



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN
DE MDF DE LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

Autores:

Aracely Nataly Gavilanez Guanoluisa

Tutor Académico:

Ing. Gabriel Napoleón Pesántez Palacios M.Sc.

LATACUNGA – ECUADOR

2024



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Yo **ARACELY NATALY GAVILANEZ GUANOLUISA** con cédula de identidad N° **0550073233** declaro ser autora del presente proyecto de investigación: **“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”**, siendo el Ing. Gabriel Pesántez M.Sc. el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, Agosto del 2024

.....
Aracely Nataly Gavilanez Guanoluisa

C.C. 0550073233



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”, de **GAVILANEZ GUANOLUISA ARACELY NATALY**. De la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aporte científico-técnico suficiente para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto del 2024

El Tutor



.....
Ing. MSc. Gabriel Napoleón Pesántez Palacios
C.C. 0301893889



AVAL DE 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.; cuanto, la postulante Gavilanez Guanoluisa Aracely Nataly, con cédula de ciudadanía N° 0550073233, con el título de Proyecto de titulación: **“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”** ha 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, Agosto 2024

Para constancia firman:

Ing. Franklin Vásquez M.Sc.
C.C. 1710434497

Ing. Efrén Barbosa M.Sc.
C.C. 0501420723

Ing. Guaman Wilian M.Sc.
C.C. 0603578956

AGRADECIMIENTO

Primero, expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia. Su apoyo incondicional, amor y comprensión fueron fundamentales para superar cada desafío en este proceso. Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mis amigos, quienes estuvieron a mi lado en cada paso, compartiendo alegrías y retos. Su compañía y amistad han sido una fuente constante de motivación, y por ello les estaré siempre agradecido.

Reconozco también a mis docentes, cuyo conocimiento y dedicación han guiado mi formación académica y profesional. Sus enseñanzas y orientación me han permitido alcanzar mis objetivos con determinación y confianza.

Extiendo mi gratitud a mis compañeros de carrera, con quienes compartí esta experiencia de aprendizaje. El compañerismo y apoyo mutuo hicieron que cada obstáculo fuera más llevadero, y las experiencias compartidas enriquecieron mi camino.

A la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., agradezco la oportunidad de haber realizado mi tesis en sus instalaciones. Un agradecimiento especial al ingeniero Efrén Barbosa y su equipo, cuya apertura y mentoría fueron esenciales para el seguimiento y éxito de este proyecto.

Finalmente, agradezco al ingeniero Gabriel Pesantez, mi tutor, por su invaluable guía y dedicación. Su experiencia y apoyo fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Gavilanez Guanoluisa Aracely Nataly

DEDICATORIA

Dedico este logro a la niña de antes, aquella que soñaba con obtener un título académico. A esa niña que, con ilusión y esperanza, imaginaba el día en que este sueño se haría realidad. Hoy, ese sueño se cumple, y este título es para ella, como testimonio de su esfuerzo, perseverancia y fe en que todo es posible.

Gavilánez Guanoluisa Aracely Nataly

ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1	Situación problemática	4
2.2	Formulación del problema.....	4
2.3	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3.1	Objeto de Investigación	4
2.4	BENEFICIARIOS	4
2.5	JUSTIFICACIÓN	5
2.6	OBJETIVOS	5
2.6.1	General.....	5
2.6.2	Específicos.....	6
2.7	SISTEMA DE TAREAS	6
3.	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO	8
3.1	CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA	8
3.2	PERTURBACIONES ELÉCTRICAS.....	8
3.3	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	9
3.3.1	Análisis de Fourier.....	9
3.3.2	La transformada discreta de Fourier	10
3.3.3	La transformada Wavelet.....	11
3.4	EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	12
3.4.1	Efectos producidos por los armónicos	12
3.4.2	Efectos de resonancia	12
3.4.3	Efectos causados por el impacto de los armónicos.....	14
3.5	EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN EQUIPOS DE ALTA POTENCIA CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA	15
3.6	NORMATIVAS aplicadas.....	16
3.7	ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA.....	17
3.7.1	Diseño de filtros pasivos.....	17
3.7.2	Filtros Activos	19
3.7.3	CÁLCULO DEL FACTOR K DEL TRANSFORMADOR	21
3.7.4	Método de reconexión de cargas	23

