



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADO**

### **MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**

#### **MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN**

**Título:**

**“ANÁLISIS DE LAS CARGAS NO LINEALES Y SU INCIDENCIA EN LA  
GENERACIÓN DE ARMÓNICOS DE LA NAVE DE SOLDADURA DE LA  
EMPRESA CIAUTO CÍA. LTDA. EN EL 2022”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad mención  
Sistemas Eléctricos de Potencia

**AUTOR:**

Ing. Jaime Efraín Pérez López

**TUTOR:**

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda MSc.

**LATACUNGA –ECUADOR**

**2023**

## **AVAL DEL TUTOR**

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Análisis de las cargas no lineales y su incidencia en la generación de armónicos de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. en el 2022**” presentado por Pérez López Jaime Efraín, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

## **CERTIFICO**

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, 02, agosto 2023



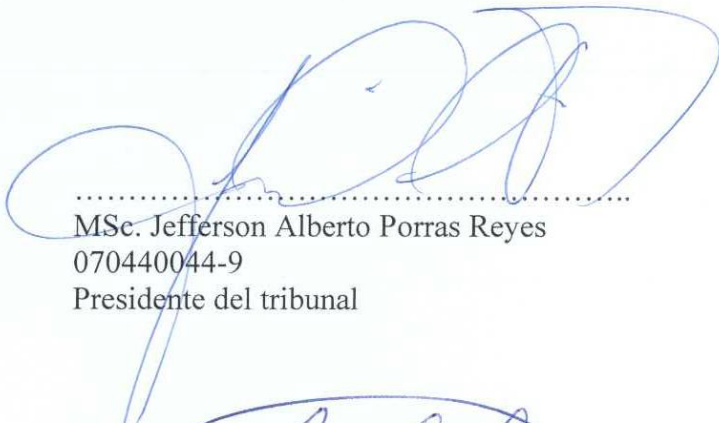
Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda MSc.

C.C. 171043449-7

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “**Análisis de las cargas no lineales y su incidencia en la generación de armónicos de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. en el 2022**” ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, 02, agosto, 2023



.....  
MSc. Jefferson Alberto Porras Reyes  
070440044-9  
Presidente del tribunal



.....  
MSc. Armando Salvador Freire Freire  
050384283-3  
Lector 2



.....  
MSc. William Germánico Yugcha Quinatoa  
050366023-5  
Lector 3

## DEDICATORIA

A mi pilar fundamental, los que dan sentido a mi vida mis hermosos hijos Pamela y Leonel, mi esposa Mayra.

A mis hermanos Christian y Jorge, por siempre estar en los momentos más difíciles.

A mis padres Magdalena y Jaime, su formación me ha impulsado a seguir superándome.

Jaime

## **AGRADECIMIENTO**

A mi angelito que está en el cielo, por siempre guiar mis pasos.

Al MSc. Franklin Vázquez por compartir todo su conocimiento en la elaboración de esta investigación.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por los conocimientos impartidos en toda mi formación profesional.

Jaime

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, agosto, 02, 2023



.....  
Ing. Jaime Efraín Pérez López  
C.C.: 050307429-6

## RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, agosto, 02, 2023

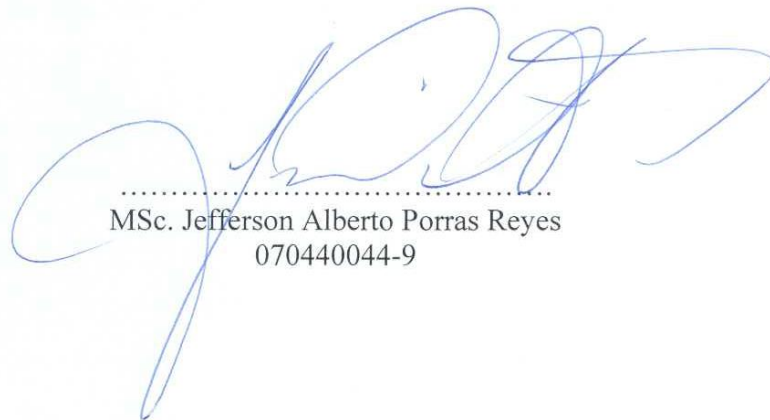


.....  
Ing. Jaime Efraín Pérez López  
C.C.: 050307429-6

## AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “**Análisis de las cargas no lineales y su incidencia en la generación de armónicos de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. en el 2022**”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, agosto, 02, 2023



.....  
MSc. Jefferson Alberto Porras Reyes  
070440044-9



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**

**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título: “ANÁLISIS DE LAS CARGAS NO LINEALES Y SU INCIDENCIA EN LA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS DE LA NAVE DE SOLDADURA DE LA EMPRESA CIAUTO CÍA. LTDA. EN EL 2022”**

**Autor:** Ing. Pérez López Jaime Efraín

**Tutor:** Franklin Vásquez Teneda MSc.

**RESUMEN**

Este proyecto se centró en realizar un análisis exhaustivo de las cargas no lineales y su influencia en la generación de armónicos en una nave de soldadura perteneciente a la empresa CIAUTO Cía. Ltda. Se realizó un estudio detallado sobre la presencia de armónicos en una red eléctrica y su potencial para crear una serie de problemas adversos, como vibraciones en máquinas eléctricas, sobrecarga en fases y conductores neutros y disparar los interruptores principales. Para determinar los armónicos más significativos, se utilizó el analizador Fluke para realizar un análisis más preciso, siendo los más representativos el tercero, quinto y séptimo armónico. En última instancia, se realizó un análisis íntegro para la implementación de correcciones específicas para mitigar los armónicos anteriores utilizando filtros pasivos. Estos filtros fueron muy efectivos para reducir el nivel de armónicos en la nave de soldadura, minimizándolos en hasta en un 81% como es el caso del séptimo armónico. Esta intervención ha llevado a una mejora significativa en el rendimiento y la eficiencia del sistema eléctrico de la nave de soldadura, lo que evita problemas asociados con la presencia de armónicos y sus efectos adversos en los equipos eléctricos.

**PALABRAS CLAVE:** NAVE DE SOLDADURA, FLUKE, ARMÓNICOS, FILTROS, SOBRECARGAS.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCION DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**THEME:** "ANALYSIS OF NON-LINEAR LOADS AND THEIR INCIDENCE IN THE GENERATION OF HARMONICS IN THE WELDING HALL OF THE COMPANY CIAUTO CÍA. LTDA. IN 2022".

**Author:** Ing. Pérez López Jaime Efraín

**Tutor:** Franklin Vásquez Teneda MSc.

**ABSTRACT**

This project focused on a comprehensive analysis of non-linear loads and their influence on the generation of harmonics in a welding hall belonging to the company CIAUTO Cía. Ltda. A detailed study was made of the presence of harmonics in an electrical network and their potential to cause a series of adverse problems, such as vibrations in electrical machines, overload in phases and neutral conductors, and tripping of main breakers. To determine the most significant harmonics, the Fluke analyzer was used to perform a more accurate analysis, the third, fifth, and seventh harmonic being the most representative. Ultimately, a comprehensive analysis was carried out for the implementation of specific corrections to mitigate the previous harmonics using passive filters. These filters were very effective in reducing the level of harmonics in the welding hall, minimizing them by up to 81%, as in the case of the seventh harmonic. This intervention has led to a significant improvement in the performance and efficiency of the electrical system in the welding hall, avoiding problems related to the presence of harmonics and their adverse effects on the electrical equipment.

**KEYWORDS:** WELDING HALL, FLUKE, HARMONICS, FILTERS, OVERLOADS.

Yo Erika Cecilia Borja Salazar con cédula de identidad número: 0502161094 Licenciada en: Ciencias de la Educación especialización inglés, con número de registro de la SENESCYT: 1020-07-747814; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: Análisis de las cargas no lineales y su incidencia en la generación de armónicos de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. en el 2022 de: Jaime Efraín Pérez López aspirante a magister en Electricidad mención en Sistemas Eléctricos De Potencia.

  
Erika Cecilia Borja Salazar  
050216109-4

Latacunga, agosto ,02, 2023

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AVAL DEL TUTOR.....	ii
AVAL DEL TRIBUNAL.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.....	vi
RENUNCIA DE DERECHOS.....	vii
AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Antecedentes.....	1
Planteamiento del problema.....	1
CAPITULO I.....	6
1.1    Antecedentes de la investigación.....	6
1.2    Fundamentación Teórica.....	8
1.2.1    Tipos de Cargas.....	8
1.2.2    Armónicos.....	11
1.2.3    Parámetros de los armónicos.....	15
1.2.4    La frecuencia.....	15
1.2.5    La Secuencia.....	16

1.2.6	Índices para la medición de armónicos .....	17
1.2.7	Índices para armónicos de corriente.....	18
1.2.8	Índices para armónicos de tensión.....	18
1.2.9	Medición de armónicos .....	19
1.2.10	Normativa.....	20
1.2.11	Filtros.....	25
1.2.12	Filtros pasivos.....	25
1.2.13	Filtros Activos .....	27
1.2.14	Balance de cargas .....	28
1.2.15	Cambio o repotenciación de conductores.....	29
1.3	Fundamentación Metodológica .....	29
1.3.1	Nivel de investigación .....	29
1.3.2	Tipo de investigación .....	29
1.3.3	Métodos de investigación.....	30
1.3.4	Técnicas e instrumentos .....	30
1.4	Conclusiones Capítulo I .....	31
CAPÍTULO II.....		32
2.1	Título del proyecto .....	32
2.2	Objetivo del proyecto .....	32
2.3	Descripción de la propuesta .....	32
2.4	Metodología, procedimientos y técnicas para el cumplimiento de los objetivos planteados.....	32
2.4.1	Descripción del área de estudio.....	32
2.4.2	Diagnóstico del sistema eléctrico actual de la nave de soldadura .....	39

2.4.3	Niveles de Voltajes.....	40
2.4.4	Niveles de corriente.....	43
2.4.5	Factor de Potencia .....	45
2.4.6	Flicker.....	46
2.4.7	Distorsión Armónica .....	47
2.4.8	Armónicos de Corriente .....	52
2.5	Conclusiones Capitulo II.....	54
<b>CAPITULO III .....</b>		<b>56</b>
3.1	Título de la Propuesta.....	56
3.2	Justificación.....	56
3.3	Objetivo .....	56
3.4	Balance de cargas .....	56
3.5	Dimensionamiento de conductores. ....	57
3.6	Redimensionamiento del transformador. ....	59
3.7	Diseño de filtro.....	59
3.7.1	Simulación de Armónicos en el Software .....	68
3.7.2	Aplicación del filtro.....	70
3.7.3	Ventajas de utilizar un filtro.....	76
CONCLUSIONES.....		77
RECOMENDACIONES .....		77
INVESTIGACIONES FUTURAS .....		78
Referencias bibliográficas .....		79
ANEXOS.....		81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> Tarea de los objetivos específicos.....	3
<b>Tabla 2.-</b> Secuencia de los armónicos .....	16
<b>Tabla 3.-</b> Características de los equipos para medición de armónicos .....	20
<b>Tabla 4.-</b> Límites de distorsión y clasificación de sistemas de baja tensión [9].....	21
<b>Tabla 5.-</b> Límites de distorsión de tensión [13].....	21
<b>Tabla 6.-</b> Límites de distorsión de corriente desde 120 V a 69 kV[13].....	21
<b>Tabla 7.-</b> Límites de distorsión armónica [14] .....	23
<b>Tabla 8.-</b> Límites de distorsión de corriente desde 120 V a 69 kV[13].....	25
<b>Tabla 9.-</b> Bombas de agua de 7,50 kW .....	33
<b>Tabla 10.-</b> Ventiladores 1,50 kW.....	33
<b>Tabla 11.-</b> Motor de Llenado 0,75 kW. ....	33
<b>Tabla 12.-</b> Motor de Recirculación.....	34
<b>Tabla 13.-</b> Datos sueldas de punto Wingle, Haval M4.....	34
<b>Tabla 14.-</b> Descripción de Motores Proyecto Wingle - Haval M4 .....	35
<b>Tabla 15.-</b> Sueldas de punto M4 – T600 – Balde. ....	35
<b>Tabla 16.-</b> Descripción de motores M4 - T600 - Balde.....	36
<b>Tabla 17.-</b> Sueldas de Punto Trifásicas Wingle – Baldes – Cabinas.....	36
<b>Tabla 18.-</b> Descripción de motores Wingle - Baldes - Cabinas.....	37
<b>Tabla 19.-</b> Voltajes Línea - Línea.....	40
<b>Tabla 20.-</b> Voltajes Línea - Neutro .....	42
<b>Tabla 21.-</b> Corriente en las fases.....	43
<b>Tabla 22.-</b> Corriente en el Neutro.....	44
<b>Tabla 23.-</b> Factor de Potencia.....	45

<b>Tabla 24.-</b> Flicker. ....	46
<b>Tabla 25.-</b> THD Voltaje.....	47
<b>Tabla 26.-</b> 3er Armónico de Tensión.....	49
<b>Tabla 27.-</b> 5to Armónico de Tensión.....	50
<b>Tabla 28.-</b> 7mo Armónico de Tensión.....	51
<b>Tabla 29.-</b> Distorsión armónica total THDI.....	53
<b>Tabla 30.-</b> Potencia Activa. ....	59
<b>Tabla 31.-</b> Características del filtro para el 5to armónico .....	63
<b>Tabla 32.-</b> Características del filtro para el 3er armónico .....	65
<b>Tabla 33.-</b> Características del filtro para el 7mo armónico .....	67
<b>Tabla 34.-</b> Porcentaje de armónicos con y sin filtro .....	73
<b>Tabla 35.-</b> Costos de los filtros .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.-</b> Carga Lineal[5].....	9
<b>Fig. 2.-</b> Carga no Lineal [5].....	10
<b>Fig. 3.-</b> Onda sinusoidal sin presencia de armónicos [9].....	11
<b>Fig. 4.-</b> Onda con presencia de armónicos [9].....	12
<b>Fig. 5.-</b> Factor de reducción para motores en redes con armónicos [9] .....	15
<b>Fig. 6.-</b> Sistema trifásico con diferentes ondas [9].....	17
<b>Fig. 7.-</b> Filtro Sintonizado [12].....	26
<b>Fig. 8.-</b> Filtro activo.....	28
<b>Fig. 9.-</b> Pantalla principal del fluke 435 II. ....	37
<b>Fig. 10.-</b> Diagrama fasorial fluke 435 II.....	38
<b>Fig. 11.-</b> Diagrama unifilar.....	39
<b>Fig. 12.-</b> Voltajes Línea a Línea .....	41
<b>Fig. 13.-</b> Voltajes Línea - Neutro .....	42
<b>Fig. 14.-</b> Corriente en las fases. ....	43
<b>Fig. 15.-</b> Corriente en el Neutro. ....	44
<b>Fig. 16.-</b> Factor de Potencia. ....	45
<b>Fig. 17.-</b> Flicker .....	47
<b>Fig. 18.-</b> THD Voltaje .....	48
<b>Fig. 19.-</b> 3er Armónico de Tensión. ....	49
<b>Fig. 20.-</b> 5to armónico de Tensión .....	50
<b>Fig. 21.-</b> 7mo Armónico de tensión.....	51
<b>Fig. 22.-</b> Distorsión Armónica Total THDI.....	53
<b>Fig. 23.-</b> Armónicos individuales de Corriente .....	54



<b>Fig. 24.-</b> Niveles de carga de fases.....	57
<b>Fig. 25.-</b> Potencia Activa.....	60
<b>Fig. 26.-</b> Filtro pasivo marca IREM .....	68
<b>Fig. 27.-</b> Corrida de Flujo Armónico.....	68
<b>Fig. 28.-</b> Porcentaje de armónicos sin el filtro aplicado.....	69
<b>Fig. 29.-</b> Onda sin aplicar filtro .....	70
<b>Fig. 30.-</b> Interfaz para aplicar el filtro .....	70
<b>Fig. 31.-</b> Diagrama unifilar con el filtro aplicado.....	71
<b>Fig. 32.-</b> Porcentaje de armónicos con el filtro aplicado.....	72
<b>Fig. 33.-</b> Onda con filtros instalados .....	72

## INTRODUCCIÓN

### **Antecedentes**

El presente trabajo de titulación está enmarcado en una línea de investigación específica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, referida a la Maestría en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia, de la sub línea energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección del medio ambiente. Esta investigación se elaboró sobre la calidad de la energía eléctrica en el TDP que alimenta a la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda.

En ese aspecto es importante resaltar que en la actualidad las redes eléctricas absorben las diferentes distorsiones armónicas principalmente generadas por cargas no lineales. Estas se encuentran en gran escala en las industrias y en pequeña escala en el área residencial, dichas cargas no lineales para su funcionamiento utilizan electrónica de potencia. Es de hecho, que estos son los principales generadores de perturbaciones eléctricas, como principal la introducción de armónicos a la red.

La existencia de armónicos en la red puede ocasionar diferentes problemas, como vibración en máquinas eléctricas, sobrecarga en conductores de fase y neutro, disparo de interruptores principales. Con lo antes mencionado es recomendable evitar la generación de armónicos o a su tratar de mitigarlos con la implementación de alguna medida de corrección.

Por ella la empresa CIAUTO Cía. Ltda. ha visto la necesidad de realizar un análisis a sus instalaciones, principalmente a la nave de soldadura, determinando las principales cargas no lineales, y luego realizar un estudio para verificar la existencia o no de armónicos. Esta investigación tiene el apoyo de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. la cual necesita implementar nuevos proyectos que le permita realizar eficiencia energética en sus procesos de producción y de esa manera proteger sus instalaciones y cumplir con el PLANEE.

### **Planteamiento del problema**

El estudio de distorsión armónica en los sistemas eléctricos de potencia es una problemática que se ha analizado a través del tiempo. En la antigüedad la distorsión armónica al sistema eléctrico era enfocada en casos puntuales. Por otro lado, en la actualidad existen evidencias investigativas que

afirman la existencia de armónicos, al introducir cargas no lineales en los diferentes procesos de producción.

En el Ecuador la resolución **ARCERNNR No. 002/20** implementa: indicadores, límites de calidad de servicio y comercialización; al mismo tiempo establece procedimientos y evaluaciones que deberán cumplirse por parte de las empresas eléctricas de distribución y a su vez a los consumidores [1]. La presente resolución está bajo los preceptos de las normativas internacionales IEC 61000-4-15, Testing and measurement techniques – flicker – functional and design specifications. La cual nos establece que el índice de severidad de flicker en el punto de medición debe ser  $Pst < 1$ , y la normativa IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, recomienda los límites de distorsión armónica individual de corriente y con el factor de distorsión de la demanda total en el punto de medición.

La empresa CIAUTO Cía. Ltda., tiene como objetivo principal ensamblar autos, para ello es imprescindible el uso de energía eléctrica en sus actividades productivas, la infraestructura con la que cuenta la empresa está distribuida en tres áreas las cuales son conocidas como naves; ensamble, pintura y soldadura respectivamente. El incremento y la actualización de sus instalaciones en estas áreas estaría afectando a la red de media tensión que dota de energía eléctrica a toda la empresa. Es trascendental efectuar un análisis de las cargas no lineales instaladas en las diferentes áreas, teniendo como principal objetivo la nave de soldadura, la cual por su naturaleza puede presentar algunos inconvenientes como la generación de armónicos en la red de media tensión de la EEASA.

Adicional es importante mencionar que la EEASA (Empresa Eléctrica Ambato SA), luego de un análisis realizado a la línea de media tensión que alimenta de energía eléctrica a la empresa CIAUTO Cía. Ltda., comunicó que existe una elevada distorsión armónica dentro de la empresa, por tal razón la importancia de la presente investigación.

### **Formulación del problema**

¿Cuál es la incidencia de las cargas no lineales en la generación de armónicos de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda.?

## Objetivo General

Analizar las cargas no lineales y su incidencia en la generación de armónicos en el TDP de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda. en el 2022.

## Objetivos Específicos:

- Realizar el estudio de arte correspondiente a los parámetros eléctricos que inciden en la calidad de energía.
- Identificar el tipo de cargas que se encuentran instaladas en la nave de soldadura la empresa CIAUTO Cía. Ltda.
- Evaluar los datos obtenidos a través del analizador de redes y establecer los parámetros correspondientes de potencia, voltaje y corriente en función de la normativa vigente.
- Plantear alternativas que permitan dar solución a los parámetros que se encuentren fuera del rango.

## Sistemas de tareas con relación a los objetivos específicos.

Tabla 1.- Tarea de los objetivos específicos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Recolección de información sobre cargas no lineales	Conocimiento de las diferentes cargas no lineales que se han incrementado en la industria.	Desarrollo de la fundamentación teórica.
1	Detalle de la información sobre generación de armónicos	Discernimiento de los tipos de armónicos que existen.	Desarrollo de la fundamentación teórica.
1	Revisión de la normativa nacional vigente.	Estudio de la regulación para identificar los límites	Resolución <b>ARCERNNR No. 002/20.</b> Calidad del servicio de distribución y

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad (tareas)</b>	<b>Resultado de la actividad</b>	<b>Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)</b>
		establecidos por la normativa	comercialización de la energía eléctrica.
2	Identificación de los puntos críticos en el TDP.	Información de los parámetros eléctricos que estén fuera del rango de los niveles de la calidad de energía.	Instalación de analizador de redes en el TDP.
2	Observación de parámetros de la calidad del producto	Niveles elevados fuera del límite de calidad de la energía emitidas por el ente regulador.	Análisis de los niveles de voltaje, distorsión armónica de voltaje, flicker, factor de potencia, corriente y potencia.
3	Análisis de los niveles de calidad.	Resultados obtenidos de los niveles de incumplimiento, según la normativa vigente.	Análisis técnico Análisis estadístico
4	Generación de propuestas	Solución de problemas evidenciados	Verificación del estado actual y planteamiento de soluciones

## **Justificación**

En la actualidad las redes eléctricas absorben las diferentes distorsiones armónicas principalmente generadas por cargas no lineales, estas se encuentran en gran escala en las industrias y en pequeña escala en el área residencial, dichas cargas no lineales para su funcionamiento utilizan electrónica de potencia, los mismos son generadores de perturbaciones eléctricas, como principal la introducción de armónicos a la red.

La existencia de armónicos en la red, puede ocasionar diferentes problemas, como vibración en máquinas eléctricas, sobrecarga en conductores de fase y neutro, disparo de interruptores

principales, con lo antes mencionado es recomendable evitar la generación de armónicos o tratar de mitigarlos con la implementación de alguna medida de corrección.

Por ello la empresa CIAUTO Cía. Ltda., ha visto la necesidad de realizar un análisis a sus instalaciones, específicamente a la nave de soldadura ya que cuenta con mayor cantidad de cargas no lineales instaladas, las mismas estarían contaminando el sistema eléctrico con la presencia de armónicos.

Esta investigación tiene el apoyo de la empresa CIAUTO Cía. Ltda., pues la necesidad de implementar nuevos proyectos que permitan llevar a cabo la eficiencia energética en sus procesos de producción, que protejan sus instalaciones y a la vez cumplir con el PLANEE.

### **Hipótesis.**

- La presencia de armónicos en el sistema eléctrico de la nave de soldadura en la empresa CIAUTO Cía. Ltda., es generada por el comportamiento de cargas no lineales dentro del proceso productivo.

### **Descripción de los capítulos:**

Los capítulos están establecidos de la siguiente manera:

**Capítulo 1.** Se establece un marco teórico, con la lectura de trabajos anteriores y efectuar una actualización sobre el tema.

**Capítulo 2.** Se realiza un análisis de las cargas instaladas en la nave de soldadura, así como los diferentes métodos, técnicas e investigaciones utilizadas para desarrollar la investigación.

**Capítulo 3.** Se plantean alternativas de solución, luego se opta por la mejor que permita mitigar los armónicos más representativos, probarlo mediante un software y comprobar que se reduzca el porcentaje de contaminación armónica a límites establecidos por la regulación vigente.

## CAPITULO I

### 1.1 Antecedentes de la investigación

Estévez *et al.*, [1] en Cuba alrededor del 2005 efectuaron en su investigación un análisis de diferentes artículos relacionados al problema de armónicos en las redes eléctricas y como estos principalmente afectan a la construcción de transformadores. El objetivo de la investigación planteada se fundamentó en el estudio de la construcción de transformadores que soporten cargas no lineales. La metodología empleada se orientó sobre una base teórico-experimental cuantitativa que les permitió a los autores abordar el problema evidenciado. Los resultados arrojaron que las pérdidas de vacío son una función de la magnitud frecuencial y forma de onda de la tensión de alimentación, estas son variables de suma importancia el dimensionamiento de transformadores. Es acertado acortar que dentro del estudio de armónicos existen magnitudes que deben ser analizadas con el propósito de generar un modelo efectivo de transformador y desde luego que este sea eficiente.

La investigación analiza el impacto de los armónicos en las redes eléctricas y cómo afectan a la construcción de transformadores y los resultados obtenidos brindan información importante para el desarrollo de modelos efectivos y eficientes de transformadores que puedan soportar cargas no lineales.

