores de velocidad, UPS, inversores, fuentes de poder de equipos eléctricos y hornos de inducción [23].

**Equipos ferromagnéticos:** Dentro de los mismos se encuentran motores, equipos magnéticos y transformadores, usualmente la contaminación que es ocasionada por los transformadores se debe al grupo de estos, ya que de manera individual no producen una distorsión mayor al 1%, pero al analizarlos en grupo debido a la excesiva presencia dentro de nuestro sistema eléctricos, se tiene una gran contaminación [23].

**Equipos de arco:** Dentro de este tipo de cargas, se tienen los hornos de arco, soldadoras y alumbrado de carácter fluorescente [11].

### 2.5.1 Carga lineal

Las cargas lineales no transmiten problemas a la red en estado de operación normal y no se ven afectadas por el voltaje aplicado ni por la corriente que circula a través de ellas. La relación entre corriente y voltaje es lineal y proporcional. Esto significa que si el voltaje aumenta la corriente también aumenta de manera directamente proporcional y viceversa. Un claro ejemplo de dispositivos lineales son las resistencias, inductancias y capacitancias [24].



### 2.5.2 Carga no lineal

A diferencia de las cargas lineales, una carga no lineal cambia su impedancia según la tensión instantánea aplicada, por lo que da lugar a una corriente absorbida no sinusoidal cuando el voltaje aplicado también lo es. Lo que quiere decir que este tipo de carga no tiene una relación constante entre corriente y voltaje [24].

Las cargas no lineales son alimentadas por tensiones sinusoidales a través de corriente distorsionadas, las cargas no lineales al estar compuestas por componentes electrónicos (diodos, transistores, tiristores, IGBT, etc.) en sus etapas de entrada [25].

Dentro de las cargas no lineales se pueden incluir los equipos de control de velocidad de motores, lámparas fluorescentes, ordenadores, elementos de calefacción con control de temperatura, estaciones de soldadura [26].

### 2.6 Armónicos

Los armónicos eléctricos son definidos como ondas distorsionadas en corriente y voltaje que están constituidas por ondas cuya frecuencia son múltiplos enteros de la fundamental del sistema eléctrico y cuya amplitud es indirectamente proporcional al múltiplo entero de la frecuencia fundamental, la presencia de estos armónicos afecta la forma sinusoidal de la onda ya que ante una mayor presencia de armónicos en el sistema la onda va perdiendo su forma [27].

Los armónicos son los elementos equivalentes en una corriente eléctrica usual descompuesta por series de Fourier. Su frecuencia fundamental (50 o 60 Hz en las redes eléctricas). Los armónicos poseen una frecuencia multiplicativa por (2, 3, 4, 5, ..., n) el dígito “n” hace acuerdo al nivel de componente armónica en la red eléctrica [25].



El Total Harmonic Distortion o por sus siglas THD, es el valor que se utiliza para describir las características de la forma de la onda sinusoidal, es una medida de valor efectivo de las componentes armónicas de una forma de onda distorsionada [28].

En la Figura 1 se aprecia que cualquier forma de onda periódica y distorsionada se puede expresar como una suma de las ondas sinusoidales. La salida de cada frecuencia se combina con la fundamental para obtener una onda de salida distorsionada [28].

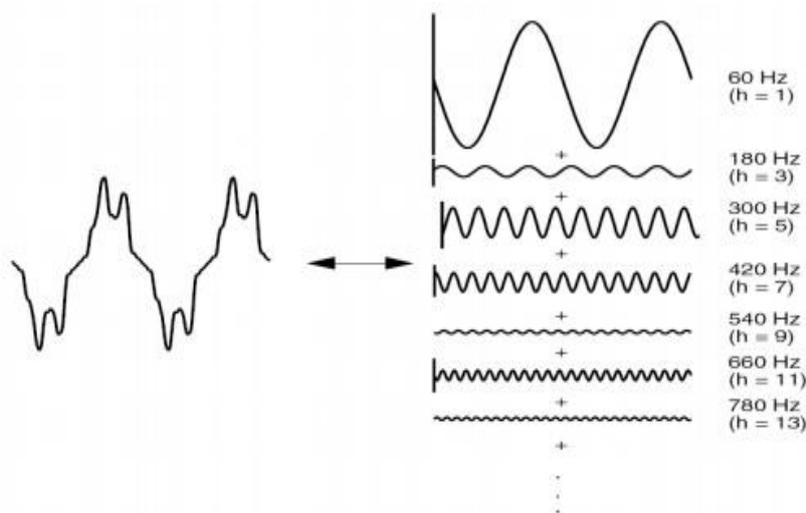


Fig. 1 Espectro de armónicos en onda fundamental. [28]

La distorsión de voltaje es el resultado de corrientes distorsionadas a través de la impedancia lineal del suministro, la cantidad de distorsión en el voltaje depende de la impedancia y la corriente. Mientras que los armónicos de corriente causan la distorsión en el voltaje [28].

### 2.6.1 Causas producidas por los armónicos

Los armónicos se producen por cargas no lineales, que, aunque alimentadas con voltaje senoidal, absorben una intensidad no senoidal. Para simplificar considere que las



cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las de los receptores alimentados por dispositivos que contienen electrónica de potencia, como variadores de velocidad, convertidores, estaciones de soldadura [26].

### 2.6.2 *Efectos producidos por los armónicos*

Los efectos nocivos producidos por el flujo de armónicos son cada día más significativos en los sistemas eléctricos, dependiendo de la intensidad relativa de la fuente emisoras y se resume en:

- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control [26].
- Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición, interferencias en sistemas de comunicación y telemando [26].
- Sobre calentamiento en los equipos eléctricos (motores con variador de velocidad, transformadores, generadores) lo que puede afectar su rendimiento y causar desgaste mecánico [1].

### 2.7 Métodos de mitigación de los armónicos

Para mitigar los contaminantes eléctricos presentes en una red eléctrica, se pueden implementar soluciones mediante la conexión de dispositivos electrónicos, el uso de circuitos, filtros y la conexión de transformadores para evitar distorsiones armónicas. Entre los métodos de mitigación se pueden destacar tres tipos de soluciones como se muestra en la Tabla I.



**TABLA I**  
Métodos de mitigación de armónicos

<b>Soluciones de carácter preventivo</b>	<b>Soluciones de carácter correctivo</b>	<b>Otras soluciones</b>
Aplicación de técnicas de cancelación de fase.	Filtros para desviar armónicos de corrientes fuera del sistema.	Utilización de transformadores de factor k especialmente diseñados para tolerar armónicos.
Control de armónicos en convertidores.	Filtros para bloquear corrientes que ingresan al sistema. Reconfiguración de circuitos alimentadores. Reubicación de banco de capacitores.	Aumento de la sección del neutro.

Nota: En la tabla se presenta las diversas técnicas y enfoques que se pueden optar para la mitigación de armónicos [11].

En general, existe gran variedad para la mitigación de armónicos, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones específicas. Los métodos más conocidos son:

- Filtros activos
- Filtros pasivos
- Transformadores con arrollamientos en triángulo
- Transformadores con distinto grupo de conexión
- Transformadores en Zig-Zag
- Inductancias de choque o aislamiento
- Conversores con mayor cantidad de pulsos
- Aumento del calibre del neutro



### 2.7.1 *Filtros pasivos*

Se denominan filtros pasivos porque están hechos de resistencias, condensadores, bobinas e incluso transformadores. No necesitan de energía externa para funcionar ya que esto es una característica clave de estos filtros. También se diseñan para un tipo específico de armónico utilizando las propiedades físicas de sus componentes RLC, refiriéndose a resistencias, inductores y capacitores [29].

### 2.7.2 *Filtros activos*

Los filtros activos de armónicos son dispositivos electrónicos de potencia diseñados para eliminar o disminuir la contaminación armónica de corriente en una instalación [20].

Su funcionamiento se basa en detectar los armónicos de corriente y producir en tiempo real, corrientes idénticas, pero de fase opuesta. Esto lo que produce, es que al combinarse las corrientes resultantes en la instalación contengan principalmente la frecuencia fundamental [20].

Estos filtros están compuestos por elementos pasivos y transistores controlados, los cuales son capaces de eliminar prácticamente todos los armónicos de baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos que es el incremento de corriente [3].

### 2.7.3 *Transformadores con arrollamientos en triángulo*

Este método encierra los armónicos triples en el bobinado delta del transformador, evitando que fluyan hacia la red. Mitigar los armónicos triples es crucial, ya que pueden causar efectos perjudiciales como:



- Sobrecalentamiento del neutro
- Sobrecalentamiento de los devanados del transformador
- Daño de máquinas rotativas

Sin embargo, los transformadores con arrollamiento en triángulo (delta) tiene desventajas comparado con otros, ya que solo protege a la línea y no los transformadores, máquinas y otros elementos del sistema eléctrico [11].

#### ***2.7.4 Transformadores con distinto grupo de conexión***

Los transformadores con distintos grupos de conexión se utilizan en grandes industrias donde hay cargas idénticas conectadas a diferentes transformadores. Esta metodología protege a la línea al evitar que los armónicos fluyan hacia ella, pero no ofrece protección para los transformadores; esto significa que los transformadores aún pueden sufrir sobrecalentamientos, reducción de eficiencia y posibles daños a largo plazo debido a los armónicos generados por las cargas conectadas [11].

#### ***2.7.5 Inductancias de choque, aislamiento o amortiguamiento***

El método de inductancias de choque aprovecha la propiedad de las inductancias de resistir los cambios de dirección de la corriente al almacenar un campo magnético. Esta característica es útil para manejar variaciones bruscas de corriente, ofreciendo protección a la línea y la carga. Todo el proceso se basa en el campo magnético generada por las inductancias de choque [11].



### 2.7.6 Transformadores en Zig-Zag

Este método se basa en dejar encerrados los armónicos en el transformador, eso se logra con la baja impedancia que tiene el mismo, evitando que la acometida y el transformador se contaminen [11].

- Presenta baja impedancia para secuencia cero.
- Presenta alta impedancia para secuencia positiva y para secuencia negativa.
- Brinda protección al transformador principal y a la red
- Deriva la corriente de secuencia cero al transformador Zig-Zag.
- Es una trampa de armónicos triples

Este transformador es un equipo de potencia que es fabricado con propósitos especiales, teniendo en cuenta que la salida se tendrá una suma vectorial de dos fases desplazadas 120 grados. Su uso más común es para reducir flujos homopolares de armónicos triples [30].

Las ventajas que se presentan es que mediante el transformador Zig-Zag no se producen desequilibrios en el primario cuando aparecen cargas desequilibradas en el secundario, permite obtener una conexión de neutro al igual que la conexión estrella, siendo importante para aplicaciones en redes de distribución [31].

En este capítulo se recopiló la información necesaria sobre aspectos de la calidad de energía, perturbadores que se encuentran dentro de la red eléctrica, tipos de cargas en un sistema eléctrico como cargas lineales, cargas no lineales y que tipo de perturbación pueden presentar cada una de estas cargas.



Las causas y efectos que pueden presentar los armónicos y cuáles son los métodos de mitigar dicho contaminante, dando mención al transformador en zigzag, ya que este es el método a utilizar en el TIC.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo, se detalla la descripción técnica de materiales y métodos empleados para realizar el análisis de armónicos en el laboratorio de electrónica de potencia y el diseño del transformador en Zig – Zag. Además, se describe la metodología aplicada en el desarrollo del trabajo de integración curricular, incluyendo la explicación de las herramientas computacionales especializadas utilizadas, la información técnica de los equipos eléctricos y las ecuaciones matemáticas que permitieron determinar los parámetros del transformador y la extrapolación de los parámetros de las estaciones de soldadura electrónica.

#### 3.1 Enfoque y tipo de investigación

Para el trabajo de integración curricular se consideró un enfoque cuantitativo, centrado en la recolección de datos obtenidos del laboratorio de electrónica de potencia para hacer pruebas de mitigación de armónicos y obtener conclusiones objetivas. El enfoque cuantitativo es adecuado para la investigación porque permite medir con los parámetros eléctricos, analizar relaciones entre variables y generalizar resultados a partir de datos significativos.

Este proyecto se desarrolló mediante una investigación de campo, que permite obtener datos directos del lugar donde se presenta el problema. Además, se emplea una investigación descriptiva para encontrar datos fundamentales que faciliten la reducción de las fluctuaciones de onda producto de la utilización de la estación de soldadura electrónica. Finalmente, se aplica una investigación analítica, que permite obtener datos



relacionados con el problema después de una búsqueda de variables en torno a un estudio, explorando la factibilidad de la simulación en Simulink para la mitigación de armónicos con el transformador en Zig – Zag.

### 3.2 Diseño de la investigación materiales, equipos y software

Luego se detallan los equipos y herramientas computacionales utilizados para medir el contaminante eléctrico y el procesamiento de datos obtenidos de la red eléctrica del laboratorio de Electrónica de Potencia.

#### 3.2.1 Estación de soldadura electrónica YAXUN V83

Con la estación de soldadura electrónica se pueden realizar diversos tipos de trabajos electrónicos y en distintas aplicaciones de reparación o instalación de placas madre, estaño con cables o algún componente de electrónico de múltiples pines de conexión.

En la Figura 2 se muestra la estación de soldadura electrónica.



Fig. 2 Estación de soldadura electrónica YAXUN V83. [32]



La utilidad de la estación de soldadura en los laboratorios es importante en el desarrollo de los estudiantes, en cuanto a actividades de electrónica analógica, electrónica de potencia, usos múltiples en la elaboración de proyectos académicos dirigidos en la carrera. En la Tabla II se muestra las características de las que se compone la estación de soldadura.

**TABLA II**

Características técnicas de estación de soldadura YAXUN V83

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<b>Voltaje</b>	110/240 V
<b>Potencia</b>	350 W
<b>Tipo de aire</b>	Bomba de aire
<b>Flujo de aire</b>	150 ml/min
<b>Temperatura Cautín</b>	200°C – 480°C
<b>Temperatura de la pistola de aire</b>	100°C – 500°C
<b>Regulación de la temperatura</b>	Ajuste manual
<b>USB</b>	5V – 1A
<b>Ruido</b>	< 45 Db

### 3.2.2 *Analizador de red METREL Power Q4 Plus*

De acuerdo con el manual de usuario [33], es un instrumento multifuncional portátil para el análisis de la calidad de energía y mediciones de eficiencia energética, en la Figura 3 se observa el analizador de red.



Fig. 3 Analizador de red Metrel Power Q4 Plus. [33]

Las principales características del instrumento es que tiene cuatro canales de voltaje y cuatro de corriente, con reconocimiento automático de pinzas y selección de escala. Mide voltajes de 0 hasta 1000 Vrms y cumple con las normas IEC 6100-4-30 clase S y EN 50160. Con un registrador de 8MB y 524 firmas de calidad de energía, puede medir interarmónicos, armónicos, señalización de la red, flicker, diagrama de fases, temperatura, sobretensiones transitorias y corrientes de arranque. Poseen 8 canales de 16 bit para mediciones precisas y una autonomía de hasta 15 horas [33].

Las Normas de seguridad del instrumento indican que es fundamental utilizar y manipular el instrumento conforme a las especificaciones del fabricante. En caso de deterioro se debe evitar su uso para prevenir riesgos físicos y lecturas erróneas de datos. La calibración y mantenimiento del instrumento deben ser realizados por personal autorizado por el distribuidor del producto. Si la temperatura supera los 40°C, no se debe manipular la tapa de las pilas durante la carga. Los parámetros de tensión máxima, independientemente de la fase con el ingreso del neutro son de 1000Vrms [33].



Al realizar la configuración de conexión en el analizador de red existen diferentes métodos dentro de la interfaz en configuración de la conexión del instrumento a sistemas multifásicos como se muestra en la Figura 4 [33].

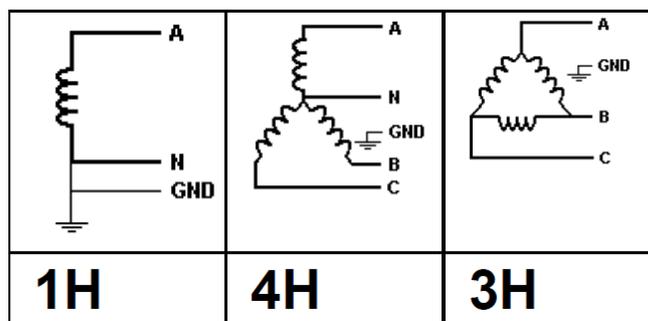


Fig. 4 Configuración de conexión del instrumento. [33]

Para cada método de conexión existe diferentes referencias 1H que significa sistema monofásico de dos hilos, 3H es un sistema trifásico de tres hilos y por último 4H que es para un sistema trifásico de 4 hilos [33].

El número de cantidades registradas por el analizador de red y visualizadas por el software se muestran en la Tabla III:

**TABLA III**  
Número total de cantidades registradas en la norma EN 50160

	<b>1H</b>	<b>3H</b>	<b>4H</b>
<b>Potencia y energía</b>	16 cantidades 64 valores por intervalo	12 cantidades 48 valores por intervalo	60 cantidades 240 valores por intervalo
<b>Flicker</b>	3 cantidades 12 valores por intervalo	9 cantidades 36 valores por intervalo	9 cantidades 36 valores por intervalo
<b>Armónicos</b>	202 cantidades 800	303 cantidades 1212 valores por intervalo	416 cantidades 1628 valores por intervalo



<b>Interarmónicos</b>	202 cantidades 800	303 cantidades 1212 valores por intervalo	416 cantidades 1628 valores por intervalo
-----------------------	-----------------------	---	---

Nota: Cantidades de armónicos registrados por el analizador de red para ser exportados y graficados [33].

### 3.2.3 PowerView v3.0

Es una herramienta de acompañamiento que permite la descarga de los datos obtenido del instrumento y permite el análisis rápido, intuitivo y descriptivo [33].

Sus principales características son:

- Incluye una interfaz sencilla pero potente para descargar los datos del instrumento.
- Se puede organizar los datos registrado y organizarlos en múltiples emplazamientos con muchos subemplazamientos o lugares.
- Genera cuadros, tablas, graficas para el análisis de datos de calidad de energía.
- Permite la exportación de datos para trabajar desde otras aplicaciones [33].

### 3.2.4 Matlab – Simulink

Matlab es un lenguaje de programación donde permite la creación de algoritmos y modelos complejos, en su caja de herramientas se encuentra Simulink que tiene un gran número de funciones especiales que ayudan al desarrollo de diversas simulaciones de sistemas lineales y no lineales [34].

