



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LA INDUSTRIA DE
FUNDICIONES FUNDI LASER UBICADA EN LA AVENIDA INDOAMÉRICA Y
ENTRADA A IZAMBA CIUDAD DE AMBATO”**

Autores:

Changoluisa Martínez Edison Ricardo.

Salazar Defaz Michael Paulina.

Tutor:

Ing. Jaime Marcelo Barrera Flores.

Latacunga - Ecuador

2017



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el o los postulantes: Changoluisa Martínez Edison Ricardo y Salazar Defaz Michael Paulina con el título de Proyecto de titulación: **“ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LA INDUSTRIA DE FUNDICIONES FUNDI LASER UBICADA EN LA AVENIDA INDOAMÉRICA Y ENTRADA A IZAMBA CIUDAD DE AMBATO”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 16 de febrero del 2017

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. Xavier Proaño

CC: 0502656424

Lector 2

Nombre: Ing. Luis Flores

CC: 1715793269

Lector 3

Nombre: Ing. Carlos Saavedra

CC: 1802248425



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Yo Changoluisa Martínez Edison Ricardo y Salazar Defaz Michael Paulina declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LA INDUSTRIA DE FUNDICIONES FUNDI LASER UBICADA EN LA AVENIDA INDOAMÉRICA Y ENTRADA A IZAMBA CIUDAD DE AMBATO”**, siendo Ing. **Jaime Marcelo Barrera Flores** tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
Changoluisa Martínez Edison Ricardo

Número de C.I. 050332747-0

.....
Salazar Defaz Michael Paulina

Número de C.I. 050364870-1



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“Estudio de la contaminación armónica en la industria de fundiciones FUNDI LASER ubicada en la avenida Indoamérica y entrada a Izamba ciudad de Ambato”, de CHANGOLUISA MARTÍNEZ EDISON RICARDO y SALAZAR DEFAZ MICHAEL PAULINA de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la FACULTAD de la Facultad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero, 2017

El Tutor

Firma

Ing. Jaime Marcelo Barrera Flores

CI: 1801848779

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar de mi bella familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada una de mis decisiones y proyectos emprendidos y en especial a mi novia Mishell Salazar por ser el sol que ilumina todos mis días y por todas y cada una de sus palabras de aliento sin dejar que me rinda jamás, gracias a todas las personas que me rodea y me demuestra lo maravillosa que es la vida, con su amistad y cariño, gracias a mi hermano Leonardo y a mi padre Venancio que nunca dejaron de creer en mí aunque la vida nos golpee tan fuerte para así convertirse en los pilares de mi propia fortaleza.

Tengo que reconocer que el camino atravesado hasta aquí no ha sido sencillo, y tengo que dar un agradecimiento especial a mi madre Targelia y a mis abuelitos que me han cuidado y guiado desde el cielo como mis ángeles guardianes sin desampararme nunca.

Ricardo.....

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mi camino, por siempre estar a mi lado y nunca abandonarme.

A mis padres por ser mi fortaleza, por siempre alentarme, por sus enseñanzas y nunca abandonarme en los malos momentos, a mi madre por ser mi apoyo, ser mi amiga y creer en mí.

A mi novio Ricardo por ser mi compañero incondicional, por entenderme y confiar en mí. Gracias a mi familia por estar pendiente en mí y nunca abandonarme.

A los docentes de la carrera de Ingeniería eléctrica por formarme íntegramente como profesional y por las enseñanzas que me dan día con día. En especial a los Ingenieros que me dieron su apoyo y guía en la realización de este proyecto.

Paulina.....

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado para mi Padre mi Madre mi Novia mi Hermano mis Abuelitos y para todas las personas que creyeron en mí y a los que no creyeron también.

Ricardo.....

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, a mi abuelita Teresa, a mi familia
y a mi novio por siempre creer en mí y no dejar que me rinda....

Paulina.....

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN -----	¡Error! Marcador no definido.
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN -----	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO -----	v
AGRADECIMIENTO -----	vi
DEDICATORIA -----	vii
DEDICATORIA -----	viii
RESUMEN -----	v
ABSTRACT -----	vi
1. INFORMACIÓN GENERAL -----	1
2. RESUMEN DEL PROYECTO -----	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO -----	4
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO -----	5
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN: -----	5
6. OBJETIVOS: -----	6
Objetivo General -----	6
Objetivos Específicos -----	6
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS: -----	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA -----	8
La Calidad del Producto -----	8
CLASES DE POTENCIAS -----	9
POTENCIA ACTIVA -----	10
POTENCIA REACTIVA -----	10
POTENCIA APARENTE -----	10
DESFASE o $\cos \varnothing$ -----	11

POTENCIA DE DISTORSIÓN -----	11
Factor de Potencia: -----	12
Factor de potencia (REGULACIÓN No. CONELEC 004/01)-----	13
Cargos por bajo factor de potencia -----	14
Armónicos -----	14
Armónicos de Voltaje:-----	16
Armónicos de Corriente:-----	17
Resonancia: -----	19
Resonancia en serie:-----	19
Resonancia en paralelo:-----	20
Filtros:-----	21
Filtro Pasivo Sintonizado-----	21
Desbalances de carga-----	28
Análisis de niveles de voltaje -----	28
Selección del Calibre de Conductor para Instalaciones Eléctricas de bajo voltaje. -----	29
Cálculo de la corriente admisible del conductor -----	29
Cálculos de transformador.-----	31
Potencia reactiva en alto voltaje. -----	31
Valores nominales de transformadores trifásicos de distribución -----	31
Características del Filtro Electrónico de Paso Bajo-----	32
9.- HIPÓTESIS:-----	32
OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES -----	32
Variable Independiente.- Análisis del sistema eléctrico -----	32
Variable Dependiente.- Suministro de energía eléctrica -----	33
10.- METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL -----	33
Métodos de investigación-----	33
Método inductivo – deductivo -----	33
Método analítico y sintético-----	33

Tipos de Investigación	34
Investigación Bibliográfica.....	34
Investigación Exploratoria	34
Investigación descriptiva	34
Investigación Propositiva.....	34
Técnicas de Investigación:	34
Observación Directa y Participativa.....	34
Instrumentos de Investigación:	35
11.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:	35
Descripción de la Industria:	35
Descripción del sistema eléctrico de la Industria:	36
Datos Medidos.-	37
Levantamiento de carga:.....	37
Análisis de los datos obtenidos a través de mediciones:	37
Análisis de la Potencia Activa en kW	37
Tabla 17: Potencia Activa de las Tres Líneas	37
Análisis de la Potencia Aparente en KVA.....	38
Análisis de la Potencia Reactiva en KVAR	38
Resumen de Potencias	38
Curva de Carga:	39
Análisis de Factor de Potencia:	40
Análisis de Armónicos:.....	41
Cálculo de armónicos de Corriente	42
Análisis de Desbalance de carga:	46
Análisis de Niveles de Voltaje:	47
Datos obtenidos con la Simulación.-	47
Simulación Inicial del Sistema en el software EASY POWER	47
Soluciones Propuestas.....	52
Resultados de la Corrida de Flujos final	67
Análisis Técnico económico de la implementación del Proyecto	68

Ahorro energético al implementar las soluciones propuestas -----	68
Cálculo del TIR y el TMAR:-----	71
12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS):-----	72
13.- PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO: -----	72
14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	73
CONCLUSIONES: -----	73
RECOMENDACIONES: -----	74
15. BIBLIOGRAFÍA -----	74
16. ANEXOS -----	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS:

Ilustración 1: Triángulo de Potencias	11
Ilustración 2: Triángulo de Potencias de Potencia de Distorsión	12
Ilustración 3: Triángulo de Potencias Factor de Potencia	12
Ilustración 4: Descomposición armónica	15
Ilustración 5: Circuito con resonancia serie.....	20
Ilustración 6: Resonancia paralelo de condensadores con la impedancia de corto-circuito.....	20
Ilustración 8: Filtro Sintonizado	22
Ilustración 9: Respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad	25
Ilustración 10: Sistema Trifásico a tres hilos.....	30
Ilustración 11: Diagrama Unifilar de la Industria FUNDI LASER	35
Ilustración 12 Datos de placa de Transformador Trifásico de 300 KVA	36
Ilustración 13: Curva de carga diaria	39
Ilustración 14: Curva de carga diaria	40
Ilustración 15: Nivel de Armónicos de Voltaje	41
Ilustración 16: Nivel de Armónicos de Corriente	46
Ilustración 17: Simulación inicial del sistema eléctrico de la industria	48
Ilustración 18: Corrida de flujos del sistema	49
Ilustración 19 : Corrida de flujos de Armónicos en la red.....	51
Ilustración 20: Simulación de los armónicos en EASY POWER.....	51

Ilustración 21: Diseño del Filtro	58
Ilustración 22 : Dimensionamiento del filtro en EASY POWER.....	58
Ilustración 23: Corrección de armónicos con instalación de filtro	59
Ilustración 24: Reducción del nivel de armónicos	59
Ilustración 26: Contenido de armónicos de corriente después de la colocación del filtro	61
Ilustración 27: Diagrama resultante del sistema	67
Ilustración 28: Corrida de flujos resultante con correcciones propuestas	67

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados	6
Tabla 2: Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados	8
Tabla 3: Orden de un armónico	15
Tabla 4: Ejemplo de distorsión individual	16
Tabla 5: Distorsión global en voltaje y corriente.....	16
Tabla 6: Ejemplo Distorsión global en voltaje y corriente.....	16
Tabla 7: Límites de armónicos de voltaje	17
Tabla 8: Límites de Distorsión de Corriente	19
Tabla 9: Ventajas del Filtro Pasivo Sintonizado	22
Tabla 10: Límites de Variaciones de voltaje	29
Tabla 11: Valores de potencia aparente nominal normalizados para transformadores de distribución trifásicos.	31
Tabla 12: Características del filtro a instalar.....	32
Tabla 13: Operacionalización de la variable independiente.....	32
Tabla 14: Operacionalización de la variable dependiente.....	33
Tabla 15: Características del Transformador	36
Tabla 16: Características del Transformador	37
Tabla 17: Potencia Activa de las Tres Líneas	37
Tabla 18: Potencia Aparente de las Tres Líneas.....	38
Tabla 19: Potencia Reactiva de las Tres Líneas	38
Tabla 20: Resumen de Potencias	38
Tabla 21: Potencia máxima de las tres líneas.....	39
Tabla 22: Valores de Factor de Potencia entre fases y total.....	40

Tabla 23: Valores de THD de voltaje por línea y fase.....	41
Tabla 24: Valores de THD de voltaje por línea y fase.....	41
Tabla 25: Valores de Corriente de la línea.....	43
Tabla 26: Cálculo de α para verificar los armónicos de corriente.....	44
Tabla 27: Límites de distorsión de corriente.....	45
Tabla 28: Límites de distorsión de corriente en Amperios.....	45
Tabla 29: Límites de distorsión de corriente en Amperios.....	46
Tabla 30: Valores de Voltaje min, med y max de las fases.....	47
Tabla 31: Niveles de Voltaje min, med y max de las fases.....	47
Tabla 32: Factor de Potencia de la carga.....	50
Tabla 33: Sobrecarga de la línea.....	50
Tabla 34: Sobrecarga del Transformador.....	50
Tabla 35: Magnitudes de los Armónicos de Voltaje.....	60
Tabla 36: Magnitudes de los Armónicos de Corriente.....	61
Tabla 37: Reducción del factor de potencia en la carga.....	62
Tabla 38: Simulación inicial con el conductor.....	63
Tabla 39: Resultado del conductor cuando ya se coloca el filtro.....	64
Tabla 40: Simulación con el calibre de 1000 MCM.....	65
Tabla 41: Simulación final con 4 conductores por fase.....	66
Tabla 42: Reducción de la sobrecarga del transformador.....	68
Tabla 43: Pérdidas Iniciales.....	68
Tabla 44: Pérdidas Finales.....	68
Tabla 45: Pliego Tarifario. Valor Industrial.....	70
Tabla 46: Penalización anual por bajo factor de potencia.....	71
Tabla 47: Flujo Neto de Inversión.....	72
Tabla 48: Presupuesto para implementación del proyecto.....	73



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO:” ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LA INDUSTRIA DE FUNDICIONES FUNDI LASER UBICADA EN LA AVENIDA INDOAMÉRICA Y ENTRADA A IZAMBA CIUDAD DE AMBATO”

Autor/es:

Changoluisa Martínez Edison Ricardo

Salazar Defaz Michael Paulina

RESUMEN

Este trabajo de investigación fue realizado en la industria FUNDI LASER dedicada al proceso de fundición de hierro, bronce, aluminio, etc., que se encuentra ubicada en la ciudad de Ambato. La finalidad del proyecto es mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica en la industria para el cumplimiento de la regulación CONELEC 004/01.

Con el propósito de conocer acerca del tema se realizó una investigación bibliográfica y de campo, lo cual ha enriquecido el tema propuesto. Se instaló un medidor de calidad de energía en el transformador existente en la fundidora y se procedió con el análisis de las mediciones, adicionalmente se realizó el levantamiento de carga y el diseño del diagrama unifilar eléctrico. Con ayuda del software EASY POWER se realizó el análisis del flujo de carga para determinar las caídas de voltaje, pérdidas de potencia, flujos de potencia, factor de potencia y cargabilidad del sistema eléctrico. Además se realizó un análisis de flujo armónico para determinar el nivel de armónicos en la industria.

Se planteó alternativas de solución para la reducción de los costos de penalización por bajo factor de potencia que mensualmente factura la Empresa Eléctrica de Ambato EEASA a esta industria, como también reducir los niveles de contaminación armónica que son producidos por el uso del horno de inducción que se considera como una carga no lineal.

Al final de la investigación se añade conclusiones y recomendaciones a seguir y se procede a plantear la propuesta con la evaluación técnica y económica.

Palabras clave: contaminación armónica, bajo factor de potencia, EASY POWER.



UNIVERSITY TECHNICAL OF COTOPAXI

THEME:

“STUDY OF HARMONIC POLLUTION IN THE FOUNDRIES INDUSTRY FUNDI LASER LOCATED IN THE INDOAMÉRICA AVENUE AND ENTRANCE TO IZAMBA, AMBATO CITY”

Authors:

Changoluisa Martinez Edison Ricardo

Salazar Defaz Michael Paulina

ABSTRACT

The present work of investigation was made in the industry FUNDI LASER dedicated to the casting process of iron, bronze, aluminum, etc., which is located in Ambato city. The purpose of the project is improving the quality of supply of electric power in the industry for the fulfillment of the regulation Not. CONELEC 004/01

Our purpose is knowing brings over of the topic a bibliographical investigation was realized and of field, which has enriched the proposed topic. One installed quality meter of energy in the existing transformer in the foundry and one proceeded with the analysis of the measurements, additional there was realized the razing load and the design of the electric single-line diagram. EASY POWER software help to load flow analysis was performed to determine voltage drops, power losses, power flows, factor power and load ability of the electrical system. In addition, a harmonic flow analysis was utilized to determine the level of harmonics in the industry.

Solutions were proposed to reduce the costs of penalty for low factor of power that monthly invoices the Electrical Company in Ambato EEASA to this industry, as well as to reduce the levels of harmonic contamination that are produced by the use of the induction furnace that a non-linear load is considered. At the end of the investigation conclusions and recommendations are added and one proceeds to raise the offer with the technical and economic evaluation.

Keywords: harmonic pollution, low factor of power, EASY POWER.



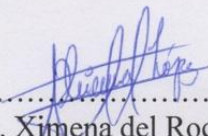
AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de docente del Idioma Inglés del Centro Cultural de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que: la traducción del resumen de Proyecto de investigación al idioma inglés presentando por los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicada: **CHANGOLUISA MARTÍNEZ EDISON RICARDO** con numero de cedula **050332747-0** y **SALAZAR DEFAZ MICHAEL PAULINA**, con numero de cedula **050364870-1** cuyo título versa **“ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LA INDUSTRIA DE FUNDICIONES FUNDI LASER UBICADA EN LA AVENIDA INDOAMÉRICA Y ENTRADA A IZAMBA CIUDAD DE AMBATO”**, lo realizo bajo mi supervisión y cumple con una correcta escritura gramatical del idioma

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Febrero 2017

Atentamente,


.....
Msc. Ximena del Rocío López Meneses
C.I: 050222925-5

DOCENTE CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

“Estudio de la contaminación armónica en la Industria de fundiciones FUNDI LASER ubicada en la Avenida Indoamérica y entrada a Izamba ciudad de Ambato”

Fecha de inicio:

Noviembre del 2016

Fecha de finalización:

Febrero del 2017

Lugar de ejecución:

Dirección:

Avenida Indoamérica y entrada a Izamba

Ciudad:

Ambato

Facultad que auspicia

Facultad Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica

Equipo de Trabajo:

Tutor

DATOS PERSONALES

Nombres y Apellidos:

Jaime Marcelo Barrera Flores

Fecha de Nacimiento:

1963-04-13

Nivel Secundario:

Colegio “Victoria Vásconez Cuvi”

DATOS PERSONALES**Nombres:**

Edison Ricardo

Apellidos:

Changoluisa Martínez

Cédula de Identidad:

0503327470

E – MAIL:

edison.changoluisa0@utc.edu.ec

Estudios realizados**Nivel Secundario:**

I.T.S “Ramón Barba Naranjo”

Área de Conocimiento:

Ingeniería, industria y construcción

Línea de investigación:

Explotación y diseño de sistemas eléctricos

Sub Línea de investigación de la Carrera:

Calidad de energía

2. RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto de Investigación tiene la finalidad de mejorar la calidad de suministro de energía eléctrica en la Industria de Fundición FUNDI LASER de la ciudad de Ambato, para el cumplimiento

de la Regulación No. CONELEC 004/01 en base a los aspectos de calidad del producto, además de proponer alternativas de solución para la reducción de costos de penalización por bajo factor de potencia.

La industria cuenta con un transformador trifásico de 13.8 kV a 440 V, el mismo que es utilizado exclusivamente para el proceso de fundición. En el presente estudio la carga que se tomara como objeto de análisis es el horno de inducción, el mismo que causa problemas en el sistema eléctrico de la industria.

La investigación realizada en la Industria de fundición FUNDI LASER utiliza como herramienta la regulación No CONELEC 004/01 la misma que establece límites y porcentajes de los índices que determinan la calidad de producto. Una vez realizadas las mediciones a través del analizador de carga FLUKER 435, los datos arrojados serán estudiados mediante el programa de análisis técnico EASY POWER el mismo que facilitara la identificación de los problemas presentes en la instalación eléctrica de la Industria y recomendar soluciones prácticas que se encuentran fundamentadas en un análisis técnico.

Conscientes de la problemática que enfrenta la Industria al no tener un servicio de energía eléctrica continuo, aceptable y confiable debido a las pérdidas de energía generadas por un bajo factor de potencia que son ser producidas por la variedad de cargas no lineales en este caso el horno de inducción, se plantea un Estudio de Contaminación Eléctrica con la finalidad de realizar una análisis general de todos los parámetros eléctricos de la edificación y así poder determinar las capacidades y características de las cargas existentes dentro de la industria y de este modo después de los análisis pertinentes podamos contribuir con un plan de mejoras con el fin de prevenir daños en el sistema actual o a los futuros incrementos de carga.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La empresa FUNDI LASER debido a sus procesos industriales de fundición necesita un servicio energético continuo y de calidad, de aquí parte la necesidad de realizar un estudio del suministro eléctrico en las instalaciones de la industria. Por esta razón se instaló un analizador de calidad de energía con el fin de obtener la medición de algunos parámetros como nivel de voltaje, perturbaciones de voltaje, factor de potencia y nivel de armónicos; cabe indicar que los equipos fueron facilitados por la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.

En un circuito industrial de corriente alterna al tener, perturbaciones de voltaje, bajo factor de potencia y un alto nivel de armónicos afectan directamente a la eficiencia del servicio eléctrico, por lo que es necesario conocer el estado actual de las instalaciones eléctricas de la industria para proponer métodos para mejorarlo.

Los motivos expuestos anteriormente conlleva a realizar un estudio técnico que permita plantear soluciones prácticas que mejoren el servicio energético, obteniendo beneficios tales como alargar la vida útil a las instalaciones y la reducción económica en la planilla del servicio eléctrico por concepto de penalización por un bajo factor de potencia.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Uno de los beneficiarios directos será el propietario de la Industria FUNDI LASER, ya que al lograr obtener una buena calidad en el suministro eléctrico, se obtendrá un servicio energético continuo necesario para los procesos de fundición, además de obtener beneficios económicos como la reducción en los costos de facturación, la eliminación del rubro por bajo factor de potencia

Al reducir los fenómenos eléctricos como armónicos, calentamiento de aislamientos, desbalances y otros factores que afectan de manera sustancial a los equipos e instalaciones eléctricas, se obtiene beneficios tales como el aumento de la vida útil de las instalaciones eléctricas de la industria e incremento de la productividad siendo beneficiario el consumidor al obtener un producto final de calidad.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN:

El desconocimiento de los propietarios de la industria FUNDI LASER en cuanto a realizar un monitoreo y control de las instalaciones eléctricas, ha ocasionado que la industria funcione con algunos parámetros que están fuera del límite que establece la norma. El principal problema que presenta la industria es el pago por penalización por el bajo factor de potencia lo que ocasiona un incremento en el pago mensual de la planilla eléctrica.

Por lo que es necesario realizar un estudio que ayude a detectar posible contaminación armónica, fallas en los sistemas eléctricos y así plantear donde se establezcan mecanismos y procedimientos para mejorar los parámetros eléctricos y cumplir con la regulación CONELEC 004 /01.

6. OBJETIVOS:

Objetivo General

- Mejorar los parámetros del sistema eléctrico de la industria FUNDI LASER mediante el análisis de las mediciones correspondientes realizadas con el equipo analizador trifásico FLUKER 435 para poder detectar posibles fallas en las instalaciones eléctricas, efectos asociados a este problema y sus posibles soluciones.

Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico en condiciones actuales de todos los parámetros eléctricos de los centros de alimentación de la industria mediante el levantamiento de cargas y del diagrama unifilar para determinar las características de los sistemas eléctricos
- Determinar los problemas existentes en la industria mediante el análisis de los datos obtenidos en mediciones para que a través de simulaciones se pueda encontrar los problemas más representativos que hay en la industria
- Proponer alternativas de solución a los problemas encontrados a través de un análisis técnico económico de dichas propuestas para cumplir con la regulación emitida y poder reducir los costos en la planilla eléctrica.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:

Tabla 1: Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

Objetivo	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Objetivo 1: Realizar un diagnóstico en condiciones actuales de todos los parámetros eléctricos de los centros de alimentación de la industria mediante el levantamiento de cargas y	Análisis de la carga existente en la industria FUNDI LASER.	Levantamiento de carga de la Industria Levantamiento del diagrama unifilar e identificación del estado general de los equipos instalados en la industria.	Investigación de campo y Observación directa. Trabajo de oficina.

del diagrama unifilar para determinar las características de los sistemas eléctricos			
Objetivo 2: Determinar los problemas existentes en la industria mediante el análisis de los datos obtenidos en mediciones para que a través de simulaciones se pueda encontrar los problemas más representativos que hay en la industria.	Estudio y simulación de los datos obtenidos por el analizador de carga	Obtener las mediciones correspondientes para evaluar el estado de los equipos e instalaciones eléctricas de la industria Visualizar las posibles perturbaciones y proponer las soluciones más viables	Simulación y corrida de flujos utilizando la herramienta digital EASY POWER Mediciones con el analizador de carga FLUKER 435. Análisis del nivel de contaminación de armónicos Selección y colocación de filtros para lograr mitigar el nivel de armónicas
Objetivo 3: Proponer alternativas de solución a los problemas encontrados a través de un análisis técnico económico de dichas propuestas para cumplir con la regulación emitida y poder reducir los costos en la planilla eléctrica.	Realizar un análisis técnico económico en base a los resultados obtenidos de la corrida de flujos del simulador.	Encontrar las soluciones técnicas y económicas más viables para contrarrestar los problemas que afectan a la calidad de energía debido a la contaminación armónica en la industria.	Comparación de las posibles soluciones planteadas en base a las necesidades técnicas y económicas de la Industria.