Rohouma *et al.*, [2] en Estados Unidos en el año 2008 aseveran que con el creciente uso de la electrónica de potencia para los convertidores CA-CC, los sistemas de distribución eléctrica experimentan un aumento de las cargas no lineales. Estas cargas no lineales, como el rectificador clásico, consumen corrientes no sinusoidales que tienden a tener un impacto nocivo en la calidad de la energía de los modernos sistemas de distribución de CA. Por ende, el desarrollo su trabajo se orientó hacia la mitigación de armónicos en redes de distribución de baja tensión con alta penetración de cargas no lineales. Los métodos empleados fueron de origen experimental y correlacional. Los autores aseveran que los métodos tradicionales de compensación ya no son adecuados y, por lo tanto, es necesario desarrollar un medio para proporcionar compensación local de reactiva y armónicos en el origen del problema de calidad de la energía dentro de la red de distribución de baja tensión. En consecuencia, se investiga el uso de un compensador síncrono

estático de distribución sin condensador (D-STATCOM) para la compensación de la calidad de la energía en los sistemas de distribución modernos. Es importante señalar que la propuesta se basó en un convertidor matricial (MC), controlado por control predictivo de modelos de conjuntos de control finito (FCS-MPC) que hizo posible el uso de almacenamiento de energía inductiva en lugar de condensadores electrolíticos. Este documento propuso un D-STATCOM sin condensador basado en MC y controlado mediante FCS-MPC para la mitigación de corrientes armónicas y la corrección del factor de potencia, lo que resulta debido al uso de cargas no lineales en la red de distribución eléctrica moderna.

La investigación ofrece una propuesta para mitigar los problemas causados por las cargas no lineales en los sistemas de distribución eléctrica modernos. Introduce el concepto de un D-STATCOM sin condensador basado en un convertidor matricial y controlado por FCS-MPC para la mitigación de corrientes armónicas y la corrección del factor de potencia. Esta propuesta busca mejorar la calidad de la energía en las redes de distribución de baja tensión.

Martínez *et al.*, [3] en Cuba; 2022 indican en su trabajo la implementación de un diseño mediante una interfaz utilizando el software Scilab para análisis de armónicos en sistemas eléctricos industriales. La investigación fue de tipo experimental al proponer el diseño de una interfaz gráfica. Los resultados arrojados el desarrollo de 3 posibles soluciones mediante filtros pasivos los cuales denotaron mejoramiento del factor de potencia, también concluyen el análisis del efecto de las cargas no lineales conectadas a la red y su impacto en las instalaciones industriales. Es necesario destacar el uso de filtros pasivos como método de mitigación de armónicos es un modelo eficiente. Sin mencionar el hecho que su dimensionamiento se establece como un factor fundamental para cualquier modelo industrial.

En resumen, la investigación presenta la implementación de una interfaz de software para el análisis de armónicos en sistemas eléctricos industriales. Además, destaca el uso de filtros pasivos como una solución eficiente para mejorar el factor de potencia y aborda el impacto de las cargas no lineales en las instalaciones industriales. También enfatiza la importancia del dimensionamiento adecuado de los filtros en los modelos industriales.



Díaz *et al.*, [4] en Colombia 2015 abordaron la evaluación de diferentes técnicas de algoritmos bioinspirados para la reducción de la distorsión armónica (THD) en la modulación por ancho de pulsos (PWM) de inversores de potencia. Se realizó un estudio exhaustivo que identifica y desarrolla algoritmos de optimización biológicamente inspirados basados principalmente en la búsqueda tabu, los algoritmos genéticos (GA), la optimización por enjambre de partículas (PSO) y la optimización por colonia de hormigas (ACO). Estos métodos de optimización bioinspirados se utilizaron para encontrar los mejores parámetros operativos de un PWM aplicado a un inversor de potencia. Los resultados evidenciados denotan que la posición del pulso se aproxima a la posición media ( $P_p=0,50$ ) o a la simetría del pulso. Para los cuatro métodos analizados el mejor resultado se obtuvo utilizando el método ACO basado en el menor contenido de THD y menor magnitud de 5to y 7mo armónico con menos pulsos ( $N_p=38$ ), casi 5 veces menor que el resultado de PSO ( $N_p=179$ ). Los autores aseveran que se consiguió reducir considerablemente las pérdidas con una reducción de la frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia (4560 Hz). En conclusión, se puede acotar que los algoritmos desarrollados pueden ser fácilmente adaptados a cualquier problema de minimización, realizando únicamente cambios en el número de variables y criterios de selección (o eliminación) para obtener mejores resultados en problemas complejos.

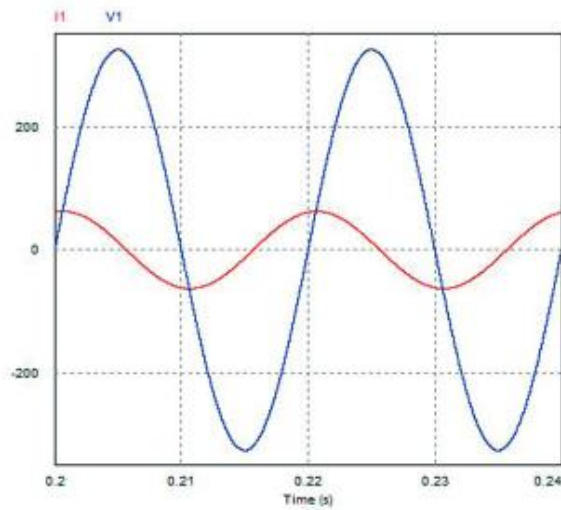
En conclusión, el texto destaca que los algoritmos bioinspirados desarrollados en el estudio pueden adaptarse fácilmente a otros problemas de minimización, con la posibilidad de realizar cambios en el número de variables y criterios de selección para obtener mejores resultados en problemas complejos. Esto implica que las técnicas propuestas podrían ser aplicadas en diferentes contextos para optimizar el rendimiento de sistemas de inversores de potencia.

## **1.2 Fundamentación Teórica**

### **1.2.1 Tipos de Cargas**

#### **1.2.1.1 Cargas lineales**

Es una carga que consume corriente instantánea proporcional a la tensión aplicada, nos indica que la impedancia se mantiene constante a lo largo de la señal sinusoidal alterna [5].



**Fig. 1.-** Carga lineal[5]

Estas cargas se pueden clasificar en:

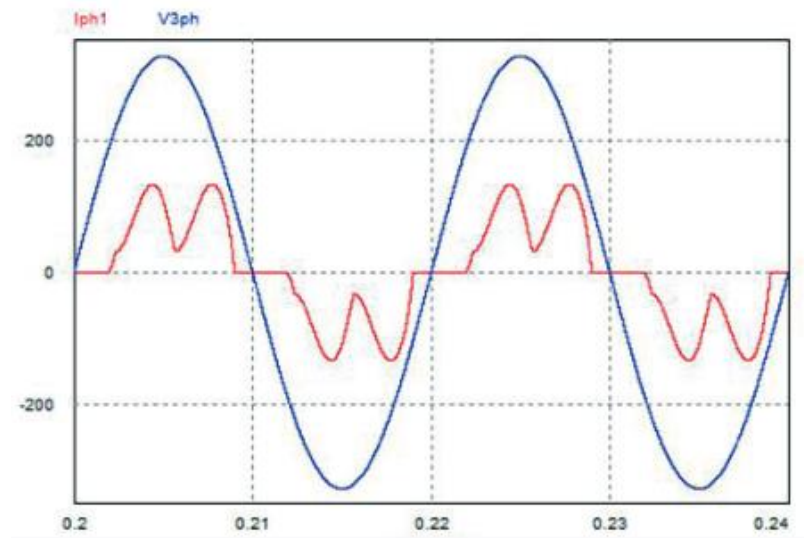
- Cargas Resistivas
  - Calentadores eléctricos.
  - Bombillas incandescentes.
- Capacitivas.
  - Condensadores.
- Inductivas.
  - Transformadores.
  - Motores.

### 1.2.1.2 Cargas no Lineales

Las cargas no lineales crecen continuamente, durante los 10 próximos años podría tener un crecimiento del 60 % en los servicios públicos y la preocupación es mantener la calidad de energía lo que lleva a tener costos importantes al mantener esta calidad de energía en la industria [6]

Una carga no lineal transforma su impedancia en forma de que se aplica voltaje, provocando una corriente absorbida no sinusoidal, estas cargas

no tiene una relación constante entre la corriente y la tensión durante un periodo [5].



**Fig. 2.-** Carga no lineal [5]

#### 1.2.1.2.1 Tipos de cargas no lineales

- Basados en arcos de descarga [7]

Lámparas de descarga

Soldadoras

Hornos de arco.

- Variadores de frecuencia.
- Equipos modernos basados en electrónica de potencia.[7]

Rectificadores monofásicos.

Rectificadores trifásicos.

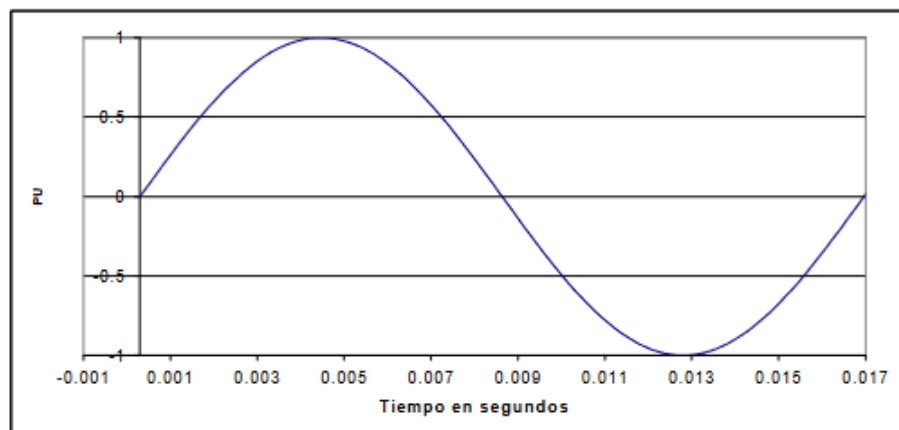
Rectificadores trifásicos de 6 pulsos.

Cargadores de baterías.

### 1.2.2 Armónicos

Se les puede definir como cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la secuencia fundamental [8],[5]. La estimación de armónicos a partir de las cargas no lineales es el primer paso en el estudio armónicos [6].

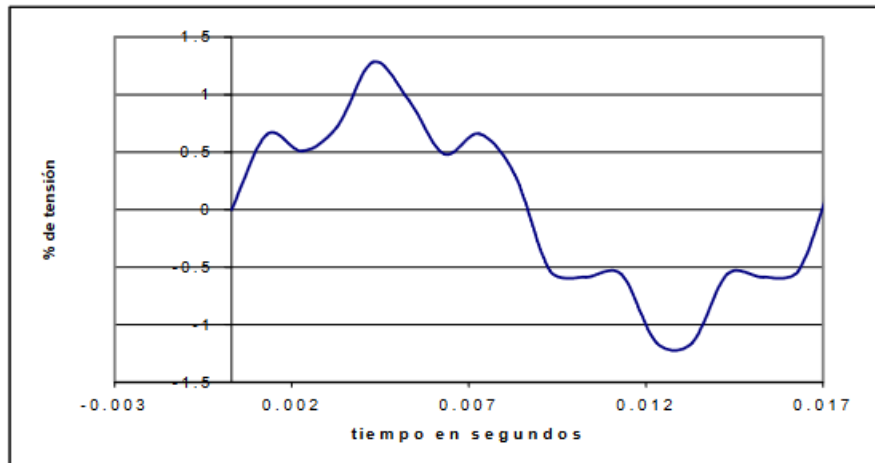
Primero se debe definir la calidad de la onda de tensión, esta necesita una amplitud y frecuencia invariables parecida a la forma sinusoidal de la Fig.3, indica una onda sin presencia de armónicos, y una frecuencia firme de 60 Hz con una amplitud de 1 pu [9].



**Fig. 3.-** Onda sinusoidal sin presencia de armónicos [9]

Cuando una onda periódica no tiene una forma sinusoidal, esa onda contiene armónicos, que pueden alterar el valor pico o valor rms, produciendo problemas en el funcionamiento de los equipos conectados a esa red [9].

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es múltiplo entero de esta frecuencia. En la Fig. 4, se divide una onda con contenido armónico y el aumento del valor pico.



**Fig. 4.-** Onda con presencia de armónicos [9]

### 1.2.2.1 Origen de los armónicos

Existe una interacción entre los equipos productores de armónicos que tienen variadas topologías y el sistema eléctrico [6]. Los armónicos son consecuencia de las cargas no lineales, que al someterse a una señal sinusoidal ostentan una contestación no sinusoidal teniendo a las principales fuentes las siguientes:

- Hornos de arco, considerados como generadores de armónicos de voltaje y podrían surgir los armónicos (2, 3, 4, 5, ...etc.), pero prevaleciendo los impares.
- Núcleos magnéticos de transformadores y máquinas rotativas, que utilizan corriente del tercer armónico para estimular el acero [9],[10].
- Variadores de velocidad
- Equipos de soldadura eléctrica.
- Arrancadores electrónicos.
- Equipos electrónicos conectados a la red monofásica [8],[10].

## **1.2.2.2 Efecto de los armónicos en la red eléctrica**

### **1.2.2.2.1 Efecto sobre los cables**

Los armónicos tienen efectos nocivos en equipos eléctricos [6] son peligrosos cuando la distorsión de corriente tiene un efecto indeseable sobre los equipos provocando un consume energético alto [11]. La corriente que pasa por medio de una sección transversal de un conductor es uniforme solamente cuando la corriente es directa, con corriente alterna al aumentar la frecuencia la no uniformidad de la distribución de corriente es más pronunciada [9].

Aumentos excesivos en la corriente del neutro, en condiciones de carga balanceada, sin armónicos se cancela el neutro, pero en un sistema con cargas no lineales, los múltiplos impares de la 3er armónico no se cancelan, sino que pasan al conductor neutro [11].

### **1.2.2.2.2 Efecto sobre los transformadores**

Los transformadores deben estar diseñados para gestionar los armónicos, los transformadores con un factor “K” se puede expresar que es una mejor solución [5], siendo estos diseñados para transportar energía con frecuencia de red (60 Hz), las frecuencias ascendentes de los armónicos acrecientan pérdidas, implicando un recalentamiento al convertidor [11],[10].

En transformadores el, límite de distorsión de la corriente es el 5 % de la corriente nominal, para lo cual debe soportar una sobretensión del 5 % con la carga nominal y el 10 % sin la carga, las corrientes armónicas en el voltaje aplicado no debieran exceder dicho límites [6].

Los armónicos triplens en el conductor neutro del transformador de distribución con una conexión delta-estrella provoca calentamientos peligrosos, así como los transformadores laminados vibran a diferentes frecuencias armónicas lo que con lleva a generar ruido y recalentamiento. La resonancia produce un riesgo entre la inductancia del transformador y las cargas capacitivas que generan las diferentes frecuencias armónicas [5].

Una posible solución a las perturbaciones armónicas en los transformadores, es la reducción de la capacidad del transformador, esto quiere decir la utilización limitada de su potencia nominal [6].

#### **1.2.2.2.3 Efectos sobre los capacitores**

Si en un sistema eléctrico se encuentran instalados capacitores podría existir la posibilidad de encontrar resonancia entre los capacitores y el sistema, lo que produce corrientes y voltajes de magnitud más alta con relación a un sistema sin resonancia. La reactancia de los capacitores decrece con el incremento de la frecuencia, provocando un incremento del esfuerzo dieléctrico y calentamiento del mismo, la temperatura no afecta de cierta manera ya que los capacitores están diseñados para soportar estas temperaturas en cambio el esfuerzo dieléctrico es muy importante ya que los voltajes en los capacitores son añadidos al pico de voltaje fundamental [9],[6].

#### **1.2.2.2.4 Efectos en los motores**

En el momento que los motores eléctricos son excitados por voltajes con una alta distorsión armónica empieza a inyectar frecuencias altas al estator, lo cual crea corrientes de armónicos a los devanados, provocando incrementos en temperatura, vibraciones mecánicas, eso sin estar trabajando en plena carga, produciendo desgaste en mecanismos de giro, influyendo en la confiabilidad y eficiencia del eje del motor [11].

Armónicos de secuencia negativa provocan una fuerza que reduce el par del motor, y generar vibraciones, aumento de calor, etc. las pérdidas en el núcleo de hierro aumentan con la presencia de los armónicos, producidos por las corrientes de Foucault y la histéresis [5].

Cuando los motores trabajan con tensiones no sinusoidales no puede operar a su capacidad nominal, por el factor de reducción de la capacidad el motor con respecto al factor de tensión armónica [9].

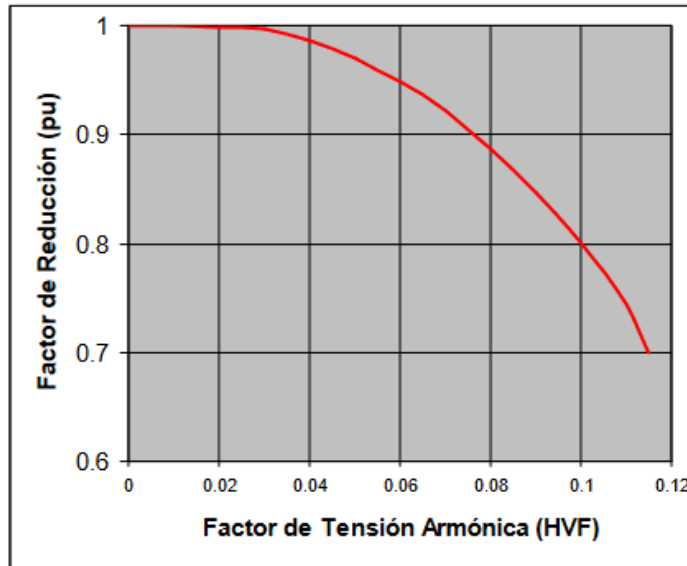


Fig. 5.- Factor de reducción para motores en redes con armónicos [9]

#### 1.2.2.2.5 Efectos sobre equipos de medición.

En lo que compete a equipos de medición también son afectados por las perturbaciones armónicas, principalmente en resonancia que tengan voltajes altos de armónicos, también se puede tener errores positivos o negativos, depende del tipo de medidor y las perturbaciones armónicas que se involucren [9].

#### 1.2.3 Parámetros de los armónicos.

La frecuencia fundamental en el Ecuador es de 60 Hz, el orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor a la fundamental. Se podría definir como la relación que existe entre la frecuencia del armónico ( $f_n$ ) y la frecuencia de la fundamental ( $f_{60}$ ) [8].

$$n = \frac{f_n}{f_{60}} \quad (1)$$

#### 1.2.4 La frecuencia

Es el resultado de multiplicar en número del orden armónico por la frecuencia fundamental (60 Hz), ejemplo.



3er armónico	$3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$
5to armónico	$5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$
7mo armónico	$7 \times 60 \text{ Hz} = 420 \text{ Hz}$

Armónicos de orden impar se los podría encontrar en las industrias en sus redes eléctricas, edificios, aeropuertos, etc. armónicos de orden par aparecen cuando hay asimetría en la señal eléctrica [8].

### 1.2.5 La Secuencia

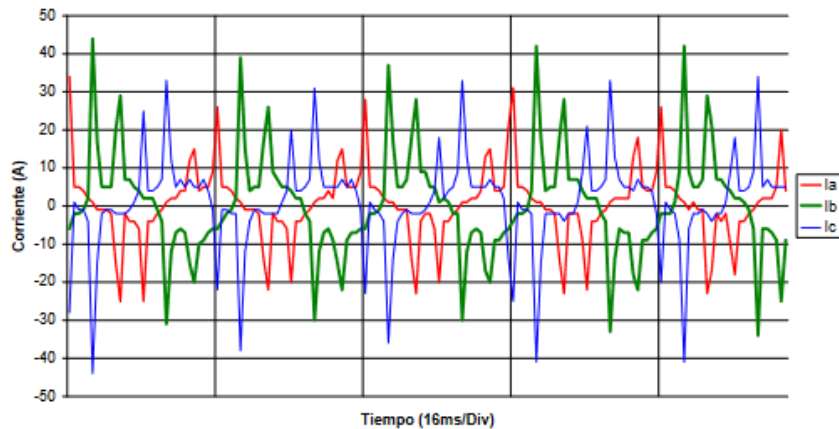
En sistemas trifásicos balanceados y en condiciones normales, las ondas de corriente y tensión presentan un desfase entre sí de  $120^\circ$  y una secuencia de fases positiva, los armónicos de las fases, debido a que la frecuencia tiene multiplicidad con la fundamental, revelan unos ángulos de desfase distintas de la forma de onda fundamental, en consecuencia exhiben otras secuencias de fase [9].

Los armónicos trifásicos generados por cargas no lineales son fasores de la secuencia cero, en un sistema trifásico, las cargas monofásica equilibradas entre fase y neutro, todos los armónicos de secuencia positiva y negativa se cancelan dejando solo a los armónicos de secuencia cero, una carga monofásica desequilibrada en el neutro lleva secuencia cero y el desequilibrio residual de las corrientes de secuencia positiva y negativa [6].

**Tabla 2.-** Secuencia de los armónicos

<b>No. armónicos</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Secuencia</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

La secuencia de los armónicos es válidas en sistemas trifásicos balanceados por ello sus ondas son idénticas, en sistemas desbalanceados podría encontrarse diferencias entre las fases del sistema como en la Fig. 6, por ello los armónicos tiene componentes diferentes de secuencia con relación a un caso balanceado [9].



**Fig. 6.-** Sistema trifásico con diferentes ondas [9]

### 1.2.6 Índices para la medición de armónicos

Medir el nivel de distorsión armónica es necesario precisar parámetros para determinar su magnitud y contar con dispositivos adecuados. A continuación, se presentan ecuaciones para realizar los cálculos relacionados con la distorsión armónica [12],[9].

#### Valor eficaz(rms)

Cuando se suman señales de voltaje y corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante [12].

Corriente eficaz (rms). 
$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2)$$

Donde:

$I_h =$  Magnitud de la armónica individual

$h =$  orden armónico

Voltaje eficaz (rms). 
$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \quad (3)$$

Donde:

$V_h =$  Magnitud de la armónica individual

$h = \text{orden armónico}$

### **Cofactor de distorsión (Cd)**

Se dice que es la analogía del contenido armónico de la señal y el valor eficaz(rms), y su valor puede ser de entre 0 % a 100 %. Si la distorsión es baja el Cd cambia, si se desea conocer el contenido armónico de la señal se utiliza la siguiente expresión [12].

Cofactor de distorsión. 
$$c_d = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{rms}} \times 100 \% \quad (4)$$

### **1.2.7 Índices para armónicos de corriente.**

Para corriente existen dos tipos, distorsión armónica individual y la distorsión armónica total [9].

Distorsión armónica individual. 
$$D_i = \frac{I_i}{I_n} \times 100 \% \quad (5)$$

Distorsión armónica total. 
$$THD_I = \frac{1}{I_L} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \times 100 \% \quad (6)$$

$$TDD = \frac{1}{I_D} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \times 100 \% \quad (7)$$

### **1.2.8 Índices para armónicos de tensión**

Para la distorsión armónica individual y total de tensión se la define a continuación [9].

Distorsión armónica individual  $D_v = \frac{V_i}{V_n} \times 100 \%$  (8)

Distorsión armónica total  $THD_V = \frac{1}{V_n} \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2} \times 100 \%$  (9)

### 1.2.9 Medición de armónicos

La problemática de armónicos en los sistemas eléctricos se debe realizar mediciones ya que el flujo y las réplicas del sistema consiguen variar de un sistema a otro con desviaciones como tolerancia de los equipos y desbalances etc. La solución a muchos problemas que se presentan con las perturbaciones armónicas se debería afrontar con un estudio de flujo de armónicos mediante las medidas realizados [9].

Según la normativa internacional IEEE 519-192, nos indica que el punto de medición debería ser donde se suministra la energía eléctrica al usuario, se podría aplicar la misma normativa para realizar mediciones en otros puntos de las instalaciones, pero al tener diversas cargas la interacción de las mismas podría producir una cancelación de armónicos y llevarnos a los límites adecuados en la red [12].

#### **Donde realizar la Medición.**

Primero se debería realizar un análisis del tipo de cargas que se tienen, para con ello guiarse en donde se podrían estar generando armónicos, como podrían ser los condensadores los mismos que podrían estar recogiendo los armónicos generados en otros sitios [12]. El análisis de las cargas lineales y no lineales facilita determinar el lugar en donde se realizaría la medición, y obtener los resultados esperados.

#### **Selección del tipo de equipo a utilizar**

Se podrían referenciar algunos como:

- Registradores.
- Analizadores de espectro.

- Osciloscopios.
- Analizadores de red.