3.7.5	Método de superposición de THDv y THDi.....	24
3.8	PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y CONSIDERACIONES SOBRE CALIDAD DE ENERGÍA.	25
3.8.1	Verificación de Medición de Sistemas de Puesta a Tierra.....	25
4.	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS	
	27	
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	29
4.2	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS DISPOSITIVOS	29
4.2.1	Levantamiento del Diagrama Unifilar.....	30
4.2.2	Selección del lugar e instalación del analizador de calidad de energía eléctrica.	31
4.2.3	Sistema de Puesta a Tierra.....	36
4.2.4	Recomendaciones de seguridad.....	37
4.3	ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS OBTENIDA	¡Error! Marcador no definido.
4.3	SIMULACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.4	CASOS DE ESTUDIO	41
4.1.1	Banco de capacitores	41
a.	Dimensionamiento.....	41
b.	Ubicación.....	42
4.1.2	Filtro pasivo	43
a.	Dimensionamiento.....	43
b.	Ubicación.....	44
4.1.3	Filtro activo.....	45
a.	Dimensionamiento.....	45
b.	Ubicación.....	46
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	51
5.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA LÍNEAS DE PRODUCCIÓN MDF DE LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI	51
5.2	SISTEMA ELÉCTRICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN MDF.....	51
5.2.1	Selección del objeto de estudio y colocación de los analizadores de calidad de energía	52
5.3	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES	53
5.3.1	Análisis de voltaje.....	53
5.3.2	Desequilibrio de voltaje Fase-Neutro	55

5.3.3	Análisis de desequilibrio de corriente.....	57
5.3.4	Análisis de desbalance de potencia activa	58
5.3.5	Análisis del factor de potencia.....	59
5.3.6	Distorsión Armónica Total de Voltaje de las seis mediciones de bajo voltaje.....	59
5.3.7	Armónicos de voltaje	60
5.3.8	Armónicos de Corriente.....	61
5.3.9	Medición del Sistema de Puesta Tierra	62
5.4	ESTADO ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN MDF.....	62
•	Desbalance de Corriente	62
•	Factor de potencia.....	63
•	Armónicos de Voltaje	63
•	Armónicos de Corriente.....	63
•	Sistema de Puesta a Tierra	63
5.4	SOLUCIONES PROPUESTAS A IMPLEMENTAR EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF	63
•	Desbalance de Corriente	64
•	Factor de potencia.....	64
•	Armónicos de Voltaje y Corriente	64
•	Sistema de Puesta a Tierra	64
5.4	SIMULACIÓN Y MODELADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ETAP 19.0.1	64
5.4.1	Diseño del esquema del sistema eléctrico	65
•	Selección e ingreso de datos en el software.....	65
•	Creación del espectro armónico.....	65
•	Reporte de resultados en el escenario cero	66
5.4.2	Cálculo del banco de capacitor	67
•	Resultados de la implementación del banco de capacitor	68
5.4.3	Diseño del filtro pasivo	69
•	Resultados de flujos de armónicos después de instalar un filtro pasivo.....	73
5.4.4	Diseño del filtro activo para mitigar armónicos de tensión y corriente.....	76
•	Resultados.....	76
6.	CONCLUSIONES	93
7.	REFERENCIAS.....	95
ANEXO A.	99

ANEXO B.....	134
ANEXO C: DIAGRAMA Unifilar de la línea de Producción de MDF en AutoCAD....	144
ANEXO D: Ubicación de los analizadores de calidad de energía eléctrica en el sistema eléctrico de MDF.....	145
ANEXO E: Diagrama Unifilar en ETAP	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Clasificación de perturbaciones [11].	8
Figura 3.2. Circuito RLC. [15].	13
Figura 3.3. Curva corriente – frecuencia y pico de resonancia [17].....	14
Figura 3.4. Efectos en conductores según el incremento de la frecuencia [14].	15
Figura 3.5. Filtro activo de potencia [24].	20
Figura 3.6. Diagrama de bloques de un filtro activo de potencia [24].	20
Figura 3.7. Consignas y control para un filtro activo de potencia [14].	21
Figura 3.8. Superposición de armónicos de tensión y corriente de orden 3 [26].	23
Figura 4.1. Diagrama de Flujo del análisis de calidad de la energía realizado.	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 4.2. Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico [31].	31
Figura 4.3 Mediciones de las puestas a tierra de la Línea de MDF en Aglomerados Cotopaxi S.A.	37
Figura 4.4 Capacitor para compensación [35].	42
Figura 4.5. Composición del filtro activo [35].	45
Figura 5.1. Comparación de voltajes tomados en la fase AN por el analizador de red Fluke 435 vs el analizador de red Fluke 1750.	55
Figura 5.2. Ingreso datos (Power Grid Editor).	65
Figura 5.3. Librería de espectros armónicos.	66
Figura 5.4. Armónico con Banco de Capacitores Cerrado en el Bus 20.	69
Figura 5.5. Armónicos con Banco de Capacitores Abierto en el Bus 20.	69
Figura 5.6. Identificación de Magnitudes Eléctricas en la Carga 5 de Prensas.	71
Figura 5.7. Identificación donde existe armónico de corriente.	72
Figura 5.8. Diseño de Filtro Pasivo para el Bus 24.	72