Elaborado por: Los Autores

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

La Calidad del Producto

La Regulación de Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución del Ecuador (Regulación No. CONELEC-004/01), establece patrones en tres aspectos tales como:

- Calidad del Producto
- Calidad de Servicio Técnico
- Calidad de Servicio Comercial

La primera, Calidad del Producto, establece pautas para los parámetros eléctricos para poder entregar energía de buena calidad. La Calidad de Servicio Técnico en cambio, regula las interrupciones de servicio eléctrico estableciendo límites para su frecuencia y duración. La calidad de Servicio Comercial a diferencia de las anteriores reglamenta las solicitudes y reclamos de medición y facturación.

El detalle de los incumplimientos y las penalizaciones correspondientes se incorporarán a los respectivos contratos de concesión. El estudio presente tomará a consideración solo la parte de “Calidad del Producto” de esta regulación, debido a que la Industria FUNDI LASER no cuenta con dicho estudio, y para ello tomar como referencia cada una de las presentes mediciones para observar las características de Calidad del Suministro Eléctrico de la Industria. Según la regulación No. CONELEC-004/01, la Calidad del Producto comprende los siguientes aspectos (CONELEC, 2011, págs. 4-11):

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones de voltaje.
- Factor de potencia

Tabla 2: Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

ÍTEM	PARÁMETRO	NORMA O REFERENCIA
1	VOLTAJE DE ESTADO ESTACIONARIO: Variaciones máximas permitidas en baja voltaje:	REGULACIÓN CONELEC 004/01 Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a continuación:

	<p>Las variaciones de voltaje permitidas en condiciones normales de operación para redes de baja voltaje (menores a 1 kV) deben estar entre el 90% y el 110% del voltaje nominal, en periodos superiores a 1 minuto.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sub etapa 1</th> <th>Sub etapa 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alto Voltaje</td> <td>± 7,0 %</td> <td>± 5,0 %</td> </tr> <tr> <td>Medio Voltaje</td> <td>± 10,0 %</td> <td>± 8,0 %</td> </tr> <tr> <td>Bajo Voltaje Urbanas</td> <td>± 10,0 %</td> <td>± 8,0 %</td> </tr> <tr> <td>Bajo Voltaje Rurales</td> <td>± 13,0 %</td> <td>± 10 %</td> </tr> </tbody> </table>			Sub etapa 1	Sub etapa 2	Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %	Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %	Bajo Voltaje Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %	Bajo Voltaje Rurales	± 13,0 %	± 10 %
	Sub etapa 1	Sub etapa 2																
Alto Voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %																
Medio Voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %																
Bajo Voltaje Urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %																
Bajo Voltaje Rurales	± 13,0 %	± 10 %																
<p>2</p>	<p>ARMÓNICOS Contenido de Armónicos de las Ondas de Voltaje y Corriente (Límites de Distorsión Armónica) depende del voltaje en el que se esté trabajando</p>	<p>REGULACIÓN CONELEC 004/01 Para efectos de regulación de calidad del servicio eléctrico. ANSI/IEEE std 519 - 1992 “Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”</p>																
<p>3</p>	<p>FRECUENCIA Variaciones máximas permitidas en frecuencia: La frecuencia nominal del SIN es 60 Hz y su rango de variación de operación está entre 59.8 y 60.2 Hz en condiciones normales de operación.</p>	<p>REGULACIÓN CONELEC 004/01 Para efectos de regulación de calidad Del servicio eléctrico.</p>																
<p>5</p>	<p>FACTOR DE POTENCIA: El factor de potencia inductivo de las instalaciones deberá ser igual o superior a 0.90.”</p>	<p>REGULACIÓN CONELEC 004/01 Para efectos de regulación de calidad Del servicio eléctrico. Establece el límite en 0,92.</p>																

Fuente: Análisis de carga del hospital San Vicente de Paúl de la Ciudad de Ibarra (Aguirre & Germán, 2010, págs. 49-54)

CLASES DE POTENCIAS

Se toma las definiciones básicas de las diferentes potencias existentes con sus respectivas fórmulas para calcular.

POTENCIA ACTIVA

La potencia activa se la define como la potencia que se transforma íntegramente en trabajo o en calor (pérdidas). Se mide en kWh. Del concepto anterior se deduce que todas las máquinas eléctricas alimentadas con corriente alterna convierten la energía eléctrica suministrada en trabajo mecánico y calor, esta energía se mide en kWh. Según (Schneider, 2008).

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\emptyset)$$

Ecuación 1

Donde:

P: Potencia activa

U: Voltaje de la red (voltaje de línea)(entre fases)

I: Corriente de la línea

\emptyset : Ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente

POTENCIA REACTIVA

La potencia que utilizan ciertos receptores para la creación de campos eléctricos y magnéticos (como motores, transformadores, reactancias, etc.)

Entonces esta potencia no se convierte en trabajo útil, pero es muy necesaria para la creación de los campos magnéticos internos de los motores y transformadores, además aumenta la potencia total a transportar por las empresas eléctricas distribuidoras, así como también las pérdidas en los conductores, caídas de voltaje de los mismos y un consumo de energía suplementario que no es aprovechable directamente por los receptores. Se mide en kVAr y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \emptyset$$

Ecuación 2

POTENCIA APARENTE

Es el valor real demandado a la red y que es la suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Es importante destacar que es la energía real generada y transportada por las líneas

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Ecuación 3

$$S=U \times I$$

Ecuación 4

$$S=\sqrt{3} \times U \times I$$

Ecuación 5

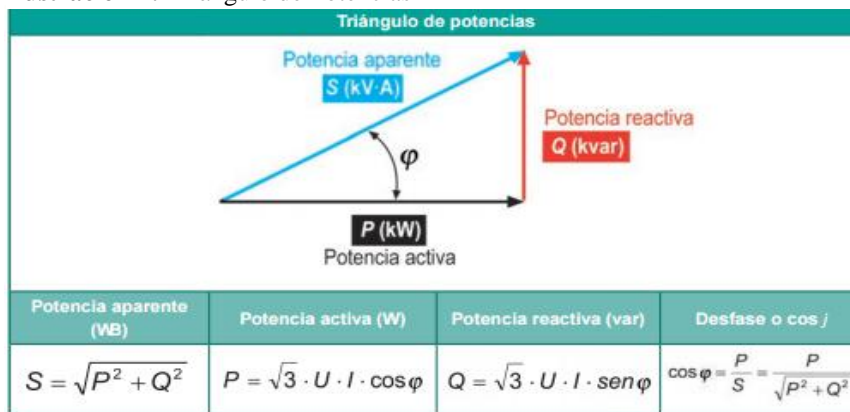
En definitiva la potencia aparente es el valor real demandado a la red y que es la suma vectorial de las potencias activa y reactiva.

DEFASE o $\cos \phi$

Es la proporción existente entre la potencia y la potencia aparente, o el coseno del ángulo de desfase entre potencia activa y potencia aparente. Según (Sierra, 2009, pág. 27)

En el siguiente grafico se observan los conceptos explicados así como su forma de cálculo.

Ilustración 1: Triángulo de Potencias



Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 27)

POTENCIA DE DISTORSIÓN

Potencia de distorsión es cuando la instalación cuenta con cargas que producen armónicos, aparece una componente más a tener en cuenta en el cálculo de la potencia aparente se la conoce con la letra D. Lo que se concluye que actualmente esta potencia es la real medida por los analizadores, debido a las cargas no lineales, mismas que producen distorsiones armónicas de la red y a su vez inciden directamente en el factor de potencia. Según (Sierra, 2009, pág. 31)

$$D=U_1 \times I_D$$

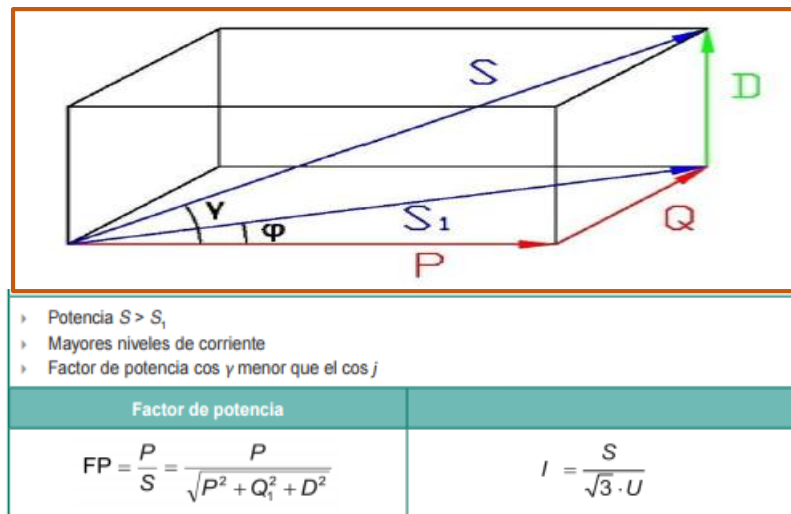
Ecuación 6

Donde:

D: Potencia de distorsión

U_1 : Voltaje de la red

I_D : Corriente distorsionada

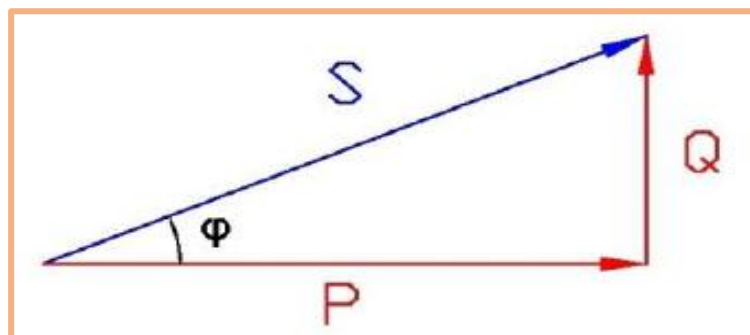
Ilustración 2: Triángulo de Potencias de Potencia de Distorsión

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 31)

Factor de Potencia:

El factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica convertida en trabajo, el valor ideal es de 1, indicando que toda la energía consumida ha sido transformada en trabajo, pero si el factor de potencia es menor entonces significa un mayor consumo de energía para producir trabajo.

Es conveniente que la energía reactiva (Q) sea baja (tendiendo a cero) y por tanto el ángulo ϕ tenderá a cero. El coseno de un ángulo cercano a cero tiende a 1 y por tanto el factor de potencia para un caso con baja energía reactiva tiende a 1 que representa la condición ideal. Por tanto, un usuario deberá llevar su factor de potencia lo más cercano a uno para evitar la penalización por bajo factor de potencia. En el factor de potencia $\cos \phi$ o tangente ϕ , la potencia activa P y la potencia reactiva Q se suman entre sí en forma vectorial dando como resultado la potencia aparente. (Camacho, 2015, pág. 70).

Ilustración 3: Triángulo de Potencias Factor de Potencia

Fuente: (Aguirre & Germán, "Análisis de carga del hospital San Vicente de Paúl de la Ciudad de Ibarra y propuesta para el cumplimiento de la calidad de energía según la regulación No. CONELEC 004/01", 2010)

$$\cos \sigma = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Por razones de orden práctico y tarifario, en las facturas de las empresas eléctricas distribuidoras, por ejemplo se calcula la tangente ϕ como el cociente entre la energía reactiva y la activa del período facturado, resultando por lo tanto un valor promedio.

Por lo anteriormente señalado; el factor de potencia o $\cos \phi$ medio de una instalación para fines prácticos, se determina a partir de la formula siguiente:

$$FP = \frac{kWh}{kWh+kVARh^2} = \cos \sigma \quad \text{Ecuación 9}$$

O bien,

$$FP = \cos \left(\arctan \frac{kVARh}{kWh} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

KWh: Cantidad registrada por el contador de energía activa.

KVARh: Cantidad registrada por el contador de energía reactiva.

Factor de potencia (REGULACIÓN No. CONELEC 004/01)

En la Regulación CONELEC – 004/01 al hablar de factor de potencia dice que “para efectos de evaluación de la calidad, en cuanto al factor de potencia, si en el 5% o más del periodo evaluado el valor del factor de potencia es inferior a los límites, el Consumidor está incumpliendo con el índice de calidad.”

➤ LÍMITE

El valor mínimo es de 0,92. (Regulación CONELEC 004/01)

Entonces operativamente las empresas eléctricas distribuidoras tienen la obligación de realizar las mediciones de la calidad del producto, recopilar, analizar y mantener registros de la información relacionada con la calidad del producto y del servicio, para analizar y reportar al Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

Diseñar planes para mantener y mejorar el nivel de calidad del servicio eléctrico de acuerdo a las exigencias de los clientes y a las normativas vigentes, considerando el aspecto económico.

Presentar alternativas de corrección para los problemas de calidad.

Cargos por bajo factor de potencia

Para aquellos consumidores de la Categoría General, con medición de energía reactiva, que registren un factor de potencia medio mensual inferior a 0,92 el distribuidor aplicará los cargos establecidos en el Reglamento de Tarifas del Pliego y Cargos Tarifarios de Ecuador, en concepto de cargos por bajo factor de potencia.

Donde se deduce que la penalización por bajo factor de potencia será igual a la facturación mensual correspondiente a: consumo de energía, demanda, pérdidas en transformadores y comercialización, multiplicando por el siguiente factor. Según (ARCONEL, 2016, pág. 9):

$$Bfp = \left(\frac{0,92}{fpr} \right) - 1$$

Ecuación 11

Donde:

Bfp: Factor de penalización por bajo factor de potencia.

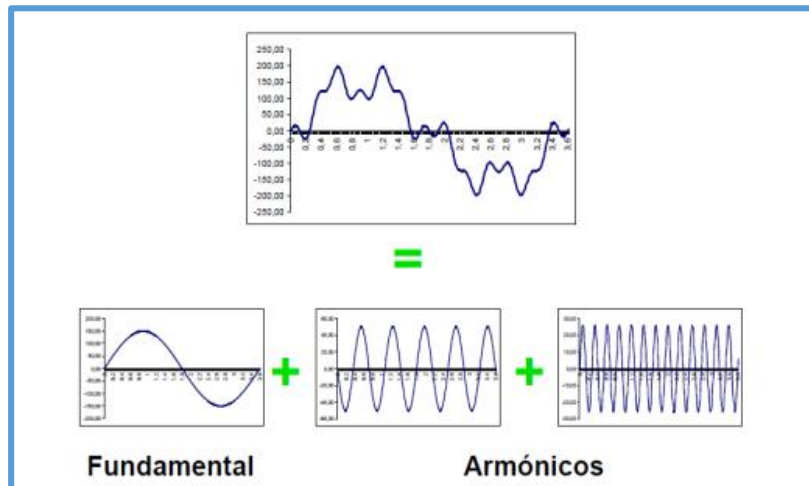
fpr: Factor de potencia registrado.

Porque existe un bajo factor de potencia

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable, los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución exagerada del factor de potencia. Según (Velasco, 2006, pág. 44)

Armónicos

Las cargas no lineales tales como: rectificadores, variadores de velocidad, hornos e inversores, etc., absorben de la red corrientes periódicas no sinusoidales. Estas corrientes están formadas por una componente fundamental de 50 o 60 Hz, más una serie de corrientes superpuestas, de frecuencias múltiples de la fundamental, que denominamos armónicos. El resultado es una deformación de la corriente y de voltaje que conlleva una serie de efectos secundarios asociados.

Ilustración 4: Descomposición armónica

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 31)

Para la interpretación de los análisis y las medidas realizadas en instalaciones con armónicos se definen una serie de parámetros.

- **Amplitud:** hace referencia al valor de la voltaje o intensidad del armónico
- **Orden de armónico (n):** hace referencia al valor de su frecuencia fundamental (60 Hz). Por ejemplo un armónico de orden 5 tiene una frecuencia 5 veces superior a la fundamental, es decir $5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$

Tabla 3: Orden de un armónico

n(orden armónico)	Frecuencia de red	
	50 Hz	60 Hz
5	250 Hz	300 Hz
7	350 Hz	420 Hz
11	550 Hz	660 Hz

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 31)

- **Tasa de distorsión individual Relación**, expresada en tanto por ciento, entre el valor eficaz de un armónico de voltaje o corriente (U_n o I_n) y el valor eficaz de la correspondiente componente fundamental.

$$U_n(\%) = \frac{U_n}{U_1} * 100$$

Ecuación 12

$$I_n(\%) = \frac{I_n}{I_1} * 100$$

Ecuación 13

Tabla 4: Ejemplo de distorsión individual

Voltaje red	I nominal fundamental	I del 5° armónico	U del 5° armónico
400 V	327 A	53 A	18 V
Tasa individual de corriente		Tasa individual de voltaje	
$I_5(\%) = \frac{I_5}{I_1} * 100 = \frac{53}{327} = 16\%$		$U_5(\%) = \frac{U_5}{U_1} * 100 = \frac{18}{400} = 4,5\%$	

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 31)

- **Tasa de distorsión total:** Relación, en tanto por ciento, entre el valor eficaz del residuo armónico en voltaje o corriente y el correspondiente valor eficaz de la componente fundamental. Para ello se define la Tasa de distorsión total o THD.

Tabla 5: Distorsión global en voltaje y corriente

Tasa de distorsión global en corriente THD I	Tasa de distorsión global en voltaje THD U
$THD I (\%) = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} * 100$	$THD U (\%) = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} * 100$

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 32)

Tabla 6: Ejemplo Distorsión global en voltaje y corriente

	Fundamental	5°	7°	11°	13°	THD (%)
I	327 A	224 A	159 A	33,17 A	9 A	84,6%
U	400 V	20 V	17 V	6 V	2 V	6.7%

Fuente: Guía Técnica de Eficiencia energética eléctrica (Sierra, 2009, pág. 32)

Armónicos de Voltaje:

Las armónicas de voltaje se producen principalmente, entre la relación de corriente armónica absorbida por las cargas no lineales y la impedancia de las fuentes del transformador de alimentación, esto está regido por la ley de OHM

La propia red de alimentación puede ser una fuente indirecta de armónicas de voltaje. Todas las cargas que comparten un transformador o un ramal, con fuerte carga armónica podrían resultar afectadas por las armónicas de voltaje producidas. Según (Sierra, 2009, págs. 29-30)

Armónicos (REGULACIÓN No. CONELEC 004/01)

Límite de Armónicos de voltaje

En la Regulación CONELEC – 004/01 al hablar de armónicos de voltaje dice que “Los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD, expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') señalados a continuación. Para efectos de esta regulación se consideran los armónicos comprendidos entre la segunda y la cuadragésima, ambas inclusive.”

Tabla 7: Límites de armónicos de voltaje

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA $ V_i' $ o $ THD' $ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V ≤ 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	$0.1 + 0.6*25/n$	$0.2 + 1.3*25/n$
Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
Mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

Fuente: Regulación CONELEC 004/01 (CONELEC, 2011)

Armónicos de Corriente:

Las armónicas de corriente son creadas por cargas no lineales que absorben corrientes en impulsos bruscos en vez de hacerlo suavemente en forma de onda sinusoidal. Estos impulsos crean ondas de

corriente distorsionadas, que originan a su vez corrientes armónicas, de retorno hacia otras partes del sistema de alimentación.

Las corrientes absorbidas por las cargas no lineales contienen una buena cantidad de armónicos. Los armónicos presentes son una función del sistema de distribución y la configuración de la carga no lineal. (Mora & Cevallos, 2014, pág. 30)

Estándar IEEE 519 -1992

Esta norma norteamericana ofrece una amplia información acerca de las causas y efectos de las perturbaciones armónicas en redes eléctricas. Está enfocada a limitar el contenido armónico de los sistemas de potencia. Separa y fija el grado de distorsión armónica máximo en voltaje (responsabilidad del suministrador de energía) y el de corriente (responsabilidad del consumidor de energía).

Distorsión Total de Demanda

TDD es la distorsión armónica basada en la máxima corriente de demanda (componente fundamental). Es una medida de la distorsión armónica total de la corriente en el PCC (punto de conexión común) para la carga total conectada

Relación de Corriente de Cortocircuito a la Corriente de Carga $\frac{I_{sc}}{I_{L1}}$

Es la medida de la relación de corriente de cortocircuito disponible en el PCC a la máxima corriente de carga en el mismo punto. Esto es una medida de la rigidez del sistema eléctrico relativo a la carga.

Contenido armónico de corriente

Se calcula sobre la base de índices que consideran el porcentaje de contenido armónico individual en la onda de corriente y el valor del TDD (Factor de Distorsión Total de la Demanda) de la carga conectada por los Agentes en los puntos de conexión. Para efectos de esta Regulación, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2° y la 30°, incluyendo las mismas

Límites

Los valores límites de contenido armónico, de TDD y más procedimientos para aplicación de límites, se regirán a lo indicado en la guía IEEE 519 Control armónico. Una tabla con los límites señalados en esa guía se indica a continuación (IEEE_519_1992, 1992, pág. 76):

Tabla 8: Límites de Distorsión de Corriente

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.5	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	0.7	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Donde:
 I_{sc} = máxima corriente de cortocircuito en el PCC
 I_L = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC

Fuente: IEEE 519-1992 (IEEE_519_1992, 1992, pág. 76)

El valor del ITHD se calcula de la manera siguiente:

$$ITHD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{30} I_h^2}}{I_{h=1}}$$

Ecuación 14

Resonancia:

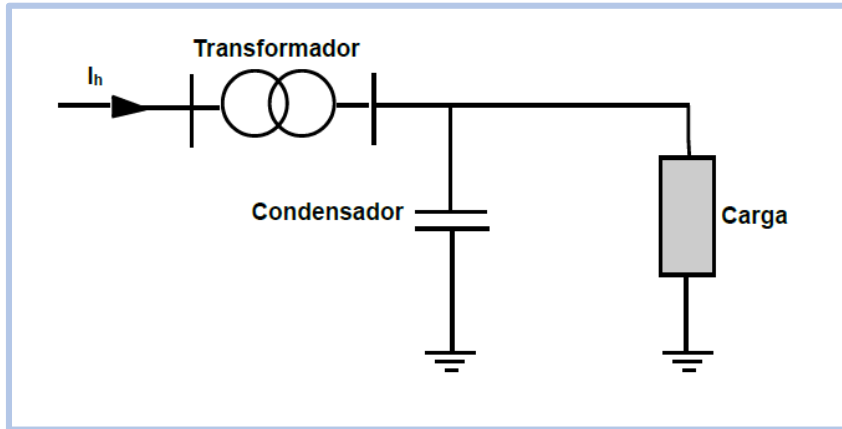
La presencia de capacitores y reactores para compensación del factor de potencia puede originar resonancias, las cuales, a su vez, producen corrientes o voltajes excesivos que afectan los equipos del sistema. La resonancia puede ser tanto en serie como en paralelo

Resonancia en serie:

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y capacitiva que están en serie son iguales, para alguna frecuencia. Esta condición ocurre como resultado de la combinación serie de un banco de condensadores y una línea o un transformador.