Con el avance de la tecnología existen analizadores sofisticados con software y hardware que permiten tener una mejor adquisición de datos, en la Tabla 3 se indica algunas de las características que deberían tener los equipos para la medición [9].

**Tabla 3.-** Características de los equipos para medición de armónicos

<b>Características</b>	<b>Osciloscopio</b>	<b>Analizador de espectro</b>	<b>de Analizador de Redes</b>
<b>Canales</b>	Dos	1	
<b>Frecuencia de muestreo</b>	> 10 MHz	128.256.512 muestras por ciclo	
<b>Memoria</b>	Algunas formas de onda	No	Almacenamiento de múltiples variables
<b>Tipo de medición</b>	Puntual	Puntual	Puntual, periódica o por evento
<b>Captura formas de onda</b>	Si	No	Opcional
<b>Captura otros eventos de calidad de energía</b>	Picos de tensión	No	

### 1.2.10 Normativa

La distorsión armónica que los diferentes usuarios producen, y a su vez inyectan a las redes de las empresas distribuidoras de energía eléctrica, debido a aquello se han establecido algunos límites de distorsión armónica, los cuales regulan a los usuarios, que estén dentro de dichos límites. En estas normas se han establecido varios índices para determinar el grado de contaminación

armónica, los más usados son las de distorsión armónica individual y la distorsión armónica total de corriente y de voltaje.

Dentro de la normativa que recomienda límites máximos admisibles para dichas distorsiones, se recomienda la norma ANSI/IEEE-519, la cual nos indica.

**Tabla 4.-** Límites de distorsión y clasificación de sistemas de baja tensión [9].

	<b>Aplicaciones Especiales</b>	<b>Sistemas Generales</b>	<b>Sistemas dedicados</b>
<b>Profundidad de la hendidura</b>	10 %	20 %	50 %
<b>THD (voltaje)</b>	3 %	5 %	10 %
<b>Área de la hendidura (An)(Vµs)</b>	16.400	22.800	36.500

Límites de distorsión armónica máxima para usuarios como para distribuidores [13].

**Tabla 5.-** Límites de distorsión de tensión [13]

<b>Bus voltage V at PCC</b>	<b>Individual harmonic (%)</b>	<b>Total Harmonic distortion THD (%)</b>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,00	8,00
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,00	5,00
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,50	2,50
$161 \text{ kV} < V$	1,00	1,50 <sup>a</sup>

**Tabla 6.-** Límites de distorsión de corriente desde 120 V a 69 kV[13]

<b>Maximum harmonic current distortion in percent of <math>I_L</math></b>						
<b>Individual harmonic order (odd harmonics)<sup>a,b</sup></b>						
<b><math>I_{SC}/I_L</math></b>	<b><math>3 \leq h &lt; 11</math></b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq h &lt; 35</math></b>	<b><math>35 \leq h \leq 50</math></b>	<b>TDD</b>
$< 20^c$	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
$20 < 50$	7,00	3,50	2,50	2,00	0,50	8,00
$50 < 100$	10,00	4,50	4,00	2,50	0,70	12,00
$100 < 1000$	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
$> 1000$	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

En el Ecuador la normativa aplicable para los límites de distorsión armónica es la ARCERNNR-002/2020, Que trata sobre la “**Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica**”.

En su objetivo enuncia establecer indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, también define procedimientos de medición, registro y evaluación que deben ser cumplidas por las empresas eléctricas distribuidora de la misma y los consumidores [14].

En su literal 9, **Perturbaciones rápida de voltaje (flicker)**. Indica la forma que se evaluara la severidad por flicker de corta duración ( $P_{st}$ ), en referencia a la normativa IEC 61000-4-15, en ella indica la severidad de las variaciones periódica de amplitud de voltaje a corto plazo con un tiempo de medición en intervalos de 10 minutos.

Donde:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525 P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (10)$$

**$P_{st}$** : Índice de severidad de flicker de corta duración.

**$P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$** : Niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 %, 50 % del tiempo total del intervalo de medición.

Esta normativa nos indica que la severidad del flicker de corta duración en el punto que se está realizando o se realizó la medición no debe superar la unidad.

Para realizar la medición de esta perturbación la normativa indicada nos dice que se debe realizar una evaluación no menor de 7 días continuos.

En su literal 10, **Distorsión armónica de voltaje**, enuncia la forma de realizar la evaluación según las siguientes formulas.

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (11)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100 \% \quad (12)$$

$$THD_k = \frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \times 100 \% \quad (13)$$

Donde:

$V_{h,k}$  = Armónica de voltaje h en el intervalo k de 10 minutos.

$V_{h,i}$  = Valor eficaz(rms) de la armónica de voltaje h (para h =2,3,.....,50), medido cada 3 segundos (i = 1,2,.....,200).

$DV_{h,k}$  = Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h (para h = 2,3,.....,50) en el intervalo k de 10 minutos.

$THD_k$  = Factor de distorsión armónica total de voltaje.

$V_{h,1}$  = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

En esta normativa nos indica los límites máximos del factor de distorsión armónica individual de voltaje y del factor de distorsión total de voltaje.

**Tabla 7.-** Límites de distorsión armónica [14]

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5,00	8,00
Medio Voltaje	3,00	5,00
Alto Voltaje (Grupo 1)	1,50	2,50
Alto Voltaje (Grupo 2)	1,00	1,50



En su literal 29, **Distorsión armónica de corriente**, evalúa la distorsión armónica individual de corriente, así como la distorsión de demanda total según:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (14)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100 \% \quad (15)$$

$$TDD_k = \frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \times 100 \% \quad (16)$$

Donde:

- $I_{h,k}$  = Armónica de corriente h en el intervalo k de 10 minutos.
- $I_{h,i}$  = Valor eficaz(rms) de la armónica de corriente h (para h =2,3,.....,50), medido cada 3 segundos (i = 1,2,.....,200).
- $DI_{h,k}$  = Factor de distorsión individual de corriente de la armónica h (para h =2,3,.....,50) en el intervalo k de 10 minutos.
- $TDD_k$  = Factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente).
- $I_{h,1}$  = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de corriente (60 Hz).

Límites de distorsión armónica individual de corriente y distorsión de demanda total.

**Tabla 8.-** Límites de distorsión de corriente desde 120 V a 69 kV[13]

Nivel máximo de armónicos impares <sup>a</sup> (% de la corriente máxima de demanda)						
$I_{cc} / I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^b$	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
$20 < 50$	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
$50 < 100$	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
$100 < 1000$	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
$> 1000$	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

### 1.2.11 Filtros

La instalación de filtros que permiten la absorción de corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales puede llegar a ser muy costosa, el dimensionamiento de estos filtros nos permite ayudar a corregir el factor de potencia, estos filtros se utilizan para tratar de resolver los problemas de perturbaciones armónicas ya sea de tensión o de grandes corrientes armónicas inyectadas a las redes eléctricas [9].

Existen dos formas de instalar filtros en serie son los que absorben toda la corriente de carga mientras que los filtros en paralelo absorben únicamente una fracción de la carga total, siendo que los filtros en serie resultan más costosos los de paralelo son usados para compensar el factor de potencia, siendo estos en paralelo los más utilizados [9].

Loa filtros se podrían clasificar de la siguiente manera:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos

### 1.2.12 Filtros pasivos

Estos filtros son resonantes formados por inductores y condensadores, que son construidos para mitigar frecuencias armónicas principalmente en el orden (5,7,11--). Aparte de mitigar un tipo de armónico, los filtros pasivos están diseñados para controlar los armónicos de determinada carga, también podría compensar el factor de potencia. Los filtros pasivos son una solución sencilla, económica y robusta en instalaciones generalmente cerradas [5].

### 1.2.12.1 Filtros Sintonizados.

Son un tipo de filtros pasivos que deben ser instalados en paralelo a la red o sistema de distribución principal, pudiendo también ser instalada en cada una de las cargas permitiendo mitigar de manera individual o a su vez general, además de ello este tipo de filtros proporciona potencia reactiva compensando así el factor de potencia. Para la programación del filtro generalmente se utiliza la frecuencia que sea menor a la dominante para que mitigue esta y las de nivel superior. El reactor que sea utilizado en este filtro debe soportar corrientes para las que ha sido diseñado sin que se deteriore su aislamiento.

Efectos importantes de los filtros sintonizados:

- Reducción de los armónicos del sistema
- Compensación del factor de potencia.

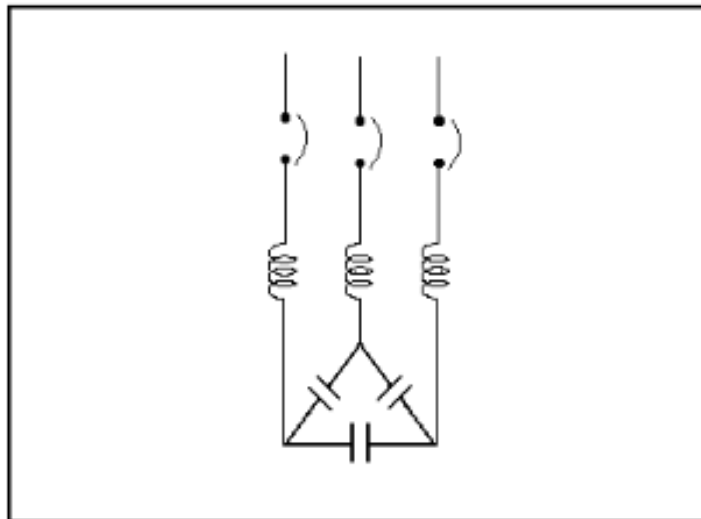


Fig. 7.- Filtro sintonizado [12]

### 1.2.12.2 Filtros desintonizados.

Estos filtros son construidos igual que el sintonizado, pero son sintonizados a una frecuencia que no va a aparecer en la red, siendo estas 3er y 4to armónico. Son utilizados generalmente para compensar el factor de potencia, estos tienen la ventaja de ser más económicos, ya que están

expuestos a armónicas menores, pero no podrán ser utilizados cuando la distorsión exceda un 40 % de la carga total, como nos indica la normativa IEEE-519 [12].

Sus efectos más importantes son:

- Protección a los capacitores.
- Evita resonancia.
- Compensación del factor de potencia.

### **1.2.13 Filtros Activos**

Estos son equipos de electrónica de potencia que mitigan las perturbaciones armónicas en la red, su funcionamiento es medir de corrientes armónicas, y generan en tiempo real el mismo armónico, pero en fase opuesta, reduciendo así esta corriente, con ello se reduce el THD a niveles inferiores al 5 %. Su diseño permite la minimización de dicha distorsión en toda la carga, no se ven afectados por la resonancia ni por las impedancias propias de la línea [5].

Ventajas en comparación con filtros pasivos:

- Compensar distintos armónicos al mismo tiempo.
- Corrige armónicos de orden mayor o alto.
- Aumentar el factor de potencia.
- Mas flexible.

Desventaja,

- Son equipos muy caros y complejos.

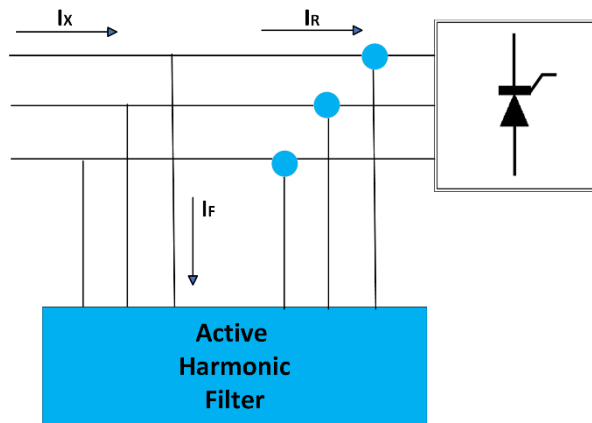


Fig. 8.- Filtro activo

### 1.2.14 Balance de cargas

El balance de carga eléctrica se refiere a la igualdad de cargas positivas y negativas dentro de un sistema u objeto. En el estado eléctricamente neutro, la carga positiva total se equilibra con la carga negativa total, lo que da como resultado una carga neutra total [15].

Estos son algunos ejemplos de situaciones en las que se produce el equilibrio de carga eléctrica:

**Carga por inducción:** Cuando un objeto cargado se acerca a un objeto neutral, hay una redistribución de cargas. Los electrones se mueven hacia o desde el objeto, creando un desequilibrio de carga. Sin embargo, la carga general del sistema permanece equilibrada [16].

**Carga por contacto:** cuando dos objetos entran en contacto, los electrones pueden transferirse entre ellos, lo que da como resultado una redistribución de cargas. Los electrones fluyen del objeto más cargado al objeto menos cargado hasta que las cargas se igualan [16].

**Descarga electrostática:** en situaciones en las que se acumula una carga excesiva en un objeto, como durante una tormenta eléctrica o cuando ciertos materiales se frotan entre sí, se produce una descarga. Esta descarga permite que las cargas se equilibren, lo que a menudo genera una chispa o un flujo repentino de corriente [16].

### **1.2.15 Cambio o repotenciación de conductores**

El cambio o repotenciación de conductores se refiere a la acción de reemplazar los conductores eléctricos existentes por otros de mayor capacidad o calibre. Esto se realiza para aumentar la capacidad de corriente que pueden transportar los conductores y garantizar un suministro eléctrico adecuado [17].

Existen diversas razones por las cuales podría ser necesario realizar el cambio o repotenciación de conductores, entre las cuales se incluyen:

**Aumento de la carga eléctrica:** Si la demanda de energía eléctrica ha aumentado en un sistema o instalación, es posible que los conductores existentes no sean capaces de manejar la carga adicional. En este caso, se puede requerir el reemplazo de los conductores por otros de mayor capacidad para evitar problemas como sobrecalentamiento o caídas de tensión [17].

**Reducción de pérdidas de energía:** En algunos casos, los conductores existentes pueden tener una resistencia eléctrica alta, lo que resulta en pérdidas de energía significativas. Al reemplazar los conductores por otros de menor resistencia, se pueden reducir las pérdidas y mejorar la eficiencia del sistema [17].

## **1.3 Fundamentación Metodológica**

### **1.3.1 Nivel de investigación**

La presente investigación se efectuó sobre una base cuantitativa de investigación, pues todo el desarrollo se orientó hacia el análisis matemático de valores convergentes a la distorsión armónica dentro de la empresa CIAUTO Cía. Ltda., de la ciudad de Ambato con particular atención a la nave de soldadura.

### **1.3.2 Tipo de investigación**

**Bibliográfica.-** Esta investigación ayuda en el desarrollo del proyecto, debido a que la distorsión armónica es muy estudiada y existe información a nivel nacional e internacional [18],[19]. Por ende, fue fundamental efectuar un análisis intenso al respecto de la temática de estudio. La búsqueda de información fue realizada en documentos bibliográficos de alto impacto como es el

caso de papers, tesis de maestría, los cuales describen los diferentes trabajos realizados que sirven como punto de partida y referencia para este proyecto.

**Exploratorio.** - Por medio de este se obtuvieron mediciones de diferentes variables en el transformador principal de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda., que facilitaron determinar las perturbaciones de energía eléctrica y desde ese punto realizar el análisis del problema y determinar soluciones para las perturbaciones.

**Experimental.** – Se desarrolla un modelo y/o propuesta en el software PowerFactory-DlgSILENT, para determinar las posibles soluciones a las perturbaciones mediante los datos recolectados por el analizador de redes.

**Explicativo.** - Esta investigación junto con la experimental facilitaron la comprobación o descarte de la hipótesis planteada.

**Correlacional.** - La investigación de igual manera se orientó sobre una base correlacional pues la idea general fue contrastar la información obtenida por medio de las lecturas efectuadas para verificar la hipótesis planteada.

### **1.3.3 Métodos de investigación**

**Método de observación científica.** - Con el conocimiento del problema y el porqué de la investigación, se estudió el transcurrir natural de los hechos. Es por medio de este aspecto que se pudieron establecer soluciones a las instancias planteadas en el presente trabajo de investigación.

**Método de Medición.** - Este método, se lo considera como la atribución de los valores numéricos, es primordial en las características de los armónicos eléctricos, cuando se mide se debe tener en cuenta donde se debe medir y las variables a ser medidas, para poder interpretar los resultados que se pretende obtener.

### **1.3.4 Técnicas e instrumentos**

**Técnica de medición.** - Esta técnica permitió asignar números y/o valores para cuantificar una serie de datos. Es importante mencionar que esta técnica fue una de las principales por su aporte

en la medición de las diferentes variables relacionadas con la investigación; como es el caso de armónicos y perturbaciones.

#### **1.4 Conclusiones Capítulo I**

- La lectura bibliográfica permite establecer aspectos que resultan muy importantes para el desarrollo de la investigación, evaluando diferentes puntos como la normativa vigente nacional e internacional, de hecho, es por medio de esta tipología de investigación que se pudo organizar la información y generar valor agregado a la investigación.
- Se destaca que en la actualidad existen estudios relacionados que ayudan a comprender las tendencias actuales asociadas al mejoramiento de la distorsión armónica con la instalación de diferentes filtros según la necesidad del sistema eléctrico a analizar.



## **CAPÍTULO II**

### **2.1 Título del proyecto**

Estudio de las diferentes cargas no lineales de la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda.

### **2.2 Objetivo del proyecto**

Analizar los parámetros eléctricos que incumplen con los límites establecidos de calidad del producto emitidos por la normativa vigente.

### **2.3 Descripción de la propuesta**

La presente propuesta parte desde el estudio evaluativo de las instalaciones, mediante la toma de datos del analizador de redes instalado en el transformador ecuatran de 800 kVA y análisis de los parámetros eléctricos contrastados con la normativa vigente.

### **2.4 Metodología, procedimientos y técnicas para el cumplimiento de los objetivos planteados**

#### **2.4.1 Descripción del área de estudio**

La empresa EEASA, es la que sustenta de energía eléctrica a la empresa CIAUTO Cía. Ltda., dividida en tres ramales que a la vez alimentan a las naves de ensamble, pintura, soldadura, a través de una línea de media tensión 13,80 kV, derivándose a la nave de soldadura mediante un cable soterrado, el mismo que llega a una celda de protección y luego al transformador de 800 kVA mediante un cable 1/0. En el Anexo A, se aprecia el diagrama unifilar completo de toda la nave de soldadura. Luego del tablero de distribución principal este se divide en 4 ramales que alimentan a diferentes cargas que se especifican a continuación.

- **Torre de enfriamiento.**

En esta área se encuentran instaladas 3 bombas de agua de 7,50 kW, 2 ventiladores 1,50 kW, 1 bomba de llenado de 0,75 kW y una bomba de recirculación de 1,10 kW, todas alimentadas a 380 V, estas bombas sirven para el enfriamiento de las sueldas de punto.

**Tabla 9.- Bombas de agua de 7,50 kW**

<b>Datos motor bombas de agua</b>			
<b>Potencia kW</b>	7,50	<b>Cos <math>\psi</math></b>	0,88
<b>Voltaje V</b>	380	<b>Grado de Protección</b>	IP55
<b>I nominal A</b>	14,50	<b>Peso kg</b>	70
<b>RPM</b>	2940	<b>Conexión</b>	Delta
<b>Frecuencia Hz</b>	60	<b>Aislamiento</b>	F
<b>Polos</b>	2		

**Tabla 10.- Ventiladores 1,50 kW**

<b>Datos del motor de ventiladores</b>			
<b>Potencia kW</b>	1,50	<b>Aislamiento</b>	F
<b>Voltaje V</b>	380	<b>Grado de Protección</b>	IP55
<b>I nominal A</b>	5,20	<b>Conexión</b>	Estrella
<b>RPM</b>	860		
<b>Frecuencia Hz</b>	60		
<b>Polos</b>	8		

**Tabla 11.- Motor de llenado 0,75 kW.**

<b>Datos del motor de llenado</b>			
<b>Potencia kW</b>	0,75	<b>Aislamiento</b>	F
<b>Voltaje V</b>	380	<b>Grado de Protección</b>	IP55
<b>I nominal A</b>	3,40	<b>Conexión</b>	
<b>RPM</b>			
<b>Frecuencia Hz</b>	60		
<b>Polos</b>			

**Tabla 12.-** Motor de recirculación.

<b>Datos del motor de recirculación</b>			
<b>Potencia kW</b>	1,10	<b>Aislamiento</b>	F
<b>Voltaje V</b>	380	<b>Grado de Protección</b>	IP55
<b>I nominal A</b>	2,70	<b>Conexión</b>	Estrella
<b>RPM</b>	1420	<b>Peso kg</b>	23
<b>Frecuencia Hz</b>	60		
<b>Polos</b>	5		

- **Montaje Proyecto WINGLE, HAVAL M4**

En este ramal se encuentran instaladas soldadoras de punto y motores utilizados como tecles para el movimiento de materiales.

**Tabla 13.-** Datos sueldas de punto WINGLE, HAVAL M4

<b>Especificaciones suelda de punto</b>			
<b>Cantidad sueldas</b>	11	<b>Fases</b>	2
<b>Marca</b>	TRIJ	<b>Modelo de producto</b>	DN3-200
<b>Voltaje nominal U<sub>in</sub> (V)</b>	AC 380 V	<b>Secundario sin voltaje de carga (V)</b>	26,20
<b>Frecuencia (Hz)</b>	50	<b>Corriente de salida continua (kA)</b>	14,10
<b>Potencia de carga continua S50 (kVA)</b>	200	<b>Corriente máxima de salida de corto circuito (kA)</b>	18
<b>Potencia Continua Sp (kVA)</b>	141	<b>Caudal de agua de refrigeración (L/min)</b>	32
<b>Grado de protección</b>	IP20	<b>Gota de presión del líquido refrigerante nominal (MPa)</b>	0,50
<b>Presión de aire (MPa)</b>	0,60	<b>Fecha de manufactura</b>	2021/03
<b>Clase de aislamiento y resistencia térmica</b>	F Class	<b>Número de fábrica</b>	DN320002699
<b>Masa (Kg)</b>	228		

Se encuentran instalados motores de diferentes capacidades utilizados como tecles, a continuación, se describe sus características.

**Tabla 14.-** Descripción de motores proyecto WINGLE - HAVAL M4

<b>Tecles</b>							
<b>Tamaño</b>	<b>Volt. (V)</b>	<b>Pn (kW)</b>	<b>In max (A)</b>	<b>Cos <math>\theta</math></b>	<b>PH</b>	<b>Polos</b>	<b>Cant.</b>
DC - pro - 10	380	0,27	1,90	0,54	3	8	1
DC - pro - 10	380	1,09	3,10	0,81	3	2	1
DC - pro - 10	380	0,54	3,40	0,58	3	8	1
DC - pro - 10	380	2,18	6,20	0,77	3	2	1

- **M4 – T600 – BALDE.**

En esta área se encuentran instaladas sueldas de punto de 2 fase a 380 V, así como motores utilizados para elevación de partes (tecles).

**Tabla 15.-** Sueldas de punto M4 – T600 – BALDE.

<b>Especificaciones suelda de punto</b>			
<b>Cantidad sueldas</b>	38	<b>Fases</b>	2
<b>Marca</b>	TRIJI	<b>Modelo de producto</b>	DN3-200
<b>Voltaje nominal U<sub>in</sub> (V)</b>	AC 380 V	<b>Secundario sin voltaje de carga (V)</b>	26,20
<b>Frecuencia (Hz)</b>	50	<b>Corriente de salida continua (kA)</b>	14,10
<b>Potencia de carga continua S50 (kVA)</b>	200	<b>Corriente máxima de salida de corto circuito (kA)</b>	18
<b>Potencia Continua Sp (kVA)</b>	141	<b>Caudal de agua de refrigeración (L/min)</b>	32
<b>Grado de protección</b>	IP20	<b>Gota de presión del líquido refrigerante nominal (MPa)</b>	0,50
<b>Presión de aire (MPa)</b>	0,60	<b>Fecha de manufactura</b>	2021/03
<b>Clase de aislamiento y resistencia térmica</b>	F Class	<b>Número de fábrica</b>	DN320002699
<b>Masa (Kg)</b>	228		

En la siguiente tabla se observa la capacidad de los motores instalados como tecles.

**Tabla 16.-** Descripción de motores M4 - T600 - BALDE.

<b>Tecles</b>							
<b>Tamaño</b>	<b>Volt. (V)</b>	<b>Pn (kW)</b>	<b>In max(A)</b>	<b>Cos <math>\theta</math></b>	<b>PH</b>	<b>Polos</b>	<b>Cant.</b>
DC - pro - 2	380	0,09	1,20	0,56	3	8	2
DC - pro - 2	380	0,36	1,60	0,53	3	2	2
DC - pro - 5	380	0,10	1,60	0,51	3	8	1
DC - pro - 5	380	0,18	1,60	0,51	3	8	6
DC - pro - 5	380	0,73	2,40	0,77	3	2	7
DC - pro - 10	380	0,27	1,90	0,54	3	8	3
DC - pro - 10	380	1,09	3,10	0,81	3	2	3

- **WINGLE – BALDES – CABINAS.**

En esta área se encuentran instaladas sueldas de punto trifásicas, así como motores para elevación de objetos conocidos como tecles.