Simulink proporciona un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables para modelar y simular sistemas dinámicos. Al estar integrado con Matlab permite



incorporar algoritmos que pueden ser exportados de los resultados de simulación en Matlab para seguir analizándolos. Por eso el uso de este software es fundamental para el trabajo de grado, ya que se enfoca en los sistemas no lineales y se atenúa [34].

### 3.2.5 Cálculo de la función de transferencia para estación de soldadura electrónica

Dentro del proceso se realizó la simulación de la función de transferencia de la estación de soldadura en Simulink, este proceso ayuda a la extrapolación de las estaciones de soldadura para conocer el consumo de cada una de las estaciones. La Figura 5 muestra los tipos de sistemas y la forma de salida del sistema para una entrada de escalón unitario [35].

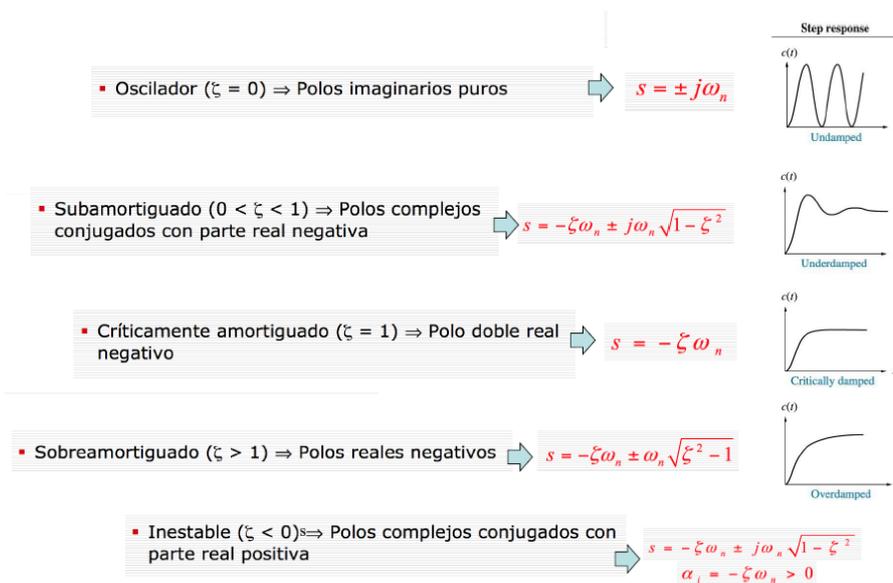


Fig. 5 Tipo de Sistema y la forma de la Salida del sistema para una entrada escalón unitario. [35]

Un sistema de segundo orden sub-amortiguado es aquel cuyo coeficiente de amortiguamiento tiene valores entre cero y uno, una de las características importante es



que tiene dos polos conjugados, esto quiere decir que son raíces de la ecuación característica del sistema y determinan el comportamiento dinámico del mismo [35].

De estudios previamente realizados por Torres Dilan, en su trabajo de grado llamado “ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ELÉCTRICA GENERADA POR LA ESTACIÓN DE SOLDADURA ELECTRÓNICA A LA RED DEL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD” [3], se concluyó que corresponde a un sistema sub-amortiguado; por lo que se hace la selección del tipo de sistema y las ecuaciones que ayudan en la elaboración del estudio. Esta determinación se basa en que la señal de corriente obtenida es semejante a la señal del sistema que se encuentra de color rojo como se indica en la Figura 6.

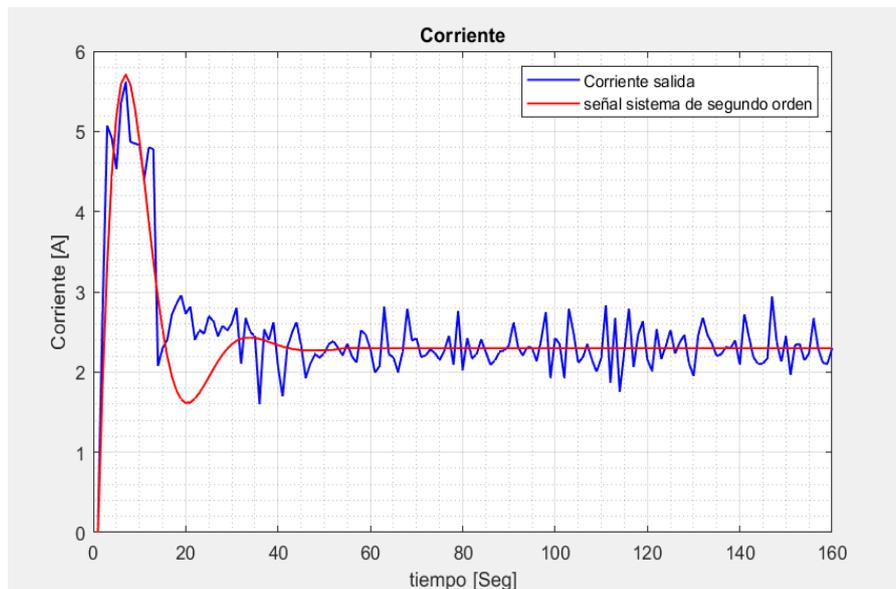


Fig. 6 Señal de sistema sub amortiguado vs señal de corriente del Sistema.

Para realizar el cálculo de la función de transferencia que tiene la estación de soldadura primero se identifica el orden del sistema, con la ayuda de la Figura 6 que es la señal de corriente de salida de la estación de soldadura en funcionamiento.



Ya determinado el orden del sistema, se emplea la siguiente ecuación de un sistema de segundo orden sub amortiguado con cero:

$$G_s = \frac{K * W_n^2 * \left(\frac{1}{z} + 1\right)}{(s^2 + 2\rho W_n s + W_n^2)} \quad (1)$$

Donde:

K = ganancia

W<sub>n</sub> = Frecuencia natural no amortiguada del sistema

(ρ) = Factor de amortiguamiento

Para realizar el cálculo de Rho (ρ), primero se debe calcular el sobre paso máximo (M<sub>p</sub>) con la siguiente ecuación:

$$M_p = \frac{V_{max} - V_{final}}{V_{final}} \quad (2)$$

Donde:

V<sub>max</sub> = Es el valor de salida en el tiempo máximo de sobre paso

V<sub>final</sub> = Es el valor de salida en estado estable

Conociendo el valor de sobre paso máximo (M<sub>p</sub>), se continua a calcular Rho (ρ) o el factor de amortiguamiento con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{-\ln\left(\frac{\%M_p}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{\%M_p}{100}\right)\right)^2}} \quad (3)$$



Cuando se conoce el valor de Rho ( $\rho$ ), se calcula la frecuencia natural no amortiguada ( $W_n$ ) despejando de la siguiente ecuación (4), hay que tener en cuenta el tiempo de asentamiento ( $T_s$ ).

$$T_s = \frac{3}{\rho * W_n} \quad (4)$$

Despejando la frecuencia natural no amortiguada ( $W_n$ ) se obtiene la siguiente ecuación:

$$W_n = \frac{3}{\rho * T_s} \quad (5)$$

Encontradas todas las variables, se reemplaza en la ecuación (1) para obtener la ecuación que representa la función de transferencia de la estación de soldadura electrónica [3].

### 3.3 Transformador en ZIG – ZAG

El transformador Zig - Zag es un transformador de propósito especial con una conexión en Zig - Zag o conexión de bobinado grado de interconexión en estrella, teniendo en cuenta que en la salida se tendrá una suma vectorial de dos de sus fases desplazadas 120 grados. También es utilizado en los sistemas de alimentación para atrapar corrientes armónicas triples, se instalan unidades cerca de cargas que producen grandes corrientes armónicas, los devanados atrapan las corrientes armónicas y evitan que viajen por el sistema evitando efectos indeseables [11] [30] [36].

Este tipo de conexión se usa en transformadores para cargas muy desequilibradas, con la conexión Zig - Zag, se consigue que la corriente que circula por cada conductor de



la línea afecte por igual y simultáneamente a dos fases, estos transformadores son trifásicos con un solo bobinado, como se muestra en la Figura 7 [37].

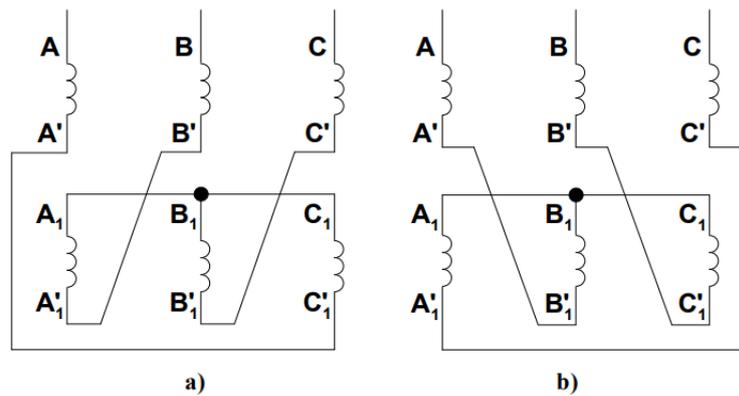


Fig. 7 Diagrama general del transformador Zig - Zag. [38]

El transformador Zig - Zag es parte de los sistemas de protecciones para neutros aislados, un sistema que aterriza mediante un conexionado de seis bobinas, que en cierto punto eléctrico se derivan a tierra [39].

El transformador al tener una relación uno a uno, es decir, que en el devanado primario tendrá el mismo valor de voltaje que en el secundario, pero con el arreglo del conexionado tendrá una polaridad aditiva, indica que la tensión en el lado primario estará en fase con el secundario [40].

### 3.3.1 Estructura y conexiones internas

El transformador en Zig - Zag tiene las mismas partes constructivas que un transformador convencional, con un núcleo ferromagnético y tres columnas, de dos devanados por cada columna, tiene 3 devanados para el primario y 3 para el secundario [40].



La conexión interna del transformador se muestra en la parte (a) de la Figura 8, y en la parte (b) se muestra la conexión del sistema, se encuentra por los devanados externos que se los conoce como Zig y a los devanados internos como Zag. Los devanados Zig son los que se conectan a las fases de alimentación, mientras que los devanados Zag se conectan entre sí para que sean unidos al neutro del sistema, la forma de conexión suele ser de forma directa o mediante el uso de una resistencia [11] [41].

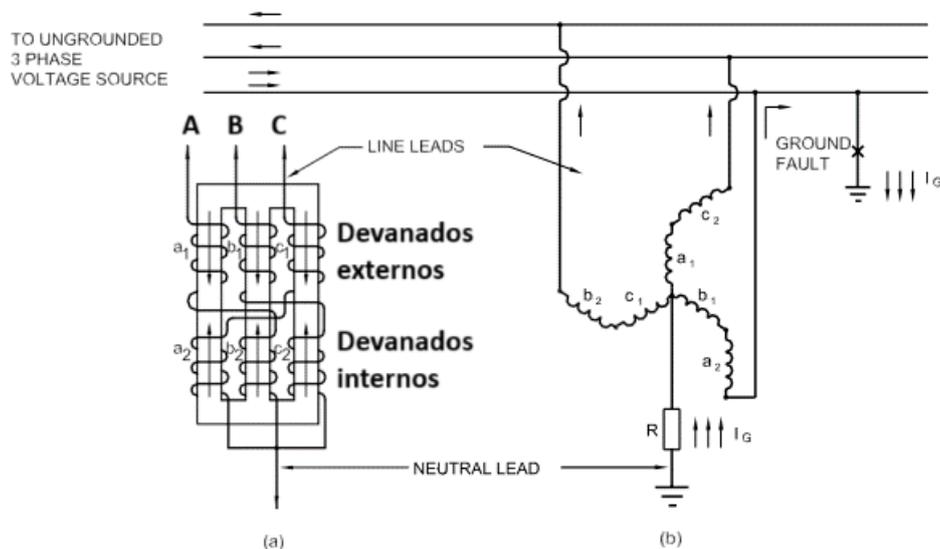


Fig. 8 Transformador de puesta a tierra en Zig – Zag  
a) devanados del núcleo, b) conexión del Sistema. [41]

Conforme a IEEE 142 [41], La impedancia del transformador trifásico Zig - Zag en condición normal es muy elevada y circula un pequeño flujo de corriente, también conocida como corriente de magnetización por el devanado del transformador. Por otro lado, la impedancia del transformador a los voltajes de secuencia cero es baja.

Al ocurrir una falla, su impedancia baja radicalmente permitiendo fluir altas corrientes de falla a tierra, todos los devanados tienen el mismo número de vueltas, pero



cada par de devanados de columna están conectados en diferente sentido, de manera que sus fuerzas magnetomotrices son iguales y opuestas [39].

### 3.4 Métodos, técnicas e instrumentos.

El desarrollo de este trabajo de integración curricular se fundamentó usando diferentes métodos de investigación para el desarrollo teórico y práctico.

De manera inicial, el trabajo se elaboró mediante la investigación documental, que implicó la búsqueda de información en documentos y artículos científicos gracias a la investigación bibliográfica y la hemerografía [42]. Se seleccionaron estos recursos para proporcionar una base sólida para la elaboración del trabajo escrito; se abordaron temas cruciales como el análisis de la energía eléctrica, la calidad de energía, los tipos de cargas no lineales presentes en un sistema eléctrico y las estrategias para mitigar sus efectos.

En el laboratorio de Electrónica de Potencia, se aplicó el método de medición experimental de su metodología experimental. Esta metodología permite la manipulación controlada de variables y la obtención de datos [43]. Las condiciones de medición en la línea se realizaron en lapsos de 30 minutos en funcionamiento, donde cada medición se realizó en intervalos de 3 segundos. Antes de la medición se verifica que no haya dispositivos o equipos conectados a la misma red para evitar posibles alteraciones en los datos obtenidos de la estación.

Este enfoque involucró la recopilación de datos generados por la estación de soldadura y adquiridos por el analizador de red, que luego se utilizaron en simulaciones realizadas en el entorno de Simulink.



Para el diseño del transformador, se utilizó el método matemático, que forma parte del método científico como un método de investigación teórica [44]. Este proceso incluyó la obtención de información de artículos y libros especializados, así como el uso de ecuaciones matemáticas para determinar los parámetros del transformador, como la relación de transformación, el núcleo, el número de espiras, potencias, voltajes, etc.

En el proyecto de TIC se optó por simular un banco de transformadores con el objetivo de replicar el comportamiento de un transformador trifásico tipo núcleo en configuración Zig – Zag. Se tomó esta decisión debido a que elaborar el diseño es más sencillo y, en caso se deseara realizar una construcción física, no sería necesario incurrir en altos costos para la fabricación.

En Simulink se modeló la estación de soldadura electrónica, este modelo permitió observar en simulación el consumo de la estación cuando entra en funcionamiento mediante la obtención de la función de transferencia.

Se aplicó la extrapolación proporcional lineal que se encuentra dentro de la metodología cuantitativa [45], para extender los datos obtenidos de una estación de soldadura a tres por cada línea, este método permitió determinar características precisas para realizar la mitigación de armónicos.

También, se llevó a cabo el método comparativo como parte de la metodología cuantitativa [46], para observar la relación del comportamiento del contaminante en el laboratorio mediante la simulación. Se evaluaron los armónicos de la estación de soldadura, tanto cuando estaba conectada como cuando no estaba conectada al transformador en Zig – Zag dentro de la simulación. Este método demostró mitigar de



forma eficiente los armónicos sin alterar la onda fundamental cuando se encuentran conectadas las estaciones de soldadura electrónica [47].

Se realizó un análisis e interpretación de las simulaciones para llegar a la comparación de resultados con y sin el transformador en Zig - Zag para determinar la eficacia de la mitigación de armónicos utilizando técnicas didácticas de presentación de la información en figuras, tablas, gráficos [44] [48].

### **3.5 Procedimiento y análisis de datos.**

Para el desarrollo del trabajo de integración curricular, se utilizaron diferentes procesos tanto para la parte teórica como práctica. Para ejemplificar, se optó por hacer un diagrama de flujo que indica el proceso que se tomó en cuenta para el desarrollo del trabajo de grado, como se muestra en la Figura 9. Se aprecia el proceso de cómo fue conformado el TIC, los principales puntos que son la fundamentación teórica, la utilización del analizador de red en el laboratorio de electrónica de potencia para el proceso de determinación de parámetros del transformador en Zig-Zag, parámetros, cálculos y explicación más a fondo del transformador para su diseño en la herramienta computacional.

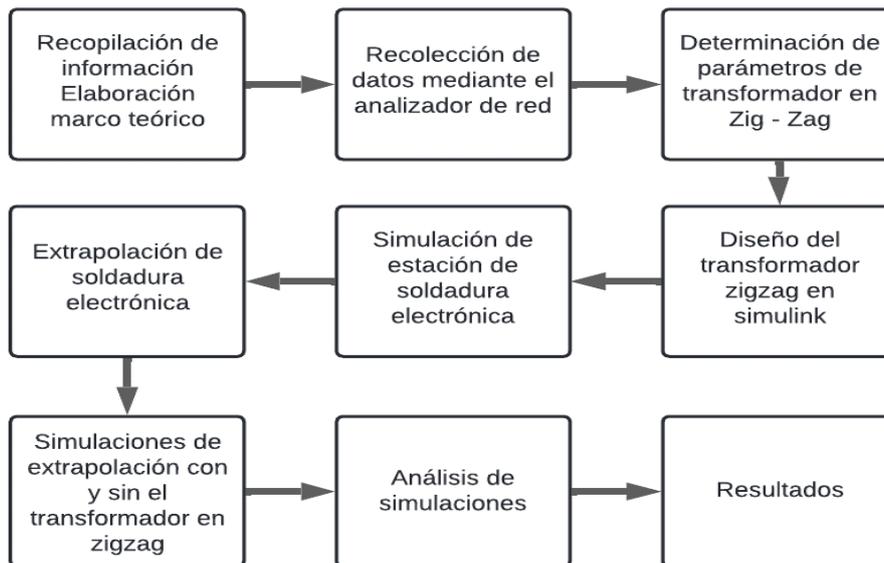


Fig. 9 Diagrama de procedimiento de TIC.