Bajo condiciones de resonancia serie, el sistema ofrece una impedancia muy baja a voltajes armónicos de frecuencia igual a la de resonancia. Por lo tanto, pequeños voltajes armónicos en el sistema pueden originar elevadas corrientes armónicas en los equipos.

Ilustración 5: Circuito con resonancia serie

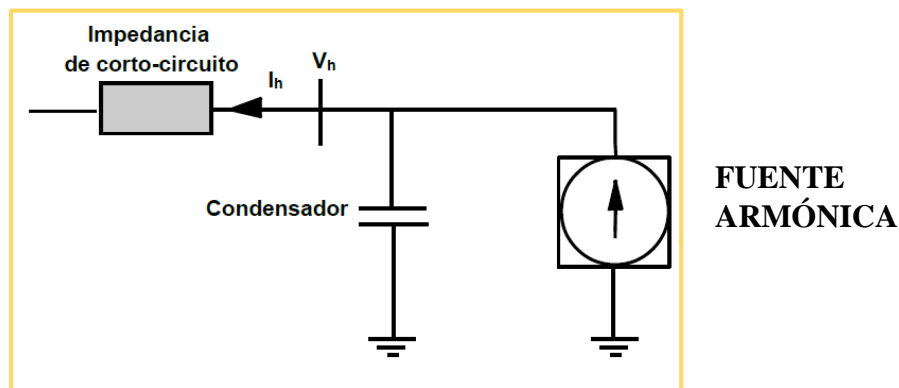


Fuente: Teoría y Diseño de filtros de armónicos en sistema eléctrico (Gers, 2008, pág. 3)

Resonancia en paralelo:

La resonancia paralela es, probablemente, una de las causas más importantes de los problemas armónicos. Una resonancia paralela resulta en una impedancia muy alta presentada por el sistema a la corriente armónica correspondiente a la frecuencia de resonancia. Puesto que la mayoría de cargas generadoras de armónicos pueden ser consideradas como fuentes de corriente, el fenómeno resulta en elevados voltajes y corrientes armónicas en las ramas de la impedancia paralelo (Gers, 2008, págs. 2-3)

Ilustración 6: Resonancia paralelo de condensadores con la impedancia de corto-circuito



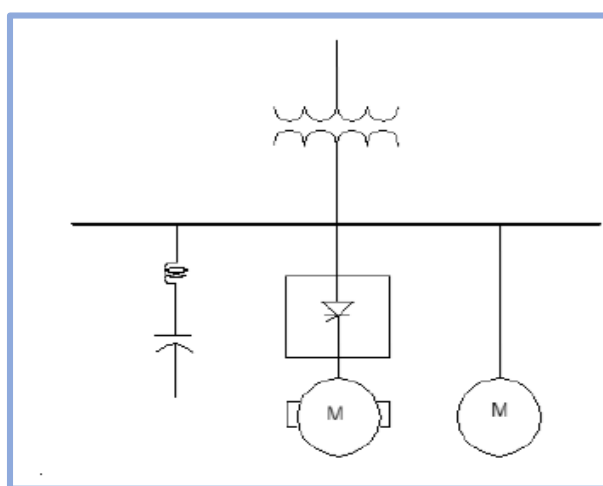
Fuente: Teoría y Diseño de filtros de armónicos en sistema eléctrico (Gers, 2008, pág. 3)

Filtros:

Filtro Pasivo Sintonzado

Estos filtros son pasivos y se conectan en paralelo al sistema de distribución general o a cargas individuales con la finalidad de reducir el nivel de armónicos producido por las cargas no lineales, además de estos proporciona potencia reactiva fundamental para compensar el factor de potencia. Cuando los filtros se instalan en el bus principal de distribución, su potencia total está conformada por grupos o pasos y son accionados por contactores de acuerdo al requerimiento de potencia reactiva del sistema ante una condición dada.

Ilustración 7: Conexión del filtro desintonizado en paralelo al bus de distribución del sistema.



Fuente: Teoría y Diseño de filtros de armónicos en sistema eléctrico (Gers, 2008, pág. 90)

Se denomina frecuencia de sintonía o frecuencia de resonancia serie cuando la impedancia de filtro se hace cero, lo que permite que las corrientes de esa frecuencia fluyan en su totalidad a través de él. La frecuencia de sintonía debe ser inferior a la menor armónica dominante, para que atenúe a esta y a las de orden superior, comportándose el filtro como un elemento inductivo, por lo que las corrientes armónicas de mayor orden ya no estarán expuestas a condiciones de resonancia, reduciéndose la potencia distorsionante del sistema.

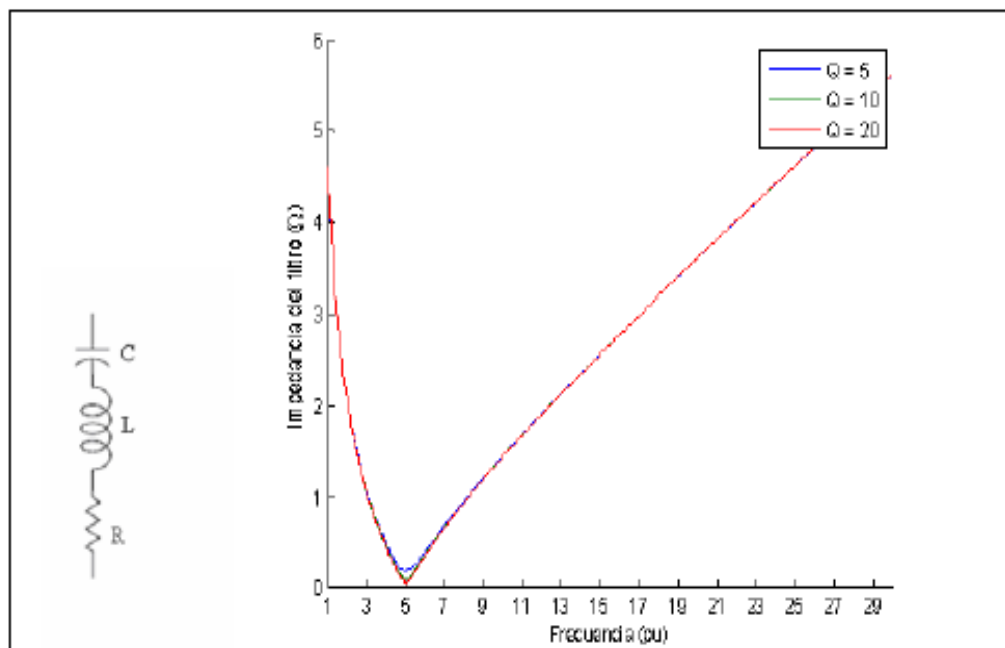
En los filtros sintonizados se debe considerar que la corriente está compuesta, por la corriente de la potencia reactiva fundamental y por la corriente distorsionante producida por las cargas no lineales. Este filtro es el más usado comúnmente en las aplicaciones industriales, el cual, representa muy baja impedancia al cambio de frecuencia. En este filtro se debe tomar en cuenta el crecimiento de las fuentes de corriente armónicas, porque si no, puede ser expuesto a sobrecargas, lo cual fácilmente puede producir un sobrecalentamiento externo e interno y causar un daño térmico.

Para diseñar un filtro pasivo sintonizado se requiere un conocimiento preciso de la carga de producción armónica y del sistema de potencia.

Los filtros pasivos siempre proveen compensación reactiva determinada por la capacidad y el voltaje usado en el banco de capacitores. En hecho pueden ser diseñados para el doble objetivo de provisión de acción filtradora y compensación del factor de potencia al nivel deseado.

Este filtro es una combinación serie de una inductancia y una capacitancia. En realidad, en la ausencia de un resistor diseñado físicamente, estará siempre una resistencia serie, la cual es la resistencia intrínseca del reactor serie, algunas veces usado como un punto para evitar sobrecalentamiento del filtro. Todas las corrientes armónicas cuya frecuencia coincide con la del filtro encontrarán un camino de baja impedancia a través del filtro. Aquí muestra una curva característica de este tipo de filtro. (Mora & Cevallos, 2014, pág. 55)

Ilustración 8: Filtro Sintonizado



Fuente: Estudio y análisis de calidad de energía enfocado en nivel de armónicos (Mora & Cevallos, 2014, pág. 234)

Tabla 9: Ventajas del Filtro Pasivo Sintonizado

Ventajas del Filtro Pasivo Sintonizado.	
✓	Mejora el factor de potencia en el circuito secundario de baja voltaje lo que hace que mejore el sistema de distribución aguas arriba.
✓	Reducción de distorsión armónica de voltaje y corriente en circuitos de bajo voltaje

✓ Reducción de corriente de neutro causada por tercer armónico.
✓ Mejora de la regulación de voltaje en las redes de bajo voltaje
✓ Optimización de la capacidad de entrega de energía a un mayor número de usuarios por transformador
✓ Aumento de la vida útil del transformador y de equipos.
✓ Mejora la calidad de potencia de suministro en especial de la forma de onda de la señal de voltaje y regulación de voltaje
✓ Bajo costo de implementación.

Cálculo de Filtros Armónicos

Lo que se pretende establecer en este punto, es poder determinar mediante cálculos sugeridos a lo largo de este estudio los filtros de distorsión armónicas que se debe colocar a la entrada del horno de inducción además, de poder determinar el tipo de filtro armónico a utilizar. En la actualidad es imprescindible el uso de estos equipos ya que ayudan a mantener un sistema eléctrico más estable y con equipos con una mayor vida útil, ya que los armónicos en la actualidad son el enemigo silencioso de los sistemas eléctricos. Según (Mora & Cevallos, 2014, págs. 105-111)

Es por ello que éste estudio va dedicado especialmente a mejorar la calidad de energía de la fábrica FUNDI LASER, a lo largo del desarrollo de esta se ha podido determinar que los filtros a instalarse serán filtros sintonizados pasivos ya que son los que se ajustan y requieren en el sistema eléctrico en mención, es lo que se ha podido determinar a lo largo de este estudio.

➤ Se realiza el siguiente Cálculo

Hay que calcular la potencia reactiva que se necesita para compensar el sistema de donde:

$$Q_{\text{eff}} = (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) * P \quad \text{Ecuación 15}$$

θ_1 = Ángulo del Factor de potencia actual

θ_2 = Ángulo del Factor de potencia deseado

Se calcula la reactancia efectiva del filtro

$$X_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{li}}^2}{Q_{\text{eff}}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Teniendo identificada la armónica que se desea filtrar, se debe de considerar un porcentaje menor de la frecuencia de sintonía, como lo sugiere la norma **IEEE-1531-2003** para evitar posibles resonancias

de sintonía en el sistema. En este proyecto se manejará el 6% menor de la frecuencia de sintonía para los cálculos a realizar

$$X_c = \frac{(h*0,6)^2}{(h*0,6)^2-1} * X_{\text{eff}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

$$h = \frac{f \text{ fundamental}}{f \text{ armónico}} \quad \text{Ecuación 18}$$

En la ecuación que se muestra a continuación realizamos el cálculo del capacitor, su unidad de medida es el faradio

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad \text{Ecuación 19}$$

Reactor.

Para sacar valores de impedancia, nos remitimos a la ecuación que se muestra a continuación:

$$Z = R + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right] \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde R, L, C son la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos del filtro, respectivamente, y ω es la frecuencia angular del sistema de potencia. Si necesitamos XL:

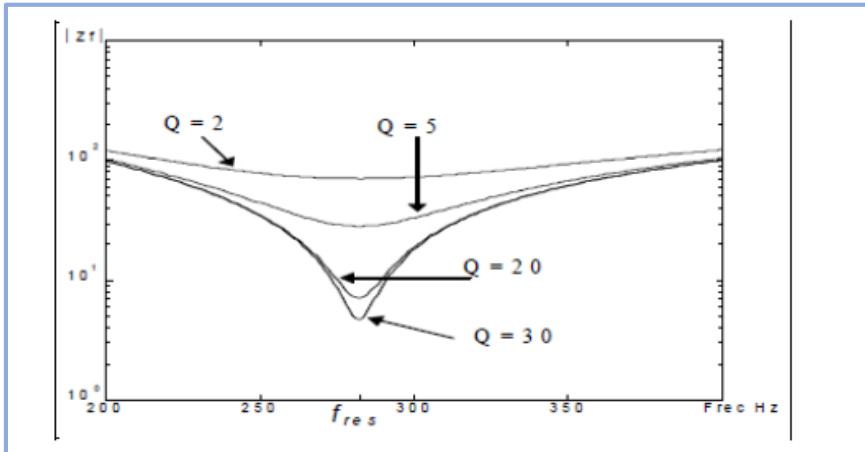
$$XL = \frac{X_c}{h^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

Para el cálculo del inductor, expresado en henrios:

$$L = \frac{XL}{2\pi f} \quad \text{Ecuación 22}$$

Factor de Calidad

Dentro del análisis de los filtros pasivos sintonizados, un parámetro muy importante es el factor de calidad, el cual relaciona la habilidad de un filtro para disipar energía absorbida a la frecuencia sintonizada. Un valor grande Q_f de implica un valle a la frecuencia resonante de un filtro y por lo tanto captura el amontonamiento de frecuencia armónica. Factor de calidad debe considerarse entre 20 a 30

Ilustración 9: Respuesta del filtro sintonizado ante diferentes factores de calidad

Fuente: Estudio y análisis de calidad de energía enfocado en nivel de armónicos (Mora & Cevallos, 2014, pág. 235)

Resistencia de un filtro

El cálculo de la resistencia de un filtro está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{X_l * h^{0,6}}{Q_f} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

H= es el orden armónico a que se encuentra.

6% = es el porcentaje en que debe disminuirse el valor del orden armónico para evitar resonancia

Q_f = Factor de calidad

Potencia reactiva del filtro (frecuencia fundamental):

$$k_{\text{var filtro}} = \frac{V_i^2 (1-l)}{X_c - X_L} \quad \text{Ecuación 24}$$

Comprobación del diseño del Filtro que establece la Norma IEEE-18 2002

1.- Sintonización a la frecuencia:

Para que el filtro se sintonice a la frecuencia requerida se debe cumplir la siguiente condición.

$$X_c = X_L \quad \text{Ecuación 25}$$

Corrientes armónicas

Para comprobar que el filtro no vaya a sufrir daño por posibles sobre corrientes debido a la presencia de corrientes armónicas, se procede a corroborar que no rebase un 1.35% de la corriente fundamental

$$I_{\text{fund}} = \frac{\frac{V_{LL\text{sist}}}{\sqrt{3}}}{X_c - X_L} \quad \text{Ecuación 26}$$

Para el cálculo de las corrientes armónicas inyectadas por la carga no lineal se usa el porcentaje de la corriente fundamental

$$I_h = \% c \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde

h = armónica inyectada por la carga no lineal

$\%$ = porcentaje de la corriente armónica con respecto a la fundamental, obtenido del espectro armónico de corriente de la carga no lineal, proporcionado como dato de sistema.

Si observamos la ecuación que sigue nos da la corriente total que circula por el filtro, la cual viene dada por:

$$I_{\text{total rms}} = \sqrt{I_h^2 + \dots + I_n^2} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

h = armónica inyectada por la carga no lineal

n = Numero armónicas inyectadas por la carga no lineal

$$\% \text{ Margen de Corriente} = \frac{I_{\text{total rms}}}{I_{\text{fund}}} * 100 \leq 135\% I_{\text{fund}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Voltajes de Diseño del Capacitor.

Como siguiente paso está el cálculo del voltaje a frecuencia fundamental, además de los voltajes provocadas por los armónicos. El valor de voltaje pico del filtro no debe sobrepasar el 120% del voltaje pico del sistema.

$$V_c = I_{\text{fund}} * X_c \quad \text{Ecuación 30}$$

$$V_c(h) = \sum_h^n (v(h)) = \sum_h^n (I(h) * \frac{X_c}{n}) \quad \text{Ecuación 31}$$

$$V_{cL-N \text{ total pico}} = \sqrt{2}(V_c + V_{c(h)}) \quad \text{Ecuación 32}$$

$$V_{L-N \text{ pico sistema}} = \sqrt{2} * V_{L-N \text{ SISTEMA}} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$V_{L-N \text{ SISTEMA}} = \frac{V_{ll \text{ sist}}}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación 34}$$

La verificación de la norma se realiza por medio de la ecuación

$$\frac{V_{c \text{ L-N total pico}}}{V_{c \text{ L-N pico sist}}} * 100 \leq 120\%$$

Ecuación 35

Norma IEEE – 1531 -2003

Según (IEEE, 2033) La instalación de un filtro de armónicos de derivación pasiva cerca de cargas que producen armónicos es uno de los métodos comunes para mitigar la distorsión armónica. El propósito del filtro de armónicos es derivar parte de la corriente armónica de la carga en el filtro para reducir la cantidad que va al sistema de energía eléctrica.

Principales consideraciones de diseño

Criterios de desempeño

Requisitos de energía reactiva (kVAR)

Es esencial conocer la potencia reactiva capacitiva necesaria y sus correspondientes ahorros, para optimizar los costes del sistema. Además, los requisitos de potencia reactiva y de control de voltaje podrían dictar la necesidad de que el banco de filtros de armónicos se conmute en pasos o no. Posteriormente, los tamaños kVAR totales y de paso se determinan normalmente por el flujo de carga de frecuencia fundamental y los requisitos de control de voltaje.

Limitaciones armónicas

Estos se definen en términos de lo siguiente:

Limitaciones del sistema

Estos se definen para garantizar que el equipo funcionará correctamente y no fallará debido a la distorsión armónica excesiva.

Frecuencia de sintonía:

Partiendo de que la frecuencia fundamental es de 50 o 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1, 2, 3, 4, 5, 6,7..... orden natural de los números.

También se define como la relación que hay entre la frecuencia de armónico (f_n) y la frecuencia fundamental (f_{60})

$$h = \frac{f_n}{f_{60}}$$

Tomando en consideración que para bajo voltaje se recomienda aplicar un 6% menor de la frecuencia de sintonía para que el filtro no entre en resonancia.

Desbalances de carga

Los sistemas eléctricos industriales son propensos a sufrir desbalance de voltaje, esto significa que los valores de voltajes se diferencian entre sí.

Las razones para que esto ocurra pueden ser:

➤ **Razones Externas:**

Que la Compañía Eléctrica entregue un voltaje desbalanceado. Esto requiere un reclamo ante la empresa suministradora para que corrija la situación.

➤ **Razones Internas:**

Crecimiento desordenado de la instalación eléctrica, al incluirse cargas Monofásicas sin control, como: Cargas especiales, motores, aires acondicionados, otros.

Falsos contactos en Breakers, Fusibles, Contactores. De manera que se produzcan caídas de voltaje en alguna de las líneas. Según (Enríquez, 2005)

Fórmula:

$$\text{Desbalance entre fases} = \frac{\text{Carga Fase Mayor} - \text{Carga Fase menor}}{\text{Carga Fase Mayor}} \quad \text{Ecuación 36}$$

El desbalance permitido no debe exceder al 5%, lo que quiere decir que las cargas totales conectadas a cada Fase de un sistema bifásico o trifásico no deben ser diferentes una de la otra en un porcentaje mayor al 5%

Análisis de niveles de voltaje

Se determina a la calidad de voltaje como las variaciones de los valores eficaces (rms), medidos cada 10 minutos, con relación al voltaje nominal en los diferentes niveles. No cumple con el nivel de voltaje en el punto de medición cuando el 5% o más de los registros durante del período de medición de 7 días continuos, no se encuentren dentro de los límites de voltaje admitidos con respecto al valor del voltaje nominal como se señala (CONELEC, 2011):

$$\Delta V_K (\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

ΔV_K = variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k =voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n =voltaje nominal en el punto de medición.

Los niveles de voltaje dependen de la zona en donde se ha realizado la medición: zona urbana o zona rural, la Subetapa 1 comprende medio voltaje (distribución), la Subetapa 2 al nivel de consumidor. Por consiguiente la industria FUNDI LASER corresponde a la categoría Bajo voltaje, zona urbana y Subetapa 2, como se resalta en la tabla

Tabla 10: Límites de Variaciones de voltaje

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	$\pm 7,0\%$	$\pm 5,0\%$
Medio Voltaje	$\pm 10,0\%$	$\pm 8,0\%$
Bajo Voltaje. Urbanas	$\pm 10,0\%$	$\pm 8,0\%$
Bajo Voltaje. Rurales	$\pm 13,0\%$	$\pm 10,0\%$

Fuente: Regulación CONELEC 004-01

Selección del Calibre de Conductor para Instalaciones Eléctricas de bajo voltaje.

La selección adecuada en un conductor que llevara corriente a un dispositivo específico se hace tomando en consideración dos factores:

- La capacidad de conducción de corriente (ampacidad)
- La caída de voltaje.

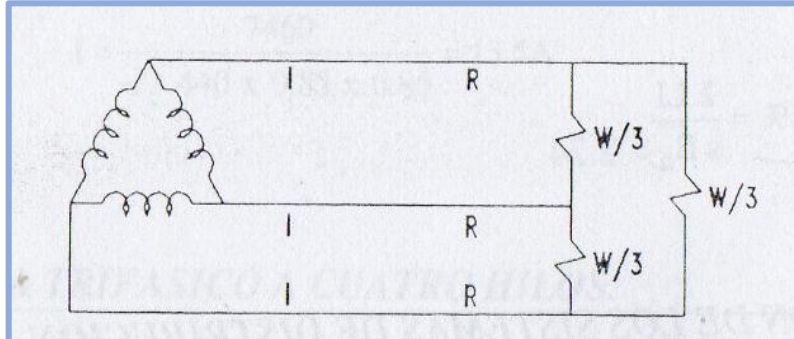
Estos dos factores se consideran por separado para un análisis y simultáneamente en la selección de un conductor. Como es posible que los resultados en la selección de un conductor difieran considerando estos factores, entonces, se debe tomar como bueno el que resulte de mayor sección ya que de esta manera el conductor se comportará satisfactoriamente desde el punto de vista de caída de voltaje y cumplirá con los requerimientos de capacidad de corriente. (Enríquez H. , 2012, págs. 89-92)

Cálculo de la corriente admisible del conductor

Los conductores de alimentación de una carga deben ser capaces de soportar, además de la corriente de plena carga en operación continua, cualquier sobrecarga que pueda tener durante su operación y

las corrientes de arranque. Por lo tanto debemos calcular el conductor a un 125% de la corriente consumida a plena carga.

Ilustración 10: Sistema Trifásico a tres hilos



Fuente: Manual de Instalaciones eléctricas (Enríquez H. , 2012, pág. 92)

Para poder calcular la corriente se utiliza las siguientes fórmulas:

$$P = \sqrt{3} * E_f * I * \cos \theta$$

Ecuación 38

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * E_f * \cos \theta}$$

Ecuación 39

Cálculo de los conductores por caída de Voltaje

El voltaje en los terminales de la carga es por lo general menor que el voltaje de alimentación, la diferencia entre estos dos puntos se conoce como “La caída de voltaje”. En las normas técnicas para instalaciones eléctricas recomiendan que la máxima caída de voltaje (desde la alimentación hasta la carga) no debe exceder el 5%; 3% se permite a los circuitos derivados (del tablero o interruptor a la salida para utilización) y el otro 2% se permite al alimentador (de la alimentación al tablero principal).