**Tabla 17.-** Sueldas de punto trifásicas WINGLE – BALDES – CABINAS.

<b>Especificaciones suelda de punto</b>			
<b>Cantidad sueldas</b>	30	<b>Fases</b>	3
<b>Marca</b>	MF resistance Welding Controller	<b>Corriente de salida max (A)</b>	600 %
<b>Voltaje nominal U<sub>in</sub> (V)</b>	AC 380 V	<b>Voltaje de salida (V)</b>	PWM 500
<b>Frecuencia (Hz)</b>	60	<b>Frecuencia de salida (Hz)</b>	1000
<b>Presión de aire (MPa)</b>	0,50	<b>Caudal de agua de refrigeración (L/min)</b>	16
<b>Grado de protección</b>	IP54	<b>Fecha de manufactura</b>	2017/07
<b>Masa (Kg)</b>	228	<b>Duty Cycle (ED)</b>	10 %

En la tabla siguiente se describe los motores utilizados como tecles y un motor extractor de gases.

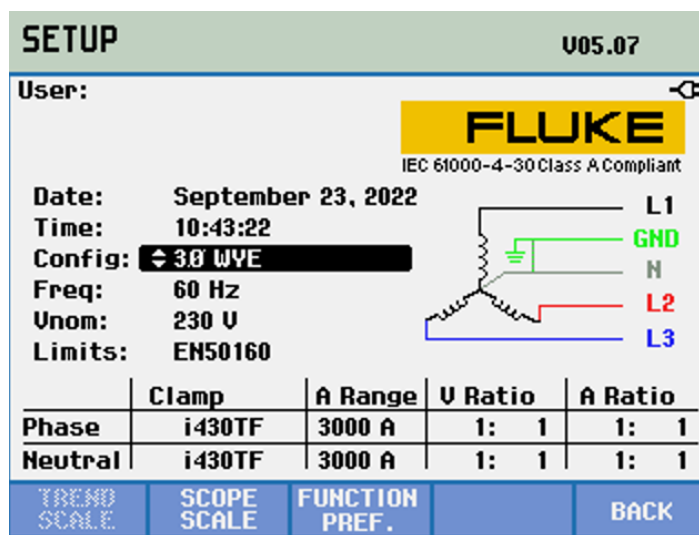
**Tabla 18.-** Descripción de motores WINGLE - BALDES - CABINAS.

Tecles							
Tamaño	Volt. (V)	Pn (kW)	In max (A)	Cos $\theta$	PH	Polos	Cant.
DC - pro - 10	380	0,27	1,90	0,54	3	8	1
DC - pro - 10	380	1,09	3,10	0,81	3	2	1
Extractor							
SI - 420L	380	4	9	.....	3	.....	1

**Instrumento de medición.** - Este tipo de instrumentos son los que registran datos, para realizar la investigación.

El instrumento de medición utilizado es el analizador de redes de marca fluke serie 435 II.

El analizador permite obtener lecturas de diferentes variables eléctricas obtenidas del punto de medición, pueden ser monofásica o trifásica, al colocar el punto de medición en el transformador ecuatran de 800 kVA que alimenta de 380 V voltaje secundario, a la parte principal de la nave de soldadura.



**Fig. 9.-** Pantalla principal del fluke 435 II.

La Fig. 10, indica si la instalación del analizador de redes y sus ondas son correctas, comprobando que el diagrama de vectores de tensión como de corriente se encuentran en secuencia con respecto a las agujas del reloj.

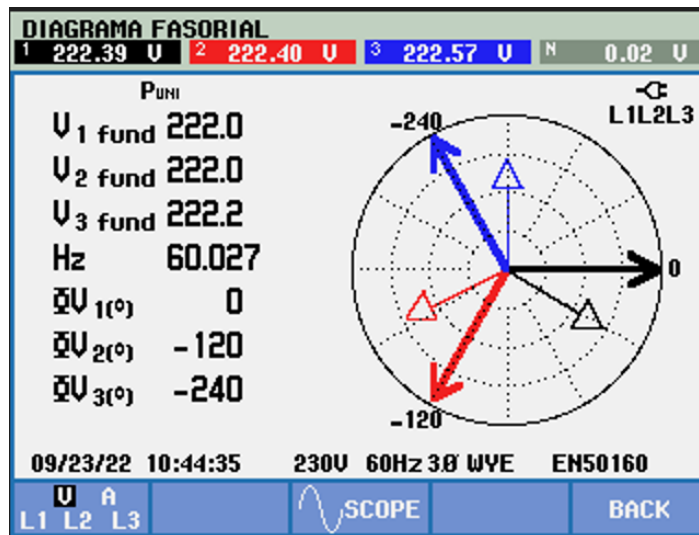


Fig. 10.- Diagrama fasorial fluke 435 II.

**Técnica de cálculos.** – En esta técnica se utilizan las diferentes ecuaciones encontradas en la teoría, para determinar valores de variables o correcciones a ser realizadas.

**Técnica de Simulación.** - Esta técnica ayuda a llevar el diagrama eléctrico del área de estudio a un software el cual permite observar el comportamiento de diferentes variables y obtener el resultado deseado.

El Software PowerFactory-DlgSILENT, es una herramienta asistida por computadora para realizar análisis de sistemas eléctricos de potencia industriales y comerciales, los cuales pueden ser cortocircuito, flujos de potencia, coordinación de protecciones, análisis de armónicos, etc.

En el presente trabajo de investigación, se utilizó el software PowerFactory-DlgSILENT, para analizar las cargas existentes en la nave de soldadura de la empresa CIAUTO Cía. Ltda., de igual manera se implementó el software para simular el comportamiento de las cargas y comprobar la hipótesis planteada, finalmente obtener una mejor solución.

La Fig. 11, muestra en un boceto del diagrama unifilar que se pretende realizar en el software, se detalla en el Anexo A.

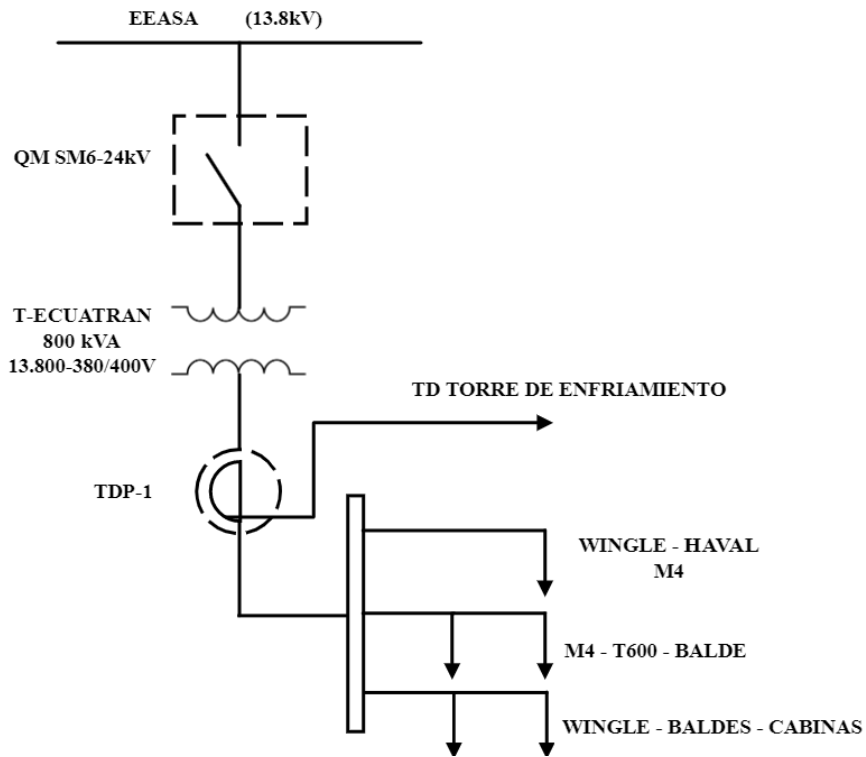


Fig. 11.- Diagrama unifilar

#### 2.4.2 Diagnóstico del sistema eléctrico actual de la nave de soldadura

El análisis de las variables medidas por el analizador, permitió realizar un diagnóstico, sobre el estado actual del sistema eléctrico de la nave de soldadura.

La recolección de datos con el analizador se realizó según la normativa vigente en el país, la misma que establece que la medición debe ser no menor a 7 días consecutivos y con periodos de 10 minutos.

Para el análisis de las gráficas se toma en cuenta el día que presentan problemas significativos y con los valores máximos de las mediciones obtenidas.

Cabe recalcar que la empresa mantiene sus actividades de lunes a viernes con horario de trabajo de 6:30 am a 17:00 pm, sábado y domingo no trabaja y por ende todos sus equipos quedan sin energía, ya que el personal técnico corta la energía en el TDP y las lecturas registradas de estos dos días tienden a cero por lo cual fueron depuradas de la base de datos por no presentar problemas.



### 2.4.3 Niveles de Voltajes

El comportamiento de voltaje Línea – Línea y Línea - neutro en el lado de baja tensión del transformador de 800 kVA, se obtuvo los siguientes valores.

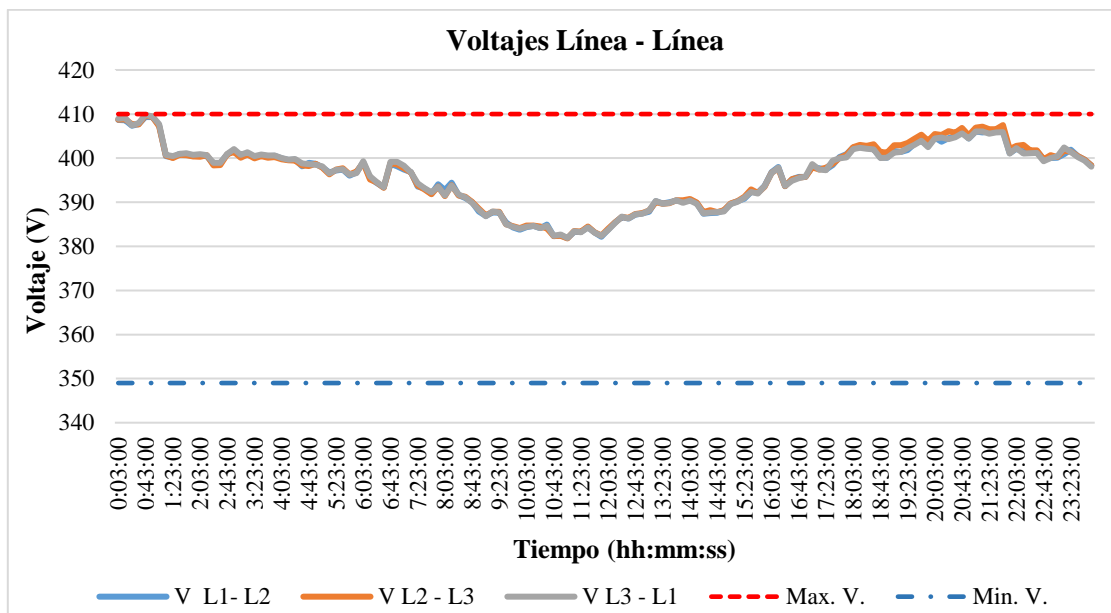
#### **Voltajes Línea – Línea.**

Para niveles de voltaje según la normativa vigente indica que las variaciones deben ser máximo  $\pm$  8 % en bajos voltajes, estos son: 349,60 V como voltaje mínimo permitido y 410,40 V como máximo voltaje permitido. La Tabla 19 muestra los niveles máximos, medio y mínimo registrados por el analizador, los cuales están dentro de la normativa.

**Tabla 19.- Voltajes Línea - Línea.**

<b>Voltajes Línea - Línea (V).</b>			
<b>Líneas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Línea 1/2</b>	351,58	393,73	409,49
<b>Línea 2/3</b>	357,59	393,91	409,66
<b>Línea 1/3</b>	363,09	393,71	409,82

La Fig. 12, indica como interactúan los niveles de voltaje cuando inician la producción según el horario de trabajo. El voltaje cae notablemente, pese a que el personal técnico de la empresa ajustó este voltaje mediante los taps del transformador con el objetivo de corregir esta reducción de voltaje.



**Fig. 12.-** Voltajes Línea a Línea

Las líneas de voltaje de la Fig. 12 se encuentran dentro del rango permitido en una media de 385 V, cumpliendo la norma.

En el Anexo B se presenta el comportamiento del voltaje Línea a Línea de todos los días que el analizador recopiló información.

### **Voltajes Línea – Neutro.**

Se realiza el análisis del voltaje parecido al análisis Línea a Línea, pero en este caso el voltaje analizado es el resultante entre la Línea y el neutro la normativa de igual manera indica que se puede tener una variación de voltaje del  $\pm 8 \%$  en bajos voltajes, el voltaje nominal del transformador es 219 V, según el rango de la normativa se establece 201,52 V como voltaje mínimo permitido y 236,52 V como voltaje máximo.

Tabla 20.- Voltajes Línea - neutro

<b>Voltajes Línea - Neutro (V).</b>			
<b>Líneas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Línea 1</b>	207,14	227,28	236,46
<b>Línea 2</b>	205,22	227,38	236,45
<b>Línea 3</b>	208,62	227,38	236,63

La Fig. 13, muestra el comportamiento de los voltajes, existiendo caídas de voltaje justo cuando se inicia la producción.

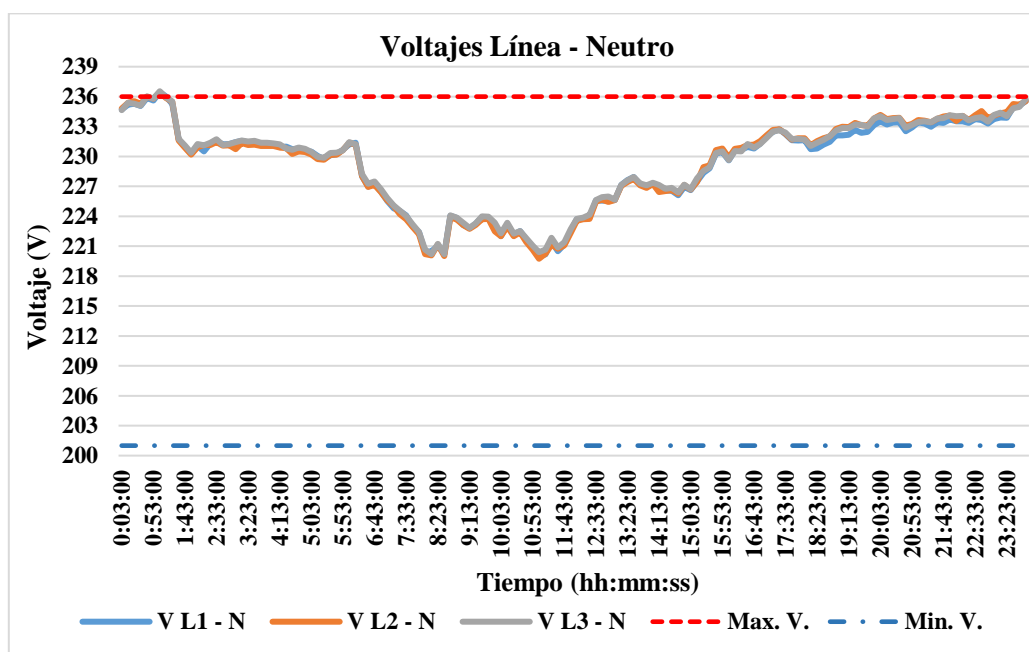


Fig. 13.- Voltajes Línea - Neutro

Aunque la caída de voltaje es considerable, se encuentran dentro de los estándares de la norma en una media de 220 V, cuando se inicia a trabajar.

En el Anexo B se presenta el comportamiento del voltaje línea a neutro de todos los días que el analizador tomo datos.

## 2.4.4 Niveles de corriente

### Corriente en las Fases

La Tabla 21 detalla las corrientes por línea obtenidas por el analizador, localizando corrientes que sobrepasan el valor nominal del transformador 1215 A. esto debido a las sueldas de punto instaladas en la nave de soldadura, en consecuencia, el transformador sufrirá grandes daños a futuro.

Tabla 21.- Corriente en las fases.

Corriente (A)			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	0	43,66	1449
Línea 2	0	45,39	1540
Línea 3	0	32,80	1482

En la Fig. 14, se puede apreciar el comportamiento de la corriente por fase, justo en la jornada de trabajo que tiene la empresa.

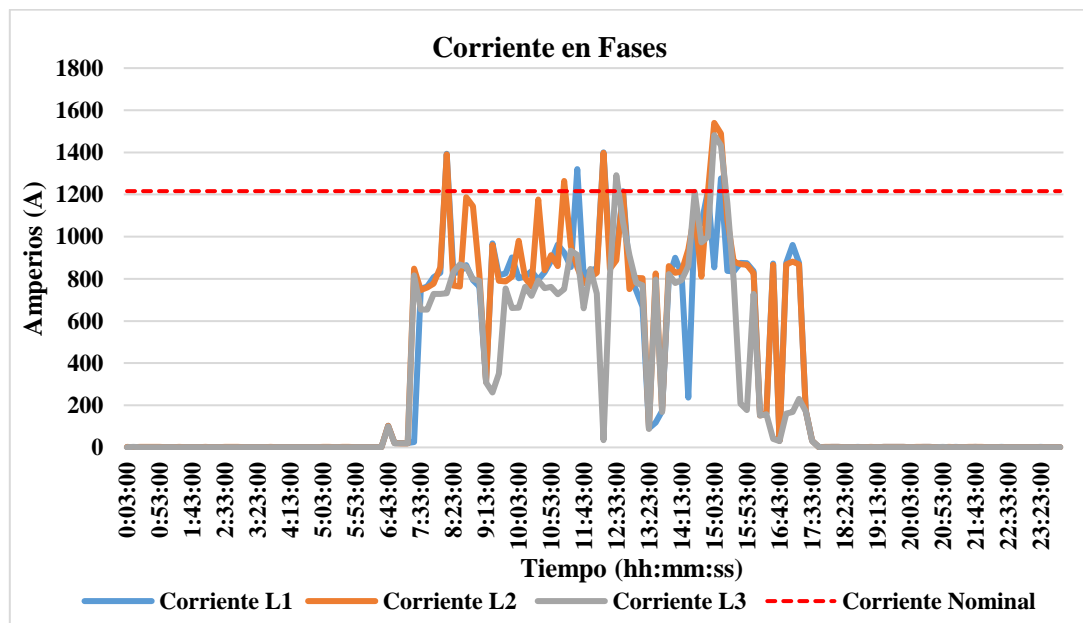


Fig. 14.- Corriente en las fases.

Las corrientes sobrepasan la corriente nominal en especial la L1 y L3, teniendo un valor de 1500 A aproximadamente.

En el Anexo B se presenta el comportamiento de las corrientes de todos los días que el analizador guardo información.

### Corriente en el Neutro.

También se realizó un análisis a las corrientes que podrían estar circulando por el neutro, expresado en la Tabla 22.

Tabla 22.- Corriente en el neutro.

Corriente (A)			
Línea	Mínimo	Medio	Máximo
Neutro	0	1,09	27

En la Fig. 15, se observa el comportamiento de la corriente por el neutro teniendo un único pico a las 12:43 am aproximadamente.

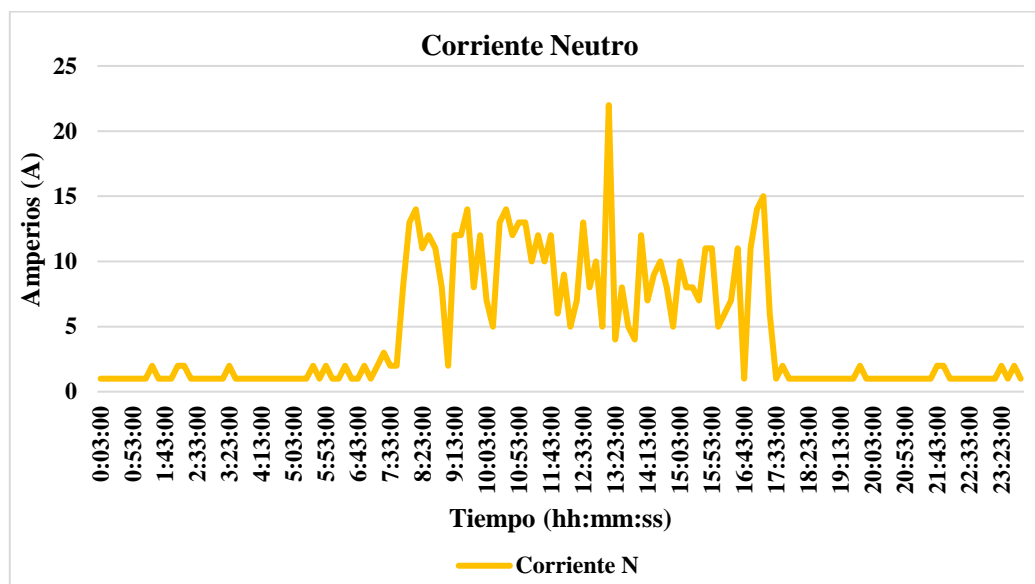


Fig. 15.- Corriente en el Neutro.

Como se puede observar la corriente en él tiene un pico muy alto alrededor del mediodía llegando hasta 20 A.

En el Anexo B se presenta el comportamiento de la corriente en el neutro de todos los días que el analizador tomo datos.

### 2.4.5 Factor de potencia

La regulación vigente indica que valor permitido para el factor de potencia debe ser mayor o igual a 0,92, en este caso la nave de soldadura tiene el problema de poseer un bajo factor de potencia, que se debería corregir y así evitar que se desgasten los equipos, en la Tabla 23 se expresan los valores de factor de potencia por fase y total.

Tabla 23.- Factor de potencia.

Factor de potencia			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	0,61	0,74	0,87
Línea 2	0,31	0,58	0,85
Línea 3	0,53	0,71	0,88
Total	0,67	0,77	0,86

La Fig. 16, indica el comportamiento que tiene el factor de potencia en un día de trabajo de la empresa. Cabe recalcar que a la empresa no recibe ninguna penalización ya que en otras naves cuenta con banco de capacitores que corrigen el factor de potencia.

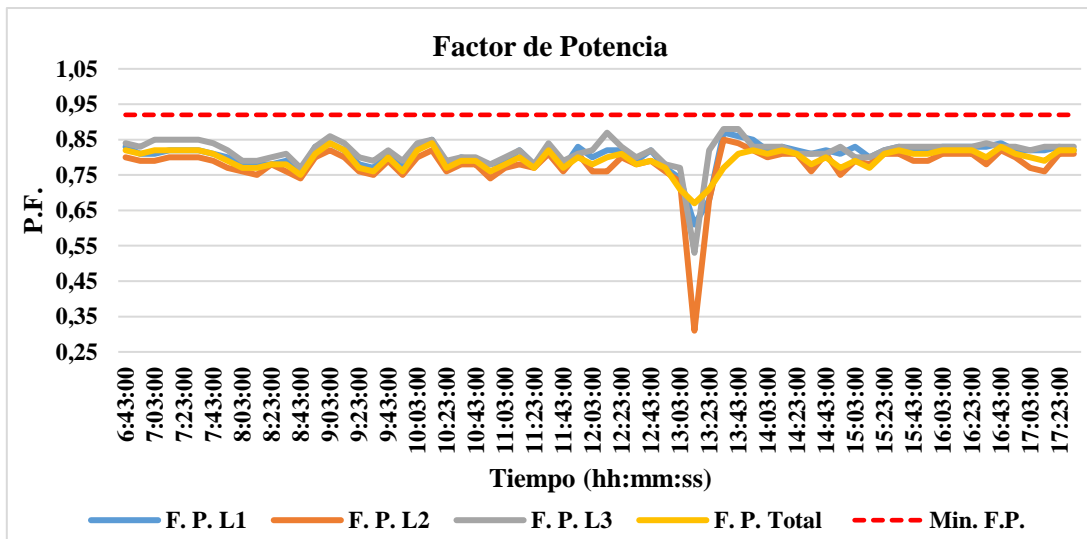


Fig. 16.- Factor de potencia.

El factor de potencia cae representativamente al mediodía, como indica la figura se tiene un factor muy bajo de 0,35.

En el Anexo B se presenta el comportamiento del factor de potencia en los días que el analizador tomo datos.

#### **2.4.6 Flicker**

La normativa vigente en el Ecuador indica: para perturbación rápida de voltaje no debe sobrepasar en 1 %, la relación flicker con respecto al voltaje, siendo inversamente proporcional, puesto que si el voltaje cae el flicker debería aumentar. En la Tabla 24 describe como un valor máximo de 3,50 %, incumpliendo así la normativa.