Una vez finalizado el marco teórico, se procedió a la recolección de datos mediante el analizador de red Metrel Power Q4 plus. La obtención de datos implicó el uso de la metodología documental, lo que significa que se realizó siguiendo las normativas establecidas en el manual de usuario del analizador de red. La Norma EN 50160 define, describe y especifica los límites y valores dentro de los cuales se puede esperar que se mantengan las características de tensión y otros valores. En la Tabla IV se muestra un resumen general de los límites en la norma [33]:

**TABLA IV**  
Resumen General de la norma EN 50160

Fenómeno de la tensión de suministro	Limites aceptables	Intervalo de medición	Periodo de monitorización	Porcentaje de aceptación
Frecuencia de red	49.5 ÷ 50.5 Hz 47.0 ÷ 52.0 HZ	10s	1 semana	99.5% 100%



Severidad del flicker Plt	$Plt \leq 1$	2h	1 semana	95%
Desequilibrio de tensión u-	$0 \div 2\%$ , ocasionalmente	10 min	1 semana	95%
Distorsión arm. Total, THDu	3%	10 min	1 semana	95%

Nota: Resumen general de la norma EN 50160 se observó el intervalo de medición en periodos de monitorización de la distorsión armónica [33].

Conforme a dicha información dada por el analizador de red, se pudieron exportar los siguientes parámetros: corriente de línea, voltajes de línea, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, distorsión armónica total THD, etc. Con la exportación de datos, estos pueden ser almacenados y exportados mediante el software PowerView 3.0 para la visualización y el análisis de la información obtenida sobre cómo afecta la estación de soldadura electrónica en el laboratorio de electrónica de potencia.

Con estos datos, se procede a la determinación de parámetros del transformador en configuración en Zig – Zag. Seguido por el diseño del transformador en Simulink, que permite modelar y verificar su rendimiento.

A continuación, se realizó la simulación de la carga no lineal, representada en este caso por la estación de soldadura electrónica. Se utilizan modelos matemáticos para obtener la función de transferencia y determinar su ganancia, lo que permite observar el consumo durante la simulación. Posteriormente, se procede a la extrapolación de las estaciones de soldadura electrónica a cada fase del transformador para comparar el



comportamiento de la carga no lineal, tanto con el transformador en configuración Zig-Zag como sin él.

Después, se analizan los resultados en la etapa de análisis de simulaciones y finalmente, se presentan los resultados obtenidos, demostrando la eficiencia del transformador Zig – Zag en la mitigación de armónicos sin alterar la onda fundamental.



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones y experimentos realizados para evaluar el comportamiento de la estación de soldadura electrónica en presencia de armónicos. Se analiza los datos recopilados para entender como la configuración del transformador en Zig – Zag influye en la mitigación de los armónicos y en calidad de la energía suministrada. Además, se examina el impacto de la carga no lineal sobre el sistema eléctrico, tanto con el transformador como sin él, con el objetivo de validar la efectividad de esta configuración en la reducción de la distorsión armónica total (THD). Los resultados se presentan de manera detallada, a acompañado de gráficos que facilitan la interpretación de los datos.

#### 4.1 Análisis de resultados obtenidos por el analizador de red

Según el procedimiento establecido, la medición se desarrolló en 30 minutos en funcionamiento, en periodos de 3 segundos. Se tomó las medidas en la línea controlando de que no existan otros dispositivos conectados en la misma red.

En el laboratorio de Electrónica de Potencia de la carrera de Electricidad, se registraron diversos parámetros mediante el analizador de red para la ejecución del proyecto. Estos parámetros, descritos en Tabla V enfatizando los aspectos físicos que se tomaron considerando al poner en funcionamiento la estación de soldadura y registrar su comportamiento en la red.



**TABLA V**

Parámetros físicos de la estación de soldadura electrónica

Herramienta	Temperatura
Pistola de calor	389° C
Cautín	306° C

En la Figura 10 se muestra el tipo de conexión empleado para medir los datos obtenidos. El método de conexión de la figura es el 4H para un sistema trifásico de 4 hilos.

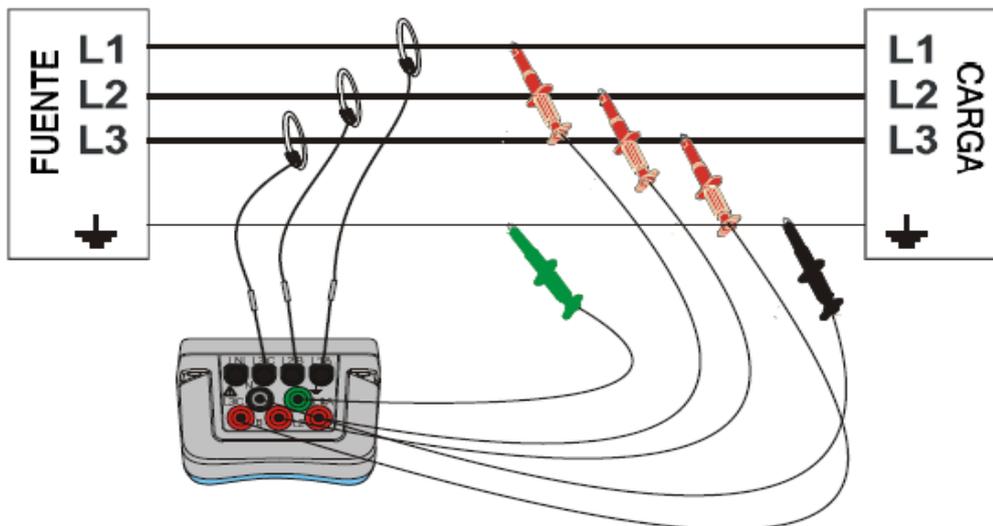


Fig. 10 Conexión del analizador de red a fuente y carga. [33]

Con el diagrama y el método de conexión establecido se instaló el analizador de red en el tablero eléctrico, como se muestra en la Figura 11, donde se aprecian las pinzas flexibles de corriente azul, y las planas rojas conectadas a las líneas L1, L2 y L3 respectivamente.

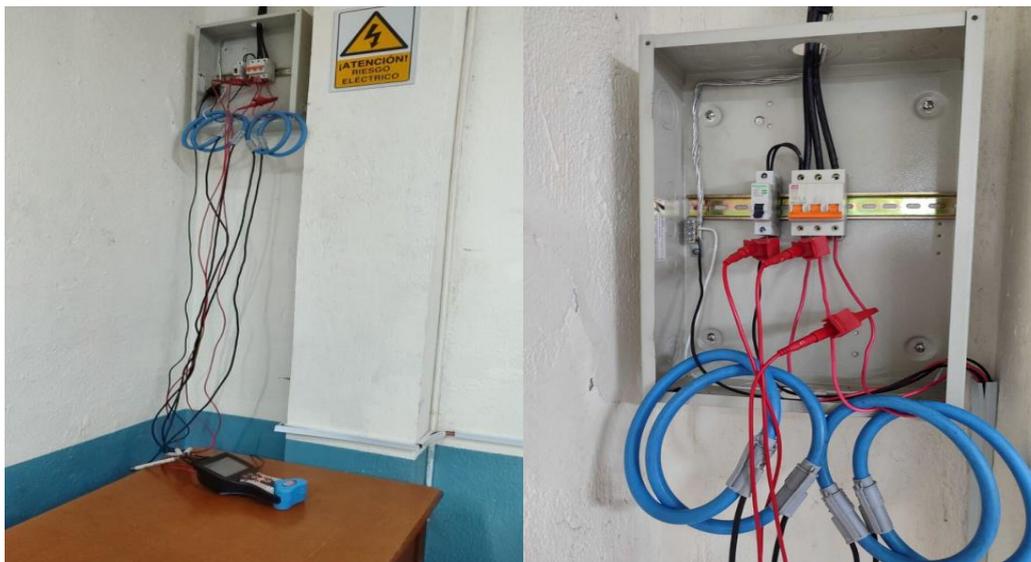


Fig. 11 Conexión de analizador de red en el laboratorio de Electrónica de Potencia.

Tras el estudio realizado se encontraron las siguientes mediciones que se detalla a continuación como el voltaje, corriente, potencia, THD (V) y THDI (%) para obtener datos que ayuden al diseño del transformador en Zig - Zag.

#### 4.1.1 Voltaje

La Figura 12 muestra la variación del voltaje a lo largo del tiempo mientras la estación de soldadura está en funcionamiento, el cuadro color rojo que se remarca en la figura indica el periodo de estabilización del voltaje. Al inicio de la gráfica se observa que el voltaje está en 130.4 V, pero se observa una caída brusca; esto indica el funcionamiento de la estación y el voltaje desciende hasta 128.5 V por un tiempo de 50 segundos, hasta conseguir que el voltaje se mantenga relativamente estable entorno a los 130 V, con fluctuaciones menores que indican variaciones en la carga mientras está en funcionamiento.

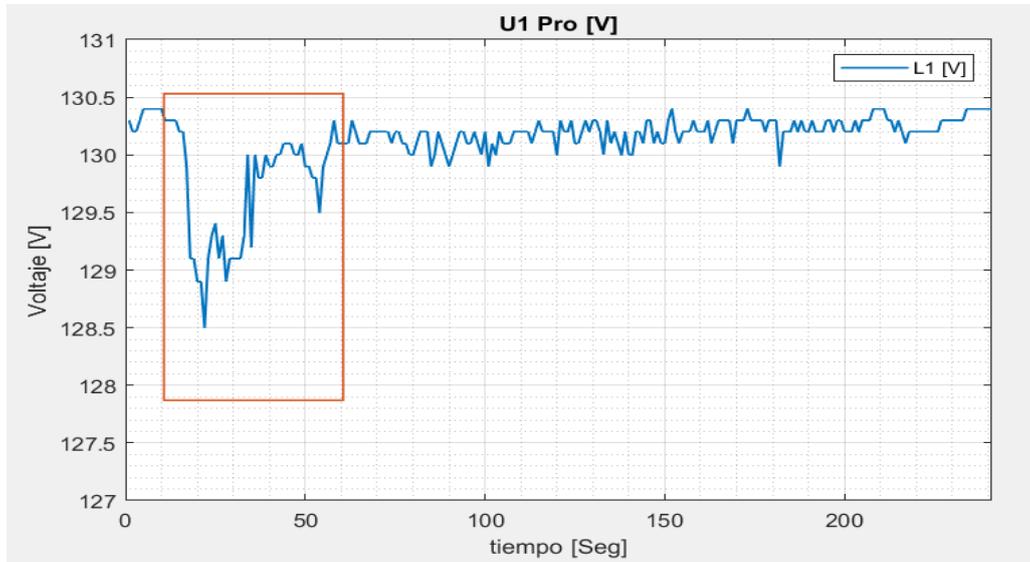


Fig. 12 Voltaje de estación de soldadura en funcionamiento.

La Figura 13 muestra los niveles de THD (V) medidos con el analizador de red a lo largo del tiempo mientras la estación de soldadura está en funcionamiento.

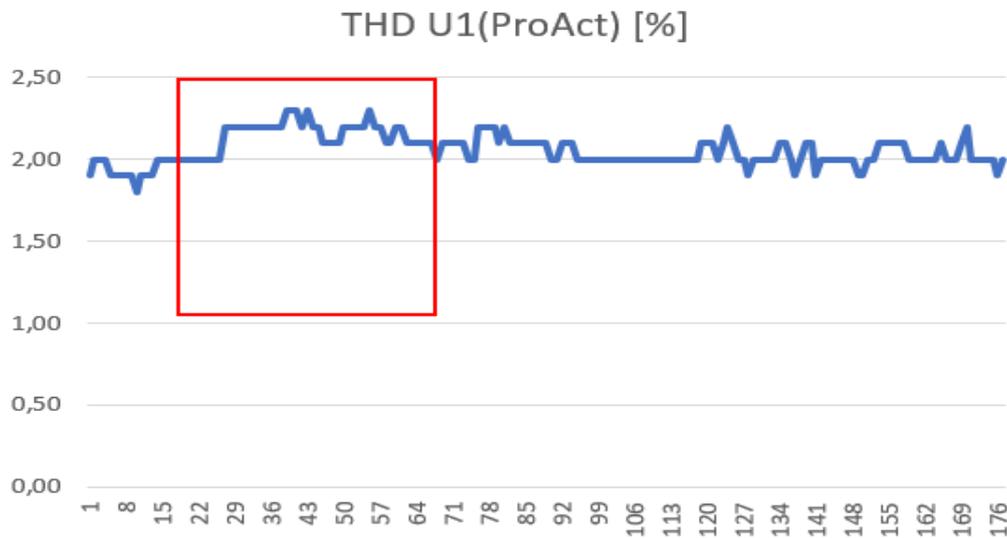


Fig. 13 Distorsión armónica en voltaje.

El THD está ligeramente por debajo del 2,0%. Poco después, se observa un incremento gradual, alcanzando un valor cercano al 2.5% en algunos puntos durante 50 segundos; como lo recalca el cuadro color rojo. Acabado este tiempo, el THD (V) fluctúa



alrededor del 2.0%, con algunas variaciones notables que indican cambios en la distorsión armónica mientras la estación está operando.

#### 4.1.2 Corriente

Con respecto a la corriente en fase de la línea 1, la Figura 14 muestra la variación de corriente a lo largo del tiempo. Se observa un pico de corriente que alcanza aproximadamente 5.5A, lo que indica un arranque alto cuando la estación de soldadura comienza a funcionar. Este pico es seguido de una caída rápida alrededor de 3 A, para normalizarse en pequeñas fluctuaciones de 2A y 3A tras 50 segundos, como destaca en el recuadro rojo.

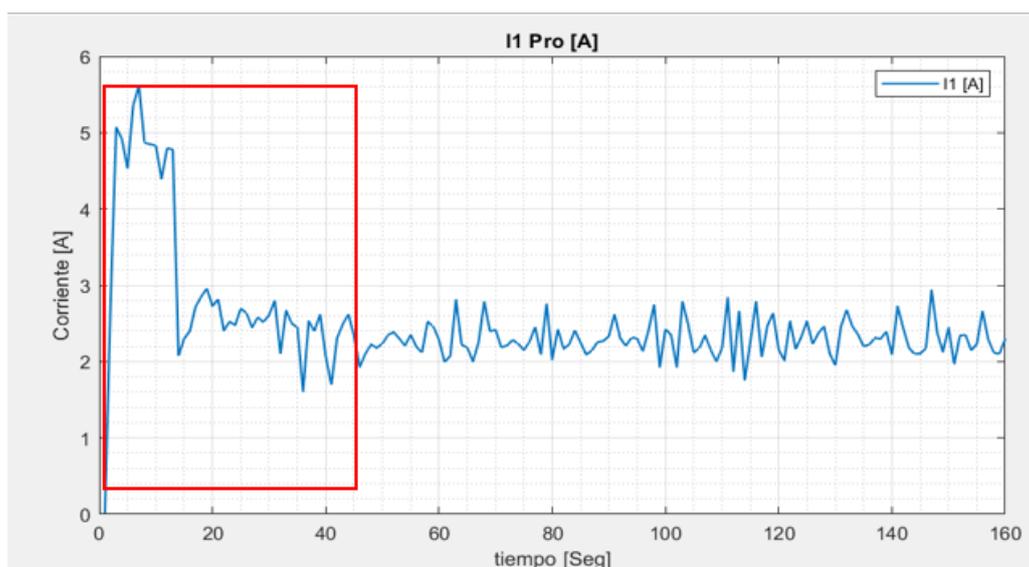


Fig. 14 Corriente de carga instalada.

Esta variación de corriente faculta a que se denote presencia de perturbaciones armónicas en la red eléctrica del laboratorio de electrónica, aumentando riesgo para diversos instrumentos y herramientas eléctricas.

Luego, se verifica que la distorsión armónica de corriente en la Figura 15 es de 66.78% (THD I) y el tercer armónico tiene un 39.69%.

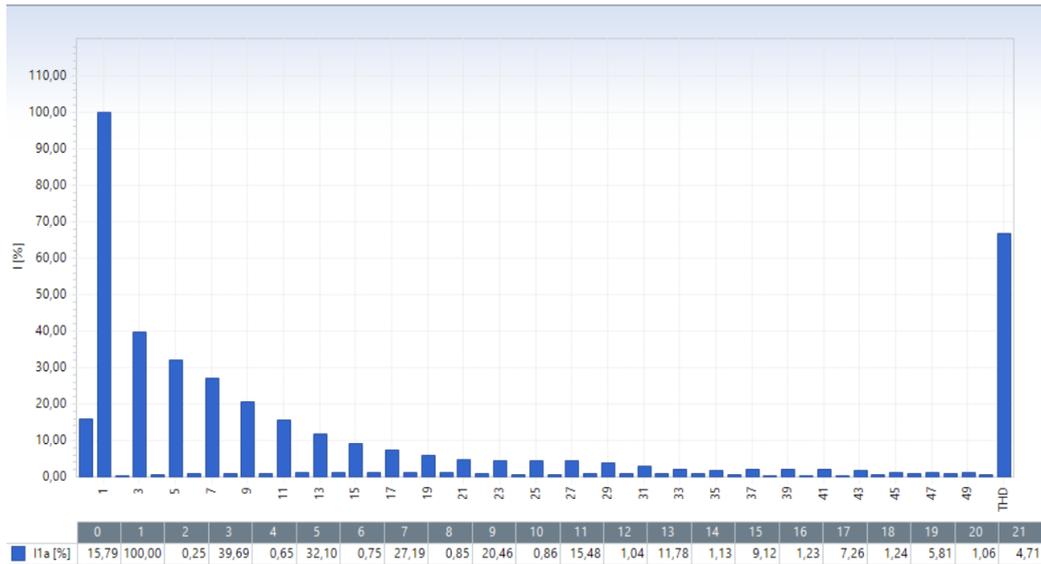


Fig. 15 Espectro de armónicos de corriente en %.

Esto evidencia que un aumento de THDI (%) de la red eléctrica del laboratorio de Electrónica de Potencia de la carrera de Electricidad al entrar en funcionamiento la estación de soldadura lo cual puede afectar a la onda fundamental de voltaje como se observa en la Figura 16.