Figura 5.9. Mitigación de armónicos en el escenario 1.....	74
Figura 5.10. Mitigación de armónicos en el escenario 2.....	74
Figura 5.11. Mitigación de armónicos en el escenario 3.....	75
Figura 5.12. Mitigación de armónicos en el escenario 4.....	75
Figura 5.13. Mitigación de armónicos en el escenario 5.....	76
Figura 5.14. Armónicos de tensión presentes en el sistema.	77
Figura 5.15. Armónicos de corriente presentes en el sistema.	77
Figura 5.16. Armónicos de corriente y tensión esperados en el sistema luego de instalación del filtro activo.	78
Figura 5.17. Valores esperados del THD antes y después de la implementación del filtro activo.	79
Figura 0.1. Comparación de voltajes tomados en la fase BN por el analizador de red Fluke 435 vs el analizador de red Fluke 1750.	134
Figura 0.2. Comparación de voltajes tomados en la fase CN por el analizador de red Fluke 435 vs el analizador de red Fluke 1750.	134
Figura 0.3. Medición 1 porcentaje armónico del espectro de corriente en el transformador padmouted 1500kVA.....	135
Figura 0.4. Medición 2 porcentaje armónico del espectro de corriente variador de frecuencia motor ventilador secadero	135
Figura 0.5. Medición 3 porcentaje armónico del espectro de corriente en alimentación caldero Benecke.	136
Figura 0.6. Medición 4 porcentaje armónico del espectro de corriente transformador Padmouted 1000kVA.	136
Figura 0.7. Medición 5 porcentaje armónico del espectro de corriente línea de Recubrimiento.	137
Figura 0.8. Medición 6 porcentaje armónico del espectro de corriente transformador de 2000kVA.	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Sistema de tareas.	6
Tabla 3.1. Comparación entre las cuatro formas del análisis de Fourier [11].	11
Tabla 3.2. Efectos en los equipos eléctricos [14].	12
Tabla 3.3. Fenómenos Afectados por los armónicos [18].	14
Tabla 3.4 Tipos de filtros.	18
Tabla 3.5. Factor K normalizados [25].	22
Tabla 3.6. Ecuaciones Puntuales sobre Puesta a Tierra y Calidad de Energía	26
Tabla 5.1. Tipos de servicios de la Línea de Producción de MDF.	51
Tabla 5.2. Cargas conectadas al transformador Padmounted 1500kVA.	52
Tabla 5.3. Fecha de instalación del analizador de red y promedio de voltaje en el Transformador Padmouted de 1500 kVA (Medición 1 y Medición 2).	54
Tabla 5.4. Diferencia de los promedios entre los dos analizadores de red Fluke 435 vs Fluke 1750.	54
Tabla 5.5. Niveles de voltaje Fase-Neutro 254 [v] del Transformador Padmouted de 1500[kVA].	56
Tabla 5.6. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.	56
Tabla 5.7. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.	57
Tabla 5.8. Desequilibrio de corriente del Transformador 1500 kVA.	58
Tabla 5.9. Porcentaje de desbalance potencia activa cada una de las fases, Transformador 1500 kVA.	58
Tabla 5.10. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.	59
Tabla 5.11. Resumen de THD en las mediciones de bajo voltaje.	60
Tabla 5.12. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.	60
Tabla 5.13. Resumen de los armónicos de corriente presentes en cada una de las mediciones.	61
Tabla 5.14. Detalle de los armónicos de corriente en el Sistema Eléctrico de MDF.	61
Tabla 5.15. Medidas resistencia tomadas en la línea de producción de MDF.	62
Tabla 5.16. Distorsión armónica de corriente en carga 5 Prensas.	71
Tabla 5.17. Valor de potencia P, S y factor de potencia del flujo de carga.	72
Tabla 5.18. Tipo de filtros pasivos sintonizados individualmente.	73

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”.