**Tabla 24.- Flicker.**

<b>Pst.</b>			
<b>Líneas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Línea 1</b>	0,05	0,62	2,77
<b>Línea 2</b>	0,06	0,77	3,50
<b>Línea 3</b>	0,05	0,48	2,87

En la nave de soldadura al iniciar la operación las sueldas de punto provocan una reducción del voltaje nominal incrementando el flicker, la Fig. 17, indica las interacciones de esta reducción de voltaje, por lo cual el flicker aumenta.

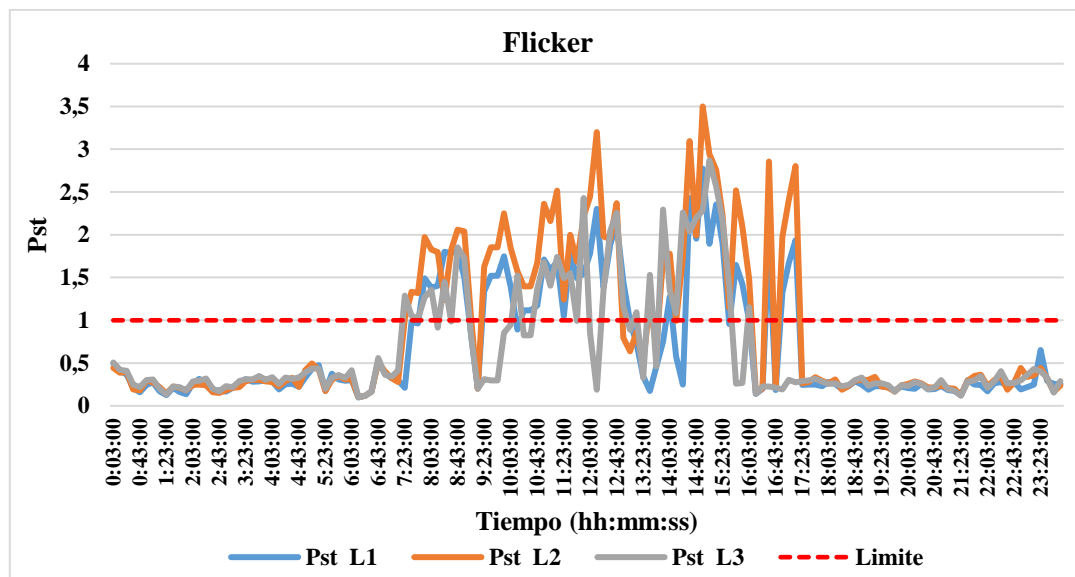


Fig. 17.- Flicker

El flicker sobrepasa el límite de 1 % desde que se empieza la jornada laboral hasta un 3,50 % como máximo hasta finalizar la jornada.

En el Anexo B se presenta el comportamiento del Pst en los días que el analizador todo dato.

## 2.4.7 Distorsión Armónica

### 2.4.7.1 Armónicos de Tensión

#### THD Tensión

Según la normativa vigente el rango permitido es del 8 % para la distorsión armónica total de voltaje, en la Tabla 25 se registra los valores máximos del analizador, obteniendo resultados por debajo del límite, cumpliendo con la normativa.

Tabla 25.- THD Tensión.

THD Tensión			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	1,48	3,14	7,74
Línea 2	1,62	3,23	7,92
Línea 3	1,44	3,01	7,76



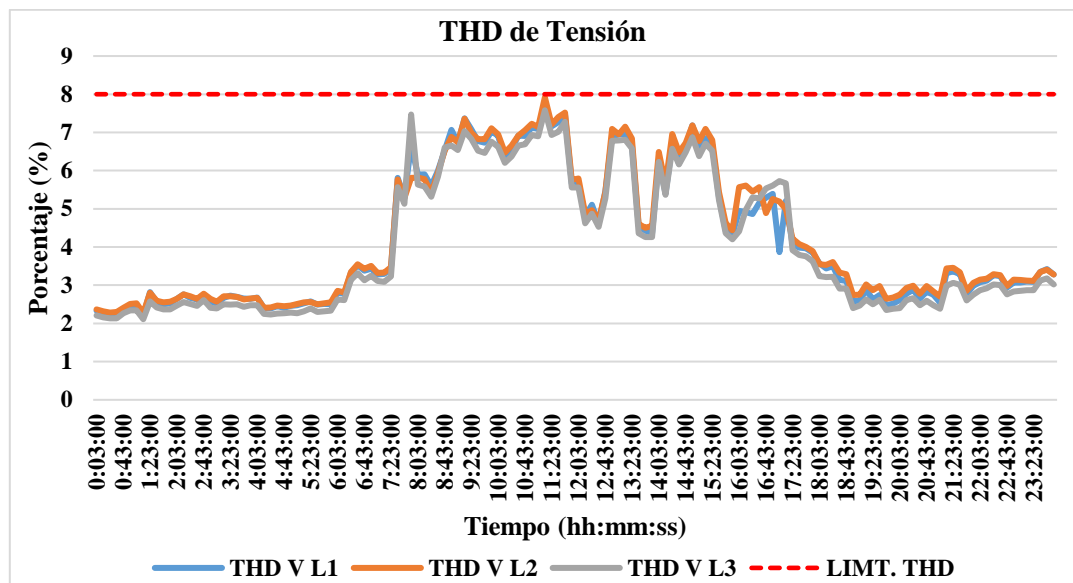


Fig. 18.- THD Tensión

EL THDV de las 3 líneas se mantienen dentro del límite permitido, con un pico de 7,92 % en L2.

En el Anexo B se presenta el comportamiento del THDV en los días que el analizador tomo datos.

### Armónicos individuales de tensión.

Para el análisis se ha considerado tres armónicos impares, los mismos que luego de la obtención de información mediante el analizador de redes fluke 435 II, se determinó que los siguientes son los más representativos.

Según la regulación nacional vigente, el rango permitido en armónicos individuales de tensión es de 5 % en bajo voltaje.

En el Anexo B se presenta el comportamiento de los armónicos individuales como son el 3er, 5to y 7mo, siendo los más representativos los cuales fueron tomados por el analizador de redes.

### Armónico 3

En la Tabla 26 se colocaron los valores del 3er armónico, luego del análisis se determina si está dentro del rango permitido por la normativa, siendo registrado con un valor máximo de 4,24 %, siendo menor del 5 % expresado en la normativa.

Tabla 26.- 3er Armónico de Tensión.

3er armónico de tensión (%)			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	0,22	2,23	4,24
Línea 2	0,14	2,19	4,24
Línea 3	0,22	1,93	3,65

En la Fig. 19, se puede observar, cómo reacciona el 3er armónico en la red, cuando las sueldas de punto están en operación, este se encuentra en el rango de la normativa.

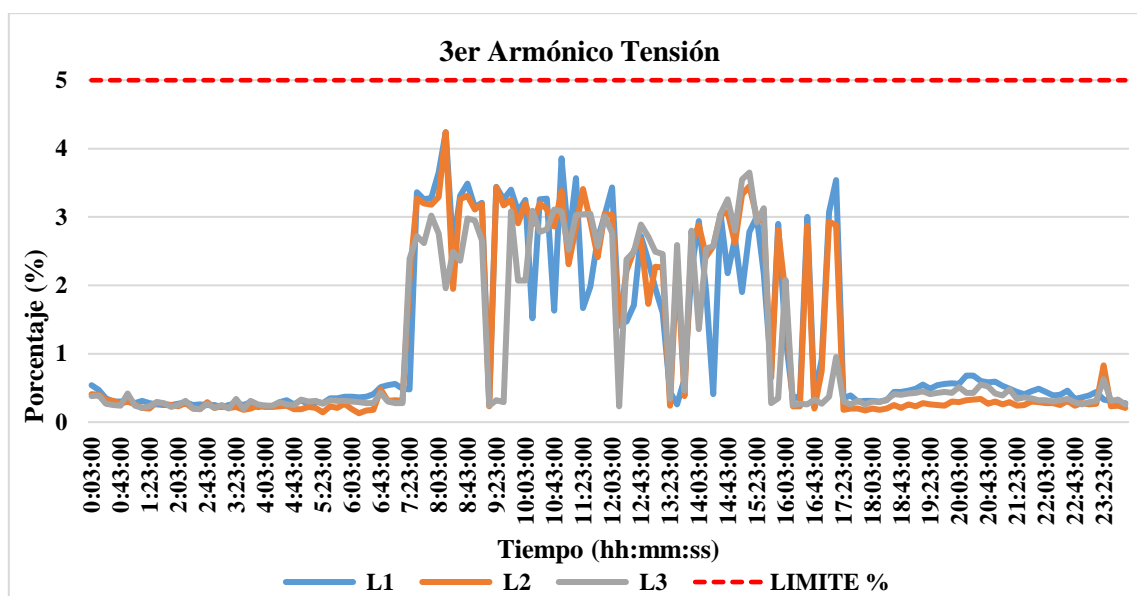


Fig. 19.- 3er Armónico de Tensión.

Los picos más representativos del tercer armónico están en L1 y L2 con valor máximo de 4,24 %.

### Armónico 5

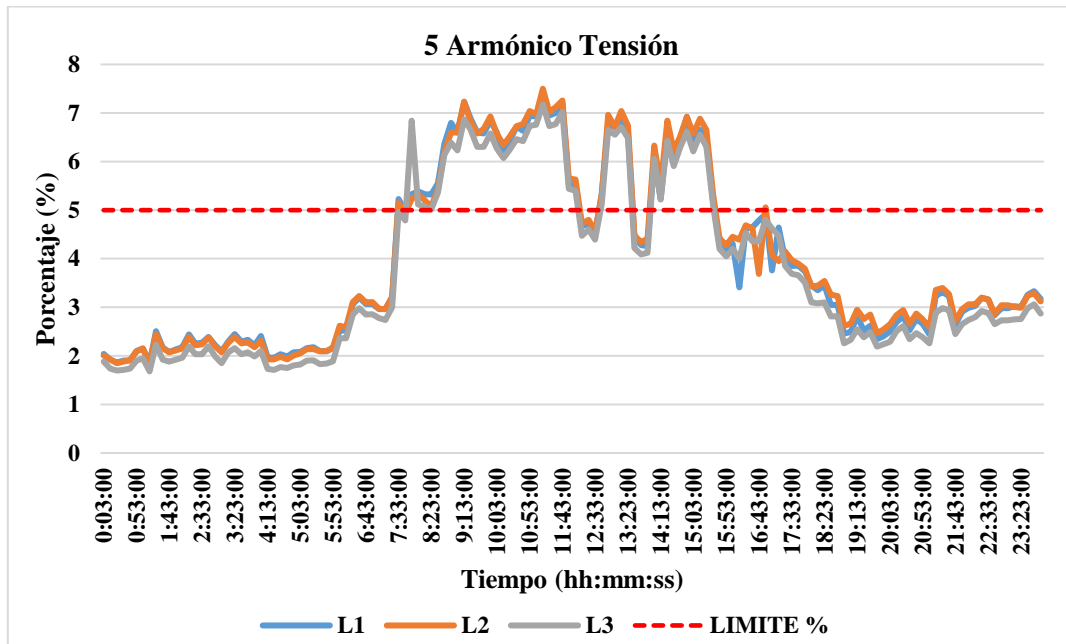
Para todos los armónicos individuales tiene el rango limite expresada por la regulación del 5 %, en la Tabla 27 se mencionan los valores máximos registrados para este armónico.

**Tabla 27.- 5to Armónico de Tensión.**

<b>5to armónico de Tensión</b>			
<b>Líneas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Línea 1</b>	1,90	4,62	7,34
<b>Línea 2</b>	1,88	4,69	7,50
<b>Línea 3</b>	1,68	4,43	7,18

Como se observó en la Tabla 27, los valores máximos sobrepasan el nivel permitido por la normativa que es de 5 %, con lo cual podría estar afectando al correcto funcionamiento del sistema eléctrico de la nave de soldadura, perturbando a la red de la empresa eléctrica y con ello estableciendo llamados de atención de igual manera penalizaciones por la introducción de estos armónicos a la red de la empresa eléctrica.

La Fig. 20, indica el comportamiento de este armónico por cada fase del sistema eléctrico.



**Fig. 20.- 5to armónico de Tensión**

Los picos más representativos del 5to armónico se encuentran en las 3 líneas con valor máximo de 7,50 % superando la normativa.

### Armónico 7mo.

En la Tabla 28 se presenta los valores registrados para este armónico obteniendo 2,83 % como máximo, indicando que dichos valores están dentro del rango permitido del 5 % regulado por normativa vigente.

Tabla 28.- 7mo Armónico de Tensión.

7mo Armónico de Tensión			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	1	1,82	2,65
Línea 2	0,89	1,86	2,83
Línea 3	0,88	1,78	2,68

La Fig. 21, muestra los límites máximos y mínimos obtenidos para este armónico en un día de trabajo particular.

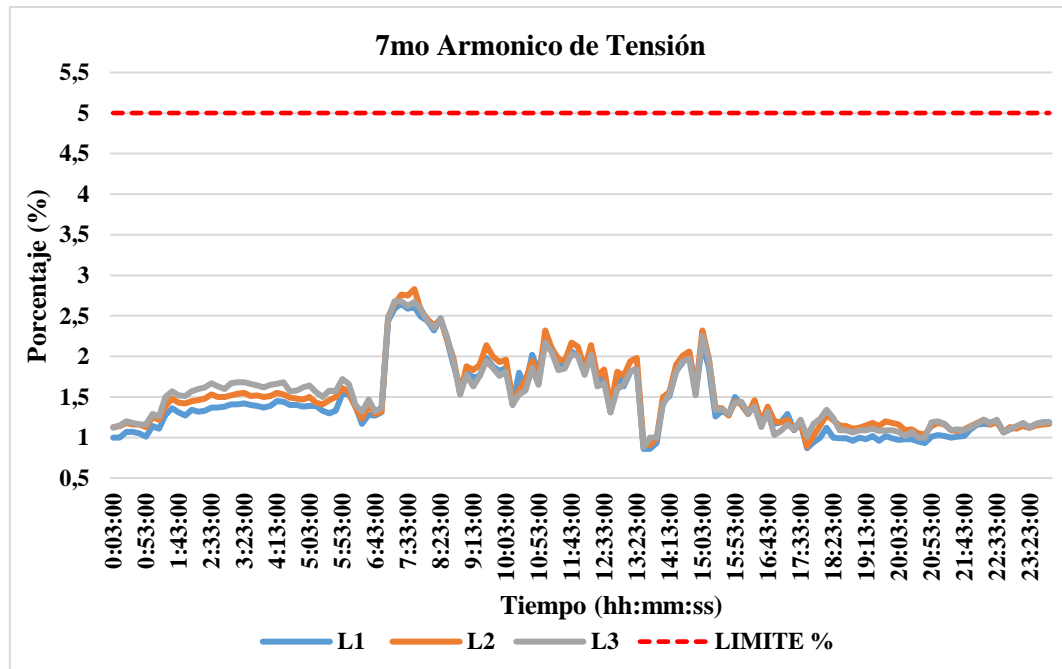


Fig. 21.- 7mo Armónico de Tensión.

Los armónicos de las 3 líneas se encuentran dentro de la normativa, con un valor máximo de 2,80 %.

#### 2.4.8 Armónicos de Corriente

Para determinar el nivel de contaminación armónica se debe realizar el cálculo de la corriente de cortocircuito vs la corriente de carga, dichos valores están dados por la regulación ARCERNNR 002/20, la misma que toma como referencia la normativa IEEE-519-1991, observar Tabla 8.

Los datos técnicos del transformador instalado en la nave de soldadura son: capacidad del transformador 800 kVA y niveles de voltaje en el secundario 380 V, Línea – Línea y 219 V Línea - neutro, reactancia del transformador 3,70 %.

Cálculo de la corriente de cortocircuito en relación con la corriente de carga.

Voltaje con respecto a la reactancia del transformador:

$$3,70 \% \times \frac{380 V}{100 \%} = 14,06 V .$$

Según la placa del transformador se tiene una corriente de carga máxima de 1215 A.

$$380 V \times \frac{1215 A}{14,06 V} = 32837,84 A.$$

Siendo esta la corriente de corto circuito (Isc) máxima.

La relación de  $I_{sc}/I_L$  es:

$$\frac{32837,84 A}{1215 A} = 27,02 A.$$

Siendo este el valor de corto circuito, para referirse a la Tabla 8. De igual manera indica que el límite para los armónicos de corriente es de **20 < 50**, siendo estas el **7 %** para armónicos impares desde **3 ≤ h < 11**, **3,50 %** para armónicos desde **11 ≤ h < 17** y un **TDD de 8 %**.

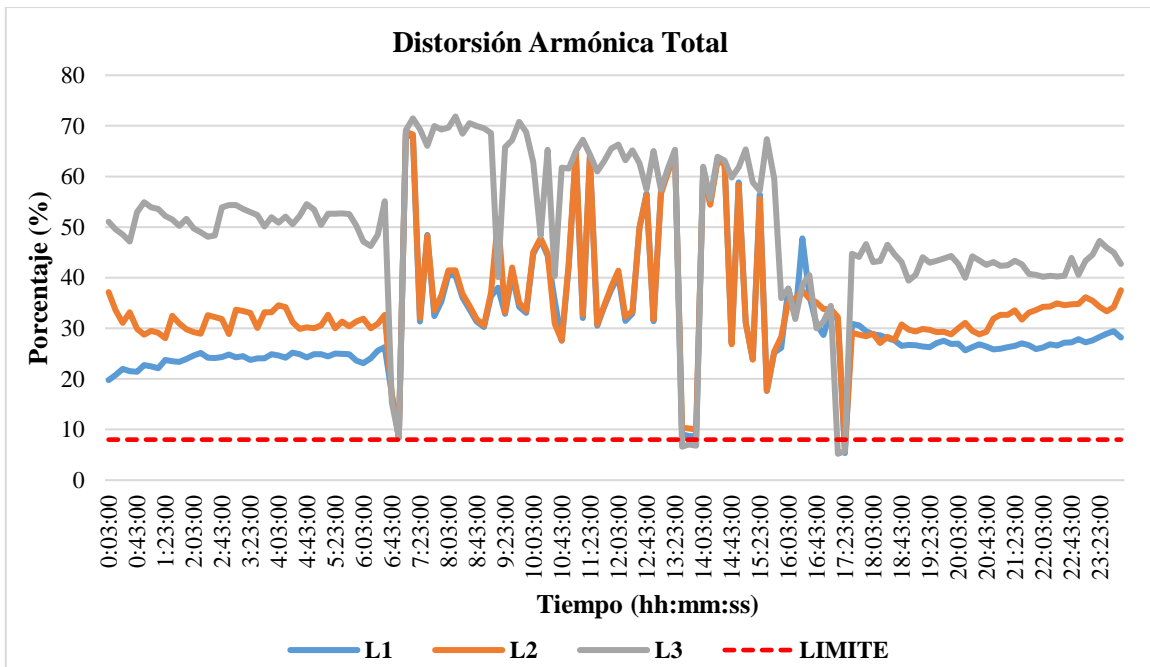
### Distorsión Armónica Total de Corriente (THDI)

Según los cálculos establecidos anteriormente, la Tabla 29 detalla los límites de distorsión armónica de corriente presentes que se obtuvieron con el analizador de redes en el PCC.

En el Anexo B se presenta el comportamiento de los datos registrados por el analizador de redes para THDI, en los días de medición.

**Tabla 29.-** Distorsión armónica total THDI.

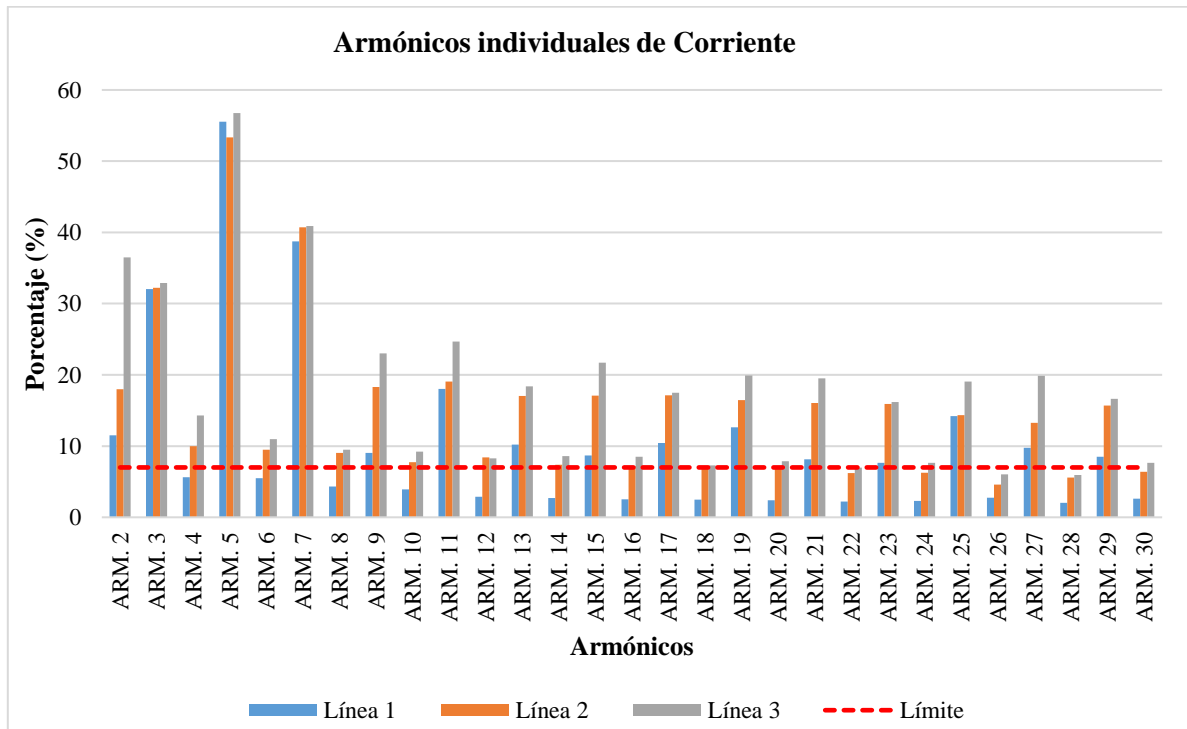
THD de Corriente.			
Líneas	Mínimo	Medio	Máximo
Línea 1	5,35	36,57	67,78
Línea 2	6,31	37,31	68,31
Línea 3	5,72	38,79	71,86
Neutro	15,12	86,86	158,59



**Fig. 22.-** Distorsión Armónica Total THDI.

En Fig. 22, se puede observar como el THDI está sobre el nivel de la normativa recomendada con un 71,86 %.

**Armónicos individuales de Corriente.**



**Fig. 23.-** Armónicos individuales de corriente

Como se observa en la Fig. 23, el armónico de corriente individual de mayor predominación es el 5to con 56,77 %, seguido por el 7mo con 40,88 % y el 3ro con 32,23 %, siendo estos los que se debe tomar como referencia para realizar el cálculo del filtro con el objetivo de mitigar estos armónicos.

**2.5 Conclusiones Capítulo II**

- El estudio de las variables medidas por el analizador, permitió realizar un diagnóstico, sobre el estado actual del sistema eléctrico de la nave de soldadura, como se pudo observar el voltaje cae notablemente, pese a que el personal técnico de la empresa ajusta este voltaje mediante los taps del transformador con el objetivo de corregir esta reducción de voltaje.

- El análisis de las mediciones realizadas por el analizador de redes fluke 435 II, facilitó determinar el nivel de contaminación armónica que existe en la nave de soldadura, siendo predominante el 5to armónico de tensión, el cual está asociado a las cargas no lineales como son las sueldas de punto.
- El problema de la nave de soldadura es que posee un bajo factor de potencia. Es fundamental que dicho factor deba ser corregido de esta manera evitar que se desgasten los equipos y desde luego permitir que la empresa trabaje a su máxima capacidad.



## **CAPITULO III**

### **3.1 Título de la Propuesta.**

Elaboración de propuestas que permita mitigar las perturbaciones armónicas y mejorar la calidad de energía eléctrica.

En este capítulo se establece el diseño de un filtro pasivo, que elimine las diferentes perturbaciones armónicas producidas por las cargas no lineales y reduzca el flicker, las cuales están alimentadas desde el secundario del transformador ecuatran de 800 kVA, que alimenta a la parte principal de la nave de soldadura como son las sueldas de punto.