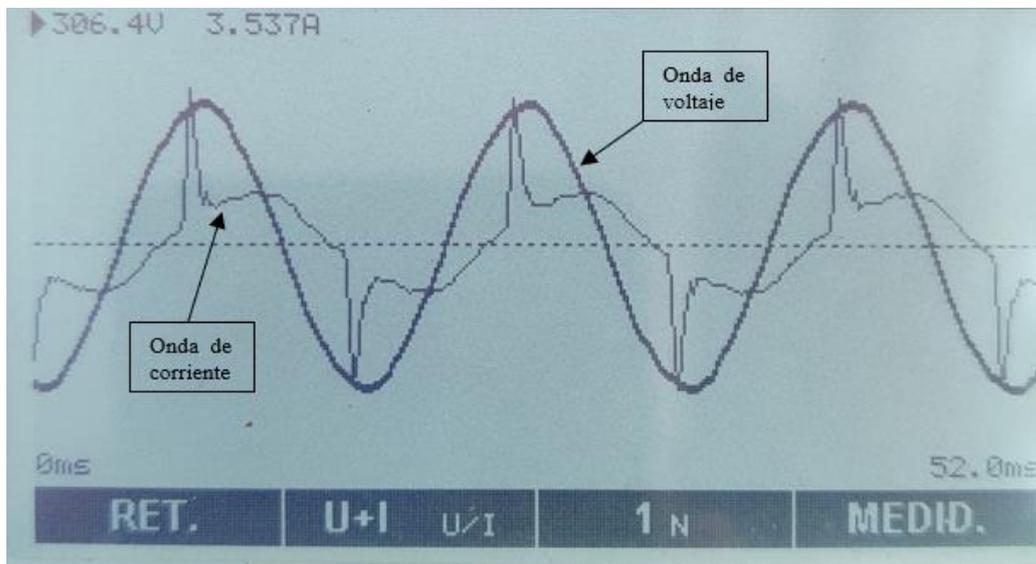


Fig. 16 Distorsión de onda de corriente debido a armónicos inyectados.



Se observa que la onda de corriente se encuentra distorsionada debido al incremento de armónicos encontrados, y esta distorsión es afectada al existir más dispositivos electrónicos conectados, este inconveniente puede afectar a la onda de voltaje.

En la Tabla VI se muestra las mediciones de armónicos individuales de corriente que se encuentran en la red.

**TABLA VI**

Mediciones de armónicos individuales de corriente

Orden del armónico	Porcentaje del armónico	Valor del armónico [A]
1	100 %	0,45
3	36,69 %	$0,45 \times 0,3669 = 0,1651$
5	32,10 %	$0,45 \times 0,321 = 0,1445$
7	27,19 %	$0,45 \times 0,2719 = 0,1223$
9	20,46 %	$0,45 \times 0,2046 = 0,092$
11	15,48 %	$0,45 \times 0,1548 = 0,0696$
13	11,78 %	$0,45 \times 0,1178 = 0,053$
15	9,12 %	$0,45 \times 0,912 = 0,4104$

#### 4.1.3 Potencia

Respecto a la potencia en la Figura 17 se muestra la variación que tiene la potencia aparente, al iniciar la estación en funcionamiento, se observa un pico de potencia que alcanza aproximadamente los 700 VA, lo cual indica un alto consumo de potencia al arrancar la estación. La región destaca en rojo resalta el tiempo de estabilización en aproximadamente 50 segundos para observar una fluctuación entre 200 VA y 300 VA.

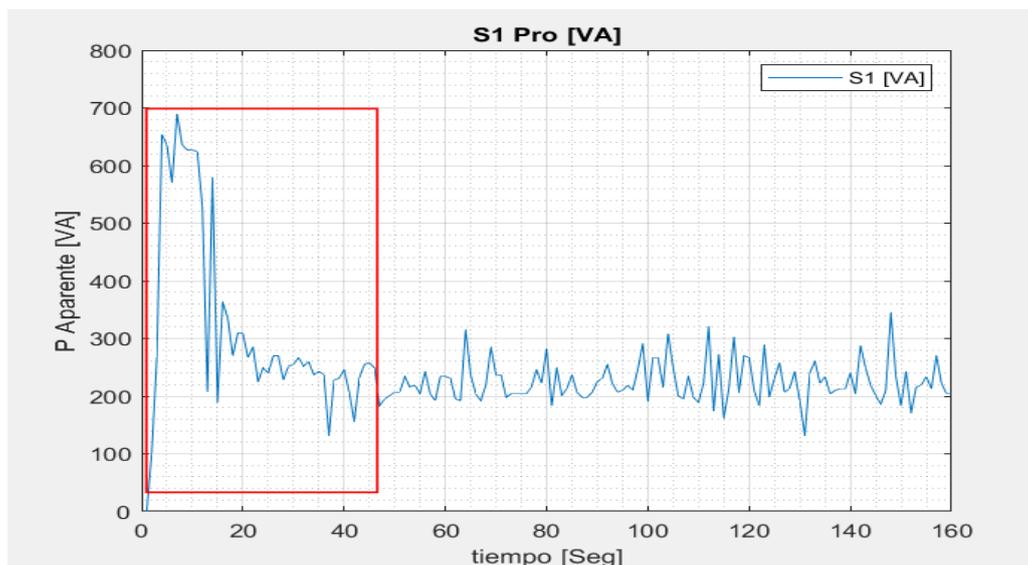


Fig. 17 Potencia aparente de carga conectada

Estas fluctuaciones reflejan las variaciones de la demanda de potencia mientras la estación de soldadura se encuentra en operación continua, la potencia aparente al ser un factor necesario para el diseño del transformador, dado a que es la combinación entre la potencia activa (W) y la potencia reactiva (VAr).

#### 4.2 Diseño del transformador en Zig-Zag

Para el diseño del transformador en Zig-Zag, el cual tenga la capacidad para mitigar armónicos es indispensable tener en cuenta factores de seguridad y las características del sistema eléctrico donde se aplicará su funcionamiento, para lo cual facultara su simulación en base a su potencia, partiendo de la corriente que entrega el analizador de red METREL Power Q4 Plus colectivamente con el voltaje de alimentación.

En el proyecto de TIC se optó por simular un banco de transformadores con el objetivo de replicar el comportamiento de un transformador trifásico tipo núcleo en configuración en Zig – Zag. La decisión se presenta debido a que elaborar el diseño es



más sencillo y, en caso se deseara realizar una construcción física, no es necesario en incurrir en altos costos de fabricación.

Se puede determinar los parámetros del transformador a partir de corrientes homopolares, lo que vienen siendo las corrientes RMS que están conformados por los armónicos generados por la estación de soldadura que se visualizan en la Figura 15 y el valor en [A] en la Tabla VI. Con la obtención de esta corriente se calcula la potencia del transformador y se siguen los pasos para el diseño del transformador.

Es importante tener en cuenta que el diseño del transformador se realizó para una corriente homopolar entregada por el analizador de red con otros parámetros eléctricos como voltaje “V” y la intensidad “I”, donde se desea encontrar la potencia nominal “P”.

Dentro del diseño se siguieron ciertos pasos generales obtenidos de “Calculo del transformador” que puede encontrarse en [49] y “Diseño de Transformador” que se obtuvo de [50], donde se recalcan datos importantes como el voltaje de salida y la corriente de carga

$$S = V_{out} * I_{out} \quad (6)$$

S = Potencia aparente

V<sub>out</sub> = Voltaje de salida

I<sub>out</sub> = Corriente de salida

A continuación, se detalla el procedimiento para el diseño del transformador, según sea la potencia para el cual puede ser fabricado, se indica los valores aproximados de rendimiento en la tabla VII.



**TABLA VII**

Valor de rendimiento en relación de la potencia

Porcentaje	Potencia
75%	Hasta 50 W
85%	Hasta 75 W
90%	Hasta 500 W
95%	Mayor a 500 W

- Se debe encontrar la sección del núcleo ( $S_n$ ), o también conocido como sección neta la cual se encuentra mediante la raíz cuadrada de la potencia aparente ( $S$ ), donde se encuentran los elementos metálicos del transformador,  $b$  y  $h$ , como se indica en la Figura 18.

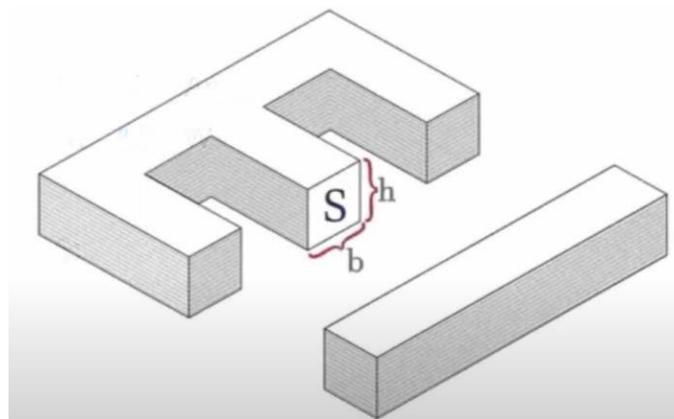


Fig. 18 Elementos metálicos del transformador,  $S_n$ ,  $b$ ,  $h$ . [51]

$$S_n = a * \sqrt{S} \tag{7}$$

$S_n$  = sección neta

$S$  = Potencia aparente

$a$  = constante para cada tipo de acero que se emplee, se tiene el valor de 0.8 para

acero en silicio y 1.2 para acero común.



2. Obtenida la sección neta ( $S_n$ ), se calcula el tamaño de la chapa ( $N^\circ$  de chapa), también conocidos como los elementos metálicos, las E y las I que se unen para formar el núcleo del transformador.

$$N^\circ \text{Chapa} = \sqrt{S_n} \tag{8}$$

En el comercio existen diversos tipos y medidas de chapas ya estandarizadas para la construcción del núcleo, en la Figura se observa la medida de las chapas en forma de E/I y sus partes para ser obtenidas de la tabla de medidas.

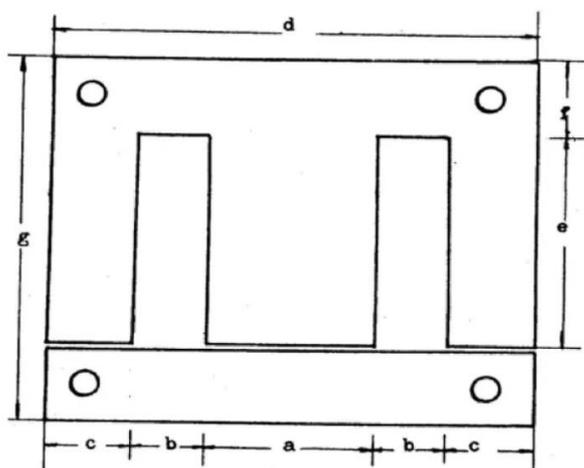


Fig. 19 Parte de laminaciones para núcleos. [49]

Es importante tener en cuenta que la medida del valor “d” y “g” se obtiene de la siguiente ecuación.

$$d = a + 2b + 2c \tag{9}$$

$$g = e + 2f \tag{10}$$

3. A continuación, se procede a buscar el tamaño de la lámina “b” y “h” apoyándose en el estándar de mediciones de chapas tal y como se muestra en la Tabla VIII que



indica el valor en cm, y en la Tabla IX las medidas de laminaciones para los núcleos en mm, seleccionado el valor más cercano:

TABLA VIII

Estándar de mediciones de Chapas

Número de Chapa	Medición (cm)
1/2"	1,28
3/4"	1,90
1"	2,54
1 1/4"	3,17
1 1/2"	3,80
1 3/4"	4,45
<b>2"</b>	<b>5,09</b>
2 1/2"	6,35

Nota: Estándar de mediciones de chapas en pulgadas y cm para el tamaño de la lámina [51].

TABLA IX

Medidas de laminaciones en mm

N°	a	b	c	e	f
155	38	19	19	57	19
60	40	20	20	60	20
42	42	21	21	63	21
150	45	28,5	22,5	117	22,5
<b>600</b>	<b>50</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>75</b>	<b>25</b>
500	64	32	32	96	32
700	64	32	32	192	32
800	80	40	40	125	40
850	80	40	40	250	40

Nota: Medidas de laminaciones en mm que se adaptan a las necesidades de valores calculados [49].

Se procede a realizar la elección del carrete, el carrete está elaborado sobre un material aislante, se utiliza un carrete prefabricado que cubra las necesidades del



fabricante del transformador, en la Figura se muestra las dimensiones del carrete en A y B.

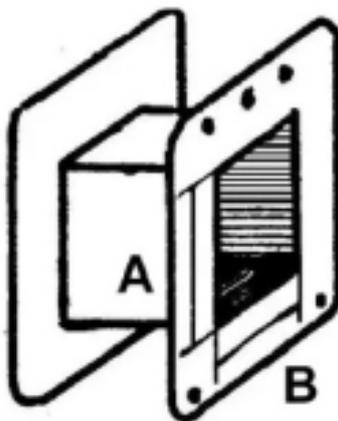


Fig. 20 Dimensión del carrete para transformadores. [49]

En la Tabla X se muestra las dimensiones de A y B, el número del carrete coincide de manera directa con el de laminación también se encuentra en milímetros.

**TABLA X**  
Medida de carretes plásticos

Nº	A	B
155	60	38
155	50	42
60	40	40
60	50	40
30	33	33
600	50	50
600	60	50
150	50	45

Nota: medida de carretes plásticos en milímetros para los cálculos realizados [49].

- Seguidamente se calcula el número de espiras de la bobina (Neb) con la siguiente ecuación:



$$N_{eb} = \frac{V_{in}}{4,44 * f * B * 0.9 * S_n} \quad (11)$$

$N_{eb}$  = Número de espiras en el devanado

V = Voltaje salida

f = frecuencia (60Hz)

4,44 = Constante relacionada con la pulsación angular.

0.9 = Constante para compensar las pérdidas de energía (perdidas en vacío)

$S_n$  = Sección neta puede ser expresada en  $cm^2$  o  $m^2$ .

B = 1 T (constante); Densidad magnética

Se debe tener en cuenta que para este tipo de transformador en Zig-Zag se tiene tres bobinas iguales que se dividen en dos partes similares, obteniendo seis ramas en los bobinados, lo que permite encontrar el valor una sola bobina para derivar este valor a las demás.

- Posteriormente se procede a calcular la corriente máxima con el despeje de la ley de Watt obteniendo la ecuación siguiente:

$$I_{max} = \frac{P}{V_p} \quad (12)$$

Como la corriente que se necesita para realizar los cálculos ya había sido obtenida gracias al espectro de armónicos entregado por el analizador de red, se utiliza la misma corriente para obtener la sección del cable ( $S_{cu}$ ) la cual se determina con la siguiente ecuación:



$$S_{cu} = \frac{I_{max}}{2,2 \text{ (constante)}} \quad (13)$$

El valor se puede seleccionar de acuerdo a la corriente que se obtiene, o puede ser por la sección del conductor, ambos valores deben tener una semejanza. lo cual con lleva a encontrar el diámetro de la galga del cable requerido que se visualiza en la Tabla XII.

TABLA XI

Estándar número de galga de cable requerido

Número de Galga (AWG)	Diámetro "mm"	Sección "mm <sup>2</sup> "	Peso "g/m"	Resistencia "Km* Ω"	Capacidad [A]
30	0,255	0,0509	0,453	339,590	0,15
29	0,286	0,0642	0,571	268,510	0,18
28	0,321	0,0810	0,720	212,930	0,23
27	0,361	0,1020	0,908	168,870	0,29
26	0,405	0,1290	1,145	133,890	0,37
25	0,455	0,1620	1,443	106,200	0,46
24	0,511	0,2050	1,820	84,2200	0,58
23	0,573	0,2580	2,295	66,8000	0,73
22	0,644	0,3260	2,894	52,9500	0,92
21	0,723	0,4110	3,649	41,9970	1,2
20	0,812	0,5180	4,602	33,3020	1,6
19	0,9116	0,65	5,79	26,15	2,0
18	1,024	0,8	7,3	20,73	2,5
17	1,150	1,04	9,26	16,34	3,2
16	1,291	1,31	11,06	12,9	3,7
15	1,450	1,65	14,7	10,3	4,8

Nota: Se muestra la tabla completa, con valores de conversión directa entre los números AWG a diámetro (mm) y sección (mm<sup>2</sup>) [52].



Se debe escoger el que más se acerque a las especificaciones del transformador para mitigar el espectro de armónico encontrado en la red.

Previamente a encontrar las ecuaciones planteadas, se tuvo la consideración de la extrapolación de las tres estaciones de soldadura electrónica a cada línea. Los datos que se tienen para el diseño del transformador son los siguientes, teniendo en cuenta que se consideró el espectro de armónicos, donde se incluyó el valor del tercer armónico con un valor de corriente RMS de 0.65 A.

$$V_{out} = 127V$$

$$I_{rms} = 0.65 * 3 = 1.95 [A]$$

$$I_{pico} = 0.94 * 3 = 2.82 [A]$$

Se agrego un factor K-20 que es utilizado en transformadores debido a que indica la capacidad que tienen los transformadores a manejar corrientes senoidales [53], para el cálculo del factor K se realizó una simulación en Matlab para que el cálculo sea de manera mas sencilla, esto se puede observar en el anexo 10. Dando como resultado un factor K de 18,90 normalizando en 20.

Se obtiene una corriente de diseño de 3.38 A, que pueden ser aproximados a 3.4 A y este valor fue considerado como la corriente de salida ( $I_{out}$ )

$$I_{out} = 2,82 A$$

Finalmente, con estos datos se pudo empezar a realizar el remplazo en las ecuaciones anteriormente mencionadas, para el cálculo de la potencia nominal del transformador se hizo uso de la ecuación (6), teniendo en cuenta el rendimiento del



transformador en un 90% haciendo uso de la Tabla VII obteniendo un resultado como se muestra a continuación:

$$S = 358,14 \text{ [VA]}$$

$$\text{potencia a tomar de la red} = \frac{(358,14 * 100)}{90} = 397 \approx 400 \text{ [VA]}$$

Calculada la potencia aparente, se hizo uso de la ecuación (7) para obtener la sección neta ( $S_n$ ), este resultado al ser entregado en  $cm^2$  se necesita la conversión a  $m^2$  por lo que al resultado se le divide por 10.000 para obtener dicho valor.

El valor que escogido para el tipo de acero es de 1.2, teniendo en cuenta este valor se obtiene como resultado

$$S_n = 24 \text{ cm}^2 \approx 0.00240 \text{ m}^2$$

Con el valor de la sección del núcleo en  $cm^2$  se procedió hacer uso de la ecuación (8) para obtener el número de chapa y por comodidad es conveniente que el núcleo tenga sección cuadrada, por lo que el valor es:

$$N^{\circ} \text{ Chapa} = 4,89 \text{ cm}$$

Se observó en la Tabla VII que el valor estandarizado es de 5.09 cm lo que corresponde a 2", este valor corresponde al largo de la chapa lo que en la Figura 18 se observa con la nomenclatura "b" y "h". También se encuentra los valores que corresponden a la laminación con ayuda de la Tabla VIII conjuntamente haciendo uso de las ecuaciones (9) y (10).