Una caída de voltaje excesiva (mayor del 5%) conduce a resultados indeseables debido a que el voltaje en la carga se reduce. No es suficiente calcular los conductores por corriente, es decir seleccionar el calibre de un conductor de acuerdo con la corriente que circula por él. También es necesario que la caída de voltaje en el conductor no excedan los valores establecidos por el Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas (que son 2% caída de voltaje en instalaciones residenciales y un máximo de 5% en instalaciones industriales, desde el punto de alimentación hasta el último punto). (Enríquez H. , 2005, pág. 107)

Calculo de la caída de voltaje en Sistemas Trifásicos a tres hilos:

La caída de voltaje entre fases es:

$$e_f = \sqrt{3} \times R \times I$$

Ecuación 40

El porcentaje de la caída de voltaje es:

$$e\% = \frac{\sqrt{3}L}{50sE_f} \times 100$$

Ecuación 41

$$e\% = \frac{2\sqrt{3}LI}{sE_f}$$

Ecuación 42

Cálculos de transformador.

Potencia reactiva en alto voltaje.

Según (Enríquez H. , 2012, pág. 105) En un sistema trifásico la potencia reactiva viene determinada por la expresión:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

Ecuación 43

Siendo:

S = Potencia reactiva del transformador.

V = Voltaje de el primario del transformador.

I = Corriente primario en amperios.

Valores nominales de transformadores trifásicos de distribución

Los valores de potencia aparente para transformadores trifásicos de distribución son los especificados en la tabla 11.

Tabla 11: Valores de potencia aparente nominal normalizados para transformadores de distribución trifásicos.

kVA	kVA	kVA
15	150	650
30	160	750
45	200	800
50	225	1 000
60	250	1 250
75	300	1 500
100	350	1 600
112,5	400	2 000
125	500	

Fuente: Transformadores de Distribución de Distribución nominales de potencias Aparentes (Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN , 2004, pág. 3)

Características del Filtro Electrónico de Paso Bajo

El filtro que se recomienda para la implementación para el proyecto, debido a su costo y a sus características es el FILTRO FN 3413 con las siguientes características:

Tabla 12: Características del filtro a instalar

CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO FN 3413	
Ancho de banda:	Paso bajo
Voltaje:	380 V, 480 V
Tipo:	Pasivo
Frecuencia:	60 Hz
Otras Características:	Trifásico de armónico

Fuente: (Direct Industry, 2017)

9.- HIPÓTESIS:

Mediante el análisis del sistema eléctrico de la industria FUNDI LASER permitirá determinar si existen problemas en la calidad del suministro de energía eléctrica.

OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable Independiente.- Análisis del sistema eléctrico

Tabla 13: Operacionalización de la variable independiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Se define como la descripción general de los componentes básicos del sistema eléctrico, partiendo de la distribución de la energía eléctrica en el alimentador principal y siguiendo sus diferentes etapas hasta el consumo final de la misma por parte de los equipos (cargas eléctricas).	Comportamiento de las cargas conectadas al transformador de la industria.	Curvas de carga	Potencia[W]	Visita de campo y observación
	Niveles de Voltaje y Potencia	Voltaje máximo y Potencia máximo	Voltaje [V] Potencia[W]	Recolección de información
	Rendimiento de los Equipos	Costos en Facturación	kWh	Observación

Elaborado por: los postulantes

Variable Dependiente.- Suministro de energía eléctrica

Tabla 14: Operacionalización de la variable dependiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Los problemas de calidad eléctrica causan estragos en tres áreas generales: tiempo de inactividad, problemas en los equipos y costos de consumo de energía por lo que es indispensable proponer métodos correctivos para mejorar el suministro de energía eléctrica	Nivel de contaminación de armónicos	Distorsión Armónica de Voltaje	Porcentaje	Simulación
	Análisis del sistema eléctrico general de la planta	Caídas de Voltaje [ΔV] Cargabilidad de los conductores	Voltaje [V]	Simulación
	Bajo Factor de Potencia	Penalización por bajo factor de potencia	$\cos\theta$	Recolección de datos

Elaborado por: los postulantes

10.- METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Métodos de investigación

Se aplicó en el desarrollo de este tema investigativo los siguientes métodos: el inductivo, deductivo, analítico y sintético.

Método inductivo – deductivo

El método inductivo – deductivo permitirá un análisis individual de la carga conectado al transformador de la industria, en este caso la carga es el horno de inducción. Con este análisis se verificara si el transformador está en la capacidad para asumir la carga, además de analizar si los la cargabilidad de los conductores

Este método analiza en forma detallada cada uno de los elementos, instrumentos, temas y subtemas que se utilizaron en la elaboración del trabajo investigativo, a su vez este método permitió establecer las conclusiones y recomendaciones al problema investigado.

Método analítico y sintético

Se utilizó el análisis y la síntesis de toda la información referente al tema, en base a documentos, Internet, fuentes bibliográficas, libros y revistas que se emplearon en el desarrollo del marco teórico. Paralelamente, se realizó la investigación bibliográfica, con el fin de analizar los diferentes enfoques de la teoría relacionada con el problema.

A través de los reportes que arrojan la simulación se realizan el análisis de los problemas encontrados en la industria contribuyendo así en la elaboración de la propuesta.

Tipos de Investigación

Investigación Bibliográfica

La investigación que se realizó se basó en una búsqueda bibliográfica como: libros, folletos, artículos, páginas web donde se logró obtener conocimientos más amplios sobre lo referente del tema, para poder realizar un análisis más amplio.

Investigación Exploratoria

A través de esta investigación se pudo conocer como estaba conformado el sistema eléctrico de la industria además de ver la necesidad de realizar un levantamiento de carga, el diseño del diagrama unifilar.

Investigación descriptiva

Se utiliza principalmente el método de análisis, es decir, se descompone el objeto a estudiar en sus distintos aspectos o elementos, para llegar a un conocimiento más especializado. Se realiza una exposición de hechos e ideas, explicando las diversas partes, cualidades o circunstancias. Esta investigación se utiliza para detallar cada uno de los problemas que producía cada elemento de la industria al sistema eléctrico

Este tipo de investigación permitió plantear alternativas para mejorar la calidad del suministro de energía como lo exige la regulación CONELEC – 004/01.

Investigación Propositiva.-

Es propositiva, ya que brindó una alternativa de solución al problema planteado. Además los procedimientos que se utilizaron son la investigación bibliográfica, el análisis de resultados de las mediciones tomadas con el analizador de carga, la interpretación de resultados, con el propósito de hallar la solución más adecuada desde el punto de vista técnico – económico.

Técnicas de Investigación:

Observación Directa y Participativa

Se utilizó esta técnica para tener un contacto directo con la industria y así entender el funcionamiento y los procesos de la industria, además con esta técnica se identificó los elementos que ocasionaban problemas al sistema eléctrico, y se pudo observar las planillas eléctricas las mismas que contaban con un valor alto sobre la penalización del factor de potencia.

Instrumentos de Investigación:

Entre los instrumentos de investigación que se utilizó tenemos:

- Grabaciones y fotografías: Se tomó grabaciones y fotografías sobre los procesos que realizaba la industria, además de las condiciones en las que se encontraba los elementos eléctricos de la industria.
- Fichas de registro en las que se anota las características eléctricas de los equipos eléctricos es decir sus datos de placa.

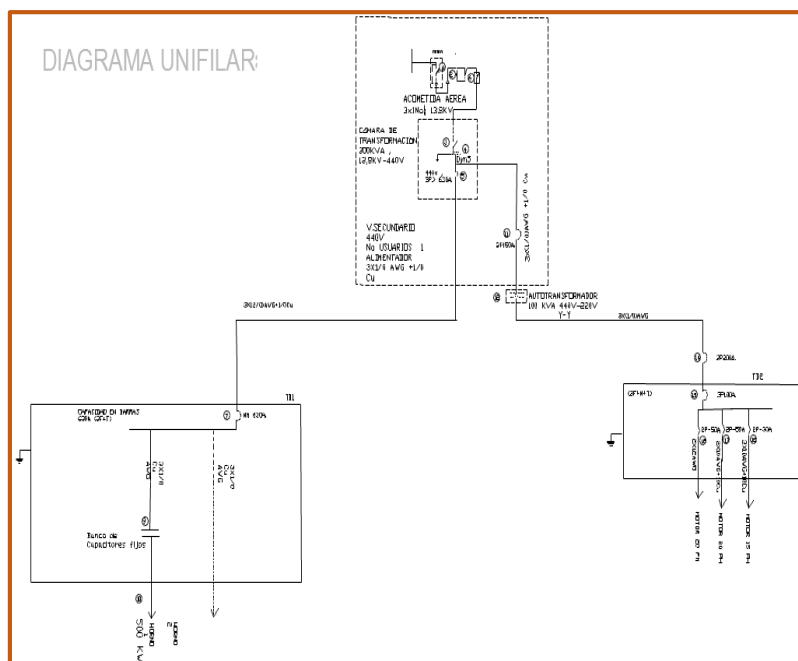
11.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

Descripción de la Industria:

La industria FUNDI LASER está dedicada al proceso de fundición de elementos como hierro, bronce, aluminio. Para el proceso de fundición utiliza un horno de inducción que es la carga de la industria que se considera que es la generadora de problemas hacia el sistema eléctrico.

El principal problema que presenta la industria y por lo que decidieron realizar un estudio técnico sobre la misma es la penalización por bajo factor de potencia que mensualmente factura la empresa Eléctrica de Ambato, dicho valor genera un gasto excesivo por lo que causa malestar a los propietarios de la empresa.

Ilustración 11: Diagrama Unifilar de la Industria



Elaborado por: los postulantes

Descripción del sistema eléctrico de la Industria:

La industria cuenta con un transformador trifásico de capacidad de 300 kVA con un voltaje de 13.8 kV a 440 V. El transformador es utilizado exclusivamente para la alimentación del horno de inducción que es la única carga con la que cuenta la industria. La alimentación consta con tres conductores por fase, dos conductores de calibre 1/0 AWG y un conductor de calibre 2/0 AWG.

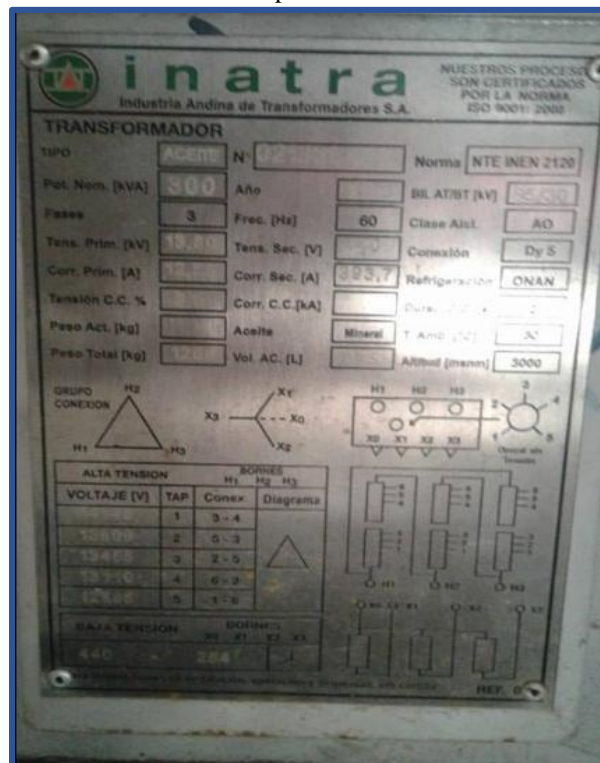
Características:

Tabla 15: Características del Transformador

Marca:	INATRA
Voltaje de alta:	13800 V
Voltaje de baja:	440 V
Capacidad:	300 kVA
Tipo de conexión:	DYn5
Nivel básico de aislamiento (BIL):	95 kV
Frecuencia:	60 Hz

Elaborado: los postulantes

Ilustración 12 Datos de placa de Transformador Trifásico de 300 KVA



Fuente: Los Autores

Datos Medidos.-

Levantamiento de carga:

El levantamiento de la carga es un factor muy importante en el desarrollo del proyecto ya que de esta forma se tendrá como resultado la magnitud de la potencia instalada y el tipo de carga. La potencia instalada se la puede obtener de diferentes formas, puede ser con los archivos de inventario de cada equipo, también con los datos de placa o realizando mediciones para determinar su potencia. A continuación se presenta la característica del transformador, y las cargas asociadas a cada uno de ellos. Para el levantamiento de la carga se considera solo la conexión del horno de inducción que es la que ocasiona problemas:

Carga conectada al Transformador de 300 kVA

Tabla 16: Características del Transformador

Ítem	Área	kW
1	Horno de Inducción	350
CARGA INSTALADA AL TRANSFORMADOR DE 300 kVA en kW		350

Fuente: Los Autores

Análisis de los datos obtenidos a través de mediciones:

Para el análisis de potencias se debe tomar en cuenta el periodo de trabajo de la industria. Se considera los días que laboraron que son el 21,22 y 27 en horario de 8H00 hasta las 17H00.

Análisis de la Potencia Activa en kW

Tabla 17: Potencia Activa de las Tres Líneas

HORA	POTENCIA	kW TOTAL	kW L1	kW L2	kW L3	% desbalance
09H30	POTENCIA MÍNIMA	93,72	31,11	30,77	31,84	3,5%
09H55	POTENCIA MEDIA	245,74	81,89	81,29	82,56	1,6%
10H00	POTENCIA MÁXIMA	361,34	120,52	119,24	121,58	1,96%

Fuente: Los Autores

Análisis de la Potencia Aparente en KVA

Tabla 18: Potencia Aparente de las Tres Líneas

HORA	POTENCIA APARENTE	kVA TOTAL	kVA1	kVA2	kVA3	% desbalance
09H30	KVA MÍNIMO	4.33	1,45	1,42	1,46	2.81
09H55	KVA MEDIO	136.31	45,56	54,03	45.72	1.53
10H00	KVA MÁXIMO	381.18	126,30	126,46	128,42	0.12

Fuente: Los Autores

Análisis de la Potencia Reactiva en KVAR

Tabla 19: Potencia Reactiva de las Tres Líneas

HORA	POTENCIA	kVAR TOTAL	kVAR L1	kVAR L2	kVAR L3	% desbalance
09H30	KVAR MÍNIMA	59.16	19,75	19,49	19,92	2.20
09H55	KVAR MEDIA	111.01	37.11	36.80	37.10	0.86
10H00	KVAR MÁXIMA	275.36	91,18	92,03	92,14	1.05

Fuente: Los Autores

Según lo expuesto anteriormente el desbalance entre fases no debe superar el 5% por lo que se concluye que el desbalance está dentro de los límites

Resumen de Potencias

Tabla 20: Resumen de Potencias

Potencias	L1	L2	L3	Total
Potencia Activa	120,52 kW	119,24 kW	121,58 kW	361,34 kW
Potencia Aparente	126,30 kVA	126,46 kVA	128,42 kVA	381,18 kVA
Potencia Reactiva	91,18 kVAR	92,03 kVAR	92,14 kVAR	275,36 kVAR

Fuente: Los Autores

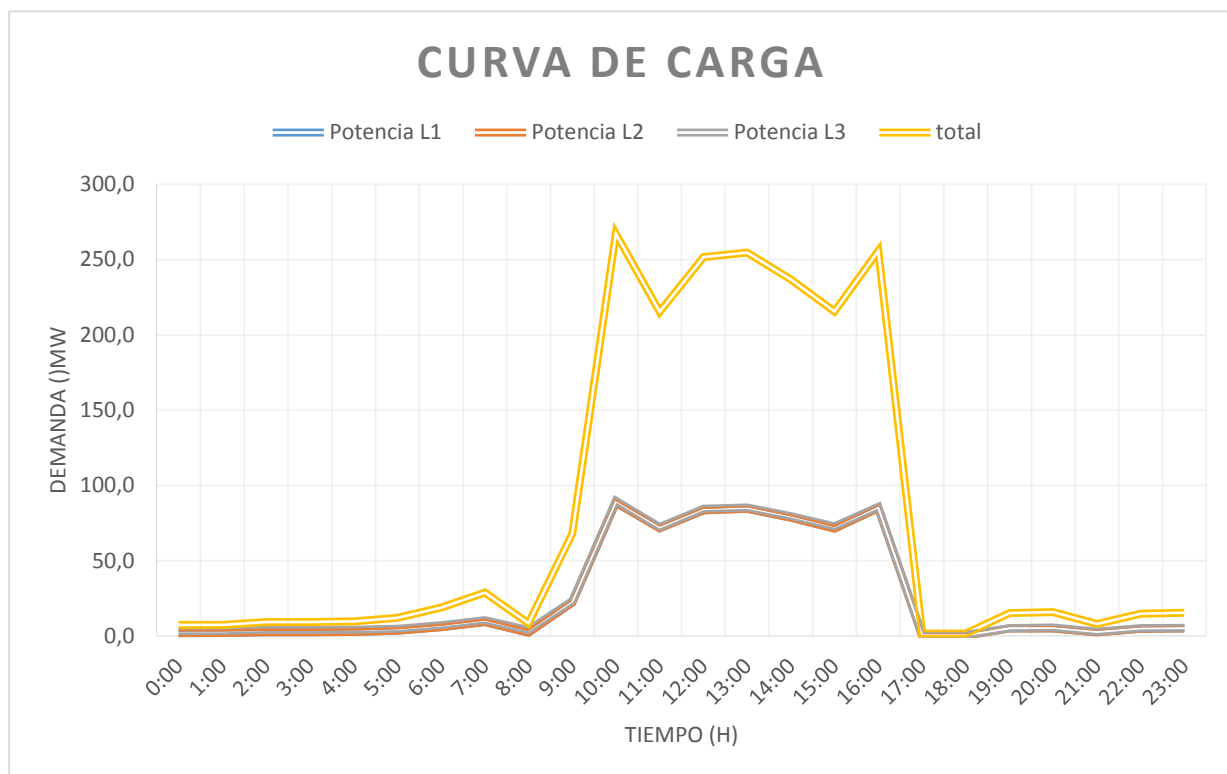
Según la tabla Número 20, el transformador de 300 kVA no abastece la potencia requerida debido a que se necesita según las mediciones una potencia de 361,34 kW

Curva de Carga:

Para la elaboración de la curva de carga se trabajó con las potencias medidas durante siete días por el analizador de carga, para esto se analiza el día más representativo del proceso de fundición que fue el día 22 de Diciembre del 2016 La curva de carga representa un comportamiento tipo industrial, donde la demanda pico se presenta a las 10:00 am.

En la representación gráfica indicada se puede observar como varia la demanda o carga eléctrica en el intervalo de tiempo.

Ilustración 13: Curva de carga diaria



Fuente: Los Autores

Se presenta el porcentaje de la potencia consumida diaria donde la potencia base considerada es de 267,67 que es el resultado de la suma de las potencias máximas de las tres líneas así:

Tabla 21: Potencia máxima de las tres líneas

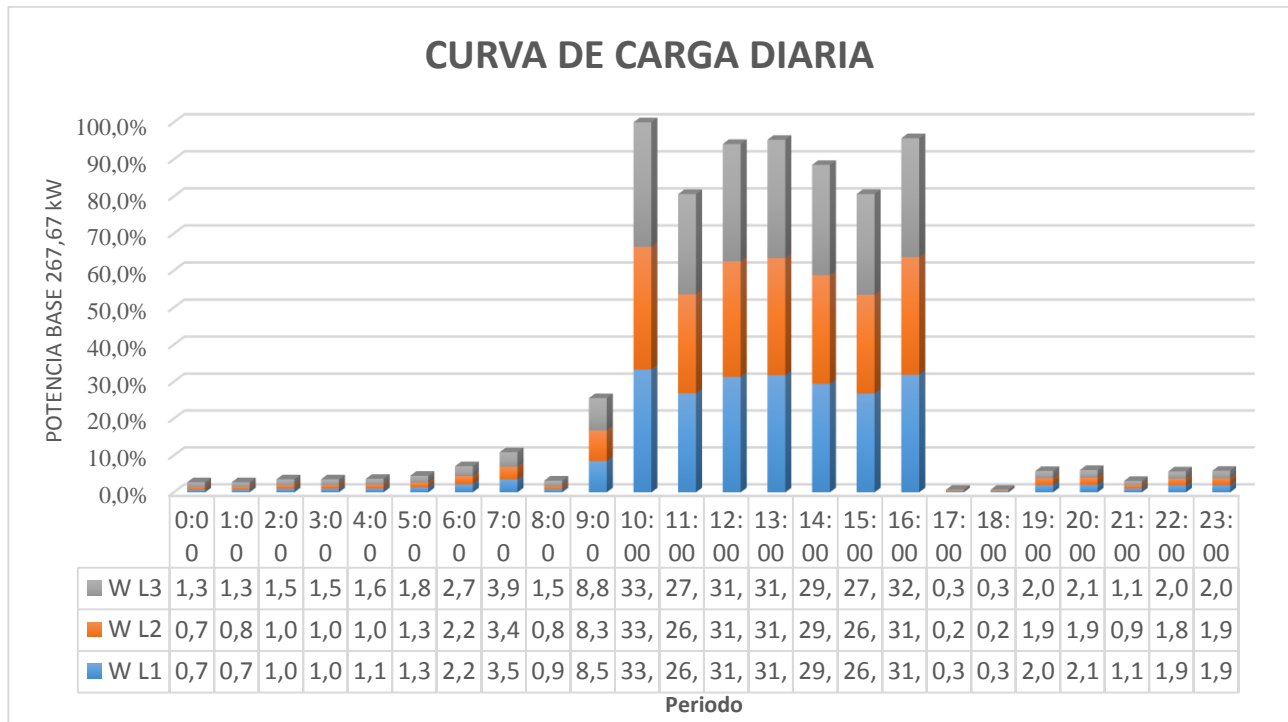
Potencia máxima L1	Potencia máxima L2	Potencia máxima L3	Total
89,15	88,63	89,89	267,67

Fuente: Los Autores

Cada valor de potencia activa de las líneas tomadas durante el día por el analizador de carga se divide para el total de las potencias máximas, con esto se obtiene los porcentajes de los valores que forman la curva de consumo diario de la industria.

La curva de porcentaje de carga dada nos ayuda a determinar si existe desbalance de carga en alguna de las tres fases.

Ilustración 14: Curva de carga diaria



Fuente: Los Autores

Análisis de Factor de Potencia:

Los registros obtenidos indican un factor de potencia total de 0,64; superando el 5% de los valores permitidos por la regulación del CONELEC 004-01, por lo tanto se encuentra bajo el límite establecido, incumpliendo la regulación. El bajo factor de potencia se presenta debido a la presencia de armónicos de la industria.

Tabla 22: Valores de Factor de Potencia entre fases y total.

Valores	MIN	MED	MAX	OBSERVACIONES
F.P L1	0,21	0,63	0,93	No cumple con la regulación
F.P L2	0,21	0,62	0,93	No cumple con la regulación
F.P L3	0,23	0,66	0,93	No cumple con la regulación
F.P. PROMEDIO	0,21	0,64	0,93	No cumple con la regulación

Fuente: Los autores

Análisis de Armónicos:

Armónicos de Voltaje:

El analizador de carga registra un THD máximo del 12%, comparando con la Regulación CONELEC 004/01 se debería tener un THD del 8% por lo que sobrepasa de lo estipulado por la regulación.

Tabla 23: Valores de THD de voltaje por línea y fase

	THD PROMEDIO	THD L1	THD L2	THD L3
MÍNIMO	0,10	0,20	0,10	0,20
MEDIO	3,21	3,23	3,17	3,21
MÁXIMO	12,20	12,20	11,90	12,00
OBSERVACIONES	El límite máximo del THD de las tres líneas es un 12.20% donde excede el 8% por lo que no cumple la regulación			

Fuente: Los autores

A continuación se analiza cual armónico afecta más al sistema eléctrico de la industria.