### **3.2 Justificación**

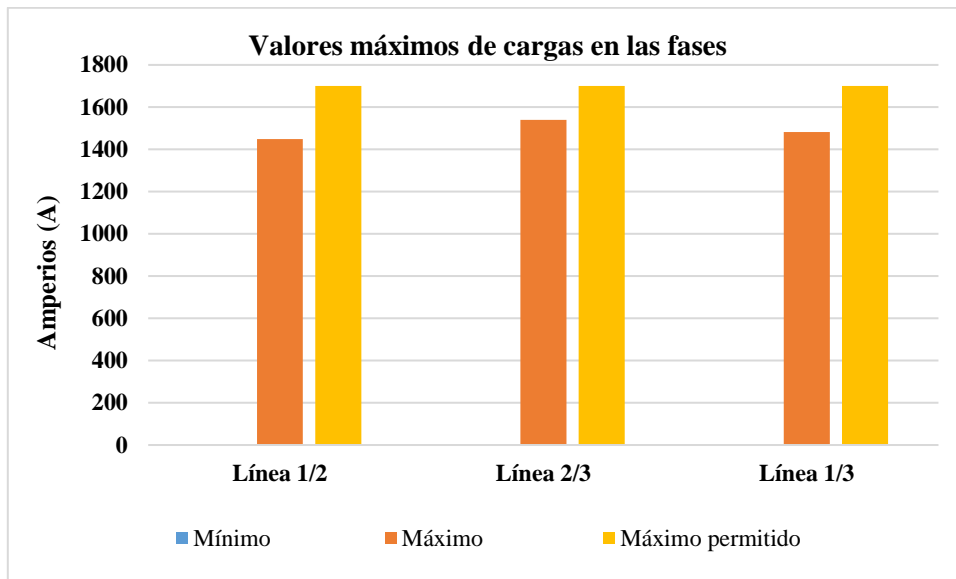
Con los datos obtenidos en el capítulo anterior, se pudo conocer los diferentes armónicos más representativos que están siendo generados por estas cargas no lineales, de los cuales podemos observar que están fuera de los límites permitidos por la regulación del ARCERNNR – 002/20, la cual se encuentra vigente en el país, por lo cual se propone la implementación de un filtro pasivo que permitirá reducir los niveles de armónicos.

### **3.3 Objetivo**

Identificar algunas propuestas para mitigar los armónicos más representativos y mejorar la calidad de energía eléctrica.

### **3.4 Balance de cargas**

El personal técnico de CIAUTO Cía. Ltda. ya realizó un análisis de balances cargas el cual se ratifica en el capítulo II con ayuda de la herramienta que se utilizó para observar dichas cargas, superan el valor nominal del transformador que es 1200 A, como se muestra a continuación:



**Fig. 24.-** Niveles de carga de fases

Como se puede observar el balance de cargas se encuentra realizado ya que los valores mínimos y máximos están dentro de la norma, por lo que se propone diseñar un filtro para reducir armónicos y mejorar la calidad energética.

### 3.5 Dimensionamiento de conductores.

Actualmente la empresa dispone de un transformador desde los bornes secundarios con 4 conductores de 4/0 AWG por fase y 2 conductores 4/0 AWG para el neutro, que va hasta el TDP.

Los ductos barras de cada línea de producción desde el TDP hasta están alimentadas por 9 conductores de 3/0 AWG por fase y 1 conductor de 2/0 para el neutro. Los ductos barras cuenta con barras de 1000 A por fase y neutro esto en cada línea de producción.

#### Conductor en Fases.

El personal técnico de la empresa según la planificación y los problemas que han presentado en el transcurso de sus actividades, instalaron corridas de cable para evitar sobrecalentamiento de estos, por ello se evidencia los 9 conductores por fase.

Para corregir este problema se recomienda reemplazar los conductores con respecto a la corriente nominal del transformador 1200 A, se sugiere realizar dos corridas de cable 1000 MCM por fase.

### **Conductor Neutro.**

En sistemas trifásicos balanceados con cargas lineales y una componente fundamental de 60 Hz de la corriente, se puede producir la anulación de corriente en el neutro debido al desfase de corrientes en 120 grados, siendo la sumatoria de las tres corrientes igual a cero.

Por otra parte, en corrientes monofásicas no lineales como es el caso de algunas de las sueldas instaladas en la nave de soldadura, las corrientes no se anulan y existe un amperaje de 24 A en el neutro siendo este provocado por el 3er armónico, a pesar de que el personal técnico de la empresa a realiza un balance de sus cargas.

Para evitar la sobrecarga en el neutro en un sistema con armónicos se recomienda dimensionar el neutro 1,70 veces mayor al de los conductores de cada fase o a su vez el doble del conductor de cada fase, en la nave de soldadura actualmente se encuentran instalados desde el transformador hacia el TDP dos corridas de cable 2/0 AWG, teniendo estos la mitad de la capacidad de los conductores instalados en cada fase, 4 corridas de cable 4/0 AWG, por lo que se recomienda reemplazar esos conductores de dos maneras:

- Aumentando más corridas de cable 2/0 AWG
- Instalando uno de mayor dimensión 250 MCM.

Al reemplazar los conductores en las fases por los de mayor dimensión anteriormente recomendados de igual manera se debería recalculan el cable del neutro con las indicaciones ya mencionadas.

Además, en circuitos de derivación trifásica, se debe instalar conductores de neutro por cada circuito y por cada fase.

### 3.6 Redimensionamiento del transformador.

Debido a la carga instalada en la nave de soldadura se debe redimensionar su transformador principal actualmente se encuentra instalado un de 800 kVA, por lo que debería ser reemplazado por uno de 1,50 MVA de acuerdo con la carga instalada en la nave de soldadura, una alternativa para reemplazar el transformador existente son los transformadores de categoría K, ya que se pueden modificar o construir en base a las siguientes características.

- Sobredimensionado del bobinado primario esto para soportar las corrientes circulantes armónicas triplens.
- Utilizar varios conductores de pequeña sección en paralelo en el bobinado secundario para reducir el efecto piel.
- Diseñar en el bobinado secundario bobinados múltiples que cambien de fase a secuencia cero y así cancelar las corrientes armónicas triplens.

### 3.7 Diseño de filtro

Para el diseño del filtro en este caso pasivo se necesita conocer la potencia activa, la cual la obtendremos en base a las mediciones realizadas, obteniendo así los siguientes datos.

**Tabla 30.-Potencia Activa.**

<b>Potencia Activa (W)</b>			
<b>Líneas</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Línea 1</b>	7.400	18.800	26.8000
<b>Línea2</b>	7.400	15.600	28.8000
<b>Línea 3</b>	7.400	15.600	210.200
<b>Total</b>	22.200	46.200	415.200

**Elaborado por:** Jaime Pérez.

La Tabla 30, muestra que el analizador registró una potencia activa máxima 451.200 W, la Fig. 25, muestra el comportamiento de la potencia activa total en el día más activo.

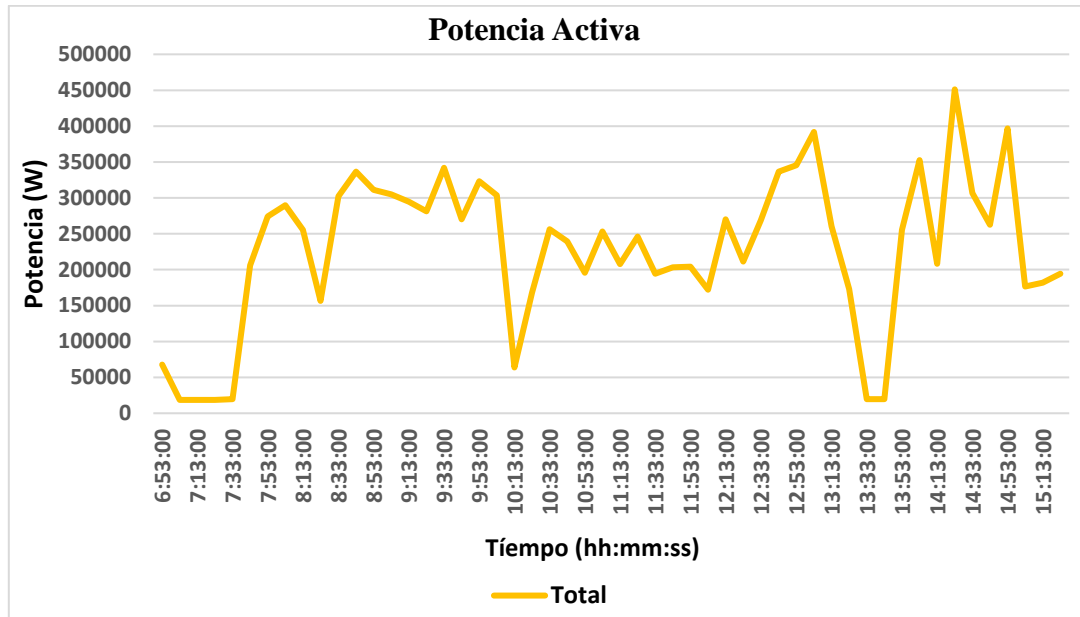


Fig. 25.- Potencia Activa.

Luego de obtener la potencia activa se realiza el cálculo de los ángulos, se toma como referencia el factor de potencia obtenido en la tabla 23, la cual indica un valor de 0,86, en base a la resolución ARCERNR – 002/20, el factor de potencia no debe ser inferior a 0,92, para el cálculo se la pretende elevar a 0,95.

La potencia reactiva de compensación es:

$$Q_c = P(\tan(\cos^{-1}FP_{actual}) - \tan(\cos^{-1}FP_{nuevo}))$$

$$Q_c = 415,2 \text{ kW}(\tan(\cos^{-1}0,86) - \tan(\cos^{-1}0,95))$$

$$Q_c = 415,2 \text{ kW}(\tan(30,68) - \tan(18,19))$$

$$Q_c = 415,2 \text{ kW}(0,59 - 0,33)$$

$$Q_c = 117.312 \text{ VAr} = 117,31 \text{ kVAr}$$

Para el cálculo de la impedancia efectiva del banco de capacitores se obtiene el voltaje nominal del transformador en el secundario que es 380 V Línea – Línea.

$$X_{eff} = \frac{(V_{LL})^2}{Q_c}$$

$$X_{eff} = \frac{(380 V)^2}{117,31 kVAr}$$

$$X_{eff} = 1,23 \Omega$$

El capítulo II determina que el armónico más representativo es el 5to armónico que tiene un valor de 56,77 %, lo cual según la fundamental que es de 60 Hz, resulta una frecuencia de 300 Hz, la normativa IEEE Std 1531 indica que se debe utilizar del 3 % al 15 % por debajo de la frecuencia inicial de sintonización en este caso se utiliza el valor del 10 % menor, dando como resultado 270 Hz.

Cálculo de la reactancia capacitiva del filtro:

$$X_C = \frac{h^2}{(h^2 - 1)} * X_{eff}$$

$$X_C = \frac{(4,5)^2}{(4,5^2 - 1)} * 1,23 \Omega$$

$$X_C = 1,29 \Omega$$

$$w = 2\pi f$$

$$w = 2 * \pi * 60$$

$$w = 377$$

Capacidad del capacitor.

$$C = \frac{1}{w * X_C}$$

$$C = \frac{1}{377 * 1,29 \Omega}$$

$$C = 2,05 \text{ mF} \cong 2050 \text{ uF}$$

El valor que existe en el mercado para este tipo de condensadores es de 2000 uF y se toma este valor para el diseño del filtro.

Calculo para el inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

$$X_L = \frac{1,29}{4,5^2}$$

$$X_L = 63,07 \text{ m}\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{w}$$

$$L = \frac{69,07 \text{ m}\Omega}{377}$$

$$L = 167,29 \text{ uH}$$

Aplicando un factor de calidad de 80 se obtiene el valor de la resistencia que es:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X_L}{Q}$$

$$R = \frac{69,29 \text{ m}\Omega}{80}$$

$$R = 866,12 \mu\Omega$$

Calculado los valores de los elementos, se determina las características del filtro que se debería instalar.

**Tabla 31.-** Características del filtro para el 5to armónico

Conexión	Delta
Potencia reactiva de compensación (kVAr)	117,31
Voltaje Línea - Línea (V)	380
Factor de potencia deseado	0,95
Bobina ( $\mu H$ )	167,29
Condensador ( $\mu F$ )	2050
Resistencia ( $\mu\Omega$ )	866,12

De igual manera se procede a calcular el valor para reducir el 3er armónico el cual es 32,23 %, a partir de los datos anteriormente obtenidos, teniendo una frecuencia fundamental de 60 Hz, se obtiene una frecuencia de 180 Hz.

Cálculo de la reactancia capacitiva del filtro:

$$X_c = \frac{h^2}{(h^2 - 1)} * X_{eff}$$

$$X_c = \frac{(3,5)^2}{(3,5^2 - 1)} * 1,34 \Omega$$

$$X_c = 1,46 \Omega$$

$$w = 2\pi f$$

$$w = 2 * \pi * 60$$

$$w = 377$$

Capacidad del capacitor.



$$C = \frac{1}{w * X_C}$$

$$C = \frac{1}{377 * 1,46 \Omega}$$

$$C = 1,81 \text{ mF} \cong 1810 \text{ uF}$$

El valor que existe en el mercado para este tipo de condensadores es de 2000 uF y se toma este valor para el diseño del filtro.

Calculo para el inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

$$X_L = \frac{1,46}{3,5^2}$$

$$X_L = 119,18 \text{ m}\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{w}$$

$$L = \frac{119,18 \text{ m}\Omega}{377}$$

$$L = 316,14 \text{ uH}$$

Aplicando un factor de calidad de 80 se obtiene el valor de la resistencia que es:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X_L}{Q}$$

$$R = \frac{119,18 \text{ m}\Omega}{80}$$

$$R = 1,48 \text{ u}\Omega$$

Calculado los valores de los elementos, se determina las características del filtro que se debería instalar.

**Tabla 32.-** Características del filtro para el 3er armónico

Conexión	Delta
Potencia reactiva de compensación (kVAr)	107,95
Voltaje Línea - Línea (V)	380
Factor de potencia deseado	0,95
Bobina (uH)	316,14
Condensador (uF)	1810
Resistencia (mΩ)	1,48

Finalmente se calcula el valor para reducir el 7mo armónico el cual tiene un valor de 40,88 %, a partir de los datos anteriormente obtenidos, teniendo una frecuencia fundamental de 60 Hz, se obtiene una frecuencia de 420 Hz.

Cálculo de la reactancia capacitiva del filtro:

$$X_C = \frac{h^2}{(h^2 - 1)} * X_{eff}$$

$$X_C = \frac{(6,7)^2}{(6,7^2 - 1)} * 1,34 \Omega$$

$$X_C = 1,37 \Omega$$

$$w = 2\pi f$$

$$w = 2 * \pi * 60$$

$$w = 377$$

Capacidad del capacitor.

$$C = \frac{1}{w * X_C}$$

$$C = \frac{1}{377 * 1,37 \Omega}$$

$$C = 1,93 \text{ mF} \cong 1930 \text{ uF}$$

El valor que existe en el mercado para este tipo de condensadores es de 2000 uF y se toma este valor para el diseño del filtro.

Calculo para el inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

$$X_L = \frac{1,37}{6,7^2}$$

$$X_L = 30,52 \text{ m}\Omega$$

$$L = \frac{X_L}{w}$$

$$L = \frac{30,52 \text{ m}\Omega}{377}$$

$$L = 80,95 \text{ uH}$$

Aplicando un factor de calidad de 80 se obtiene el valor de la resistencia que es:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X_L}{Q}$$

$$R = \frac{80,95 \text{ m}\Omega}{80}$$

$$R = 1,02 \text{ }\mu\Omega$$

Calculado los valores de los elementos, se determina las características del filtro que se debería instalar.

**Tabla 33.-** Características del filtro para el 7mo armónico

Conexión	Delta
Potencia reactiva de compensación (kVAr)	107,95
Voltaje Línea - Línea (V)	380
Factor de potencia deseado	0,95
Bobina ( $\mu H$ )	80,95
Condensador ( $\mu F$ )	1930
Resistencia ( $\mu\Omega$ )	1,02

### Modelo de filtro a utilizar

La empresa RTR fabrica filtros bajo pedido con los valores requeridos, el filtro que se propone implementar se muestra en la Fig. 26.



Fig. 26.- Filtro pasivo marca IREM

### 3.7.1 Simulación de Armónicos en el Software

En el software PowerFactory-DlgSILENT, se llevó a cabo la implementación del circuito eléctrico de la nave de soldadura con sus cargas principales ver anexo A, y corridas de flujo armónico los cuales se presentan a continuación.

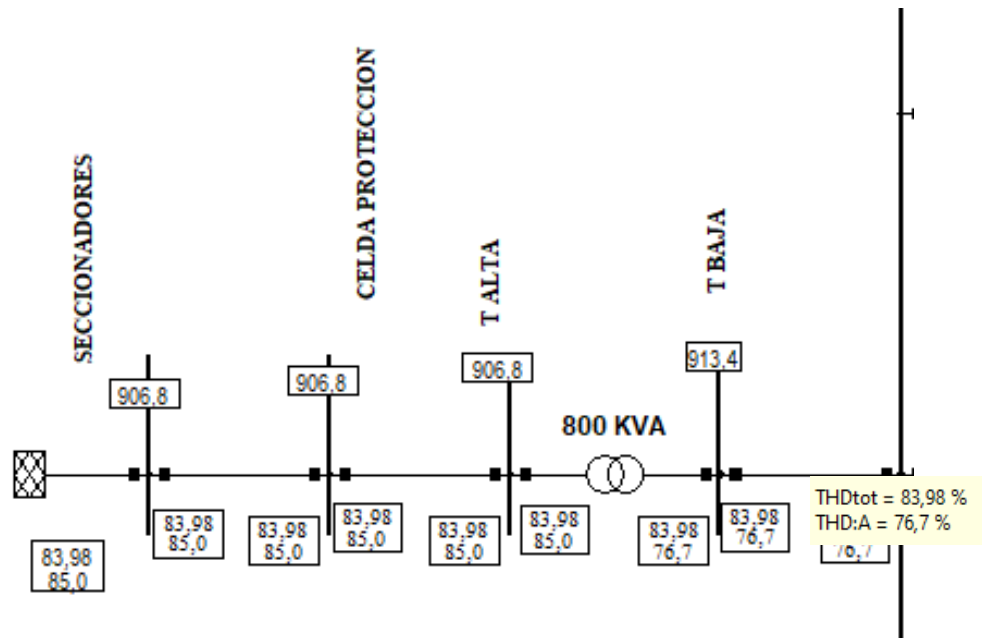


Fig. 27.- Corrida de Flujo Armónico.

En la Fig. 27, muestra una corrida de flujo armónico, en donde el THDI total esta por 83,98 % con una diferencia del 10 % con respecto al valor registrado por el analizador que es 71,86 %.

### Armónicos individuales de corriente.

A continuación, se puede divisar los armónicos de corrientes resultantes de la implementación en el programa.

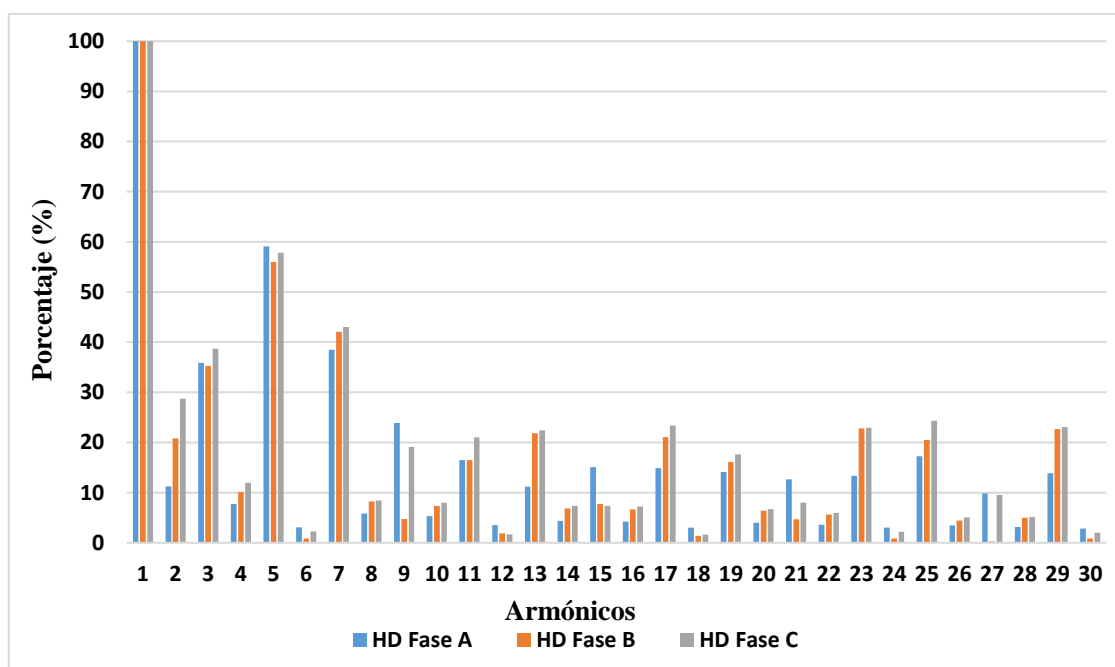
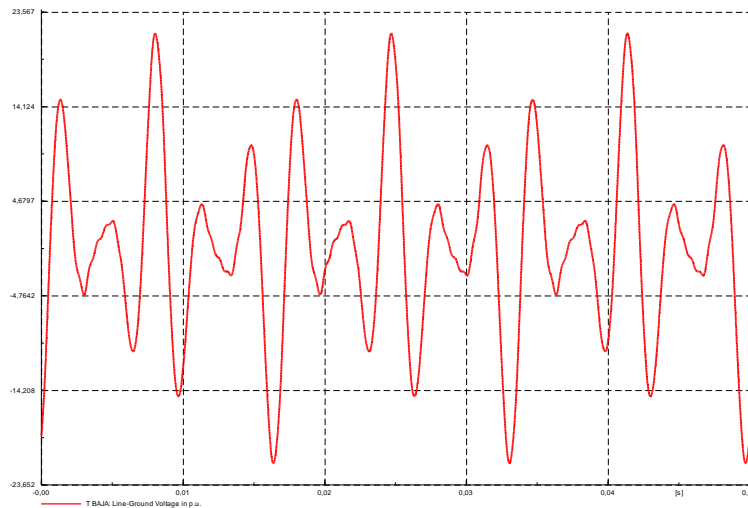


Fig. 28.- Porcentaje de armónicos sin el filtro aplicado

La Fig. 28, muestra el valor inicial de los armónicos, como se detalló anteriormente los armónicos más representativos son el 3ro, 5to y 7mo, con un valor de 38,70 %, 59,13 % y 43,03 % respectivamente con una diferencia del 18 %, 5 %, 7 %, en relación a los datos registrados en la medición.

### Forma de Onda.

Del software se pudo extraer la forma de onda con los armónicos presentes en el circuito.

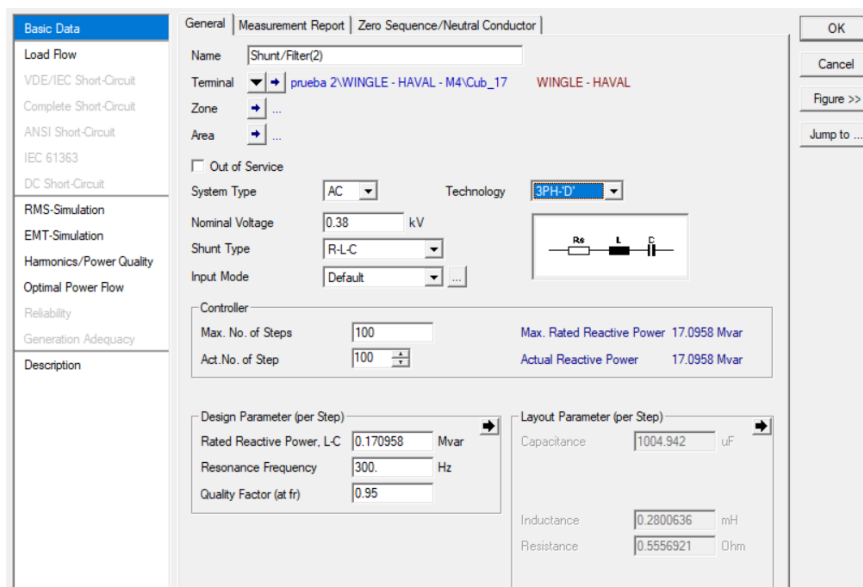


**Fig. 29.-** Onda sin aplicar filtro

De igual manera se puede observar en la Fig. 29, la forma de onda con los armónicos, dando como resultado una onda nada sinusoidal.