Se selecciona la lámina con el N° 600, ya que se adapta de manera correcta a las necesidades de este cálculo debido a que las dimensiones son similares a los valores obtenidos.

$$d = 150 \text{ mm}$$

$$g = 125 \text{ mm}$$

Con los valores obtenidos se realizó una tabla que indica los valores correspondientes a la laminación N° 600.

**TABLA XII**  
Valores correspondientes a laminación N° 600

N°	a	b	c	d	e	f	g
600	50	25	25	150	75	25	125

A continuación, se realizó la selección del carrete con ayuda de la Tabla X, se selecciona el indicado con el N° 600 cuyas dimensiones coinciden con las necesarias para alojar las láminas.

$$A = 50 \text{ mm} ; B = 50 \text{ mm}$$

Se calculó el número de espiras de la bobina con la ecuación (11), obteniendo como resultado el siguiente valor:

$$N_{eb} = 220 \text{ vueltas}$$

Para encontrar la cantidad de espiras por voltio, el valor de las espiras total se divide al  $V_{out}$  y así se encuentra el valor de:



$$n = \frac{220}{127} = 1,73 \text{ espiras/volt}$$

Este valor es el mismo para el secundario, debido a que el diseño del transformador no está establecido para aumentar o disminuir el voltaje, sino, mantener el voltaje de entrada igual al de salida.

Finalmente, se encuentra el número del calibre del cable a utilizar considerando que la corriente es de 2,82 A haciendo uso de la ecuación (13):

$$S_{cu} = 1.28 \text{ mm}^2$$

Obteniendo el valor de la sección del conductor, se observó la Tabla XI, en donde se recomienda escoger un cable calibre 16 AWG. Se procede a la elaboración de la Tabla XII que resume los valores calculados dentro del diseño del transformador.

**TABLA XIII**  
Datos calculados para el diseño del Transformador

<b>Especificación</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de salida	Vout	127 V
Corriente RMS	Iout	2,82 A
Potencia aparente	S	400 [VA]
Sección del núcleo	Sn	24 cm <sup>2</sup>
Numero de Chapa	Nº de chapa	5,09 cm
Chapa de laminación	Nº	60
Carrete de plástico	Nº	600
Número de espiras	Neb	220 espiras
Espiras por voltio	n	1,28 espiras/volt
Sección del conductor	Scu	16 AWG



Dado que en la simulación se observará la configuración Zig – Zag, la capacidad total del banco de transformadores será la suma de las capacidades individuales que daría un valor de 1.5 KVA.

A continuación, se procede a conectar el banco de transformadores en configuración Zig – Zag de manera que replique el comportamiento de un transformador trifásico tipo núcleo como se observa en la Figura 21.

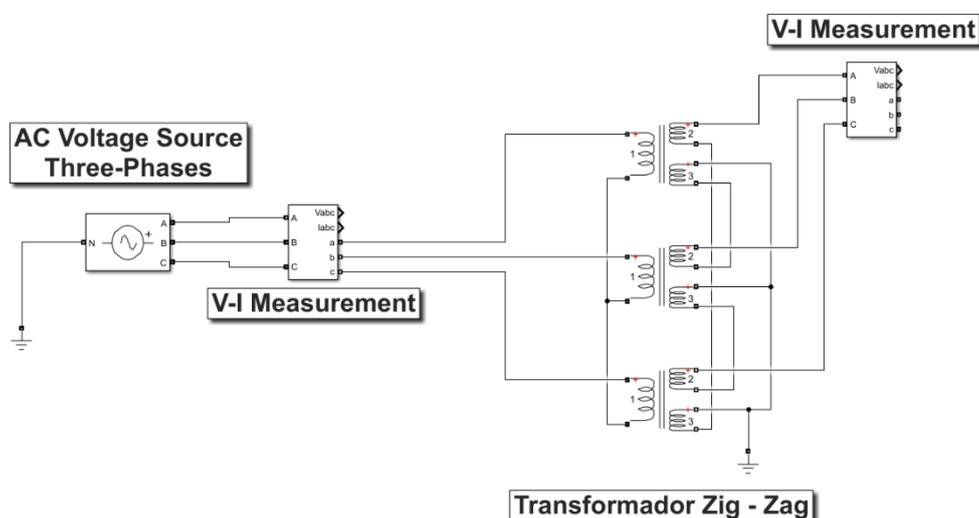


Fig. 21 Configuración en Zig – Zag.

Cada fase de la fuente de voltaje trifásico está conectada al devanado primario de uno de los tres transformadores, donde cada bobina se divide en dos partes iguales, resultando en seis ramas en los devanados. El secundario del T1 se conecta a la salida A y al secundario 2 del T3. El secundario 2 del T1 se conecta a un punto común que es tierra y al secundario 1 del T2. Desde el secundario 1 del T2 se conecta a la salida B, y el secundario 2 del T2 se conecta al punto común y luego al secundario 1 del T3. La primera salida del T3 se conecta a la salida C, y el secundario 2 del T3 se conecta al punto común



(tierra) y al secundario 1 del T1. Entregando la configuración que se puede observar en la Figura 7, en el apartado (a).

Para el ingreso de los parámetros en el transformador, se tomó en consideración los valores ya antes calculados, como la potencia individual y el voltaje de salida, que al tener relación 1 a 1 es el mismo voltaje de ingreso, debido a que esta relación no afecta el cambio en el voltaje.

Block Parameters: Linear Transformer3

Linear Transformer (mask) (link)  
Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units: pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:  
[ 0.431e3 60 ] [ 431,60 ]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:  
[ 127 0.002 0.08 ]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:  
[ 127 0.001 0.04 ]

Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:  
[ 127 0.001 0.04 ]

Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]:  
[ 500 500 ]

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Fig. 22 Parámetros en transformador Zig - Zag.

En la Figura 22 se observa que los parámetros se encuentran en por unidad, por lo que se ingresa la potencia calculada, y al tener la relación de 1 a 1 se ingresa el valor de 127 [V] tanto para la entrada como la salida.



### 4.3 Extrapolación de estación de soldadura electrónica.

El proceso de extrapolación de la estación de soldadura electrónica fue crucial para conocer el consumo que generan estos equipos. Antes de proceder con la simulación fue necesario obtener el valor de las ecuaciones descritas en el capítulo 3. Estas ecuaciones proporcionan la fundamentación matemática para determinar la función de transferencia y observar el comportamiento en simulación.

Conocido el orden del sistema, se emplea la ecuación (2) de sobre paso máximo ( $M_p$ ) y este resultado se multiplica por 100% obteniendo como resultado:

$$M_p = 0.2 * 100 = 20\%$$

El resultado de sobre paso máximo quiere decir que se obtuvo un sobrepaso del 20%, conocido este valor se procedió a calcular rho ( $\rho$ ) o también llamado factor de amortiguamiento con la ecuación (3):

$$\rho = 0.45595$$

Despejando la frecuencia natural no amortiguada ( $W_n$ ) de la ecuación (4), se obtiene la ecuación (5). Conocidos el valor del factor de amortiguamiento y teniendo en cuenta que el tiempo de asentamiento ( $T_s$ ) maneja un criterio del 5% y el valor es de 40s.

$$W_n = 0.16449 \text{ rad/s}$$

Una vez encontradas todas las variables se remplazan en la ecuación (1) que representa la función de transferencia de la estación de soldadura electrónica.



$$G_s = \frac{\left(\frac{0.8}{350}\right) (0.16449)^2 * 20.5s + 1}{(s^2 + 2(0.45595 * 0.16449)s + (0.16449)^2)}$$

A continuación, se procede a realizar la simulación de la función de transferencia en Simulink, se utiliza varios elementos que se detallan a continuación y se puede observar en la Figura 23:

- Step: Es un bloque que sirve para generar un entrada tipo escalón.
- Gain: Este bloque sirve como multiplicador
- Bloque Transfer Fnc: Este bloque permite ingresar la ecuación anteriormente calculada.
- Display: Este bloque permite observar el consumo de la estación de soldadura.

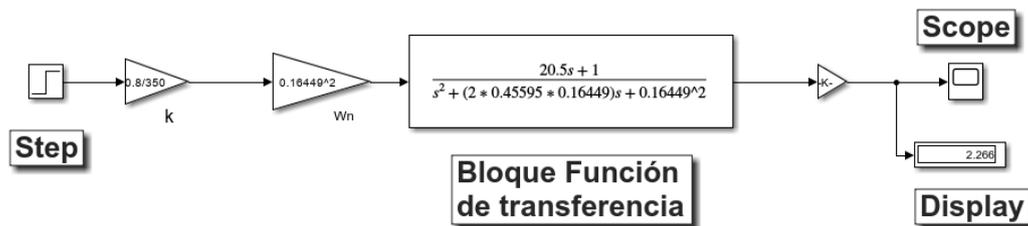


Fig. 23 Elementos que conforman la función de transferencia para observar el consumo de la estación de soldadura.

Se simuló la función de transferencia para observar si el consumo es similar a la corriente entregada por el analizador de red, en la Figura 24 se observa que el pico de corriente es igual a la gráfica de corriente y el tiempo que le toma hasta estabilizarse es similar, esta comparación se puede observar en la Figura 6 mencionada en el capítulo 3.

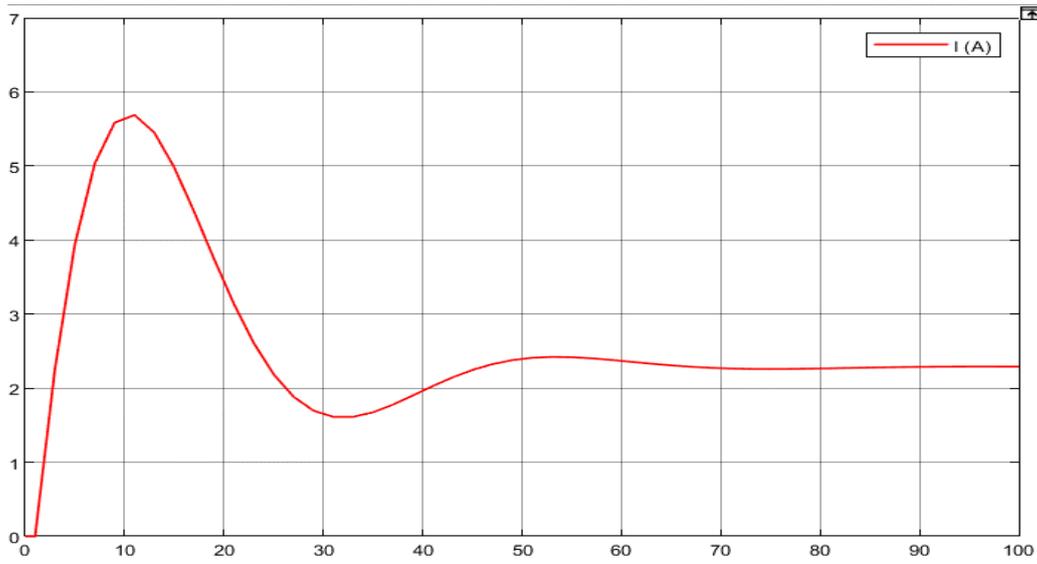


Fig. 24 Visualización del consumo en [A] de la estación de soldadura

Una vez verificado que el consumo es el correcto, se procedió a realizar la extrapolación para tres estaciones de soldadura, se creó un subsistema para cada estación de soldadura como se observa en la Figura 25.

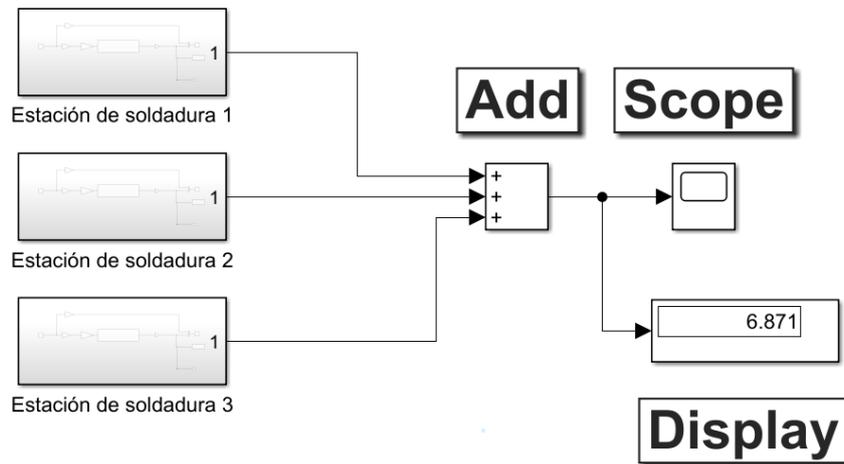


Fig. 25 Extrapolación de la estación de soldadura electrónica



Se agrega un bloque de Add para que se sume el consumo de las tres estaciones de soldadura y poder observar cual es el consumo máximo y el tiempo que le toma estabilizarse como se observa en la Figura 26.

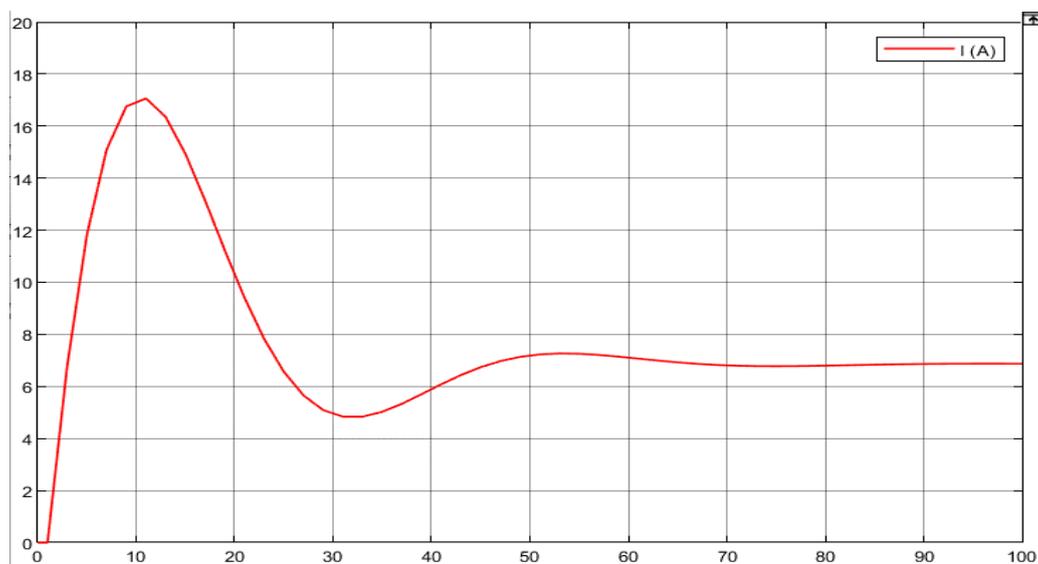


Fig. 26 Consumo de tres estaciones de soldadura con ayuda el bloque "Add".

Al verificar que la corriente es de 17 A en 10 segundos existiendo un incremento de consumo eléctrico en ese intervalo de tiempo, mientras que pasado ese tiempo la corriente es de 6.87 como se puede observar en el display que se muestra en la Figura 25, producto de la estación de soldadura eléctrica.

También se consideró la construcción de la carga no lineal se llevó a cabo gracias a distintos bloques que se encuentran en la biblioteca de Simulink, que permiten generar las corrientes armónicas deseadas, se hizo uso de diodos para formar un rectificador, inductores, capacitores, voltaje inicial en ac y para la visualización del espectro armónico, se hizo uso del bloque "POWERGUI" como se observa en la Figura 27.

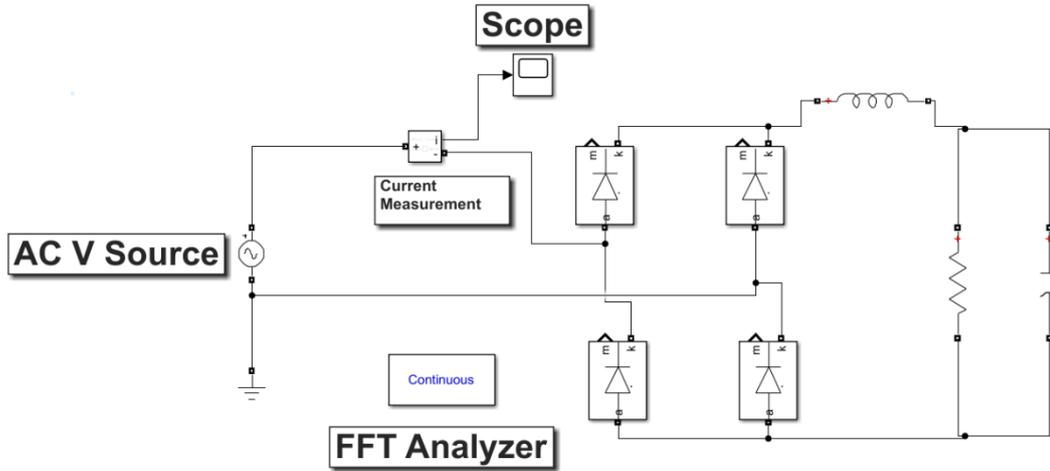


Fig. 27 Estación de soldadura en bloques de Simulink para generación de armónicos en sistema monofásico en AC.

En la Figura 28 se observa un THDI (%) de 60% que es muy cercano al valor real entregado por el analizador de red y un 38.14% en el tercer armónico. Esto indica que la carga no lineal diseñada para generar armónicos reproduce efectivamente los armónicos esperados para su mitigación.

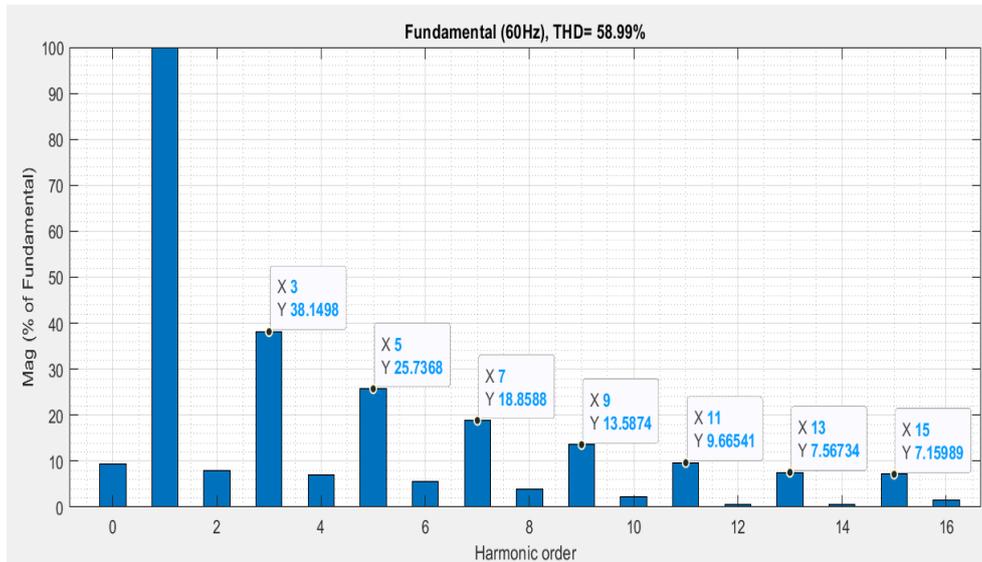


Fig. 28 Espectro de armónicos en sistema monofásico.