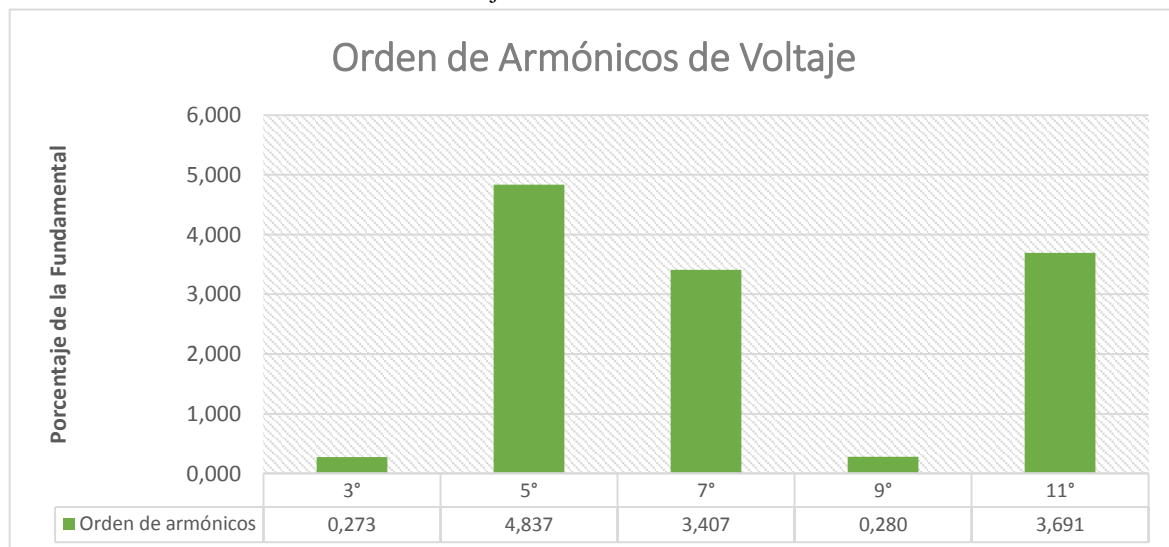
Tabla 24: Valores de THD de voltaje por línea y fase

ARMÓNICO DE VOLTAJE POR FASE					
	3°	5°	7°	9°	11°
MÁXIMO	0,273	4,837	3,407	0,280	3,691

Fuente: Los autores

Para el análisis se presenta un diagrama de barras que indica el porcentaje del nivel de armónicos presente en la industria.

Ilustración 15: Nivel de Armónicos de Voltaje



Fuente: Los Autores

Armónicos de Corriente:

Cálculo de armónicos de Corriente

El transformador ubicado en la industria FUNDI LASER es de 300 kVA, la impedancia es de 3.9% o 0.039

$$I_{CC} = \frac{1}{X_{p,u}} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,039}$$

$$I_{CC} = 25.64$$

Para obtener el valor de la relación $\alpha = \frac{I_{cc}}{I_{Lpu}}$ se calcula la corriente de carga I_L en amperios, para posteriormente obtener la corriente de carga en valores en por unidad I_{Lpu} . Para obtener la corriente de carga se emplea la siguiente ecuación:

$$S = V * I_L * \sqrt{3} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$I_L = \frac{S}{V * \sqrt{3}}$$

La potencia que se considera es la del transformador 300 kVA, el voltaje es el del secundario del transformador 440 V.

$$I_L = \frac{300000}{440 * \sqrt{3}} = 393,65 \text{ A}$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{25.64}{393.65}$$

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L} = 0,065$$

Para el cálculo de la corriente de carga en por unidad se debe obtener los valores de corriente medidos por el analizador de carga:

Tabla 25: Valores de Corriente de la línea

	L1	L2	L3
A RMS MÍNIMA	4,700	5,500	8,900
A RMS MEDIA	61,996	61,572	62,792
A RMS MÁXIMA	434,200	433,200	439,200

Fuente: Los autores

A continuación se debe calcular el TDD

TDD: distorsión de demanda total, distorsión de corriente armónica en % de la máxima corriente de carga demandada.

Fase 1:

Obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 1

$$I_{Lpu} = \frac{434,200}{393,65}$$

$$I_{Lpu} = 1.103$$

El factor α es igual a:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{25.64}{393.65} = 23,246$$

Fase 2:

Obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 2

$$I_{Lpu} = \frac{433,200}{393,65}$$

$$I_{Lpu} = 1.100$$

El factor α es igual a:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{25.64}{1.100} = 23.309$$

Fase 3:

Obtenemos la corriente de carga en valores por unidad de la fase 3

$$I_{Lpu} = \frac{439,200}{393,65}$$

$$I_{Lpu} = 1.116$$

El factor α es igual a:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{25.64}{1.116} = 22.975$$

A continuación se presenta una tabla de los valores obtenidos y necesarios para el análisis del nivel de contenido de corrientes armónicas en el sistema

Tabla 26: Cálculo de α para verificar los armónicos de corriente

Fases	X_{pu}	I_{cc}	I_{cc}/I_{Lpu}
I₁	0.039	25.64	23.446
I₂	0.039	25.64	23.309
I₃	0.039	25.64	22.975

Fuente: Los autores

Luego de calcular el factor α para cada una de las fases se procede a calcular el total de todo el sistema:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_L}$$

$$\alpha = \frac{25.64}{393.65} * 100\%$$

$$\alpha = 6.51\%$$

De acuerdo a lo establecido en la norma IEEE-519, el valor de (I_{cc}/I_{Lpu}) según la tabla 26 es aproximadamente de 23.243 el mismo que debe estar entre 20<50 la TDD permitida es 8%

Tabla 27: Límites de distorsión de corriente

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.5	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	0.7	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Donde:
 I_{sc} = máxima corriente de cortocircuito en el PCC
 I_L = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC

Fuente: Norma IEEE 519 -1992

A continuación se presenta el cálculo del TDD a partir de la siguiente formula:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{L1, \text{ demanda máxima}}} * 100 \quad \text{Ecuación 46}$$

Para calcular el valor de TDD se debe considerar el valor de la corriente de los armónicos que se presenta en la siguiente tabla, donde se considera los armónicos impares 3, 5, 7, 9, 11 que son los que afectan más en el horno de inducción:

Tabla 28: Límites de distorsión de corriente en Amperios

ARMÓNICO DE CORRIENTE POR FASE					
	3°	5°	7°	9°	11°
MÁXIMO	2,446	88,090	51,389	1,631	34,628

Fuente: Autores

$$TDD = \frac{\sqrt{(2,446)^2 + (88,090)^2 + (51,389)^2 + (1,631)^2 + (34,628)^2}}{393,65 A} * 100$$

$$TDD = 27,50\%$$

El valor del TDD sobrepasa el nivel estipulado en la norma que es del 8% y el valor que tenemos a causa de las corrientes armónicas es de 27,50%

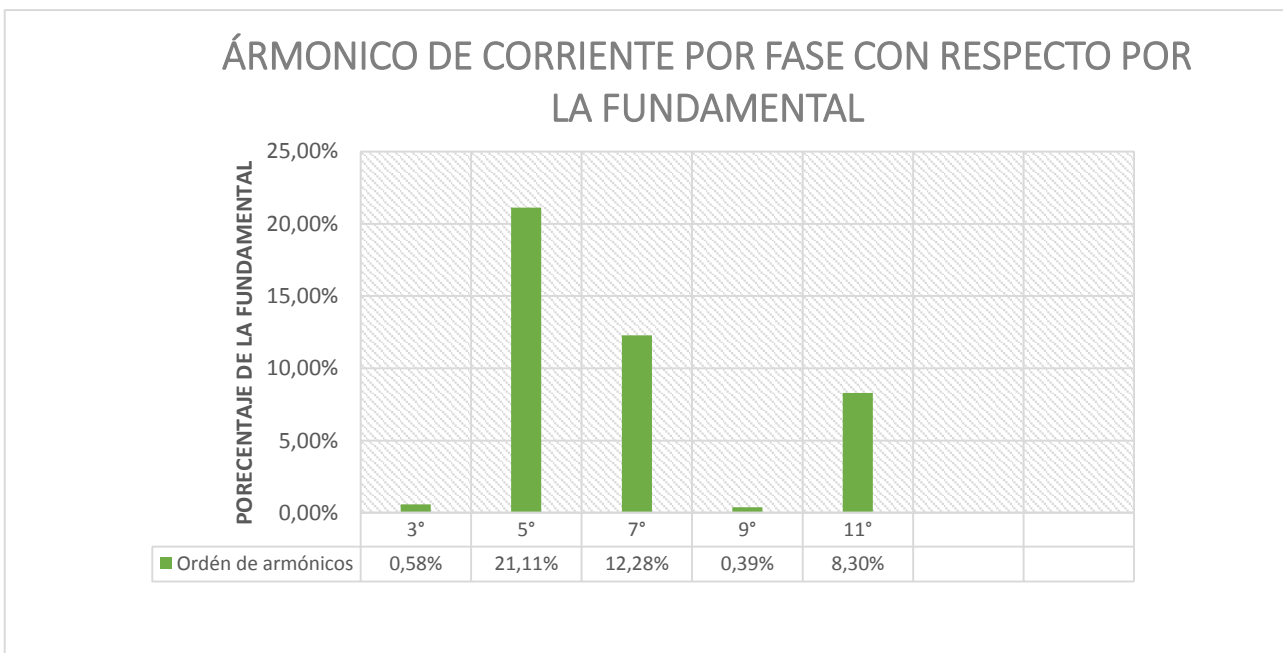
A continuación se analiza el valor de los armónicos, de acuerdo a la norma los armónicos impares menores a 11 deben tener valores menores al 7%, según la tabla 29 está sobre el límite.

Tabla 29: Limites de distorsión de corriente en Amperios

ARMÓNICO DE CORRIENTE POR FASE CON RESPECTO POR LA FUNDAMENTAL					
	3°	5°	7°	9°	11°
MÁXIMO	0,585	21,115	12,282	0,390	8,300

Fuente: Autores

Ilustración 16: Nivel de Armónicos de Corriente



Fuente: Autores

Después de exponer los armónicos de voltaje y corriente se puede analizar que el quinto armónico tanto de corriente y de voltaje es el que más incide y afecta al sistema. Con esto se puede determinar que la presencia de la quinta armónica es la que se produce básicamente en cargas no lineales

Análisis de Desbalance de carga:

Para analizar si existen desbalances de carga se aplica la ecuación

$$\text{Desbalance entre fases} = \frac{\text{Carga Fase Mayor} - \text{Carga Fase menor}}{\text{Carga Fase Mayor}} * 100\%$$

$$\text{Desbalance entre fases} = \frac{121,58 - 120,52}{120,52} * 100\%$$

$$\text{Desbalance entre fases} = 1,96\%$$

1,96% < 5% lo que esta dentro de la norma; no existe desbalance entre fases

Análisis de Niveles de Voltaje:

Después de aplicar la fórmula de índice de calidad para el nivel de voltaje, establecida en la regulación CONELEC 004/01 se obtiene los siguientes resultados:

- Los niveles de voltaje dependen de la zona en donde se ha realizado la medición FUNDI LASER corresponde a la categoría Bajo Voltaje, zona urbana y en la subetapa 2 cuya variación es del $\pm 8\%$

Los datos obtenidos de las tres líneas son:

Tabla 30: Valores de Voltaje min, med y max de las fases

	V1L RMS	V2L RMS	V3L RMS
VOLTAJE MÍNIMO	251,400	250,400	250,100
VOLTAJE MEDIO	263,321	261,482	261,421
VOLTAJE MÁXIMO	269,500	267,100	267,300

Fuente: Los autores

Tabla 31: Niveles de Voltaje min, med y max de las fases

	V1L RMS	V2L RMS	V3L RMS
VOLTAJE MÍNIMO	-1,04%	-1,43%	-1,55%
VOLTAJE MEDIO	3,66%	2,93%	2,91%
VOLTAJE MÁXIMO	6,09%	5,14%	5,22%

Fuente: Los autores

- El 5% de los registros no debe exceder de $\pm 8,0\%$ del voltaje nominal. Se aprecia que los valores de las líneas se encuentran dentro de los límites permitidos, por lo tanto cumplen con la regulación

Datos obtenidos con la Simulación.-

Simulación Inicial del Sistema en el software EASY POWER

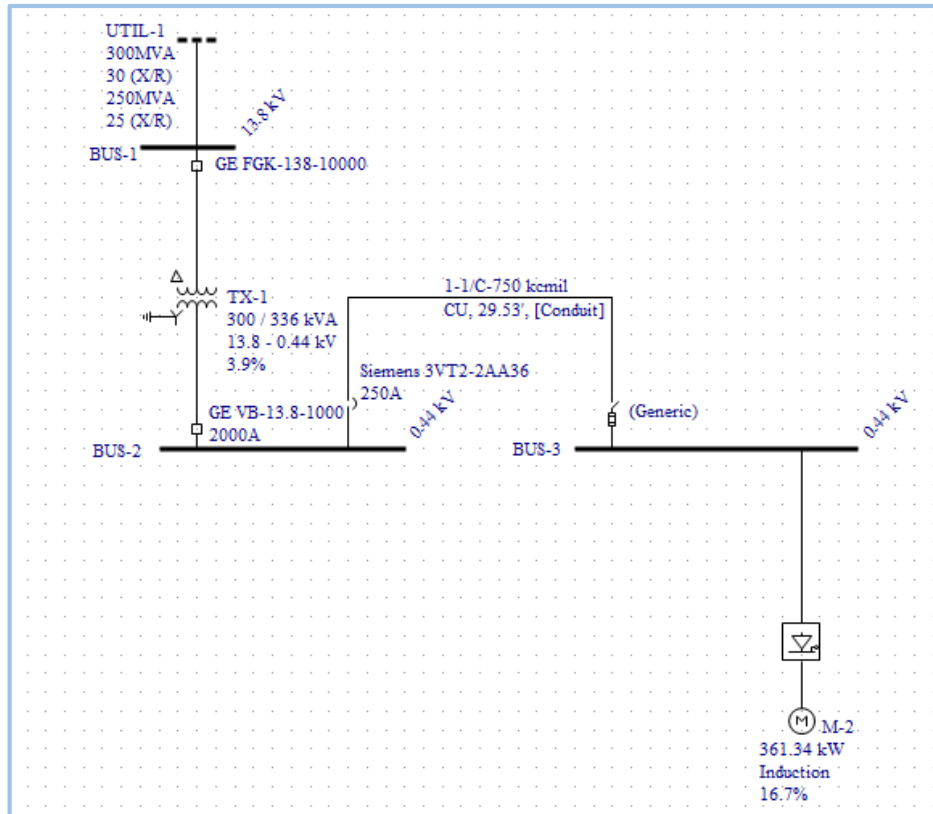
Una vez obtenido la información inicial del sistema eléctrico de la Industria FUNDI LASER se procede a ingresar los datos al software obtenidos en el levantamiento de carga.

Los datos ingresados son los siguientes:

- Transformador de 13.8 kV a 440 V de 300 kVA
- Dos conductores de calibre 1/0 AWG y un conductor de calibre 2/0 AWG
- Un horno de Inducción de Potencia de 361.34kW

Estos datos se ingresan al software de simulación para determinar cuáles son los problemas y así plantear soluciones que mejoren la calidad del suministro de energía eléctrica en la industria.

Ilustración 17: Simulación inicial del sistema eléctrico de la industria



Fuente: Simulación EASY POWER

- La carga que es el horno de inducción se le represento en el EASY POWER mediante un motor que se le configuro para darle la característica de una carga inductiva.

En el software no se puede ingresar tres conductores en paralelo, razón por la cual se decidió calcular el conductor equivalente a dos conductores de calibre 1/0 AWG y un conductor de calibre 2/0 AWG. Se sigue el siguiente procedimiento:

Calibre 1/0

La capacidad de corriente del calibre 1/0 es de 170 A, como son dos conductores la corriente total que circula por los dos conductores va hacer:

$$170 \text{ A} * 2 = 340 \text{ A}$$

Calibre 2/0

La capacidad de corriente del calibre 1/0 es de 195 A

Corriente Total

$$I_T = (340 + 195) \text{ (A)}$$

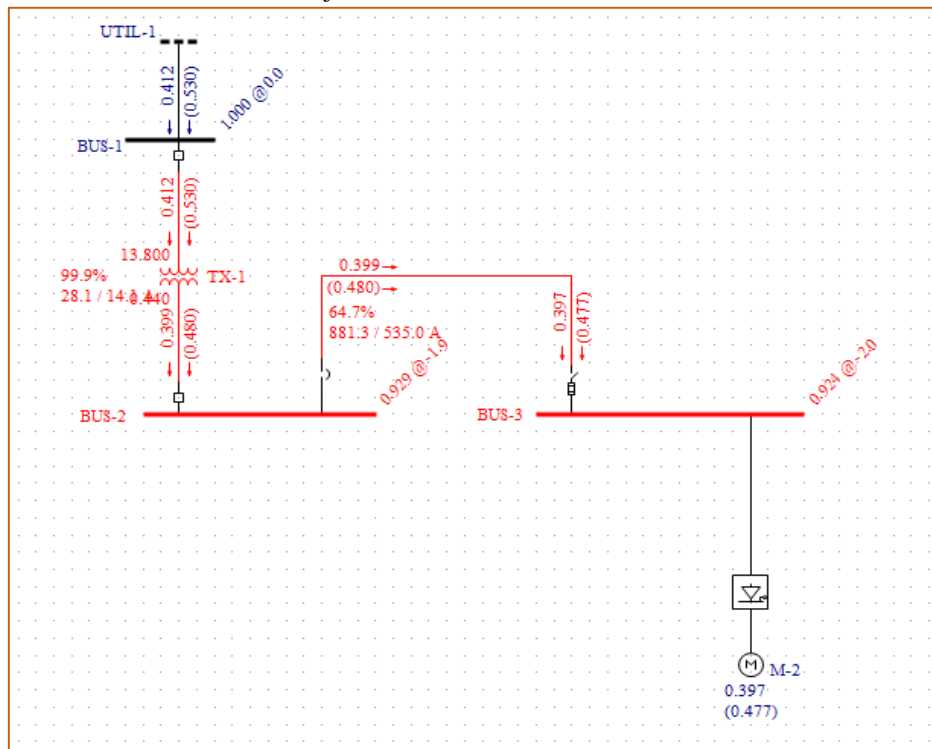
$$I_T = 535 \text{ (A)}$$

La corriente total que circula por los tres conductores es de 535 A, que da un conductor equivalente a 750 MCM. El calibre equivalente calculado es de 750 MCM AWG, el mismo que tendrá que ser simulado, para obtener una aproximación de la situación real de la industria.

A continuación se realiza la primera corrida de flujo con los datos iniciales antes mencionados, donde se explica cada uno de los problemas encontrados y se indica el reporte dado por el analizador.

Corrida de Flujo Inicial en el software EASY POWER

Ilustración 18: Corrida de flujos del sistema



Fuente: Simulación EASY POWER

Problemas encontrados en el sistema a través del software EASY POWER

Los resultados obtenidos en la corrida de flujos inicial son los siguientes:

Bajo factor de potencia:

La carga tiene un factor de potencia de 0.640 lo cual ocasiona un incremento de costos de la planilla eléctrica

Tabla 32: Factor de Potencia de la carga

Total	MW	MVAR	MVA	PF
Generation in System	0.412	0.530	0.672	0.613
Load in System	0.397	0.477	0.620	0.640
Shunt Load in System	-0.000	-0.000		
Losses in System	0.015	0.054		
Check of Balance	-0.000	-0.000		

Fuente: Simulación EASY POWER

Sobrecarga de la línea

Se puede observar que existe una sobrecarga del 64.7%. El mismo que más adelante se planteara las soluciones necesarias para disminuir la sobrecarga del conductor.

Tabla 33: Sobrecarga de la línea

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded %	OverLoaded %	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	535.0	881.3	164.7%	64.7%	VIOLATION

Fuente: Simulación EASY POWER

Sobrecarga del Transformador

Los datos simulados reportan que el transformador dimensionado inicialmente en la industria no cubre la demanda requerida.

Tabla 34: Sobrecarga del Transformador

Transformer				Load			
Name	From Bus Name	To Bus Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded %	OverLoaded%	Comment
TX-1	BUS-1	BUS-2	14.1	28.1	199.9%	99.9%	VIOLATION

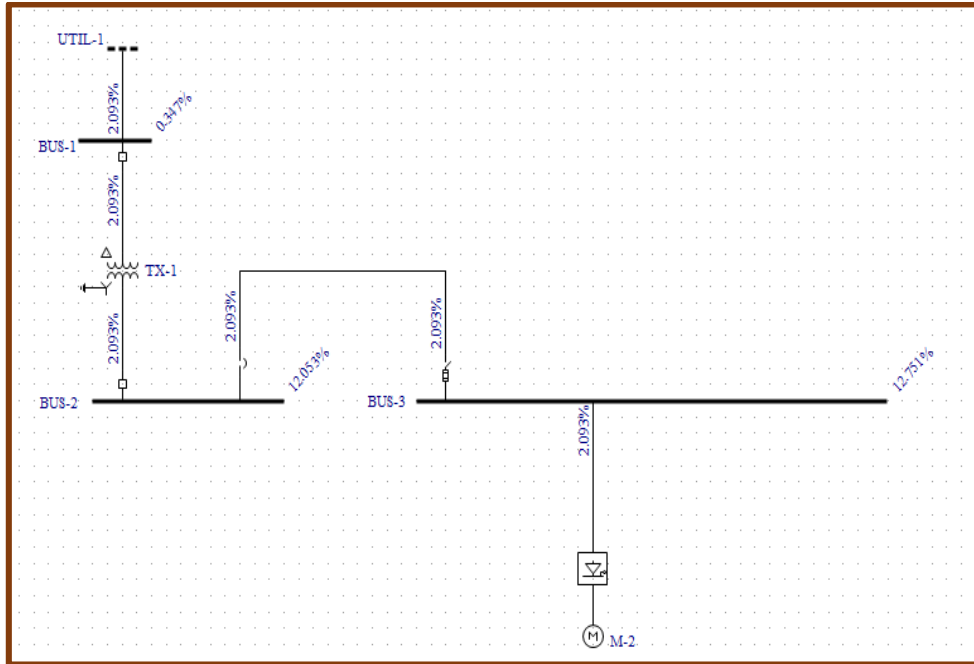
Fuente: Simulación EASY POWER

Corrida de Flujo Armónico Inicial en el software EASY POWER

En los reportes obtenidos del software se observa que en las barras existe un THD de voltaje del 12% sobrepasando lo establecido por la norma.