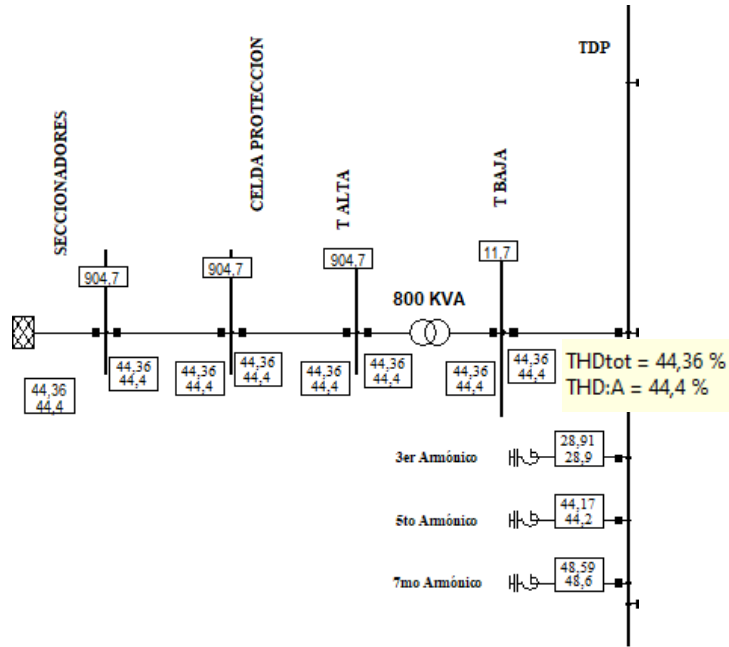
### 3.7.2 Aplicación del filtro

Con los datos que se obtuvo anteriormente, se implementa el filtro en el software PowerFactory-DlgSILENT, como se muestra en la Fig. 30.



**Fig. 30.-** Interfaz para aplicar el filtro

## Diagrama unifilar con los filtros



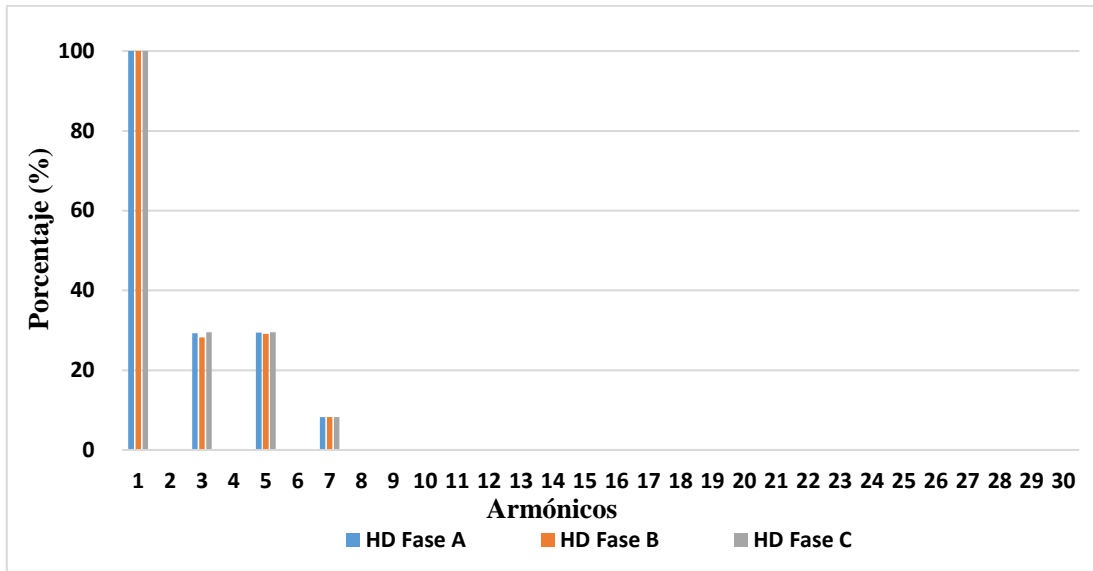
**Fig. 31.-** Diagrama unifilar con el filtro aplicado

La Fig. 31, muestra cómo se aplicó los filtros para los 3 armónicos antes calculados, se instalan en el PCC, y dando como resultado los siguiente un THDI con el 44,36 %, una reducción aproximadamente del 50%, con relación al 83,98 % que tenía ante de ser colocado los filtros.

### Armónicos Individuales de corriente.

Con respecto a los armónicos individuales de corriente el programa nos da como resultado los siguiente.

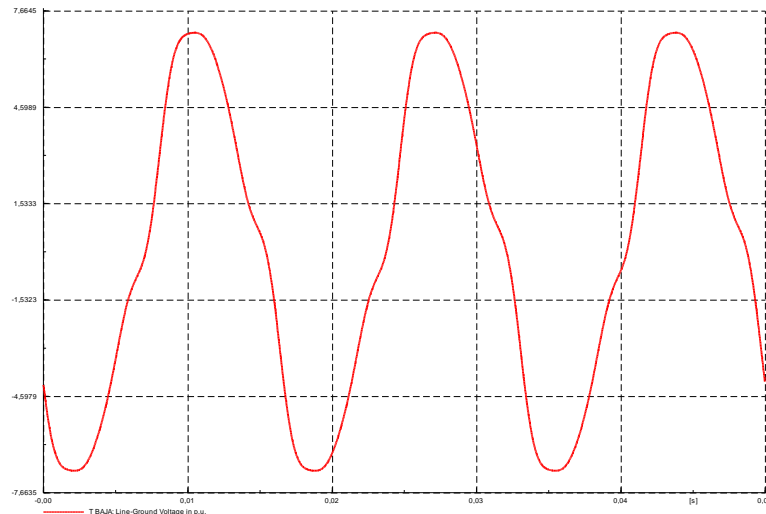




**Fig. 32.-** Porcentaje de armónicos con el filtro aplicado

La Fig. 32, se observa el valor de los armónicos luego de aplicar el filtro, como se puede observar el 3er armónico se redujo a un 29,2 %, el 5to armónico tuvo una reducción a 29,1 % y el 7mo armónico disminuyó hasta 8,2 %.

### Forma de Onda



**Fig. 33.-** Onda con filtros instalados

La Fig. 33, muestra como los filtros, aunque no eliminan por completo los armónicos mejoran la calidad energética, esto se puede comprobar con la forma de la onda.

## RESULTADOS

En la Tabla 34 se presenta de manera más detallada los datos obtenidos antes y después de obtener el filtro.

**Tabla 34.-** Porcentaje de armónicos con y sin filtro

MAGNITUD	SIN FILTRO	CON FILTRO
3er Armónico en Fase A	32,04 %	29,30 %
3er Armónico en Fase B	32,23 %	28,20 %
3er Armónico en Fase C	32,88 %	29,50 %
5to Armónico en Fase A	55,56 %	29,40 %
5to Armónico en Fase B	53,35 %	29,10 %
5to Armónico en Fase C	56,77 %	29,50 %
7mo Armónico en Fase A	38,72 %	8,20 %
7mo Armónico en Fase B	40,71 %	8,20 %
7mo Armónico en Fase C	40,88 %	8,20 %

Como se puede observar los armónicos se reducen en un para el 3er armónico se reducen en un 12,79 %, en el 5to armónico se reducen en 51,63 % y en el 7mo armónico su reducción es del 78,57 %. Aunque no se logra eliminarlos por completo, la reducción de los armónicos es más del 50 %.

### Análisis de costos

La Tabla 35 muestra los costos de adquisición para los filtros aplicados teóricamente.

**Tabla 35.-** Costos de los filtros

COSTO DE ADQUISICIÓN DE FILTROS			
N°	Cantidad	Descripción	Total
1	1	Filtro pasivo para el 3er armónico marca RTR	\$18.562,00
2	1	Filtro pasivo para el 5to armónico marca RTR	\$19.570,00
3	1	Filtro pasivo para el 7mo armónico marca RTR	\$20.583,00
Sub-Total			\$58.715,00
COSTO DE INSTALACIÓN DE FILTROS			

N°	Descripción	U/M	Cantidad	Costo Unitario	Total
1	Cable de cobre 2 x 500 AWG/Kcmil	m	20	\$40	\$800,00
2	Cable de cobre 2 x 500 AWG/Kcmil	m	20	\$32	\$640,00
3	Cintas aislantes	u	5	\$3	\$15,00
4	Terminales de compresión para cable de 500 Kcmil	u	12	\$3	\$36,00
5	Terminales de compresión para cable de 350 Kcmil	u	12	\$3	\$36,00
6	Mano de obra	u	1	\$2000	\$ 2.000,00
Sub-Total					\$ 3.527,00
Costo Total instalación de filtro					\$62.242,00

El costo total para la instalación de los filtros es de sesenta y dos mil ciento nueve dólares, incluyendo equipos, cables y mano de obra.

COSTO DE ADQUISICIÓN DE TRANSFORMADOR		
Cantidad	Descripción	Total
1	Transformador de 1,50 MVA	\$30.000,00
Sub-Total		\$ 30.000,00
COSTO DE INSTALACIÓN DEL TRANSFORMADOR		

Descripción	U/M	Cantidad	Costo Unitario	Total
Cable de cobre 2 x 500 AWG/kcmil	M	20	\$40	\$800,00
Cable de cobre 2 x 500 AWG/kcmil	M	20	\$32	\$640,00
Cintas aislantes	U	5	\$3	\$15,00
Terminales de compresión para cable de 500 kcmil	U	12	\$3	\$36,00
Terminales de compresión para cable de 350 kcmil	U	12	\$3	\$36,00
Mano de obra	U	1	\$2000	\$2.000,00
Sub-Total				\$ 3.527,00
Costo Total instalación Transformador.				\$ 33.527,00

Implementar un transformador resulta en un precio más alto que instalar filtros además antes de redimensionar un transformador, puede ser necesario instalar filtros pasivos para reducir problemas como armónicos, fluctuaciones de tensión y ruido eléctrico. Para garantizar un suministro de energía más estable y limpio, estos filtros protegen el nuevo transformador y otros equipos conectados.

### **Características de los filtros**

Las impedancias de línea y el filtro LC son los dos componentes principales de estos filtros. La impedancia de línea tiene una impedancia alta hacia la red, mientras que el filtro LC tiene una

impedancia baja hacia la carga, lo que garantiza un filtrado armónico máximo. Como resultado, los efectos perjudiciales de los armónicos están atrapados dentro del filtro.

**Tensión Nominal:** 3 x 400 V

**Corriente Nominal:** 8 A a 400 A

**Frecuencia:** 50 Hz – 60 Hz

**Grado de Protección:** IP21

**Protección Sobre temperatura:** Incluida

**Montaje:** Interior (en pared o armario)

**Clase:** F / 40 °C

**Refrigeración:** Forzada

### **3.7.3 Ventajas de utilizar un filtro**

- Instalar un filtro para reduce de cierta manera el porcentaje de contaminación armónico, lo cual alarga la vida útil del transformador principal y por ende de los diferentes equipos instalados.
- Mejor el factor de potencia en el secundario del transformador con ello permitiendo mejorar todo el sistema.
- Reduce las distorsiones armónicas tanto de corriente como de tensión en los circuitos de baja tensión.
- Bajo costo en su fabricación, instalación y mantenimiento, pues su construcción se realiza en el país por lo que es más fácil su adquisición.

## CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica nos permitió identificar los aspectos importantes a evaluar en los sistemas eléctricos, basados en normativa nacional e internacional los cuales nos indican límites máximos para las diferentes perturbaciones de las redes eléctricas.
- El análisis de las cargas no lineales instaladas en la nave de soldadura, nos permitió establecer que las sueldas de punto son las principales cargas que están generando armónicos a la red de la nave y por ende al sistema eléctrico principal de la empresa CIAUTO Cía. Ltda.
- Se analizó opciones para mejorar la calidad energética de la empresa CIAUTO Cía. Ltda., siendo la óptima el diseño de un filtro pasivo, ya que al implementar filtros pasivos mitiga problemas como armónicos, fluctuaciones de tensión. Estos filtros ayudan a asegurar un suministro de energía estable y limpio, protegiendo al transformador y otros equipos conectados en las naves. Luego de aplicar los filtros se redujo los tres armónicos más representativos que son el 3ero con un 32,23 % inicial a 29,50 % final, el 5to de 56,77 % inicial reduciéndolo al 29,40 % y para el 7mo armónico se inició con 40,88 %, reduciendo a 8,2 %, el 5to y el 7mo con una reducción significativa, aunque no se eliminan por completo, la señal mejora significativamente siendo parecida a la sinusoidal perfecta.
- El costo de implementación de los filtros es alto llegando a un valor de sesenta y dos mil doscientos cuarenta y dos dólares, incluyendo equipos, cables y mano de obra, considerando que reduce el desgaste acelerado del ciclo de vida útil de los equipos que se utilizan en las diferentes naves y que pueden estar siendo afectados por los armónicos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda instalar los filtros en paralelo al transformador para mitigar los armónicos existentes en dicha nave y así evitar posibles sanciones por parte de la empresa distribuidora de energía.
- Se recomienda realizar el reemplazo del transformador principal de 800 kVA, con el análisis de cargas que se realizó se pudo evidenciar que la carga instalada sobrepasa la capacidad del transformador.

## **INVESTIGACIONES FUTURAS**

- Realizar un estudio de armónicos a cada nave, para poder determinar en cuál de ellas se está generando perturbaciones armónicas, para con ello instalar filtros en cada nave y cumplir con la regulación nacional.

## Referencias bibliográficas

- [1] R. V. Estévez, O. H. Areu, y J. G. S. Glean, «El problema de los armónicos en los transformadores. Estado mundial del arte», *Ing. Energética*, vol. XXVI, n.º 2, pp. 3-8, 2005.
- [2] W. Rohouma, R. Balog, A. Peerzada, y M. Begovic, «D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads», *Renewable Energy*, 5 de mayo de 2019. doi: 10.1016/j.renene.2019.05.134.
- [3] M. P. Martínez, J. R. Guardarrama, R. C. S. Freire, y D. B. Gonzales, «Desarrollo de aplicaciones en el software Scilab para el análisis de armónicos en sistemas industriales», vol. 43, n.º 1, p. 11, 2022.
- [4] J. L. Díaz-Rodríguez, O. E. Gualdrón-Guerrero, y A. Pardo-García, «Algoritmos bioinspirados para optimizar el contenido de armónicos de un inversor de potencia PWM», *Tecnológicas*, vol. 18, n.º 34, p. 63, ene. 2015, doi: 10.22430/22565337.210.
- [5] R. Pinyol, «ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN». R&D Product Leader en SALICRU, abril de 2016.
- [6] J. C. Das, *Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics*. en Power engineering, no. 33. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [7] J. Mesas, L. Sainz, y A. Ferrer, «Estudio y caracterización de cargas no lineales», Investigación, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA, Barcelona, 2009. Accedido: 14 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/32211/TJJMG1de1.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [8] J. Fourier, «Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica», *RTR ENRGIA SL*, p. 12.
- [9] J. D. Arcila, «ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS», *IEB S.A.*, p. 26.
- [10] A. J. Yarin Achachagua, G. N. Salazar Huamani, y J. Chávez Vivar, «Control de armónicos en transformador eléctrico de potencia de planta de manufactura mediante filtro pasivo incorporado optimizado con algoritmo de forraje bacterial», *TECNIA*, vol. 21, n.º 2, jun. 2021, doi: 10.21754/tecnia.v21i2.1031.
- [11] C. Gil, «APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJES EN SISTEMAS Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS: SU IMPORTANCIA Y TRABAJOS RELACIONADOS», vol. 5, n.º Edición1, p. 16, 2014.
- [12] E. Téllez, «DISTORSION ARMONICA». AUTOMATIZACION, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD S.A. de C.V. [En línea]. Disponible en: <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- [13] C. Berger y E. Spiewak, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems». 27 de marzo de 2014.
- [14] «Regulacion-002-20. “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”», 13 de noviembre de 2020. <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp->



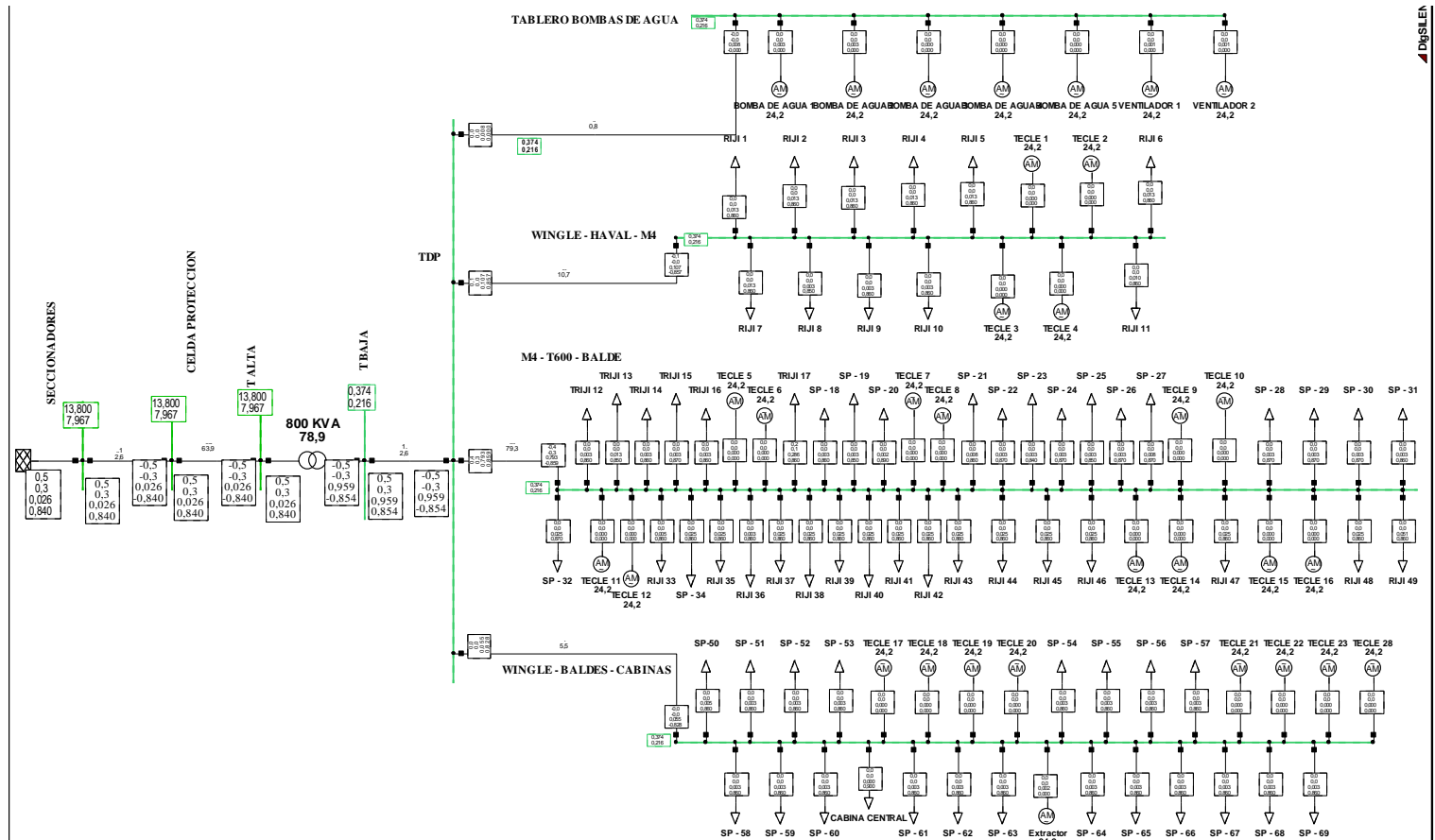
content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf (accedido 26 de septiembre de 2022).

- [15] H. A. Yigit, H. Ulsan, S. Chamanian, y H. Kulah, «Charge Balance Circuit for Constant Current Neural Stimulation with Less than 8 nC Residual Charge», en *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Sapporo, Japan: IEEE, may 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702790.
- [16] N. Uchikoga, S.-Y. Takahashi, R. Ke, M. Sonoyama, y S. Mitaku, «Electric charge balance mechanism of extended soluble proteins», *Protein Sci.*, vol. 14, n.º 1, pp. 74-80, ene. 2009, doi: 10.1110/ps.04984505.
- [17] J. A. C. González, «Estudio para Repotenciación de la Línea de Transmisión Pucará – Mulaló a 138 kV Utilizando el Conductor más Económico».
- [18] J. L. Arias Gonzáles y M. Covinos Gallardo, *Diseño y metodología de la investigación*. Enfoques Consulting EIRL., 2021. Accedido: 11 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2260>
- [19] E. Maya, «Métodos y técnicas de investigación», n.º primera edicion electronica, p. 90, México 2014.