Se hace la consideración anteriormente descrita en el capítulo 3 de la extrapolación de 3 estaciones de soldadura por línea para un sistema trifásico, la Figura 27 indica el subsistema que se integra a un sistema monofásico para observar el comportamiento de las componentes armónicas.

Se procedió a conectar 3 estaciones en un sistema monofásico en paralelo como se observa en la Figura 29, para observar cómo se eleva el THDI (%) y también el THDI (%) individual.

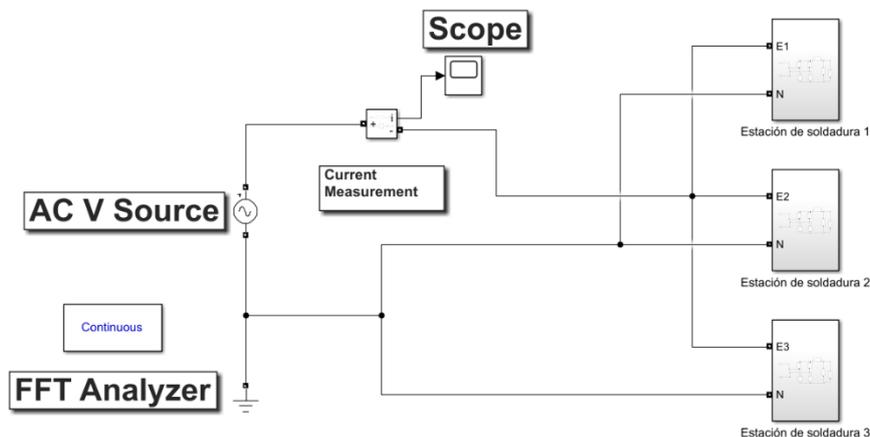


Fig. 29 Extrapolación de estación de soldadura en un sistema monofásico.

Se observó que efectivamente hay un incremento notable en el THDI (%) al elevarse a 139.94% y también existe un incremento en el THD individual de cada armónico. El tercer armónico tuvo un incremento de al 84.81% como se indica en la Figura 30.

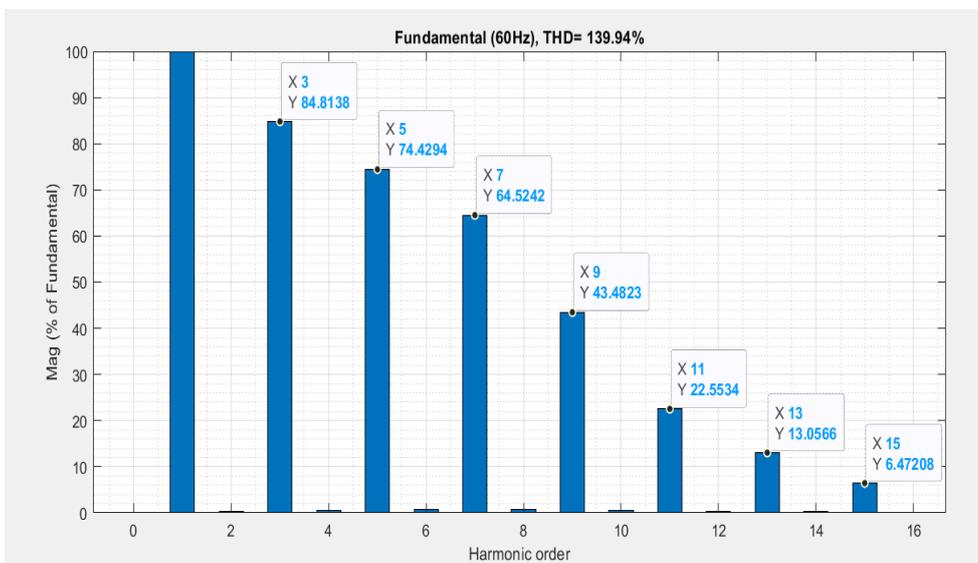


Fig. 30 Espectro de armónicos.

Al notar que existió un notable incremento debido a la extrapolación de la estación de soldadura, se continua con el estudio haciendo el debido conexiónamiento del transformador en Zig – Zag y observar cómo mitiga el tercer armónico de manera eficiente.

#### 4.4 Simulación de transformador en Zig – Zag para mitigar los armónicos generados por estación de soldadura electrónica

En esta sección, se describe el procedimiento de simulaciones realizadas y los resultados obtenidos al utilizar el transformador en Zig – Zag para la mitigación de armónicos generados por la estación de soldadura.

Se inició con la elaboración de una carga no lineal que asemeje los valores de armónicos obtenidos por el analizador de red y realizar las simulaciones para observar el comportamiento de ondas de voltaje y corriente de la estación en un sistema monofásico y en un sistema trifásico.



#### 4.4.1 *Extrapolación de estación de soldadura electrónica sin transformador en Zig – Zag*

Para verificar el correcto funcionamiento del transformador en Zig – Zag, se procedió a realizar la extrapolación de la estación de soldadura en un sistema trifásico y observar el comportamiento del espectro armónico. La conexión de la estación se realizó en paralelo juntamente con las otras estaciones para que haya tres estaciones por línea.

Esta simulación se realizó sin la integración del transformador en Zig – Zag como se observa en la Figura 31.

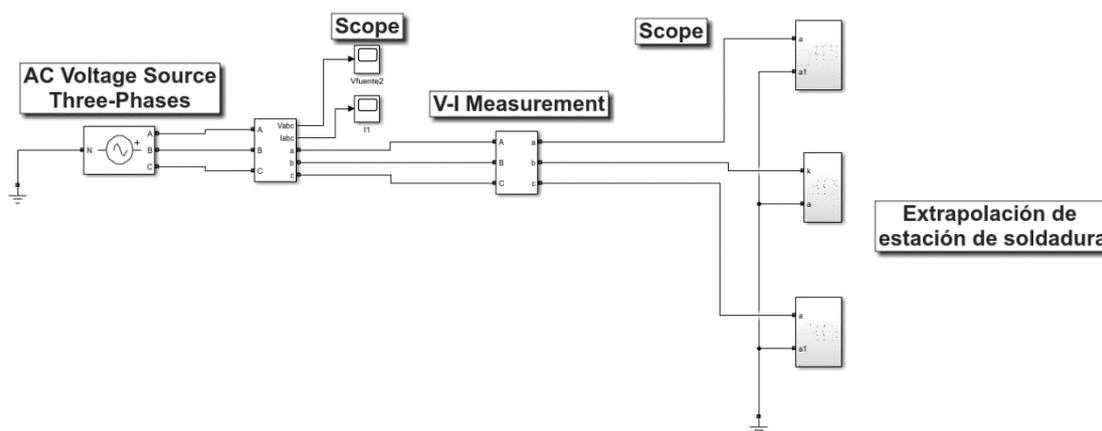


Fig. 31 Extrapolación de estación de soldadura en sistema trifásico AC.

En la Figura 32 se observa las ondas de voltaje que entrega la fuente trifásica, correctamente desfasado  $120^\circ$ , con un voltaje que está oscilando entre los 127 [V], cada línea de distinto color, para que al momento de indicar las ondas de corriente se identifique cual color es relacionado con la onda de voltaje.

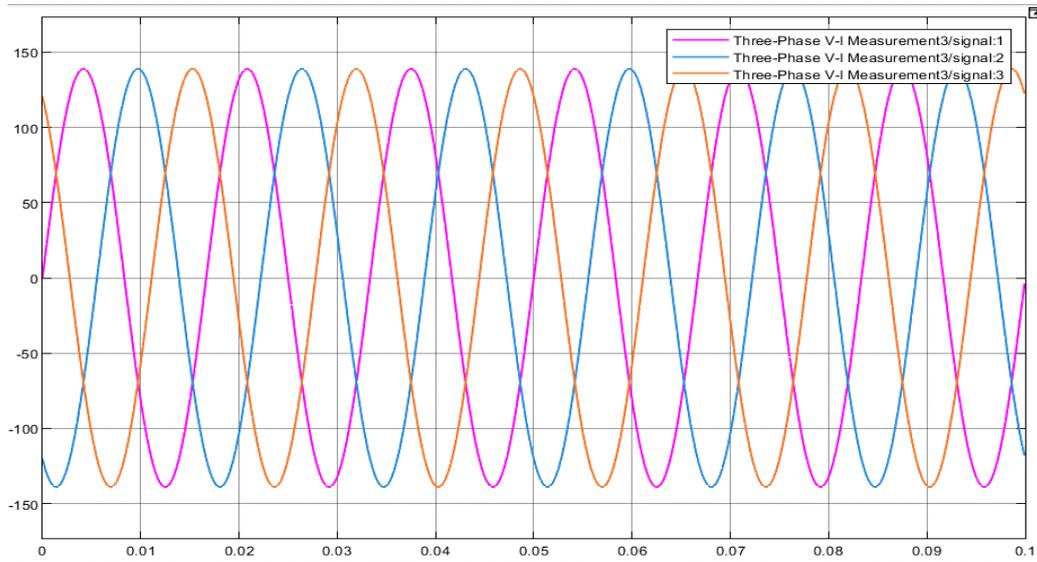


Fig. 32 Onda de voltaje en sistema trifásico con carga instalada

En la Figura 33 se observó que existe gran inyección de armónicos hacia la onda de corriente debido a la extrapolación de la estación de soldadura, la inyección de armónicos debido a la carga no lineal, muestra la onda de corriente distorsionada.

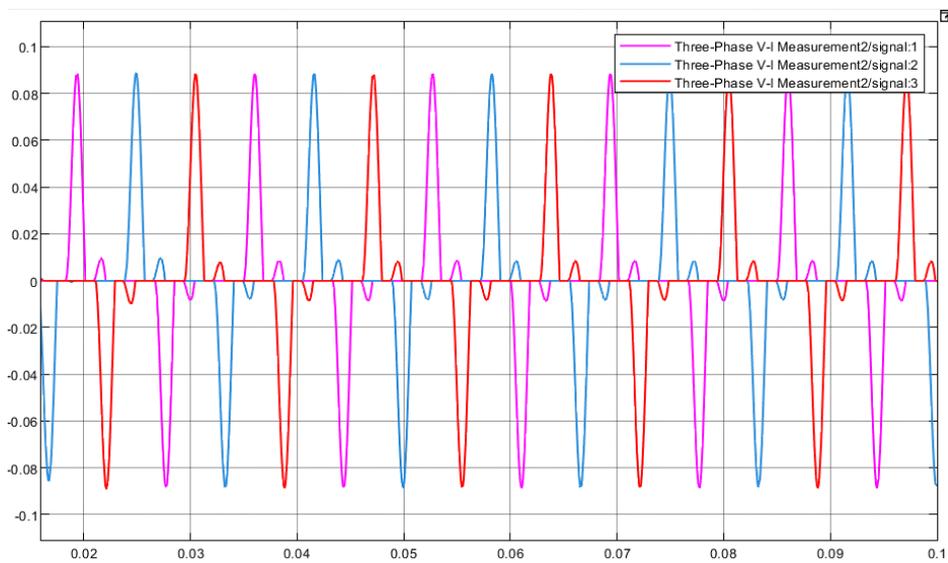


Fig. 33 Onda de corriente con presencia de armónicos generados por extrapolación de estación de soldadura.



Con el bloque de simulación Powergui se procedió a realizar un análisis de cada una de las líneas de corriente, donde se obtuvo un THDI (%) de 142.67% en la línea 1, en la línea 2 se obtuvo un THDI (%) de 139.47% y en la línea 3 un THDI (%) de 139.76% como se observa en la Figura 34, este incremento significativo es debido a la extrapolación de la estación de soldadura.

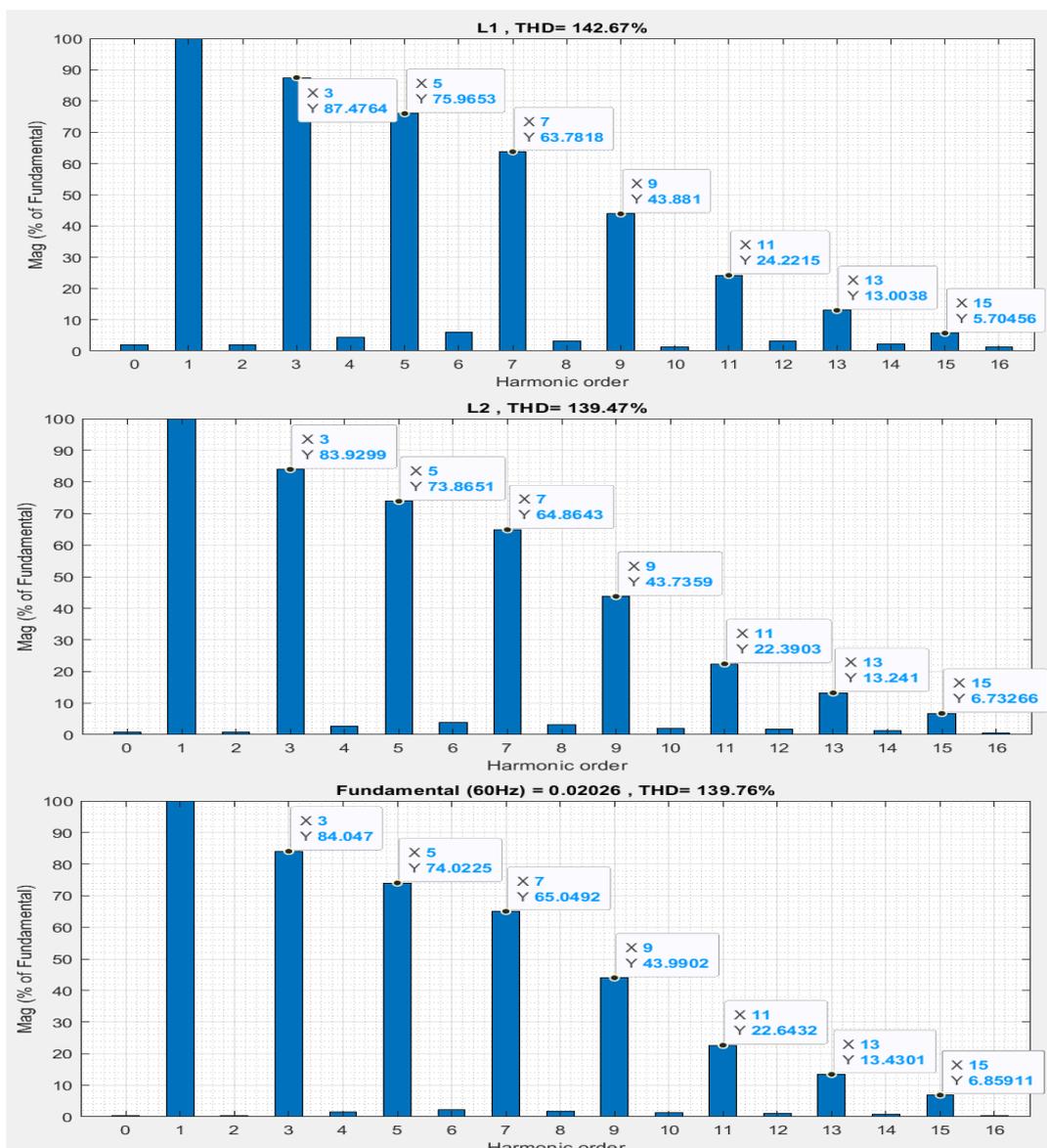


Fig. 34 Espectro de armónicos en las líneas L1, L2 y L3.



Así mismo, se observa un incremento de THDI (%) individual en cada una de las líneas que conforman el sistema trifásico, el porcentaje de tercer armónico, que es el que predomina en la investigación. En la línea 1 se observa un 87,47% de armónico 3, respecto a la línea 2 se tiene un 83,92% de tercer armónico y para la línea 3 un incremento de 84,04% en el tercer armónico.

Estos valores son muy similares entre las tres líneas debido a que son cargas iguales, esto quiere decir que cada una genera un porcentaje de contaminación similar, es por eso la razón de que en cada línea debido al desfase de  $120^\circ$  no existe mucha diferencia en el THDI (%) como el THDI (%) individual.

#### ***4.4.2 Extrapolación de estación de soldadura electrónica con transformador en Zig – Zag***

Por último, se realiza conexión con el transformador en Zig – Zag como se describió con anterioridad, donde se recalca la configuración en Zig - Zag en un banco de transformadores, que contienen 3 bobinados principales iguales, donde en el bobinado secundario está dividido en 2 partes iguales y así se obtienen las 6 ramas de bobinados.

Dentro de la elaboración en Simulink se utilizaron diversos bloques ya antes mencionados que ayudaron a representar el sistema trifásico como el bloque de fuente de alimentación trifásica, el bloque de V-I Measurement que ayuda a observar mediante un Scope la forma de onda de corriente y voltaje y poder enviar al Powergui para observar el espectro armónico que se está generó en el sistema.

La extrapolación de 3 estaciones de soldadura a cada línea del sistema trifásico, y cada una de estas líneas se encuentra conectada a un bloque V-I Measurement para



observar si el espectro armónico tuvo una reducción considerable a comparación del sistema sin utilizar el transformador en Zig – Zag.

En la Figura 35 se observa la conexión del transformador en Zig – Zag a la extrapolación de la estación de soldadura electrónica.