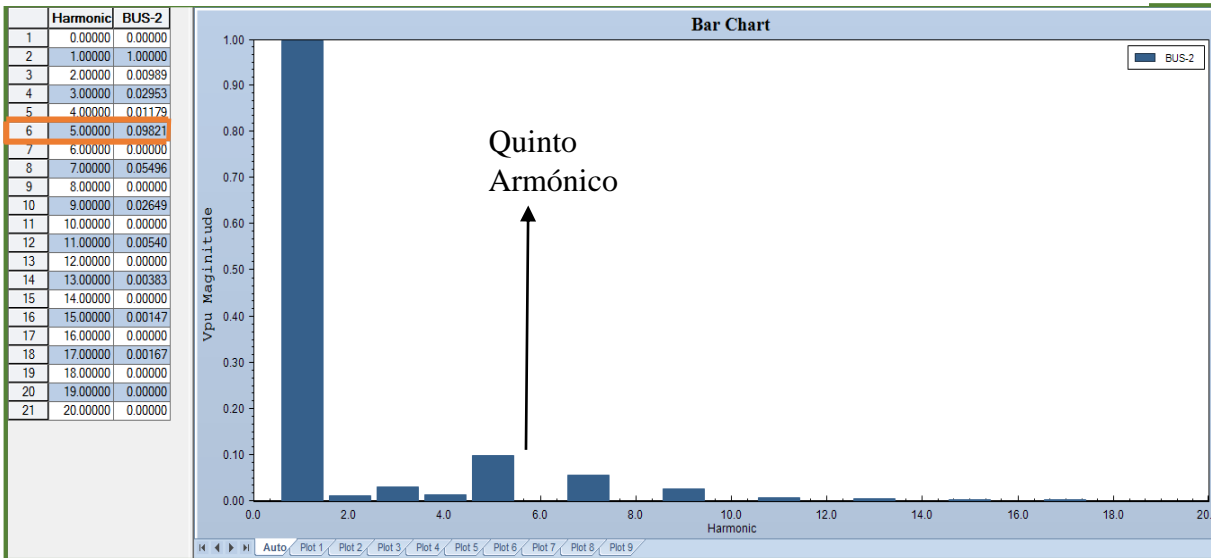
Se puede observar que el quinto armónico es el que afecta más al sistema. Coincidiendo con los datos obtenidos del analizador de carga.

Ilustración 19 : Corrida de flujos de Armónicos en la red.



Fuente: Simulación EASY POWER

Ilustración 20: Simulación de los armónicos en EASY POWER



Fuente: EASY POWER

Se muestra los valores de los armónicos individuales de voltaje donde el quinto armónico afecta en gran cantidad.

Soluciones Propuestas.-

Propuesta para mitigar armónicos.-

Cálculo Para Diseño del Filtro Armónico del Horno de Inducción:

Potencia consumida en el Horno de Inducción = 361.34 kW

Lo primero que se procede a realizar es el cálculo de los ángulos, utilizado como datos el valor medido del factor de potencia y como segundo dato el valor al cual deseo llevar el factor de potencia.

$$f_{p1}=0.64 \quad \theta_1 = \cos^{-1}(0.64) = 50.21$$

$$f_{p2}=0.98 \quad \theta_2 = \cos^{-1}(0.98) = 11.48$$

Con los datos de los ángulos saco los KVAR efectivos (Q_{eff})

$$Q_{\text{eff}} = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$Q_{\text{eff}} = 361.34 (\tan(50.21) - \tan(11.48))$$

$$Q_{\text{eff}} = 360.46 \text{ kVAR}$$

Este valor en KVAR es el que se deberá instalar en total del sistema en el punto de conexión del horno de inducción

El siguiente paso es calcular la reactancia efectiva del filtro.

$$X_{\text{eff}} = \frac{(V_{\text{I sist}})^2}{Q_{\text{eff}}}$$

$$X_{\text{eff}} = \frac{(440 \text{ v})^2}{360.46 \times 10^3}$$

$$X_{\text{eff}} = 0.54 \Omega \text{ x fase}$$

$$h = \frac{f \text{ armonico}}{f \text{ fundamental}}$$

$$h = \frac{300}{60} ; h=5 ; \quad 5 \times 6\% = 0.3 ; \quad 5 - 0.3 = 4.7$$

Cálculo de la reactancia capacitiva.-

$$X_c = \frac{(hx0.6)^2}{(hx0.6)-1} X_{\text{eff}} \quad C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c}$$

$$X_c = \frac{(4.7)^2}{(4.7)^2 - 1} * 0.54 \quad C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 0.57} = 4.65 \times 10^{-3} \text{ F}$$

$$X_c = 0.57 \Omega$$

$$C = 4650 \mu\text{F}$$

Debemos elegir un capacitor de valor comercial de 4700 μF

Cálculo de la reactancia inductiva.-

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

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$X_L = \frac{0.57}{5^2}$$

$$L = \frac{0.0228 \Omega}{2\pi \times 60}$$

$$X_L = \frac{0.57}{25}$$

$$L = 6.048 \times 10^{-5} \text{ H} = 0.6048 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$$X_L = 0.0228 \Omega$$

$$L = 0.06048 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$L = 0.06048 \text{ mH}$$

Cálculo de la Resistencia del Filtro

$$R = \frac{X_L \cdot h \cdot 0.6}{Q_f}$$

$$R = \frac{0.0228 \Omega \times 4.7}{20}$$

$$R = 5.358 \times 10^{-3} \Omega$$

$$R = 5.358 \text{ m}\Omega$$

Cálculo de la Impedancia del Filtro

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

$$Z = 5.358 \times 10^{-3} \Omega + j \left(2 \times \pi \times 60 \times 0.06048 \times 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 4.65 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Z = 5.358 \times 10^{-3} \Omega + j (0.023 - 0.57)$$

$$Z = 5.358 \times 10^{-3} - j 0.547$$

Cálculo de los kVAR del Filtro

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{V_i^2 I_1}{X_c - X_L}$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{(440)^2}{0.57 - 0.0228}$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = 353801.17$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = 0.35380 \text{ MVA}$$

COMPROBACIÓN.

Para que el filtro pasivo serie RLC se sintonice a la frecuencia requerida, se debe cumplir la siguiente condición:

$$X_c = X_L \qquad X_L = X_C \times h$$

$$X_c = \frac{0.57}{4.7} \qquad X_L = 0.0228 \times 4.7$$

$$X_c = 0.121 \qquad X_L = 0.107$$

$$0.121 = 0.107$$

Corriente- El valor eficaz de la corriente en el filtro no debe sobrepasar los 135% de la corriente fundamental.

CORRIENTE FUNDAMENTAL.

$$I_{\text{fund}} = \frac{V_{\text{ll sist}}}{\sqrt{3} (X_c - X_L)}$$

$$I_{\text{fund}} = \frac{440}{\sqrt{3} (0.57 - 0.0228)}$$

$$I_{\text{fund}} = 464.24 \text{ A}$$

CORRIENTES ARMÓNICAS.

$$I_h = \% \times I_{\text{fund}}$$

$$I_{5\%} = 5100 = \frac{I_3}{I_{\text{fund}}} \times 100 = \frac{5100 \times 464.24 I_3}{100} \qquad I_3 = 23.67 \text{ A}$$

$$I_{7\%}=3600=\frac{I_7}{I_{fund}} \times 100=\frac{3600 \times 464.24I_3}{100} \quad I_7=16.71 \text{ A}$$

$$I_{11\%}=3900=\frac{I_{11}}{I_{fund}} \times 100=\frac{3900 \times 464.24I_3}{100} \quad I_{11}=18.11 \text{ A}$$

$$I_{13\%}=3300=\frac{I_{15}}{I_{fund}} \times 100=\frac{3300 \times 464.24I_3}{100} \quad I_{13}=15.32 \text{ A}$$

$$I_{total \text{ rms}}=\sqrt{I_f^2+I_5^2+I_7^2+I_{11}^2}$$

$$I_{total \text{ rms}}=\sqrt{(464.24)^2+(23.63)^2+(16.71)^2+(18.11)^2}$$

$$I_{total \text{ rms}}=465.75 \text{ A}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA.

$$\% \text{margen de corriente}=\frac{I_{total \text{ rms}}}{I_{fundamental}} \times 100\% \leq 135\% I_{Fund} \text{ Se encuentra dentro de la norma}$$

$$\% \text{margen de corriente}=\frac{465.75}{464.24} \times 100\% \leq 135\%$$

$$I_{total \text{ rms}}=100.33\% \leq 135\% \quad \text{SE ENCUENTRA DENTRO DE LA NORMA}$$

El valor de voltaje pico del filtro no debe sobrepasar el 120% del voltaje pico del sistema.

$$V_c=I_{fund} \times X_C$$

$$V_c=464.24 \times 0.57$$

$$V_c=264.62 \text{ V}$$

$$V_{c(h)}=\sum_h^n (v(h))=\sum_h^n \left(I(h) \times \frac{X_C}{n} \right)$$

$$V_{c(h)}=V_{(5)}+V_{(7)}+V_{(11)}+V_{(13)}$$

$$V_{c(h)}=(I_{(5)} \times \frac{0.57}{5})+(I_{(7)} \times \frac{0.57}{7})+(I_{(11)} \times \frac{0.57}{11})+(I_{(13)} \times \frac{0.57}{13})$$

$$V_{c(h)}=(23.67 \times \frac{0.57}{5})+(16.71 \times \frac{0.57}{7})+(18.11 \times \frac{0.57}{11})+(15.32 \times \frac{0.57}{13})$$

$$V_{c(h)} = 2.70 + 1.36 + 0.94 + 0.67$$

$$V_{c(h)} = 5.67 \text{ V}$$

$$V_{c \text{ L-N total pico}} = \sqrt{2}(V_c + V_{c(h)}) \qquad V_{\text{L-N SISTEMA}} = \frac{V_{\text{II sist}}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c \text{ L-N total pico}} = \sqrt{2}(264.62 + 5.67) \qquad V_{\text{L-N SISTEMA}} = \frac{440 \text{ V}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{c \text{ L-N total pico}} = 382.25 \text{ V} \qquad V_{\text{L-N SISTEMA}} = 254.03 \text{ V}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = \sqrt{2} \times V_{\text{L-N SISTEMA}}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = \sqrt{2} \times 254.03 \text{ V}$$

$$V_{\text{L-N pico sistema}} = 359.25 \text{ V}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA.

$$\frac{V_{c \text{ L-N total pico}}}{V_{\text{L-N pico sistema}}} \times 100\% \leq 120\%$$

$$\frac{382.25 \text{ V}}{359.25 \text{ V}} \times 100\% \leq 120\%$$

$$106.40\% \leq 120\% \qquad \text{SI CUMPLE}$$

El valor eficaz del voltaje del filtro no debe sobrepasar EL 110% del voltaje eficaz del sistema.

$$V_{c \text{ L-N total rms}} = \sqrt{(V_{c1})^2 + (V_{c5})^2 + (V_{c7})^2 + (V_{c11})^2 + (V_{c17})^2}$$

$$V_{c \text{ L-N total rms}} = \sqrt{(264.62)^2 + (2.70)^2 + (1.36)^2 + (0.94)^2 + (0.67)^2}$$

$$V_{c \text{ L-N total rms}} = 264.66 \text{ V}$$

$$V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = \frac{V_{\text{II sist}}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = \frac{440 \text{ V}}{\sqrt{3}} \qquad V_{\text{L-N rms SISTEMA}} = 254.034 \text{ V}$$

VERIFICACIÓN DE LA NORMA.

$$\% \text{margen de voltaje} = \frac{V_{c \text{ L-N total rms}}}{V_{\text{L-N rms SISTEMA}}} \times 100\% \leq 110\%$$

$$\% \text{margen de voltaje} = \frac{264.66 \text{ V}}{254.03} \times 100\% \leq 110\% V_{\text{L-N rms SISTEMA}}$$

$$\% \text{margen de voltaje} = 104.18\% \leq 110\% V_{\text{L-N rms SISTEMA}}$$

SE CUMPLE_ DENTRO DE LA NORMA

El último factor evalúa el calentamiento del dieléctrico del filtro.

$$Q_{3\phi \text{ recalculado}} = \frac{(V_{c \text{ L-N total rms}})^2}{X_c} \times 3 = \frac{(264.66 \text{ V})^2}{0.57} \times 3$$

$$Q_{3\phi \text{ recalculado}} = 368.66 \text{ kVAR}$$

$$\% \text{margen de voltaje} = \frac{Q_{3\phi \text{ recalculado}}}{Q_{3\phi}} \times 100\% \leq 135\%$$

$$\% \text{margen de voltaje} = \frac{368.66 \text{ kVAR}}{360.46 \text{ kVAR}} \times 100\% \leq 135\%$$

$$\% \text{margen de voltaje} = 102.275\% \leq 135\% \quad \text{SI CUMPLE}$$

CALENTAMIENTO DEL DIELECTRICO.

$$\sum \downarrow h = (V(h) \times I(h)) \leq 1.35 Q_{3\phi \text{ recalculado}}$$

$$\sum \downarrow h = 3((264.62)(464.24) + (23.67)(1.36) + (18.11)(0.94) + (15.32)(0.67))$$

$$\sum \downarrow h = 3(122961.11)$$

$$\sum \downarrow h = 368883 \text{ VAR}$$

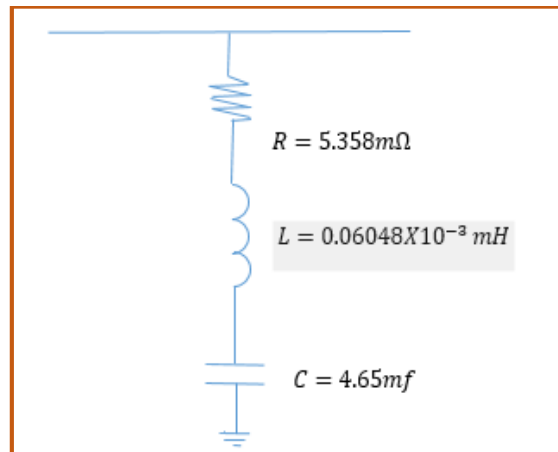
$$\sum \downarrow h = 368.883 \text{ kVAR}$$

$$368.883 \leq 1.35 \times 368.66$$

$$368.883 \leq 497.691 \quad \text{SI CUMPLE}$$

Todos los límites se cumplen por un margen sustancial por lo tanto el diseño propuesto es satisfactorio. Por lo tanto el diseño del filtro que se va a colocar en la industria es el siguiente:

Ilustración 21: Diseño del Filtro



Fuente: Los Autores

Comprobación del filtro calculado en el software

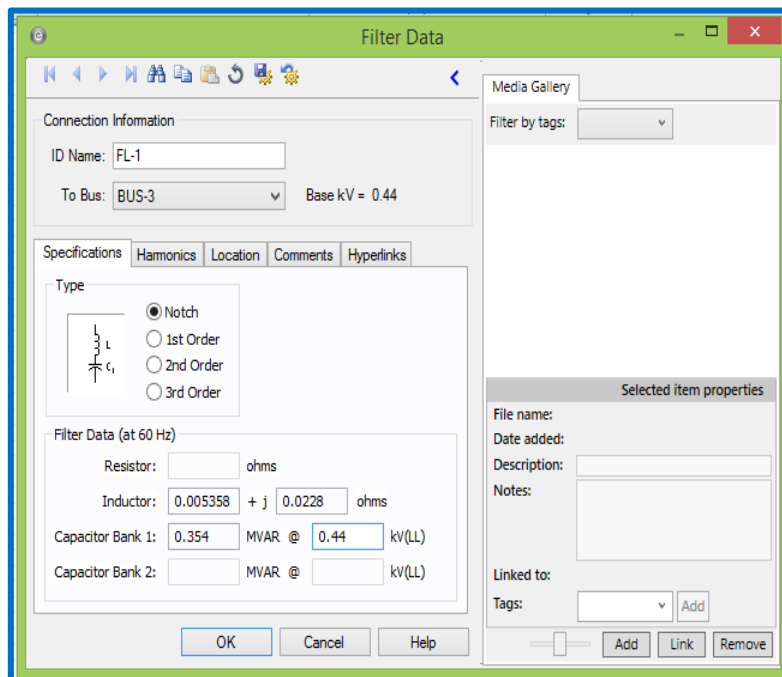
Una vez ya calculado el filtro se procede a ingresar los datos del sistema:

Inductor = $0.005358 + j 0.0228 \Omega$

Capacidad en MVAR = 0.354 MVAR

Voltaje de línea a línea = 0.44 kV

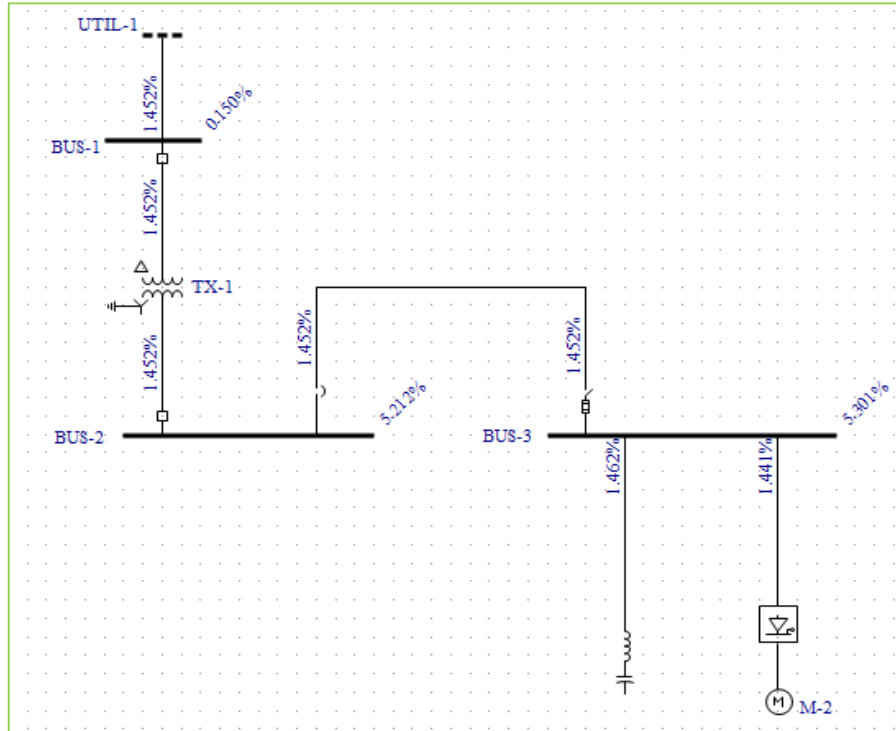
Ilustración 22 : Dimensionamiento del filtro en EASY POWER



Fuente: EASY POWER

- Una vez ingresado los datos del filtro en el simulador se realizar una corrida de flujos de carga armónica y comprobamos que el THD de voltaje disminuye de un 12.75% a un 5.30%; observamos que ya está dentro de las normas

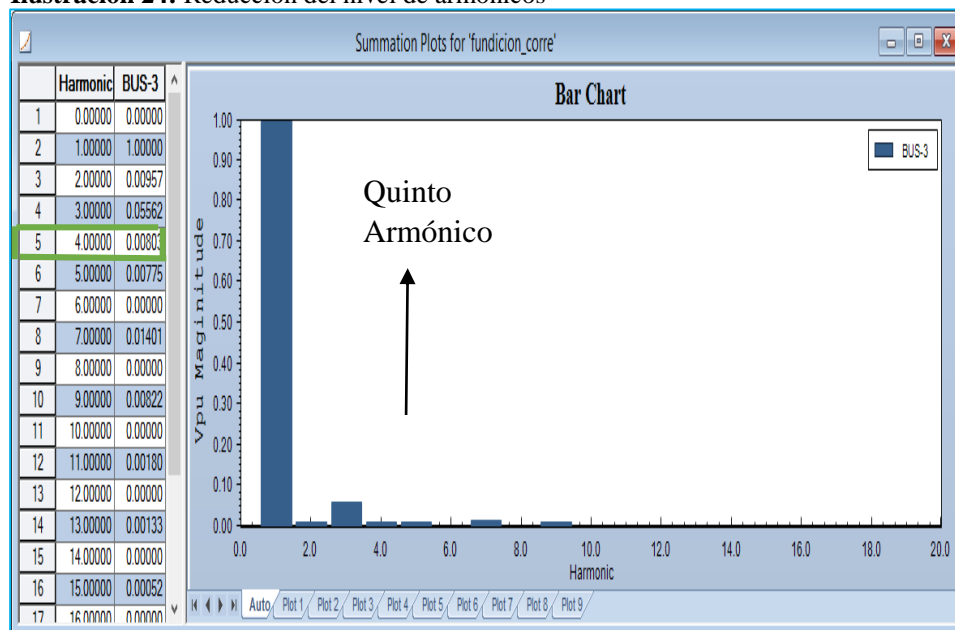
Ilustración 23: Corrección de armónicos con instalación de filtro



Fuente: EASY POWER

Por lo tanto se logra disminuir el porcentaje del nivel de armónico en especial del quinto armónico.