# ANEXOS

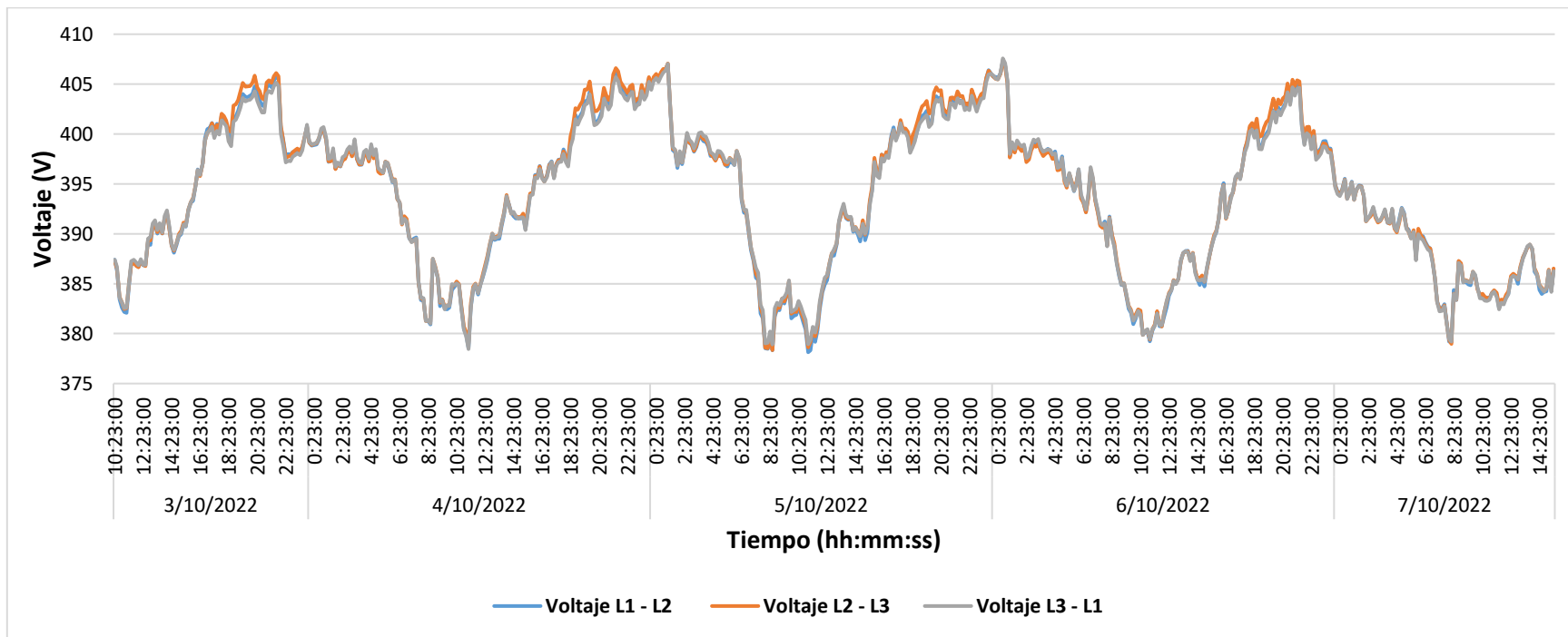
## Anexo A

### Diagrama unifilar nave de soldadura

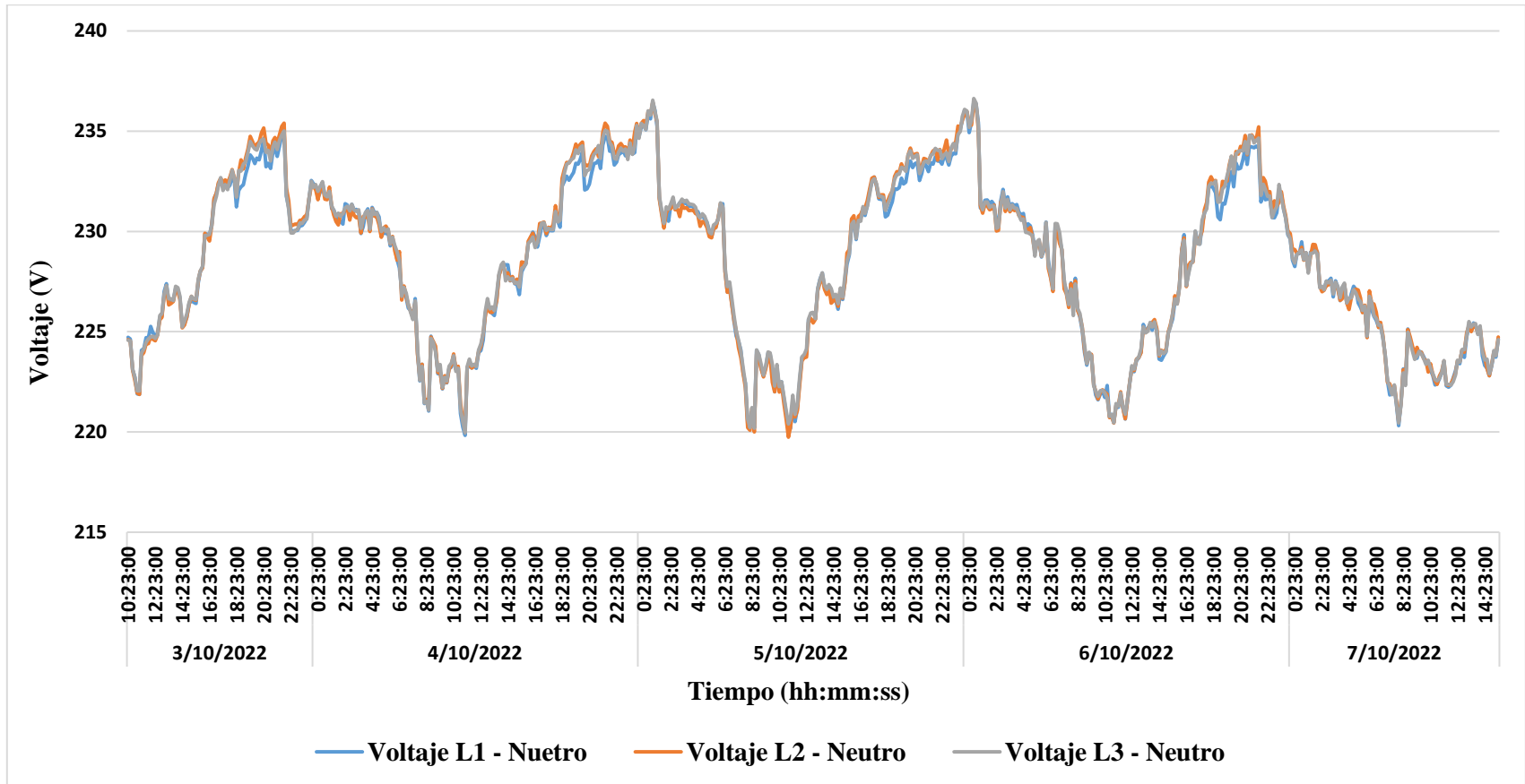


### Anexo B Datos completos del analizador de redes

#### Voltajes Línea a Línea

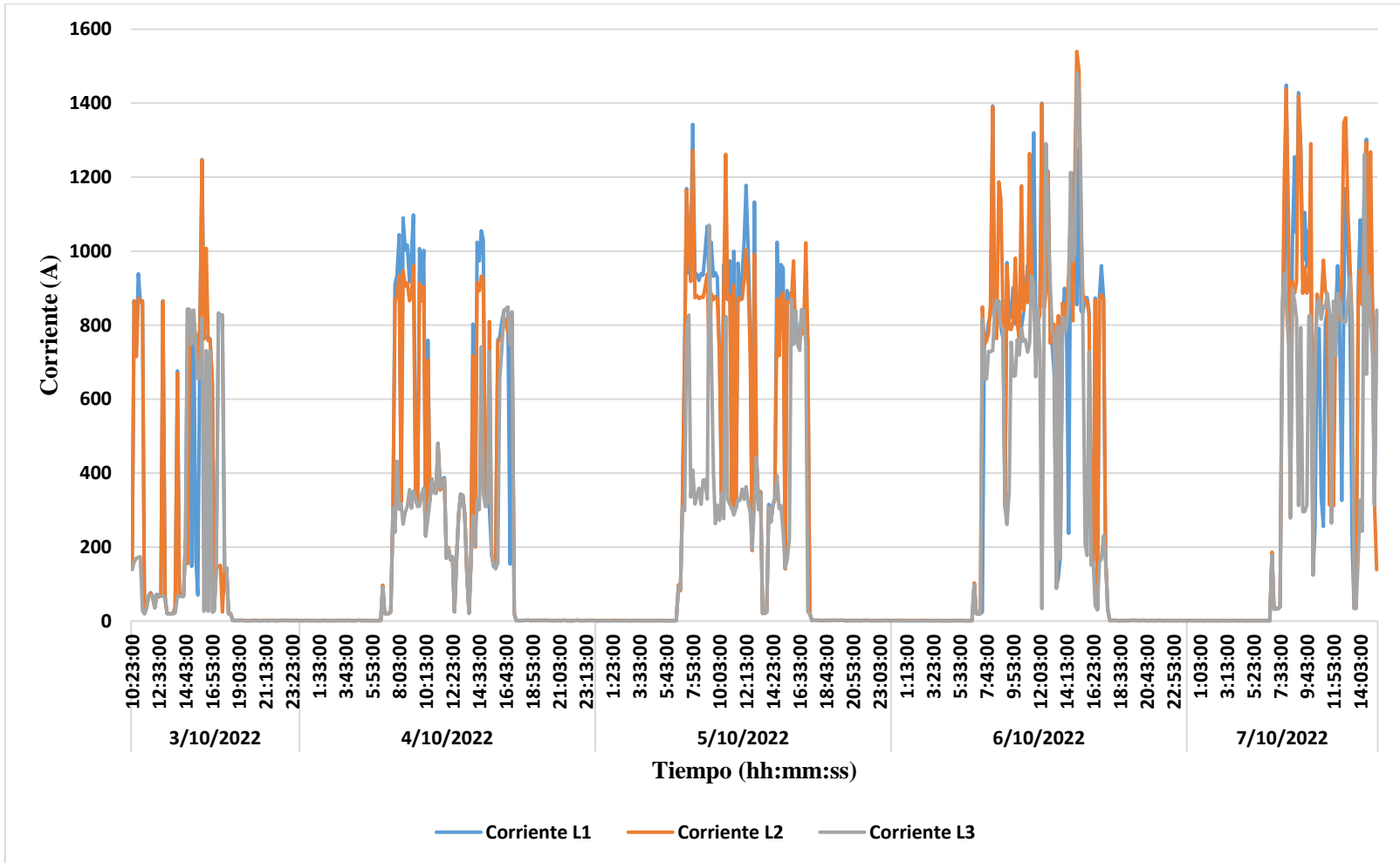


# Voltaje Línea – Neutro



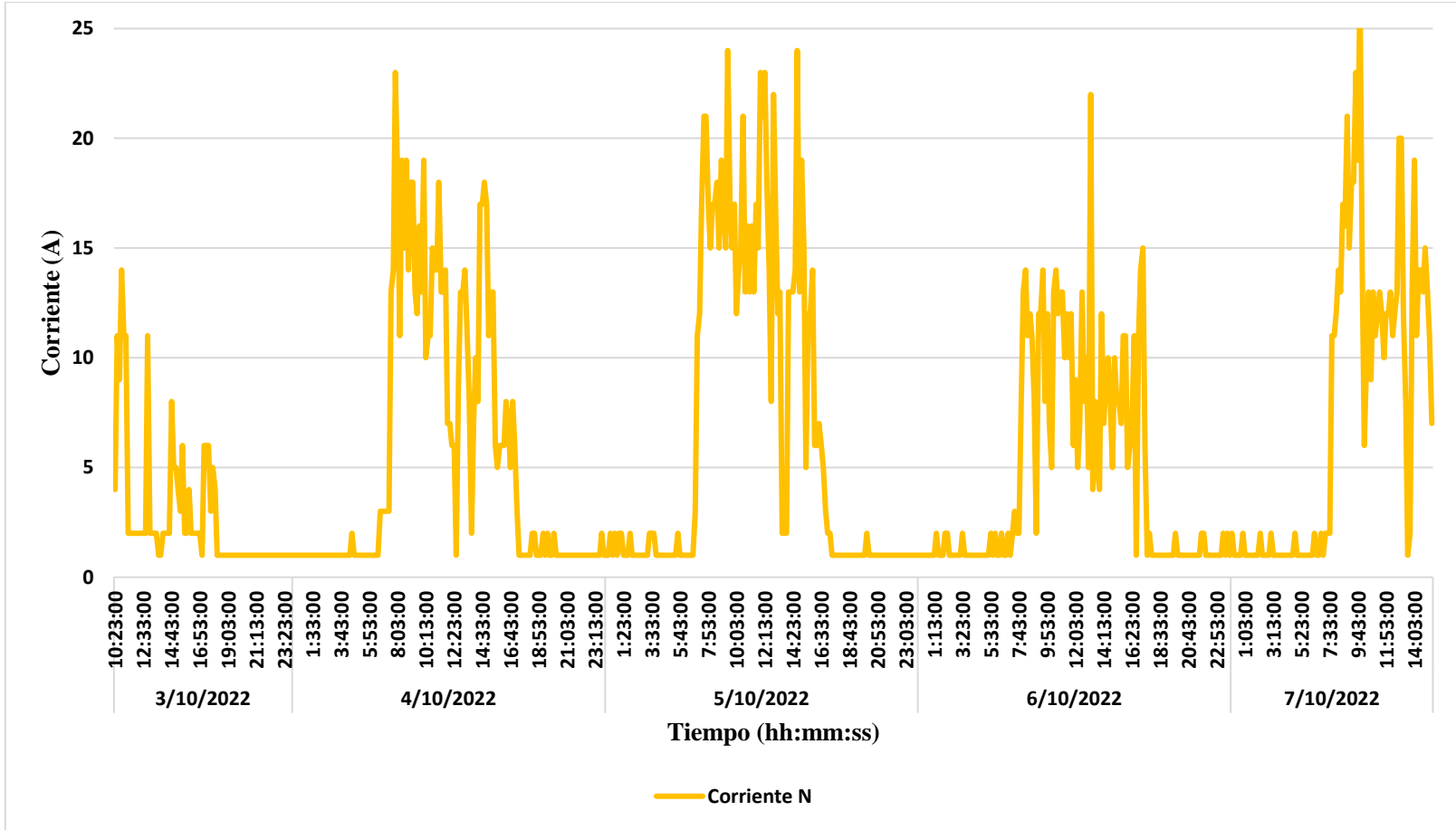
Corriente en fases.

84

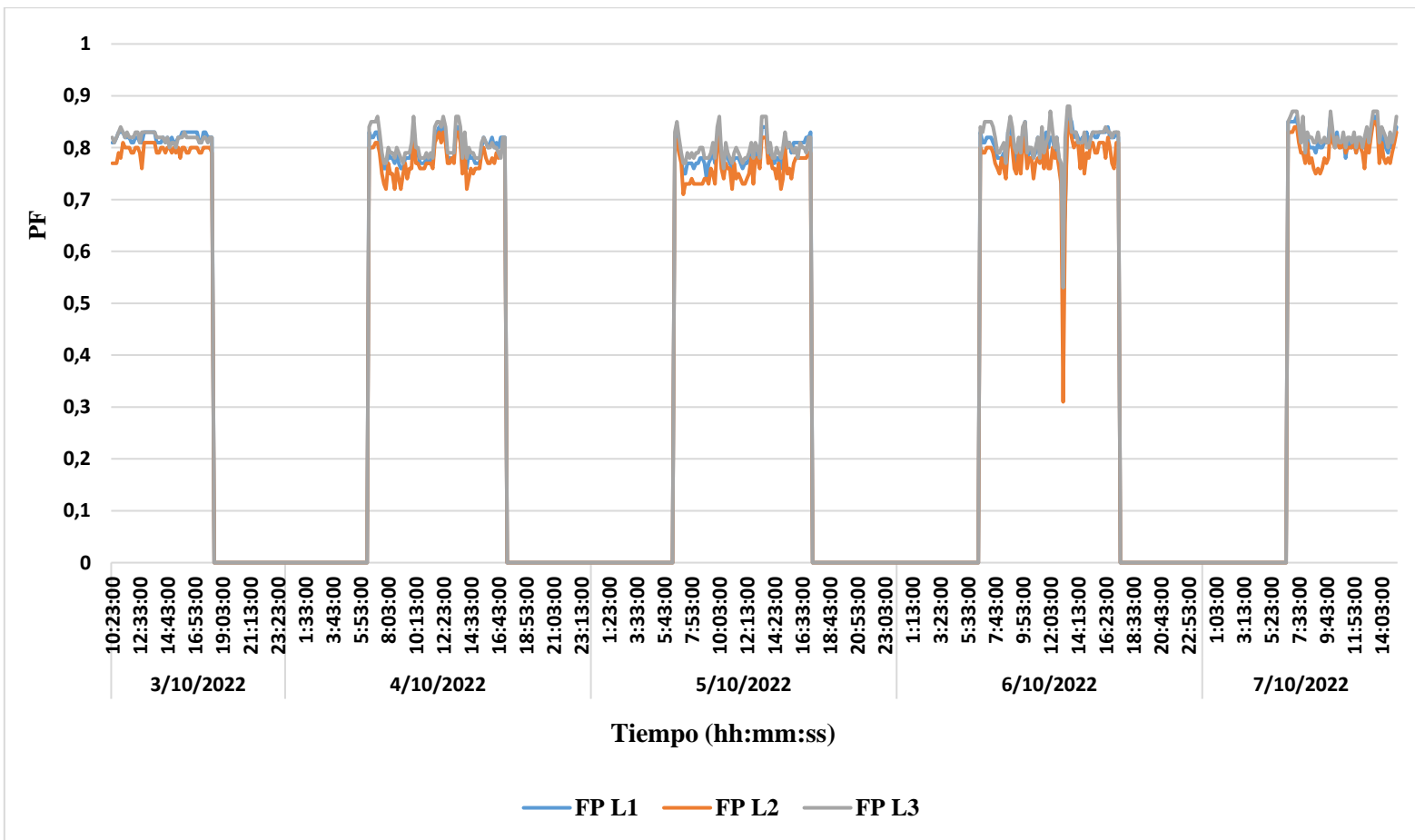


# Corriente en el neutro

88

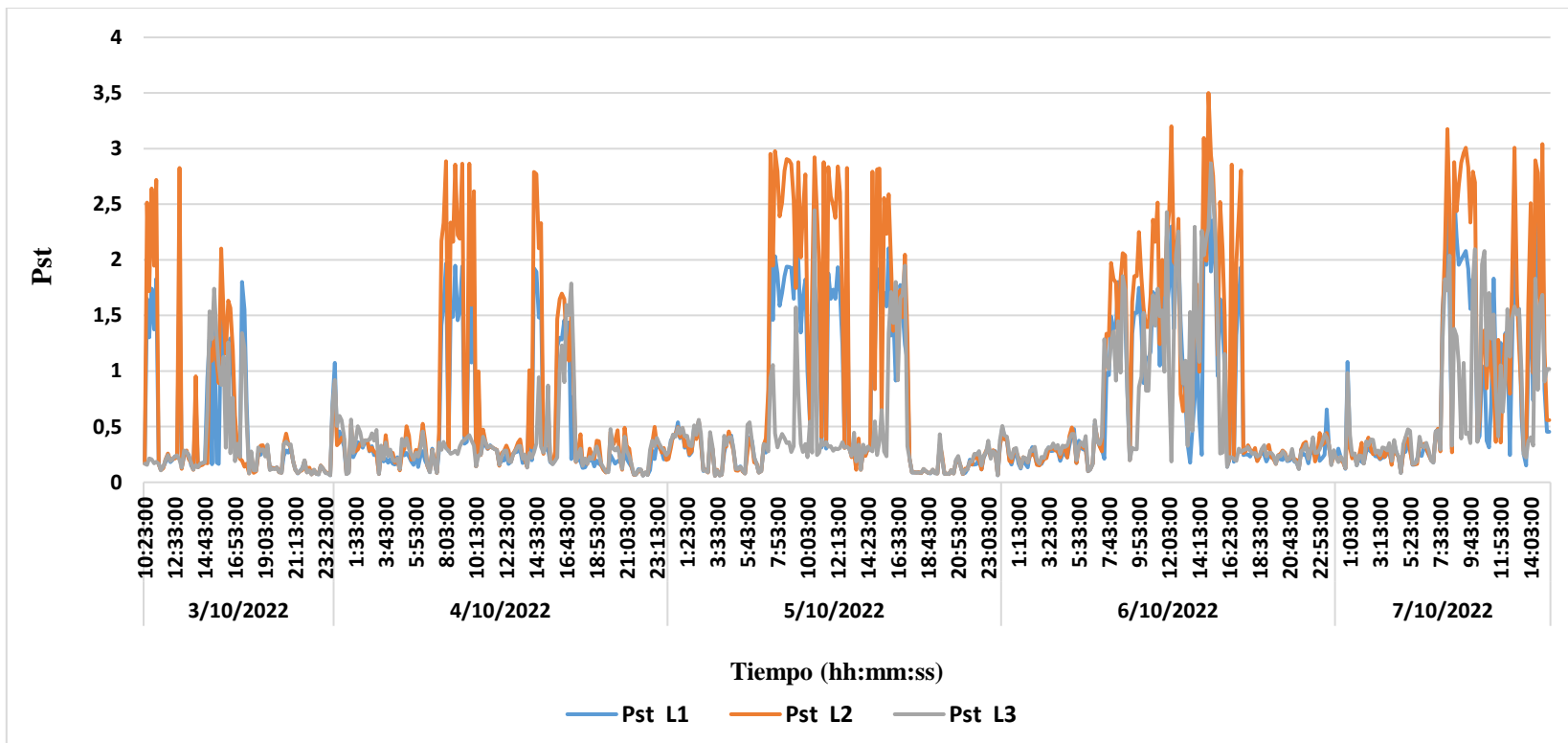


# Factor de Potencia



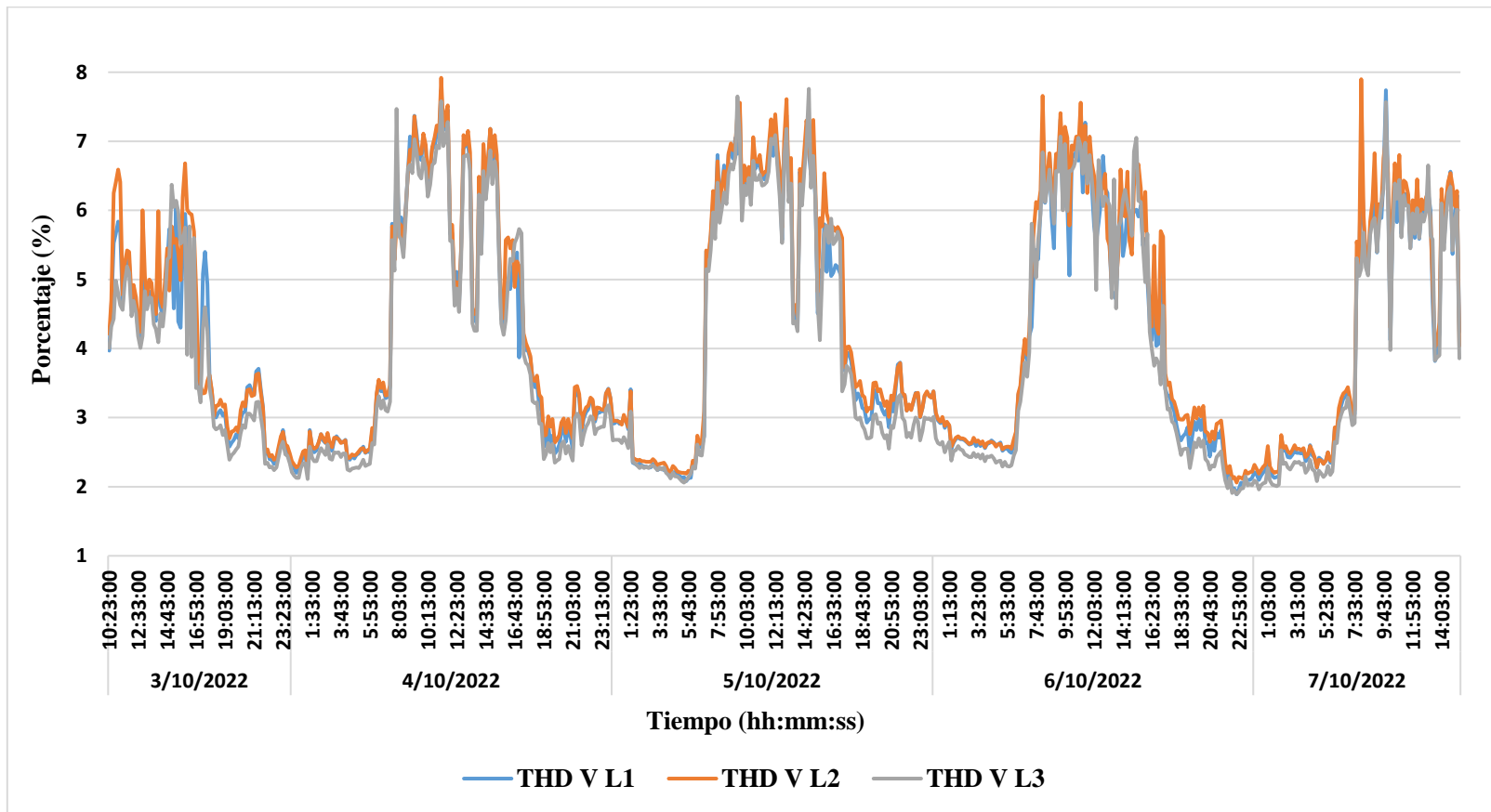
# Flicker

87

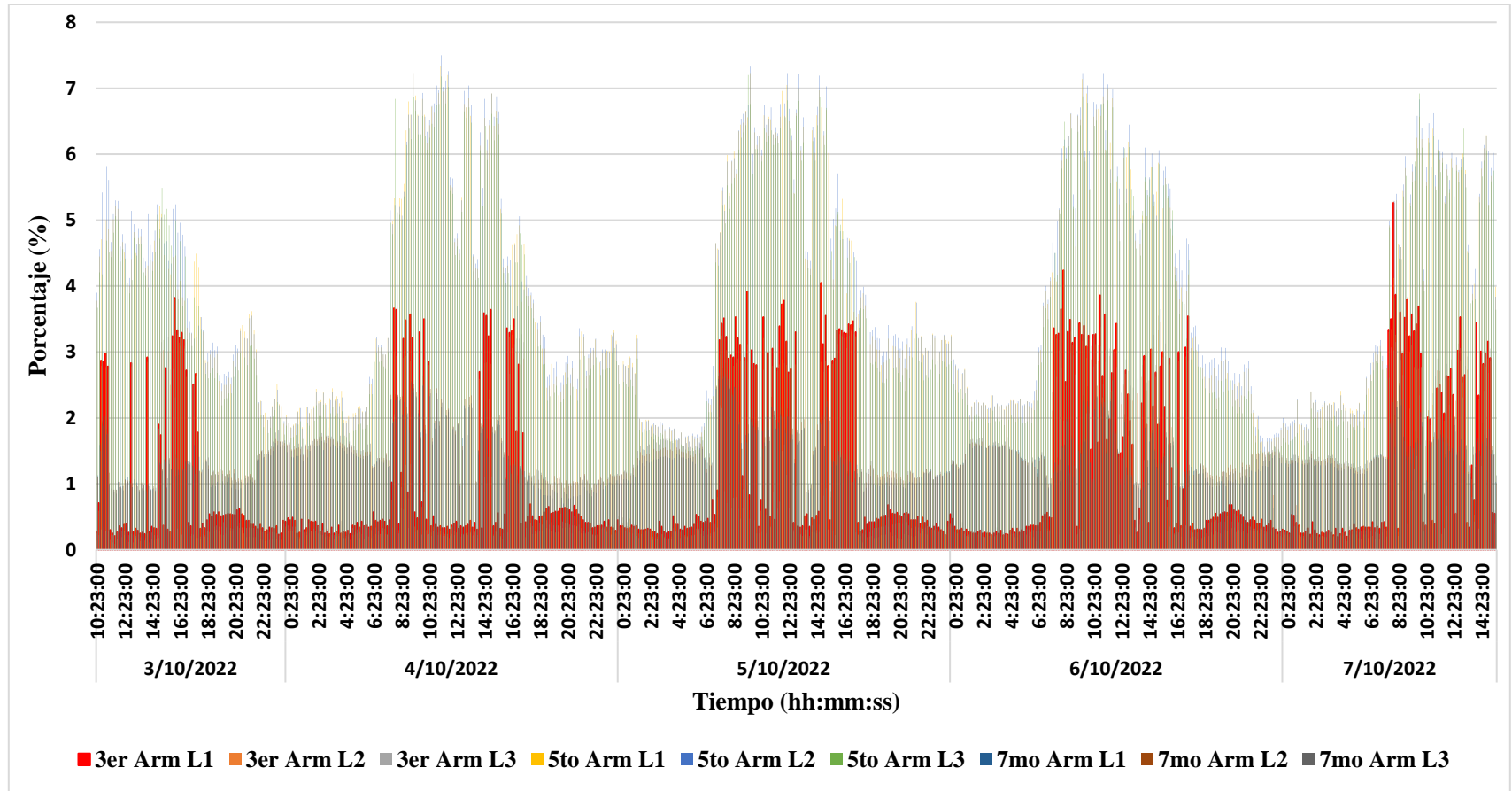




### Distorsión armónica total de voltaje (THDV)



# Armónicos Individuales de Voltaje



### Distorsión armónica total de corriente (THDI)

06