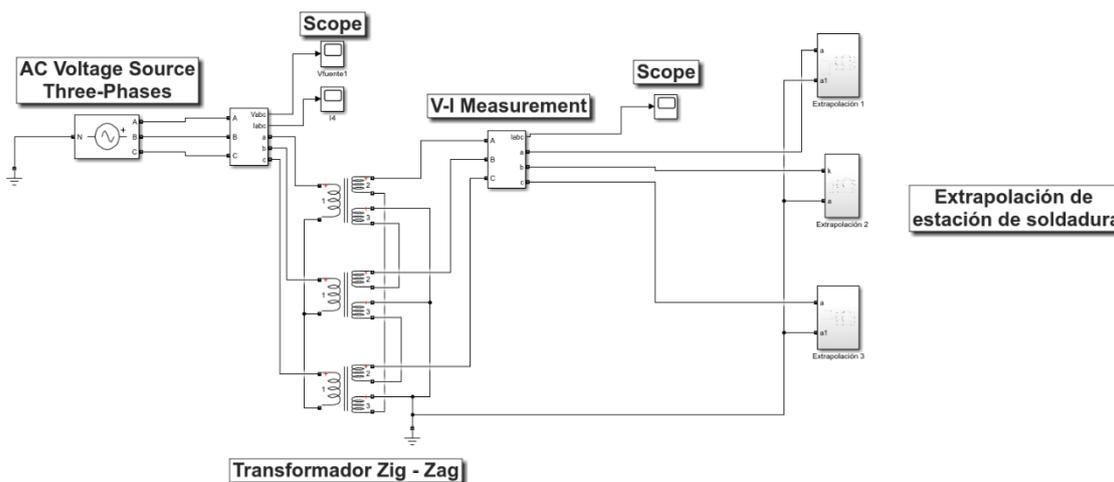


Fig. 35 Extrapolación de estación de soldadura conectado al transformador en Zig – Zag.

Debido a que la mitigación se generó en el bobinado secundario, donde se encuentra la conexión en Zig – Zag, todas las cargas tienen que estar conectadas al punto en común de dicha conexión, este punto en común es el que se deriva a tierra o neutro, y es por eso que ahí se encuentra atrapado el tercer armónico en la conexión mixta que presenta el devanado secundario.

En la Figura 36 se aprecia que después de hacer uso del transformador en Zig - Zag, existe un cambio considerable en la forma de la onda, ya siendo un poco más sinusoidal con menos inyección de armónicos.

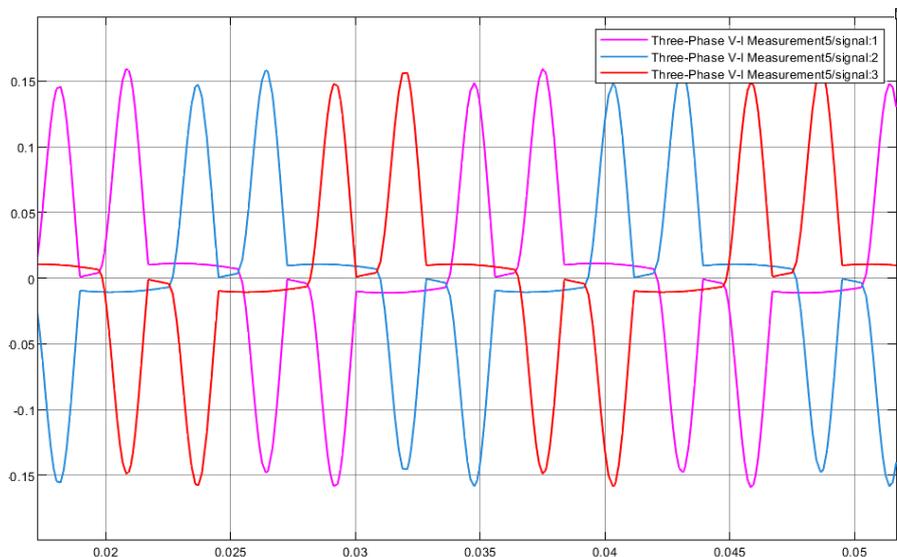


Fig. 36 Onda de corriente después de hacer uso del transformador en Zig – Zag.

Una vez analizada las formas de onda de cada una de las líneas, se observó el espectro armónico con el bloque de simulación Powergui, lo que se observa a primera vista que el transformador en Zig - Zag cumplido con el objetivo deseado, disminuyendo de manera significativa el espectro de tercer armónico en cada una de las líneas

Se observó en la Figura 37 que existe una disminución de THDI (%) en la línea 1 a 93.23% y un valor de tercer armónico a 1.06 %, lo que significa que existió una reducción considerable, pero a consideración del armónico quinto y séptimo, no altero el uso del transformador y estos espectros armónicos se mantienen.

En la línea dos se observó de igual manera un THDI (%) de 93,73% y una disminución considerable del tercer armónico a 0.68%, en la línea 3 se observó una disminución de THDI (%) de 94,19% y un tercer armónico en 1,52% haciendo efectiva la mitigación de armónicos de secuencia cero, porque se observa que los armónicos de este tipo también disminuyeron en comparación a la Figura 34.

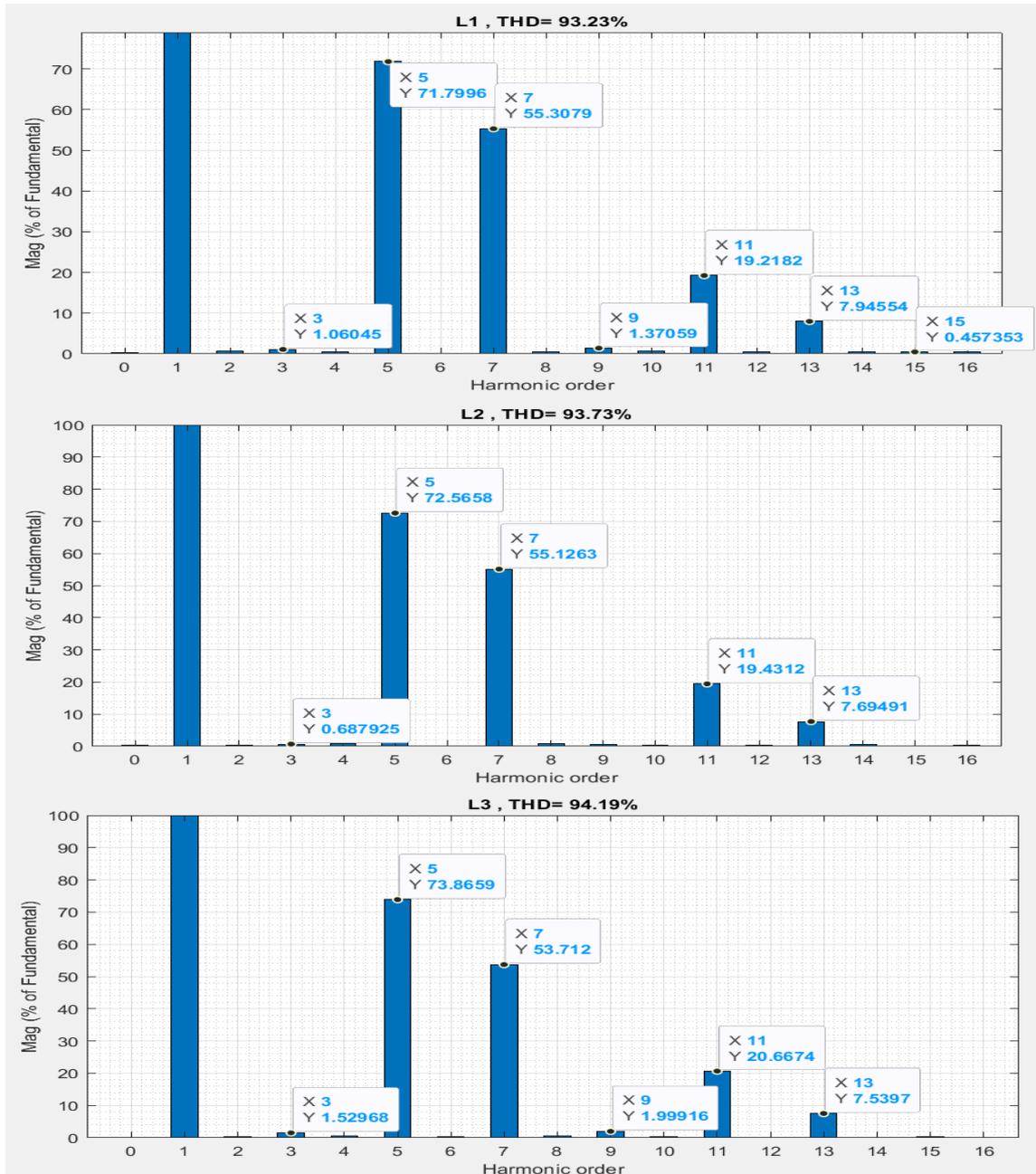


Fig. 37 Espectro de armónicos de corriente después de hacer uso del transformador en Zig – Zag.

Estos resultados descritos anteriormente, muestran que el transformador en Zig - Zag es altamente efectivo en la mitigación de armónicos de secuencia cero, haciendo énfasis en el de tercer orden que es un punto importante del estudio. El transformador



demuestra la capacidad de mejorar significativamente la calidad de la energía eléctrica y presentar una mayor estabilidad en el sistema del laboratorio de electrónica de potencia. Pero manteniendo los armónicos impares todavía dentro de la red, es por tal motivo que se optó dentro de simulación hacer uso de un filtro pasivo para mitigar el espectro de armónicos que todavía se encuentran dentro de la onda sinusoidal de corriente.

En la Figura 38 se observa la implementación de cada filtro en paralelo a cada una de las extrapolaciones realizadas en simulación.

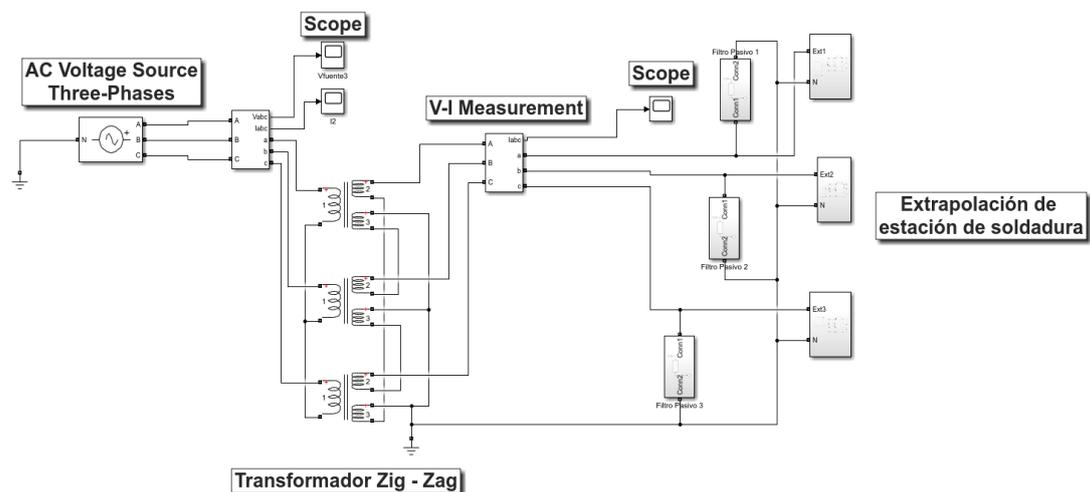


Fig. 38 Implementación de Filtro Pasivo

Se observó que la onda fundamental de corriente es mucho más sinusoidal debido al uso de estos filtros que ayudan a mitigar de manera efectiva los armónicos de orden impar como se observa en la Figura 39.

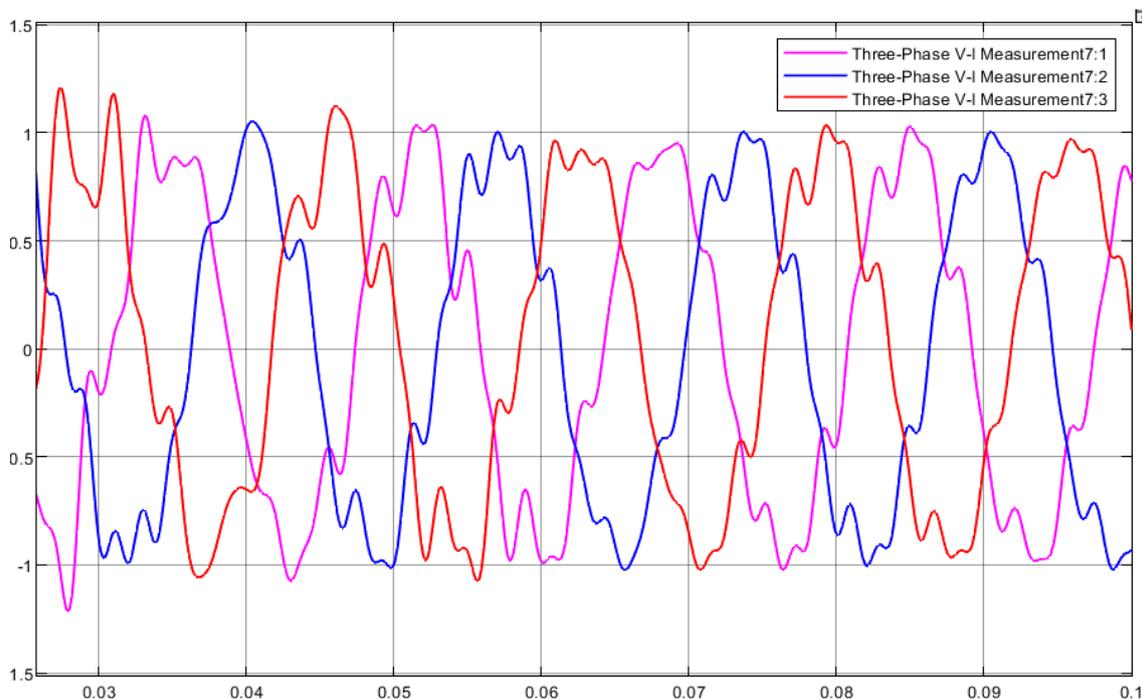


Fig. 39 Onda de Corriente con Filtro Pasivo en transformador en Zig – Zag.

Como se mencionó con anterioridad se hace uso del bloque de Powergui para analizar el espectro de armónicos que se presenta en cada una de las líneas, dando como resultado una mitigación efectiva a cada espectro de armónicos de orden impar.

En la Figura 40 se observó en la línea 1 que al mitigar el armónico de orden quinto a un 10.78% y el séptimo a 1.63% el total de distorsión armónica que existe dentro de la onda sinusoidal disminuye de manera considerable a un 11.16%. En la línea 2 de igual manera se observó un THDI (%) de 10.25% con reducción en los armónicos quinto a 8.14% y séptimo a 2.07%. Por último, en la línea tres el THDI (%) disminuye a un total de 9.17% con una reducción en el quinto armónico a 4.52% y séptimo a 2.64% haciendo efectivo el uso de estos filtros pasivos.

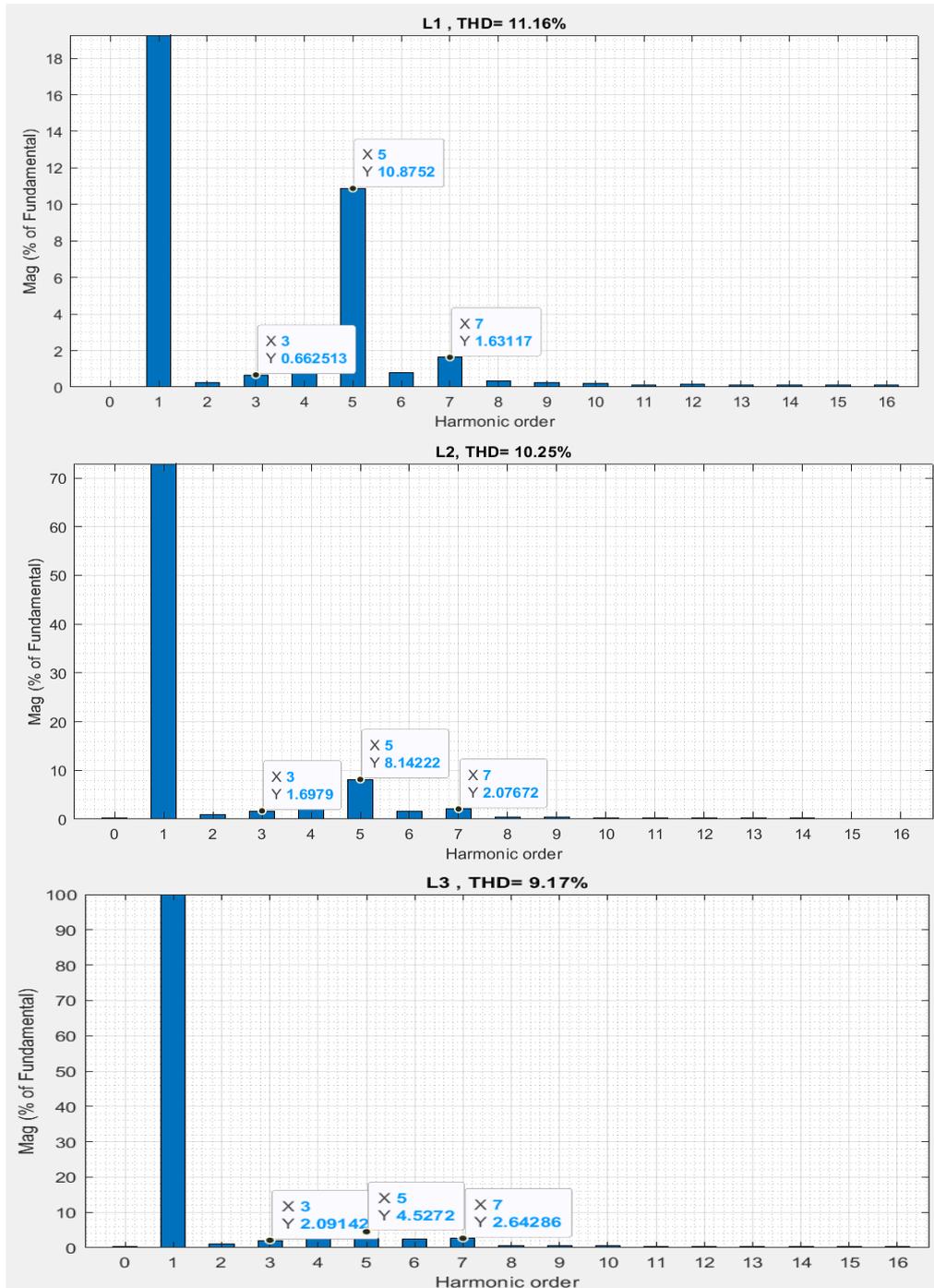


Fig. 40 Espectro de armónicos en L1, L2, L3 con uso de filtro pasivo después de utilizar el Transformador Zig – Zag

El uso de filtros pasivos es un gran soporte al Transformador en Zig – Zag, ya que el filtro al configurarse en la frecuencia que se desea mitigar, ayuda de manera



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



considerable a la onda fundamental. Es así evitando un menor número de inyección de corrientes armónicas que son generadas por distintas cargas no lineales.