Ilustración 24: Reducción del nivel de armónicos



Fuente: EASY POWER

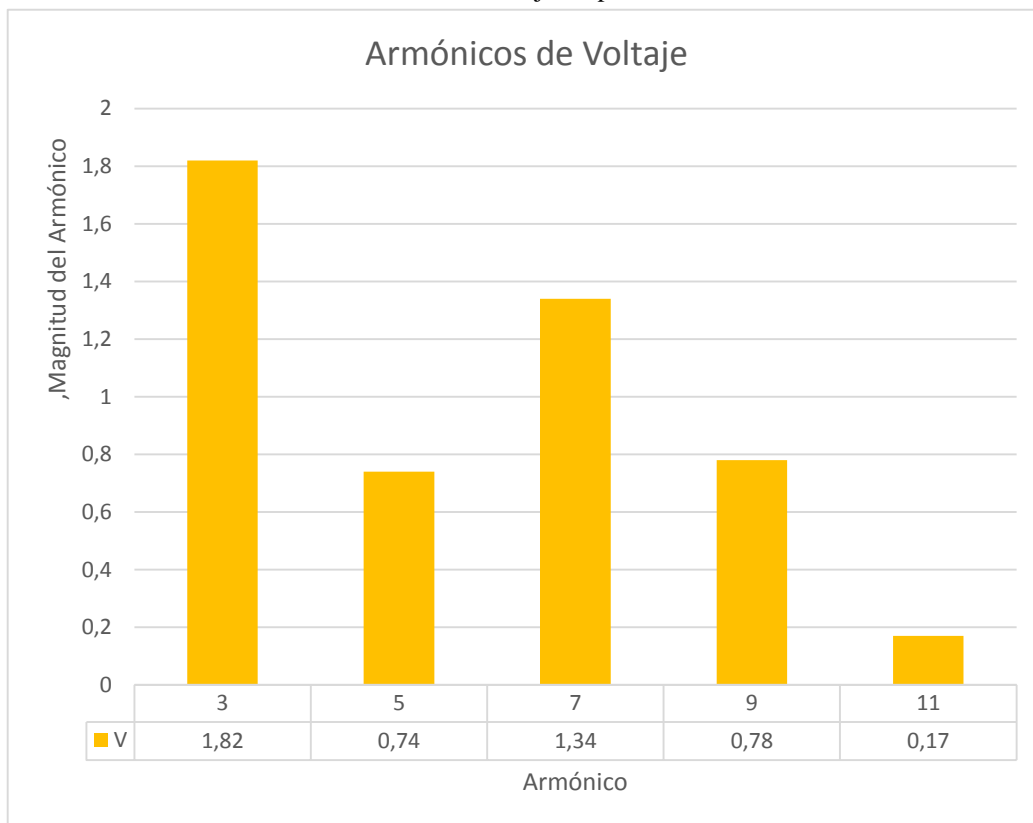
Análisis de los armónicos de voltaje:

Tabla 35: Magnitudes de los Armónicos de Voltaje

Individual Harmonic Magnitude	
Harmonic	V
3	1,82
5	0,74
7	1,34
9	0,78
11	0,17

Fuente: EASY POWER

Ilustración 25: Contenido de armónicos de voltaje después de la colocación del filtro



Fuente: EASY POWER

- Los niveles de armónicos de voltaje disminuyeron considerablemente, en especial el quinto armónico bajo el nivel del 4,837 al 1,169 el mismo que está dentro de la regulación
- El THD de voltaje disminuye al 5.783% el mismo que está dentro de la regulación

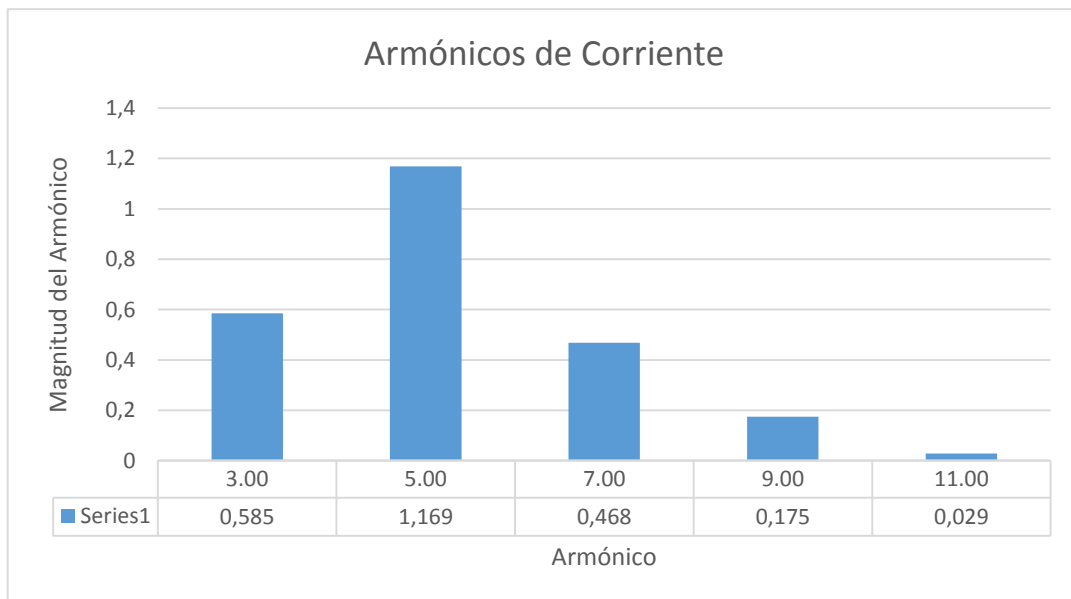
Análisis de los armónicos de corriente:

Tabla 36: Magnitudes de los Armónicos de Corriente

Individual Harmonic Magnitude	
Harmonic	I(pu)
3.00	0,585
5.00	1,169
7.00	0,468
9.00	0,175
11.00	0,029

Fuente: EASY POWER

Ilustración 26: Contenido de armónicos de corriente después de la colocación del filtro



Fuente: EASY POWER

- Nuevo cálculo del TDD del sistema

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{(0,585)^2 + (1,169)^2 + (0,468)^2 + (0,175)^2 + (0,029)^2}}{656,08 \text{ A}} * 100$$

TDD= 0,21% Se verifica que el nuevo valor del TDD está debajo del 8%, cumple lo estipulado por la norma

Factor de Potencia:

Tabla 37: Reducción del factor de potencia en la carga

Bus		Solution						
Name	Base kV	kV	Vpu	Deg	MW	MVAR	MVA	Pf
BUS-1	13.800	13.800	1.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
BUS-2	0.440	0.430	0.977	-2.36	0.000	0.000	0.000	0.000
BUS-3	0.440	0.429	0.975	-2.50	0.376	0.093	0.388	0.971

Fuente: EASY POWER

- Por lo tanto el nivel del factor de potencia subió de un 0.64 a un 0.971, la regulación CONELEC 004/01 estipula un factor de potencia mínimo de 0.92 por lo que se cumple con la norma y no es necesario colocar un banco de capacitores

Solución para la sobrecarga del Transformador:

Como se pudo observar en los reportes iniciales el transformador de 300 kVA se encuentra sobrecargado además de no contar con el nivel de reserva recomendado que es del 80% del kVA del sistema, por lo tanto se decide calcular un nuevo transformador:

Calculo de potencia en kVA.

$$I=623.21 \text{ A}$$

$$S=\sqrt{3} \times V \times I$$

$$S=\sqrt{3} \times 440 \text{ V} \times 623.21 \text{ A}$$

$$S=474949.81 \text{ VA}$$

$$S=474.95 \text{ KVA}$$

En el mercado no se encuentran disponible esta potencia por lo que escoge una potencia de 500 kVA.

$$S = 500 \text{ KVA}$$

TRANSFORMADOR: 500 kVA

RESERVA=80%

KVA del sistema=381.18 kVA

500 KVA al 80% tendremos disponible 400 kVA.

$$RESERVA = 400 \text{ kVA} - 381.18 \text{ kVA}$$

$$RESERVA=18.82 \text{ kVA}$$

Por lo tanto tendremos una reserva de **18.82 kVA**.

El transformador adecuado es de 500 kVA. No se puede colocar un transformador en paralelo debido que solo alimenta a una sola carga.

Análisis del Conductor:

Análisis Inicial:

Actualmente está instalado los conductores de calibre 2 x 1/0 + 1 x 2/0 por fase que su equivalente es de 750 MCM el mismo que admite una capacidad de corriente de 535 A. De acuerdo a la norma, se determina que los conductores de calculan a un 125% de la corriente consumida a plena carga.

El cálculo de la corriente inicial del sistema es el siguiente:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \text{fp}}$$

Ecuación 47

$$I_1 = \frac{361,34 * 10^3}{\sqrt{3} * 440 * 0,64}$$

$$I_1 = 740,84 \text{ A} * 1.25$$

$$I_1 = 926,05 \text{ A}$$

Tabla 38: Simulación inicial con el conductor

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded %	OverLoaded %	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	535.0	881.3	164.7%	64.7%	VIOLATION

Fuente: EASY POWER

La corriente inicial calculada por el simulador es de 881.30 A el mismo que se encuentra sobrecargado en un 64.7%.

Tiene una caída de voltaje de:

$$e\% = \frac{2\sqrt{3}LI}{E_{fs}} (\%)$$

Ecuación 48

Para un calibre de 750 MCM tenemos una sección de 379.837 mm², con esto calculamos la caída de voltaje:

$$e\% = \frac{2\sqrt{3} * 9m * 740.83A}{440 V * 379.837 \text{ mm}^2} (\%)$$

$$e\% = 13.82\%$$

La caída de voltaje supera el 5% que es permitido en instalaciones industriales, por lo que dicho conductor produce muchos problemas en el sistema eléctrico.

Análisis con el mismo conductor y corregido el factor de potencia:

Al colocar el filtro el factor de potencia se eleva a 0,97 con este valor se calculara el nuevo valor de corriente.

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} * V * fp}$$

$$I_2 = \frac{361,34 * 10^3}{\sqrt{3} * 440 * 0,97}$$

$$I_2 = 488,80 \text{ A} * 1.25$$

$$I_2 = 610 \text{ A}$$

Se utiliza el mismo conductor de 750 MCM y se simula el sistema con el filtro, donde se obtiene el siguiente reporte:

Tabla 39: Resultado del conductor cuando ya se coloca el filtro.

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded%	OverLoaded%	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	535.0	531.5	99.3%	-0.7%	Warning

Fuente: EASY POWER

La corriente calculada por el simulador es de 531.5 A. El conductor no se encuentra sobrecargado pero la capacidad del conductor se acerca al límite. El conductor debe tener un reserva del 25% para

una posible sobrecarga. La reserva que tiene el conductor luego de corregir el factor de potencia es de 0.7%.

Para un calibre de 750 MCM tenemos una sección de 379.837 mm², con esto calculamos la caída de voltaje:

$$e\% = \frac{2\sqrt{3} \cdot 9m \cdot 448,80}{440 V \cdot 379,837 \text{ mm}^2} (\%)$$

$$e\% = 8.372\%$$

La caída de voltaje supera el 5%, por lo que se procederá al cálculo del nuevo conductor.

Análisis con el nuevo conductor y corregido el factor de potencia:

La corriente sigue siendo la misma que la del anterior caso:

$$I_2 = 610 \text{ A}$$

El conductor 1000 MCM tiene la capacidad de 615 A. El conductor que abastece la corriente de 610 A es de 1000 MCM. El reporte de la simulación con el conductor de 1000 MCM es el siguiente:

Tabla 40: Simulación con el calibre de 1000 MCM

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded%	OverLoaded%	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	615.0	531.3	86.4%	-13.6%	

Fuente: EASY POWER

Con el conductor de calibre de 1000 MCM se tiene una sobrecarga del 13.6% pero no llega al 25% de reserva que debería tener.

Para un calibre de 1000 MCM tenemos una sección de 506.450 mm², con esto calculamos la caída de voltaje:

$$e\% = \frac{2\sqrt{3} \cdot 9m \cdot 448,80}{440 V \cdot 506,450 \text{ mm}^2} (\%)$$

$$e\% = 6.28 \%$$

Este conductor tiene una caída de voltaje menor que al conductor instalado sin embargo no cumple con el límite que establece la norma que es igual o menor a 5%.

Con el fin de cumplir con la selección del calibre del conductor por caída de voltaje se ha decidido elegir el conductor de calibre de 1250 MCM que tiene una capacidad de corriente de 665 A y una caída de voltaje a más de tener una reserva del 25%

$$e\% = \frac{2\sqrt{3} \cdot 9m \cdot 448,80}{440 V \cdot 633,063 \text{ mm}^2} (\%)$$

$$e\% = 5.00 \%$$

El conductor de 1250 MCM cumple con los requerimientos del sistema, sin embargo este calibre no existe en el mercado nacional, tiene un costo muy elevado y es difícil de manipularlo.

Para esto calculamos el equivalente de este conductor:

El calibre 1250 MCM tiene una capacidad de conducción de 665 A.

A estos 665 Amperios lo repartimos en cuatro conductores de menor calibre:

$$\frac{665A}{4 \text{ conductores}} = 166.25 A \text{ que recorrería por cada conductor}$$

La capacidad de conducción que tiene el calibre 1/0 es de 170 A

Por lo tanto la Corriente total que circula por los cuatro conductores es:

$$I_T = 170 \cdot 4$$

$$I_T = 680 A.$$

Se realiza la simulación final con 4 conductores por fase de calibre 1/0 AWG:

Tabla 41: Simulación final con 4 conductores por fase

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded%	OverLoaded%	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	680.0	531.5	78.2%	-25.8%	

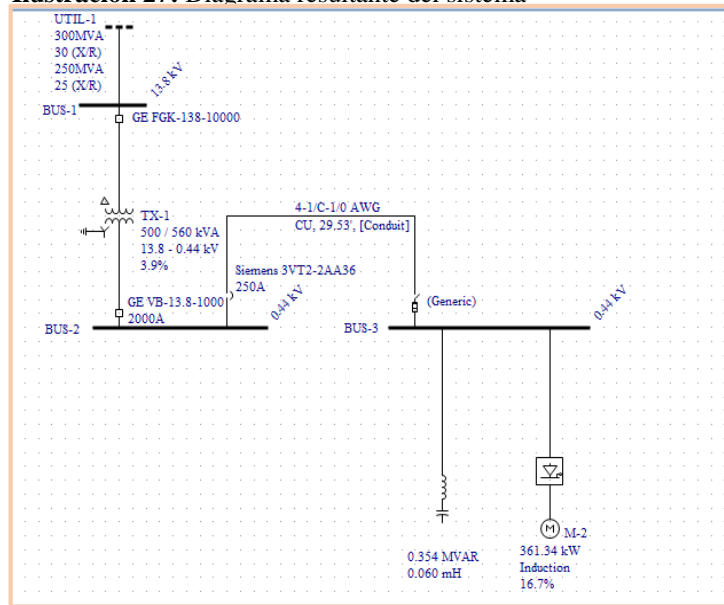
Fuente: EASY POWER

Los cuatro conductores por fase de calibre 1/0 AWG, tiene una reserva del 25% y es económicamente recomendable que la anterior opción.

Resultados de la Corrida de Flujos final

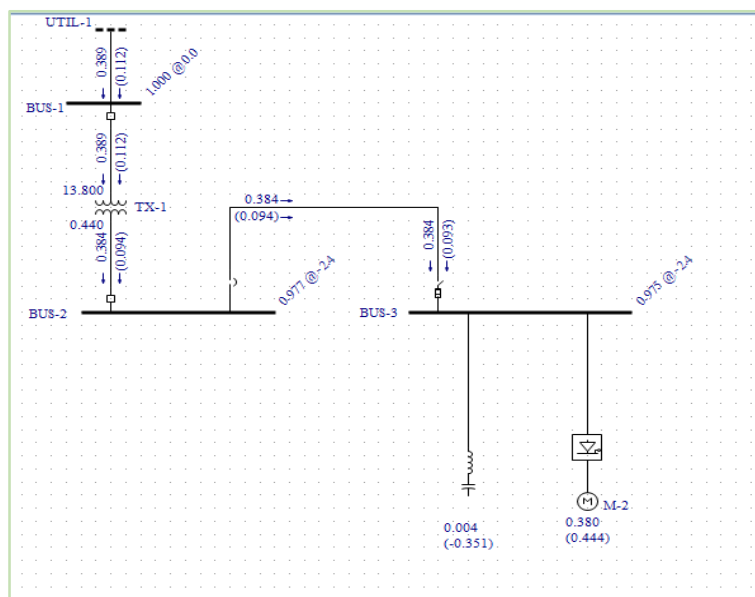
Después de haber realizado las correcciones propuestas se realiza una nueva corrida de flujos y se observa que ya no existen fallas y el sistema funciona correctamente, los parámetros eléctricos se encuentran dentro de los niveles permitidos. El transformador de 500 kVA abastece la potencia requerida sin sobrecarga al igual que el conductor, teniendo una reserva del 21,8% para el transformador y del 25.8% para el conductor, con la que se asegura un buen suministro de energía eléctrica y disminuye el costo de la planilla eléctrica

Ilustración 27: Diagrama resultante del sistema



Fuente: EASY POWER

Ilustración 28: Corrida de flujos resultante con correcciones propuestas



Fuente: EASY POWER

Los reportes obtenidos a partir de la corrida de flujos con las correcciones ya hechas son los siguientes:

El transformador de 500 kVA soporta la carga que consume la industria fundidora y tiene una reserva del 21.8%

Tabla 42: Reducción de la sobrecarga del transformador

Line				Load			
From Bus Name	To Bus Name	Branch Name	Rated Amps	Load Amps	Loaded%	OverLoaded%	Comment
BUS-2	BUS-3	C-1	680.0	531.5	78.2%	-21.8%	

Fuente: EASY POWER

Análisis Técnico económico de la implementación del Proyecto

Ahorro energético al implementar las soluciones propuestas

Cálculo de Pérdidas:

Pérdidas Iniciales=0.014 MW

Tabla 43: Pérdidas Iniciales

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.013	0.051
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.001	0.003
Total System Losses				0.014	0.053

Fuente: EASY POWER

Pérdidas finales=0.005 MW

Tabla 44: Pérdidas Finales

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.005	0.018
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.000	0.001
Total System Losses				0.005	0.019

Fuente: EASY POWER

$$0.014 \times 10^6 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 14 \text{ kW}$$

$$0.005 \times 10^6 \text{ W} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 5 \text{ kW}$$

Pérdidas Iniciales en hora pico = 14 kW

Pérdidas finales en hora pico = 5 kW

Pérdidas totales = Pérdidas Iniciales - Pérdidas finales

Ecuación 49

Pérdidas totales = 14 kW - 5 kW

Pérdidas totales = 9 kW

Calculo de las pérdidas de energía.

Pérdidas de Energía = Pérdidas en valor en kW * días * horas

Ecuación 50

$$\# \text{ de horas de carga equivalentes (EH)} = \frac{\text{Energía total consumidas en un periodo (kWh)}}{\text{Carga máxima (kW)}}$$

Ecuación 51

Carga máxima = 267,67 kW

Energía total consumidas en un periodo (kWh) = 24103.03 kWh

$$\text{EH} = \frac{24103.03 \text{ kWh}}{267,67 \text{ kW}}$$

EH = 90.05 h

Pérdidas de Energía = Pérdidas totales en kW * semanas * horas

Pérdidas de Energía = 9 kW * 4 semanas * 90.05 horas

$$\text{Pérdidas de Energía} = 3241.80 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

Se multiplica la Energía por el costo del kWh este valor es tomado del pliego tarifario

Tabla 45: Pliego Tarifario. Valor Industrial

BAJA TENSIÓN CON DEMANDA			
COMERCIALES E INDUSTRIALES			
	4,790	0,090	1,414
ENTIDADES OFICIALES, ESCENARIOS DEPORTIVOS			
SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES			
	4,790	0,080	1,414
BOMBEO AGUA			
	4,790	0,070	1,414
BAJA TENSIÓN CON DEMANDA HORARIA			
COMERCIALES E INDUSTRIALES			
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	4,790	0,090 0,072	1,414
E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS			
SERVICIO COMUNITARIO, AUTOCONSUMOS Y ABONADOS ESPECIALES			
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	4,790	0,080 0,066	1,414
BOMBEO AGUA			
07h00 hasta 22h00 22h00 hasta 07h00	4,790	0,070 0,056	1,414
BOMBEO AGUA SERVICIO PÚBLICO DE AGUA POTABLE			
L-V 08h00 hasta 18h00 L-V 18h00 hasta 22h00 L-V 22h00 hasta 08h00*** S,D 18h00 hasta 22h00	2,620	0,056 0,095 0,045 0,056	1,414
VEHICULOS ELÉCTRICOS			
L-V: 08h00 hasta 18h00 L-D: 18:00 hasta 22:00 L-D: 22h00 hasta 08h00 SyD: 08h00 hasta 18h00	4,050	0,080 0,100 0,050	1,414

Fuente: Pliego Tarifario

$$\text{Costo por perdidas} = 3241.80 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} * 0.090 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo por perdidas} = 291.76 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}}$$

$$\text{Costo por perdidas} = 3501.14 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Pago de penalización por bajo factor de potencia

El siguiente recuadro muestra la cantidad que debe pagar cada mes la industria FUNDI LASER por concepto de penalización por bajo factor de potencia que presentan

Tabla 46: Penalización anual por bajo factor de potencia

MES	VALOR CONSUMO CANCELADO	Penalización de fp	Consumo sin Penalización
ENERO	2458,31	\$ 229,24	2229,07
FEBRERO	2418,29	\$ 229,24	2189,05
MARZO	2175,83	\$ 135,27	2040,56
ABRIL	2856,53	\$ 243,54	2612,99
MAYO	2564,13	\$ 309,07	2255,06
JUNIO	2284,98	\$ 491,69	1793,29
JULIO	2709,61	\$ 435,21	2274,4
AGOSTO	2523,92	\$ 475,84	2048,08
SEPTIEMBRE	2476,06	\$ 414,16	2061,9
OCTUBRE	2589,79	\$ 334,12	2255,67
NOVIEMBRE	2858,14	\$ 233,33	2624,81
DICIEMBRE	2779,91	\$ 248,56	2531,35
MULTA ANUAL			3779,27

Fuente: Los Autores

Ahorro económico=Costo por perdidas anual + Multas anual por bajo factor de potencia

$$\text{Ahorro económico} = 3501.14 + 3779.27 = 7280,41 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

$$\text{Ahorro económico} = 7280,41 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

Cálculo del TIR y el TMAR:

Para el cálculo de estos parámetros tomamos en consideración los siguientes datos:

- Inversión del Proyecto: 21291,20 USD
- Ahorro económico por energía consumida anual y multas por penalización por bajo factor de potencia: $7280,41 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$
- Instalación de los equipos recomendados: 500,00 USD
- Mantenimiento de los equipos: 200,00 USD
- Además se tomara en cuenta una tasa de inflación del 0,9%

Tabla 47: Flujo Neto de Inversión

CUENTAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INVERSIÓN	(21.291,20)										
AHORRO ECONÓMICO		7.280,41	7.404,18	7.705,53	8.019,14	8.345,52	8.685,18	9.038,67	9.406,54	9.789,39	10.187,82
GASTOS:											
INSTALACIÓN		500,00									
MANTENIMIENTO		200,00	208,14	216,61	225,43	234,60	244,15	254,09	264,43	275,19	286,39
FLUJO NETO	(21.291,20)	6.580,41	7.196,04	7.488,92	7.793,71	8.110,92	8.441,03	8.784,58	9.142,12	9.514,20	9.901,43

Fuente: Los Autores

- **Cálculo del TIR:** 33,51 %
- **Cálculo del TMAR:** 21265,36
- **Tiempo de recuperación:** 3 años

El proyecto es rentable puesto que el período de recuperación de la inversión de capital se da en un tiempo razonable de tres años ya que el tiempo de vida útil de los equipos es de diez años, además de esto se debe considerar los beneficios que generan como el ahorro de energía y la maquinaria funciona adecuadamente.

12. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS):

➤ **FACTIBILIDAD OPERATIVA**

Desde el punto de vista operativo el estudio es factible debido a que las propuestas de solución ayudarán a reducir cualquier anomalía presente en la red de la Industria y principalmente permitirá mejorar el funcionamiento de los procesos y equipos.

➤ **FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

Las propuestas planteadas tienen factibilidad económica, puesto que es una inversión a corto plazo, donde el principal beneficio económico será eliminar el pago de penalizaciones por bajo factor de potencia, rubro que pasará a formar parte de los ingresos a favor de la empresa, gracias al nivel de calidad de energía eléctrica. Los fenómenos que afectan a los equipos son controlados, garantizando confiabilidad en las instalaciones eléctricas de la industria, puesto que al contar con un buen suministro de energía eléctrica se podrá invertir en maquinaria y equipo, manteniendo la vida útil de los mismos.

13.- PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO:

Tabla 48: Presupuesto para implementación del proyecto

ÍTEM	EQUIPO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Filtro electrónico de paso bajo/pasivo/de armónico FN 3410	1	\$ 5.200,00	\$ 5.200,00
2	CONDUCTORES DE 1/0 AWG PARA CONEXIÓN DE TRANSFORMADOR A LA CARGA	108 m	\$ 7,50	\$ 810,00
3	TRANSFORMADOR DE 500 kVA de 13.8 kV/440 V	1	\$ 13.000,00	\$ 13.000,00
SUB TOTAL				\$ 19010,00
IVA 12%				\$2281.2
TOTAL				\$ 21291.20

Fuente: Los Autores

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

- Según el análisis sobre los parámetros eléctricos realizado en la Industria FUNDI LASER se puede percibir que el transformador de 300 kVA se encuentra sobrecargado en un 99.7%, mediante cálculos se pudo establecer que se debe instalar un transformador de 500 kVA.
- El conductor que se encuentra instalado en la industria es de calibre es de 2 x 1/0 + 1 x 2/0 por fase que equivale a un conductor de 750 MCM a través de las simulaciones se observó que dicho conductor está sobrecargado en un 64,7% lo que ocasiona el incremento de las pérdidas de energía, el calibre calculado por capacidad de corriente y caída de voltaje es el conductor 1250 MCM, sin embargo para una mejor distribución de corriente lo más apropiado es utilizar cuatro conductores de calibre 1/0 AWG los mismos que presentan mayor reserva que los instalados y una menor posibilidad de presentar en el futuro caídas de voltaje si es que existiera un incremento de carga
- Las propuestas dadas en el presente proyecto para mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica tiene una factibilidad tanto técnica como económica debido a que la inversión inicial que se tendrá al implementar las mejoras es menor al ingreso que se obtendrá mensualmente al mitigar los problemas en el sistema eléctrico y eliminar el rubro por pago de penalización por bajo factor de potencia

RECOMENDACIONES:

- Se debe primero realizar el cálculo y las debidas simulaciones del filtro pasivo sintonizado, el mismo que proporciona potencia reactiva fundamental para compensar el factor de potencia, donde se debe observar a que nivel mejoró, luego y si el caso lo amerita se debe colocar un banco de capacitores para llevar al factor de potencia a niveles que estén dentro de la regulación
- Se debe realizar un mantenimiento a las instalaciones eléctricas de la Industria y así se podrá incrementar la vida útil de los equipos, además de disminuir considerablemente las pérdidas en cada uno de los elementos del sistema eléctrico de la industria como: conductores, transformadores, protecciones, etc.
- El banco de capacitores que se encuentra instalado en la Industria se verifico que no corrige el factor de potencia, por lo que se recomienda retirar dicho banco ya que solo con la colocación del filtro se logra disminuir los armónicos y elevar el factor de potencia
- Invertir en el proyecto ya que es factible técnicamente, y económicamente de acuerdo a los datos medidos, la inversión se recupera en un tiempo razonable, gracias a evitar recargos por penalización por bajo factor de potencia y además disminuirá las pérdida de energía eléctrica.

15. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, L., & Herrera, G. (2010) . Análisis de carga del Hospital San Vicente de Paúl de la Ciudad de Ibarra y propuesta para el cumplimiento de la Calidad de Energía (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/357/3/FECYT%20933%20TESIS%20FINAL.pdf>

ARCONEL. (2016). Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas. Coordinación Nacional de Regulación.

Cables Eléctricos. (2010). Selección del conductor eléctrico apropiado para cada proyecto. Recuperado de: <http://cableselectricos.cl/articulos/como-seleccionar-el-conductor-electrico-apropiado-para-cada-proyecto/>

Camacho, J. (2015). Estudio de Factibilidad para el mejoramiento de la calidad de energía eléctrica en la planta Industrial INDUCUERDAS (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3801>

CONELEC. (2011). Regulación del Servicio Eléctrico de Distribución No CONELEC 004/01. Directorio del Consejo Nacional de Electricidad, 4-10.

Direct Industry. (2017). Filtro electrónico de paso bajo pasivo trifásico de armónico. Recuperado de: <http://www.directindustry.es/prod/schaffner-group/product-15134-1773554.html>

Enríquez, H.,(2008). El ABC de las Instalaciones Eléctricas Residenciales. México: Limusa

Enríquez, H.,(2012). Manual de Instalaciones Eléctricas Residenciales e Industriales. México: Limusa

Gers,J. (2008). Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos. TECSUP, volumen (17), 2-3.

IEEE. (2003). Norma IEEE – 1531-2003. Coordinación Nacional de Regulación. Recuperado de <http://www.powerqualityworld.com/2011/08/harmonic-filter-design-ieee-1531.html>

IEEE_519. (1992). Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. IEEE. Recuperado de <http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/352/Control de Armonicos IEEE 519 -1992 en Espa%C3%B1ol.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2004). Transformadores de Distribución y Valores nominales de Potencias Aparentes. Ecuador: INEN. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2131.2004.pdf>

Mora, J., & Cevallos, Y. (2014). Estudio y análisis de calidad de energía enfocado en nivel de armónicos en el sistema eléctrico de la subestación enfriadora Holcim Ecuador Planta Guayaquil. (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6848/1/UPS-GT000654.pdf>

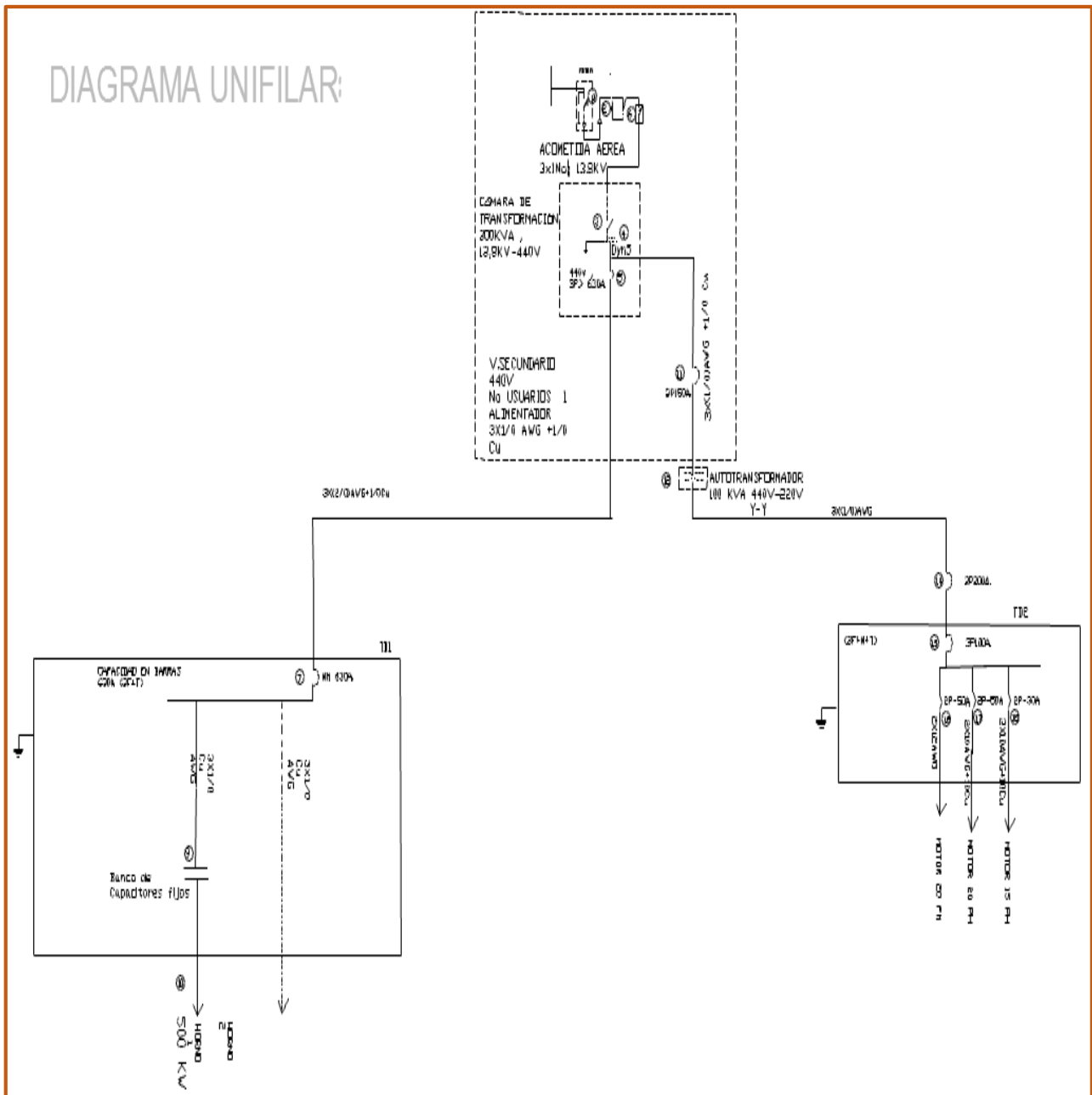
Schneider. (2008). Manual de Compensación de energía reactiva. Recuperado de http://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/myce/capitulo02_1907.pdf

Holguín, M., & Gómez, D. (2010). Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2110/13/UPS-GT000145.pdf>

16. ANEXOS

ANEXOS

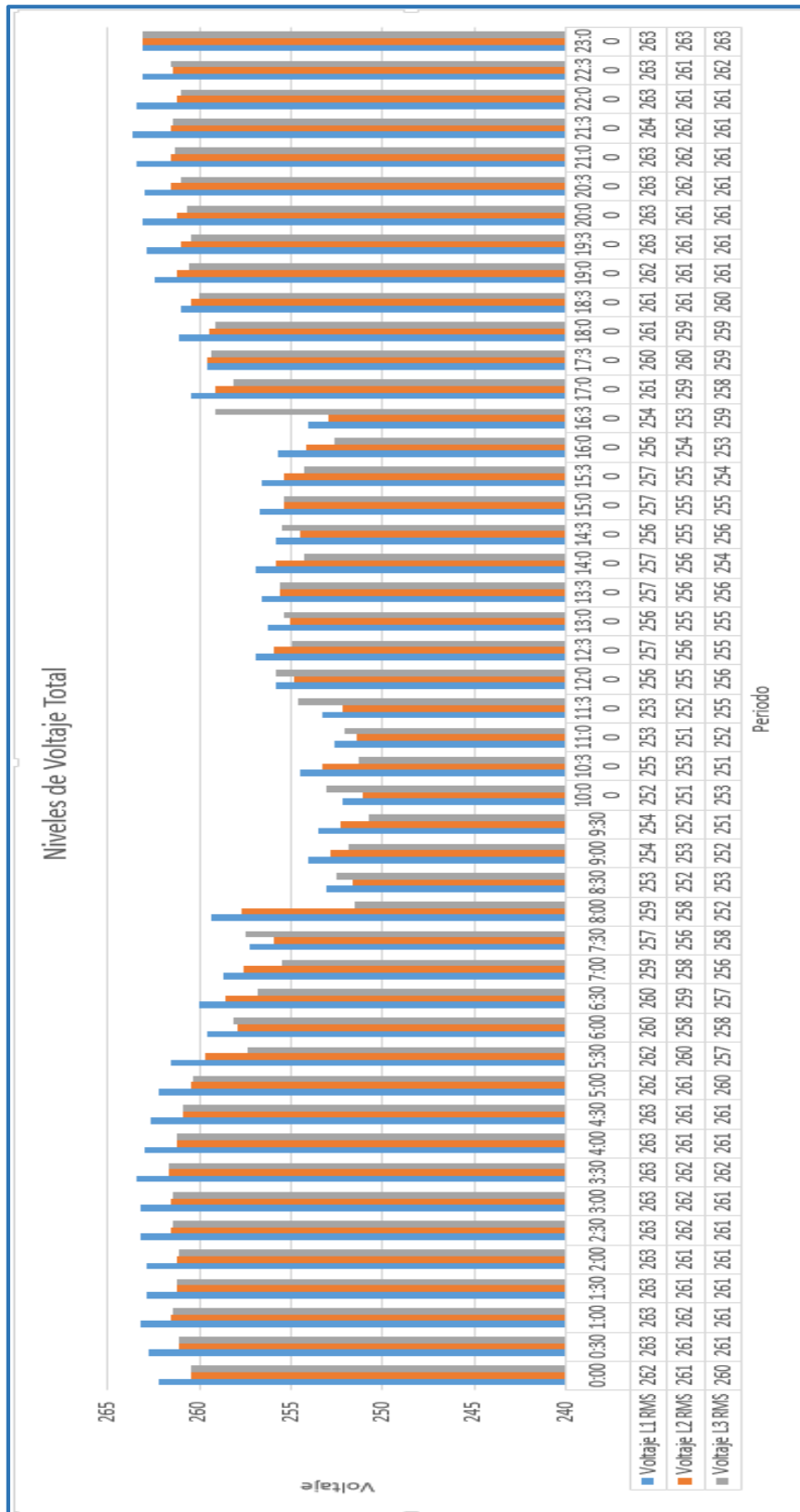
ANEXO 1: DIAGRAMA UNIFILAR DE LA INDUSTRIA FUNDI LASER



Fuente: Autores

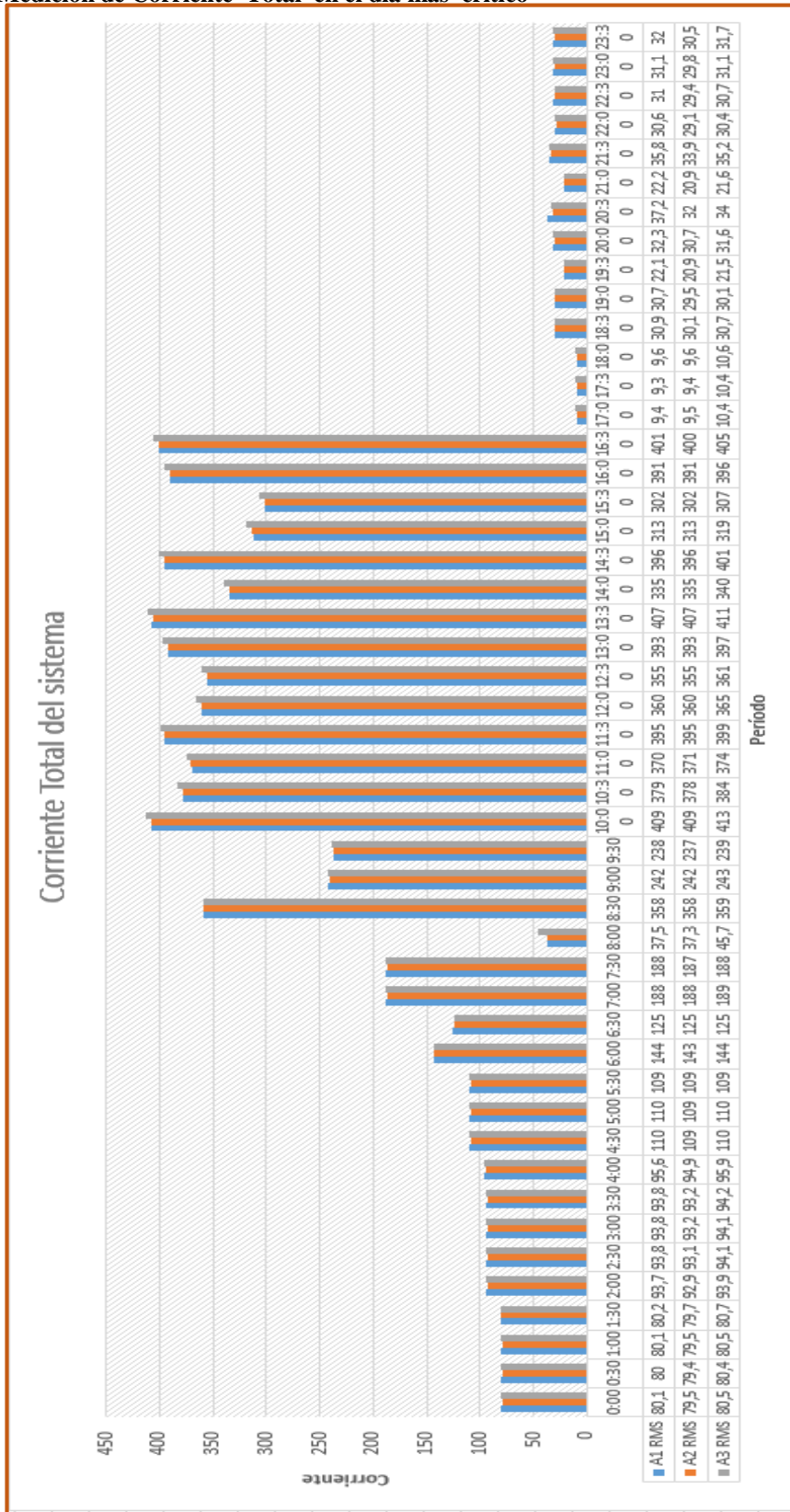
ANEXO 2: Mediciones de Parámetros eléctricos

Medición de Voltaje Total en el día más crítico



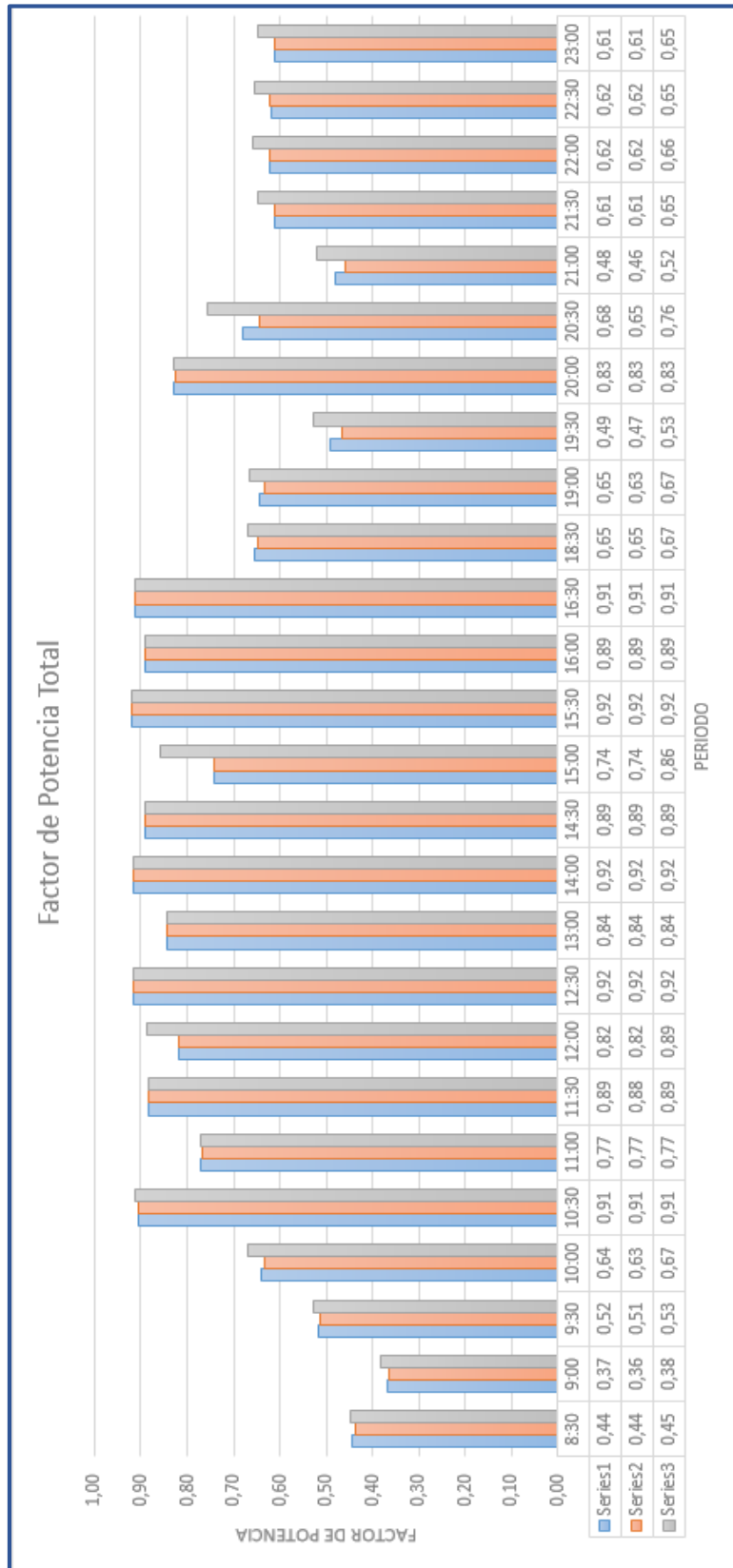
Fuente: Analizador de Carga

Medición de Corriente Total en el día más crítico



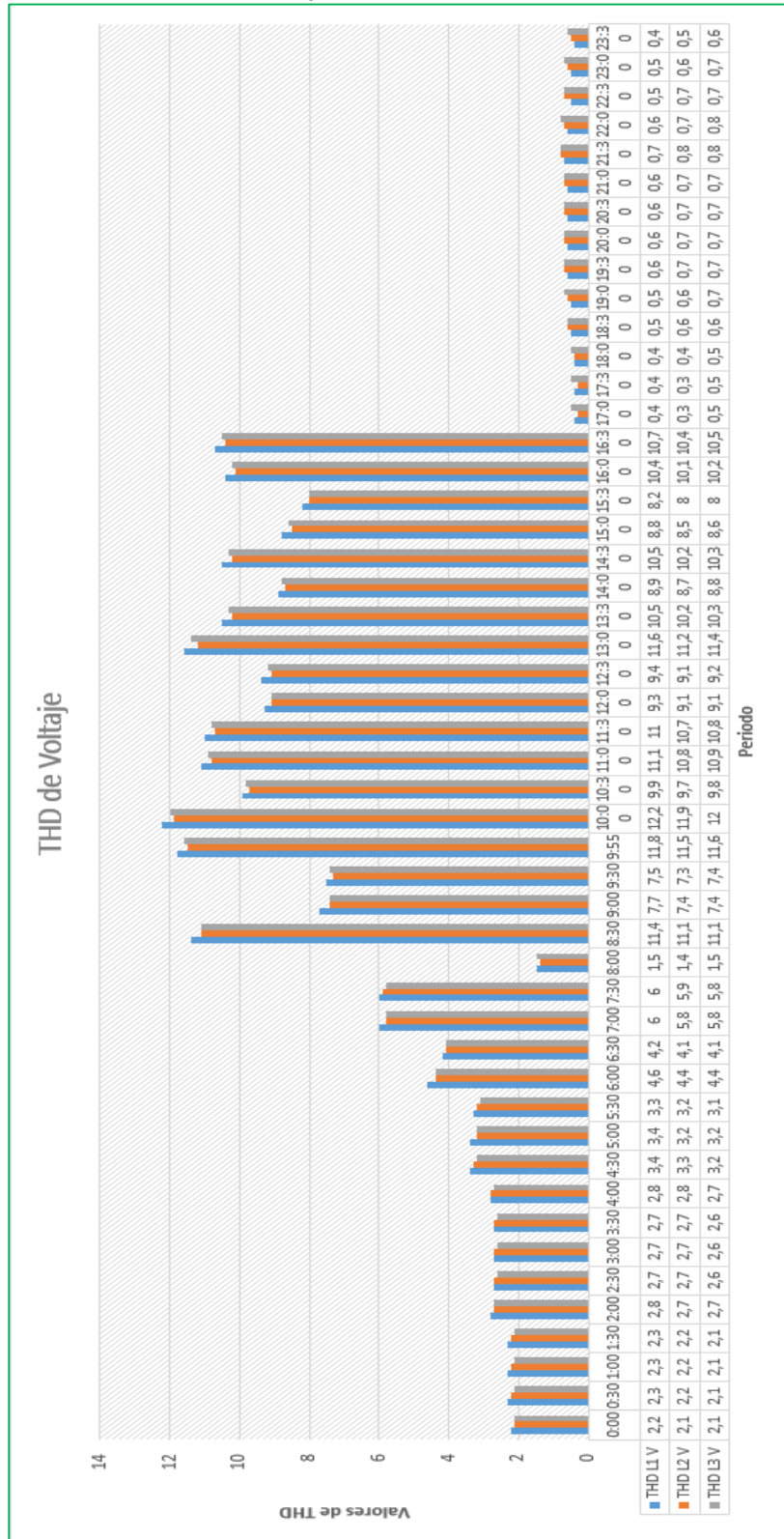
Fuente: Analizador de Carga

Medición del Factor de Potencia Total en el día más crítico



Fuente: Analizador de Carga

Medición del THD de Voltaje en el día más crítico



Fuente: Analizador de Carga

Medición del THD de Corriente en el día más crítico



Fuente: Analizador de Carga

ANEXO 3: Fotografías del levantamiento técnico de datos de la Industria

Horno de Inducción



Fuente: FUNDI LASER

Horno de Inducción



Fuente: FUNDI LASER

Tablero General

Fuente: FUNDI LASER

Parte interna del tablero de Mando del Horno de Inducción

Fuente: FUNDI LASER