## CONCLUSIONES

Con la investigación desarrollada se concluyó que la presencia de armónicos en los sistemas eléctricos es un fenómeno causado por cargas no lineales, la estación de soldadura electrónica al ser una de ellas genera fluctuaciones en la forma de onda de corriente, lo que puede llevar a sobrecalentamiento de cables, daños en equipos sensibles y dispositivos electrónicos que se encuentren conectados en la misma red. El método de mitigación de transformador en Zig – Zag es eficaz al reducir los armónicos de secuencia cero.

El diseño del transformador en Zig-Zag se basó en datos del analizador de red como espectro de armónicos, potencia, voltaje y corriente, útiles para calcular parámetros de construcción. La estación generó un THDI (%) del 66% y un tercer armónico del 39.69%, afectando la onda fundamental de voltaje. Al extrapolar a un sistema monofásico, la corriente aumentó a 17A y se estabilizó en 6A, con un THDI (%) del 58.99% y un tercer armónico del 38.15%. Al extrapolar a tres estaciones de soldadura, el THDI (%) aumentó significativamente a 139.4%, mostrando alta distorsión armónica. Esto demuestra que el elevado THDI (%) puede afectar de manera significativa la onda fundamental de voltaje, y múltiples estaciones de soldadura aumentan la distorsión armónica en el sistema.

La configuración en Zig – Zag del transformador, demostró ser altamente efectivo en la mitigación de armónicos de secuencia cero, especialmente en el de tercer orden generados por la estación de soldadura electrónica, dentro del entorno de simulación se observó una reducción significativa en cada una de las líneas en el sistema trifásico, en la



L1 reduciéndose a 1,06%, en la L2 reduciéndose a 0,68% y por último en la L3 reduciéndose a 1,52%, manteniéndose el espectro de armónicos de orden impar (5to, 7mo, 11vo, etc.) en cada una de las líneas, es por tal motivo que para mitigar los armónicos de orden impar se hizo uso de filtros pasivos sintonizados a cada frecuencia del espectro armónico para obtener una mejoría en la onda senoidal de corriente y un THDI (%) mucho menor.



## RECOMENDACIONES

Se sugiere investigar la implementación del banco de transformadores en conexión Zig – Zag, como se realizó en las simulaciones, para evaluar su desempeño práctico con cargas reales. Esto permitirá validar las simulaciones, ofrecer soluciones más económicas en lo que se refiere a la construcción física de un transformador trifásico, así como efectivas en lo que se trata de cargas no lineales en sistemas trifásicos. El promover investigaciones que evalúen el estado de la red eléctrica, y concienticen a los estudiantes sobre la importancia de la calidad de la energía eléctrica.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] R. R. Trejo, J. Aurelio, y M. Rios, “Mitigación de la distorsión armónica e interarmónica en redes eléctricas utilizando filtros digitales”, 2021, [En línea]. Disponible en: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/6385](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6385)
- [2] ARCERNNC, “Regulacion-002-20”, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/regulaciones/>
- [3] D. Torres, “Estudio de la contaminación eléctrica generada por la estación de soldadura electrónica a la red del laboratorio de electrónica de potencia de la carrera de electricidad”, bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12109>
- [4] J. J. Marulanda Durango, A. Escobar Mejía, y L. A. Alzate Gómez, “Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia”, *Tecnura*, vol. 21, núm. 52, pp. 15–31, abr. 2017, doi: 10.14483/UDISTRITAL.JOUR.TECNURA.2017.2.A01.
- [5] J. Esterlin, C. Sevilla, J. Pablo, y A. Arévalo, “Mitigación de problemas de calidad de energía causado por las oscilaciones de potencia reactiva de un horno de arco eléctrico (EAF) mediante un compensador estático síncrono (STATCOM)”, 2022, [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22572>



- [6] CIRCUTOR, “Armónicos eléctricos - CIRCUTOR”. [En línea]. Disponible en:  
<https://circutor.com/soporte/formacion/notebooks/armonicos-electricos/>
- [7] G. Szwarc, N. Rocchia, D. M. Ferreyra, y E. Bernardi, “Transformada discreta de Fourier: demostración didáctica sobre distorsión armónica en redes eléctricas”, *VIII Jornadas de Ciencia y Tecnología para Alumnos*, pp. 263–268, sep. 2018, [En línea]. Disponible en: <http://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/3526>
- [8] A. Felipe, B. Franco, L. Antonio, N. Vega, y W. M. Giral Ramírez, “Análisis de distorsión armónica en iluminación LED”, *Revista Vínculos*, vol. 14, núm. 2, pp. 95–107, dic. 2017, doi: 10.14483/2322939X.12520.
- [9] J. Arrillaga Garmendia y L. I. Eguíluz Morán, *Armónicos en sistemas de potencia*. Universidad de Cantabria, 1994.
- [10] R. Darussalam, A. Rajani, T. D. Atmaja, A. Junaedi, y M. Kuncoro, “Study of Harmonic Mitigation Techniques Based on Ranges Level Voltage Refer to IEEE 519-2014”, *Proceeding - 2020 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application: Sustainable Energy and Transportation: Towards All-Renewable Future, ICSEEA 2020*, pp. 14–21, nov. 2020, doi: 10.1109/ICSEEA50711.2020.9306137.
- [11] C. X. Muñoz Peñafiel, “Diseño e implementación de un transformador zig-zag para mitigación de armónicos de corriente.”, 2022. [En línea]. Disponible en:  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22580>



- [12] F. Barrero, *Sistemas de energía eléctrica*. Madrid ESPAÑA: Paraninfo, S.A, 2004.  
[En línea]. Disponible en:  
[https://www.google.com.co/books/edition/Sistemas\\_de\\_energ%C3%ADa\\_el%C3%A9ctrica/wZoyiFKf5IkC?hl=es&kptab=editions&gbpv=1](https://www.google.com.co/books/edition/Sistemas_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica/wZoyiFKf5IkC?hl=es&kptab=editions&gbpv=1)
- [13] J. Balcells *et al.*, *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica*, vol. 1. Marcombo, 2016. [En línea]. Disponible en:  
[https://books.google.com/books/about/Eficiencia\\_en\\_el\\_uso\\_de\\_la\\_Energ%C3%ADa\\_El%C3%A9.html?hl=es&id=fmCa9L6nTDoC](https://books.google.com/books/about/Eficiencia_en_el_uso_de_la_Energ%C3%ADa_El%C3%A9.html?hl=es&id=fmCa9L6nTDoC)
- [14] IECOR, “Calidad de Energía Eléctrica”. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>
- [15] R. A. Barragán Llanos, “La generación de energía eléctrica para el desarrollo industrial en el ecuador a partir del uso de las energías renovables”, Universidad Internacional SEK, 2020. [En línea]. Disponible en:  
<http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/4023>
- [16] M. Polo y J. Bernardo, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra”, 2017, [En línea]. Disponible en:  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- [17] Calidad de la Energía Eléctrica, “CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”, nov. 2014.
- [18] P. Rodríguez Cortés, “Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos”, *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*,



p. 418, mar. 2005, [En línea]. Disponible en:

<https://www.tdx.cat/handle/10803/6295>

[19] V. Gonzales, “Perturbaciones en el sistema eléctrico y formas de mitigarlo”, dic. 2021.

[20] Pinyol Ramon, “ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN”, *SALICRU*, 2016.

[21] Clou Global, “Fluctuación de voltaje y parpadeo ‘flicker’ | CLOU GLOBAL”. [En línea]. Disponible en: <https://clouglobal.com/es/fluctuacion-de-voltaje-y-parpadeo-flicker/>

[22] “¿Qué son las variaciones de frecuencia? | Blog Pepeenergy”. [En línea]. Disponible en: <https://www.pepeenergy.com/blog/glosario/definicion-variaciones-de-frecuencia/>

[23] D. Morales, “Análisis de armónicos en transformadores de potencia monofásicos mediante simulación”, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, 2017.

[24] Arauz Amador Andrick Antonick y Urbina Narváez Edwin Ariel, “PROPUESTA DE BALANCE DE CARGA EN LOS PANELES ELÉCTRICOS PRINCIPALES POR CENTRO DE TRANSFORMACIÓN DEL RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://library.co/document/z3d9wn6m-universidad-ingenier%C3%ADa->



universitario-electrotecnia-computaci%C3%B3n-departamento-ingenier%C3%ADa-el%C3%A9ctrica.html

- [25] S. M. Atencia Pazmiño y L. F. Ortiz Santana, “Comportamiento de un sistema fotovoltaico en presencia de cargas no lineales”, 2022, Consultado: el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23571>
- [26] F. E. R. Delgado, “Análisis del comportamiento de las cargas no lineales en los Motores eléctricos de Corriente Alterna”, 2021.
- [27] J. R. Bravo, “Identificación de patrones de comportamiento de armónicos en circuitos de distribución”, *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electroenergética*, jun. 2017, [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7995>
- [28] E. Power Quality - EE8006, “Effects of Harmonics”. [En línea]. Disponible en: [https://www.brainkart.com/article/Effects-of-Harmonics\\_11723/](https://www.brainkart.com/article/Effects-of-Harmonics_11723/)
- [29] J. Hernandez, “Capitulo 2-Filtros pasivos Tecnología I (Universidad de El Salvador)”, 2020.
- [30] “Transformadores Zigzag | PDF | Transformador | Corriente eléctrica”. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/236243074/Transformadores-Zigzag>



- [31] D. Figueroa, K. E. Macias, J. Molina, y P. Elizalde, “Modelado de los efectos de un transformador en ZIG - ZAG en una red de distribución”, *UTEQ*, núm. Proyecto, 2020.
- [32] “Estacion de Soldado YAXUN V83 Comprar Online”. Consultado: el 11 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnoland.com.ar/productos/estacion-de-soldado-yaxun-v83/#product-gallery>
- [33] METREL, “PowerQ4 y PowerQ4 Plus MI 2592 y MI 2792 Manual de funcionamiento”, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.metrel.si>
- [34] MATLAB, “Simulación y diseño basado en modelos con Simulink - MATLAB”. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>
- [35] Obando Larry, “Sistema de 2do orden subamortiguado – dademuchconnection”. [En línea]. Disponible en: <https://dademuchconnection.wordpress.com/2020/11/02/sistema-de-2do-orden-subamortiguado/>
- [36] C. Sankaran, “The Basics of Zigzag Transformers | EC&M”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecmweb.com/content/article/20897030/the-basics-of-zigzag-transformers>
- [37] ELT - 2510 “Circuitos Eléctricos II”, “LABORATORIO NO. 2 APLICACIÓN DE DIAGRAMAS FASORIALES TRIFÁSICOS A LA CONEXIÓN DE



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS”, núm. REDES TRIFÁSICAS Y SUS APLICACIONES, 2010.

- [38] M. A. Rodríguez Pozueta, “Transformadores”, *Universidad de Cantabria*, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://personales.unican.es/rodrigma/pdfs/trafos.pdf>
- [39] W. T. Culqui Moposita, “Diseño de un sistema de protección de los generadores en conexión y no aterrizados para detectar fallas a tierra en la central hidroeléctrica ‘la península’ perteneciente a la EEASA en el período agosto 2013 – agosto 2014”, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/2958>
- [40] Pérez, “Dimensionamiento de transformadores Zig-Zag y resistencias de puesta a tierra (PAT)”, *Ingeniería Eléctrica Online*. Consultado: el 4 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingenieriaelectrica.online/dimensionamiento-transformador-zigzag/>
- [41] IEEE 142, “IEEE 142-2007 | Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”, p. 23, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/607615252/IEEE-142-2007-ESPANOL>
- [42] D. S. Behar Rivero, “Introducción a la Metodología de la Investigación”, *Editorial Shalom*. 2008.
- [43] Catelló Llopis David, “Metodología experimental”.
- [44] S. L. Hernández Mendoza y E. Guzmán Olgún, “Métodos matemáticos en la investigación”, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 2022.



- [45] A. Gloag, Kramer Melissa, y Gloag Anne, “Interpolación y extrapolación lineal”, cK-12. Consultado: el 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-conceptos-de-%C3%A1lgebra-nivel-b%C3%A1sico-en-espa%C3%B1ol/section/5.11/primary/lesson/interpolaci%C3%B3n-y-extrapolaci%C3%B3n-lineal-bsc-alg-spn/>
- [46] Nohlen Dieter, “Método Comparativo”, *Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, 2020, doi: <https://tinyurl.com/y2lh7foq>.
- [47] M. Perez, “ConceptoDefinición | ¿Qué es Metodología? - Definición, Tipos y Ejemplos”. Consultado: el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://conceptodefinicion.de/metodologia/>
- [48] R. Gonzáles Cardenas, “METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN”, *Universidad Naval*, 2017.
- [49] Benétiez Guillermo, “Cálculo del Transformador”, [En línea]. Disponible en: [https://es.slideshare.net/merche\\_pirx/calculo-de-transformadores-119505859](https://es.slideshare.net/merche_pirx/calculo-de-transformadores-119505859)
- [50] Ramírez Alberto, *Diseño transformador monofásico - YouTube*, (2021). [En línea Video]. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=KZJzHR69CbA&list=PLr1MG9ixNQawxIJuHwkjOEej\\_HR-how21](https://www.youtube.com/watch?v=KZJzHR69CbA&list=PLr1MG9ixNQawxIJuHwkjOEej_HR-how21)



- [51] MAGNUM TyC, *Transformador Tipo Acorazado 60 hz - Diseño de #transformadores (Fórmulas y aplicación) - YouTube*, (2018). [En línea Video].  
Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=dkKoSUI8NPQ>
- [52] “Cables en electrónica - Su equivalencia de estándar AWG a diámetro, carga máxima”. [En línea]. Disponible en: <https://soelectroshop.com/es/blog/cables-en-electronica-su-equivalencia-de-estandar-awg-a-diametro-carga-maxima-n74>
- [53] J. M. Astorga Gómez, R. Alfonso, A. Córdova, Y. Antonio, y I. Salinas, “Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal K factor estimation in distribution transformers using linear regression models”, vol. 20, pp. 29–40, 2016, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a02.



## ANEXOS

**Anexo 1.** Conexión del analizador de red al tablero del laboratorio de electrónica de potencia



**Anexo 2.** Configuración de conexión del analizador de red



**Anexo 3.** Estación de soldadura electrónica en laboratorio conectada en una línea**Anexo 4.** Conexión de estación de soldadura a sistema monofásico



### Anexo 5. Obtención de datos registrados por el analizador de red



### Anexo 6. Código de para grafica de corriente, datos adquiridos mediante base de datos Excel

```
%Corriente
plot(t,y,"LineStyleMode","auto")
title('I1 Pro [A]')
xlabel('tiempo [Seg]')
ylabel('Corriente [A]')
legend("I1 [A]")
grid on
grid minor
```

### Anexo 7. Código para graficar función de transferencia con grafico de corrientes

```
%Funcion de transferencia
plot(data,"LineStyleMode","auto")
grid on

%todo unido
plot(t,y,'b-', "LineStyleMode", "auto");
hold on;
plot(data,'r--', "LineStyleMode", "auto");
hold off
xlabel('tiempo [Seg]')
ylabel('Corriente [A]')
```



```

title('Corriente')
grid on
grid minor
legend('Corriente salida','señal sistema de segundo orden')

```

#### Anexo 8. Código para graficar datos de voltaje

```

%%%Voltaje
plot(Voltaje,"LineStyleMode","auto")
title('U1 Pro [V]')
xlabel('tiempo [Seg]')
ylabel('Voltaje [V]')
xlim([0,241]);
ylim([127,131])
legend('L1 [V]')
grid on
grid minor

```

#### Anexo 9. Código para graficar potencia aparente

```

%%Potencia aparente
plot(aparente, 'LineStyleMode', 'auto', 'LineWidth', 1);
title('S1 Pro [VA]')
xlabel('tiempo [Seg]')
ylabel('P aparente [VA]')
xlim([0,160]);
ylim([0,800])
legend('S1 [VA]')
grid on
grid minor

```



## Anexo 10. Factor K

% Valores de corriente de cada armónico en amperios

I1 = 0.45; % Corriente fundamental

I3 = 0.1651;

I5 = 0.1445;

I7 = 0.1223;

I9 = 0.092;

I11 = 0.0696;

I13 = 0.053;

I15 = 0.04104;

% Cálculo del Factor K

$$K = (I1/I1)^2 * 1^2 + (I3/I1)^2 * 3^2 + (I5/I1)^2 * 5^2 + \dots$$

$$(I7/I1)^2 * 7^2 + (I9/I1)^2 * 9^2 + (I11/I1)^2 * 11^2 + \dots$$

$$(I13/I1)^2 * 13^2 + (I15/I1)^2 * 15^2;$$

% Mostrar resultados

fprintf('Factor K: %.2f\n', K);



Anexo 11. Cronograma de actividades

Objetivo	Actividades	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8				% de avance
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1. Describir causas y efectos principales que producen los armónicos y los métodos de mitigación.	1.1 Búsqueda bibliográfica de las causas y efectos de los terceros armónicos de corriente.	X	X	X	X																													30
	1.2. Búsqueda bibliográfica de los métodos para la mitigación de armónicos de corriente.					X	X																											
	1.3. Descripción de los métodos de mitigación de armónicos para determinar el método más adecuado.							X	X	X	X	X																						
2. Diseñar el transformador para la mitigación de armónicos generados por la estación de soldadura electrónica.	2.1 Adquisición de datos mediante el analizador de red cuando la estación de soldadura esté y no esté en uso.									X	X	X																						35
	2.2 Simular los efectos producidos por la estación de soldadura.											X	X	X																				
	2.3 Extrapolar los efectos de 3 estaciones de soldadura													X	X	X	X																	
3. Simular el transformador que mitigue los armónicos generados por la estación de soldadura.	3.1. Realizar el dimensionamiento del transformador.															X	X	X	X	X														35
	3.2 Elaborar el diseño en Simulink de Matlab con todos los parámetros ya establecidos.																	X	X	X	X	X												
	3.3. Simulación del diseño del prototipo con las 3 estaciones de soldadura electrónica.																					X	X	X	X									
Total																																		100%