Autores:

Gavilanez Guanoluisa Aracely Nataly

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal la mejora de la calidad de la energía en el sector industrial, a través de la implementación de soluciones técnicas y normativas. La calidad de la energía es un aspecto fundamental que influye directamente en la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones industriales. Desde los años 80, ha habido un incremento en la preocupación por garantizar la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas eléctricos debido a la creciente complejidad de las cargas no lineales y las distorsiones armónicas. En este contexto, se realizó un análisis exhaustivo de calidad de energía en la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., conforme a la normativa ecuatoriana ARCENNR 002/20. Este proceso incluyó la recolección minuciosa de datos en diferentes puntos críticos del sistema, lo que permitió actualizar los diagramas unifilares en AutoCAD y evaluar las medidas del sistema de puesta a tierra.

Posteriormente, se analizaron los datos obtenidos, realizando los cálculos correspondientes para evaluar la distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, el factor de potencia, y los desequilibrios de voltaje y corriente. Estos datos se integraron en un modelo en ETAP, donde se simularon los armónicos presentes y se llevaron a cabo flujos de potencia utilizando los resultados obtenidos.

A partir de estos análisis, se plantearon diferentes escenarios de corrección de armónicos, considerando tanto la viabilidad técnica como los costos asociados. Se propusieron soluciones que incluyeron la implementación de filtros armónicos, y se evaluaron las repercusiones técnicas y económicas de estas alternativas, todo en conformidad con la normativa ARCENNR 002/20, garantizando el cumplimiento de los estándares nacionales de calidad de energía.

Palabras Clave: Calidad de la Energía, Cargas No Lineales, Armónicos, Filtros Armónicos.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED FACULTY

TITLE: “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”.

Authors:

Gavilanez Guanoluisa Aracely Nataly

ABSTRACT

The main objective of this research is to improve energy quality in the industrial sector by implementing technical and regulatory solutions. Power quality is a fundamental aspect that directly influences industrial operations' efficiency, safety, and sustainability. Since the 1980s, there has been an increased concern for ensuring electrical system reliability and performance due to the growing complexity of nonlinear loads and harmonic distortions. In this context, a comprehensive power quality analysis was carried out in the MDF production line of the company Aglomerados Cotopaxi S.A., according to the Ecuadorian standard ARCENNR 002/20. This process included detailed data collection at different critical points of the system, which allowed for updating the single-line diagrams in AutoCAD and evaluating the measurements of the grounding system.

Afterward, the data obtained were analyzed, and the corresponding calculations were performed to evaluate the harmonic distortion of both voltage and current, the power factor, and the voltage and current unbalance. These data were integrated into a model in ETAP, where the harmonics present were simulated, and power flows were carried out using the results obtained.

Different harmonic correction scenarios were proposed based on these analyses, considering both technical feasibility and associated costs. Solutions that included the implementation of harmonic filters were proposed, and the technical and economic repercussions of these alternatives were evaluated, all in compliance with ARCENNR 002/20 regulations, ensuring compliance with national power quality standards.

Keywords: Power Quality, Nonlinear Loads, Harmonics, Harmonic Filters.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del Proyecto: Estudio de la calidad de energía en la línea de producción de MDF en la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Ingeniería en Electricidad

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto Desarrolló de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo:

Estudiante: Gavilanez Guanoluisa Aracely Nataly

Tutor: Ing. Gabriel Pesántez M.Sc.

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento y la competitividad del sector industrial, que representa una gran parte del consumo energético mundial, dependen de la calidad de la energía. Sin embargo, este sector se enfrenta a una serie de desafíos relacionados con la calidad de la energía, los cuales tienen un impacto en su eficiencia, seguridad y sostenibilidad. Por lo tanto, es fundamental implementar soluciones técnicas y normativas que garanticen una calidad de energía óptima, mejore la eficiencia energética y reduzca la huella ambiental [1].

La importancia de la calidad de la energía eléctrica ha aumentado desde los años 80, impulsada por la necesidad mundial de garantizar la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas de energía eléctrica. Mantener una disponibilidad de energía de al menos el 99.998% en un entorno industrial es crucial para evitar pérdidas financieras y daños a los equipos. Los fabricantes de equipos eléctricos determinan la calidad de la energía utilizando características de tensión y corriente para garantizar que los dispositivos funcionen sin interferencias ni perturbaciones. Normas internacionales, como el estándar IEC 61000-4-30 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y la IEEE 1159, establecen los criterios y métodos para medir y controlar la calidad de la energía eléctrica en puntos específicos del sistema [1].

Dado que influye en la eficiencia, productividad y rentabilidad de los procesos, la calidad de la energía eléctrica es esencial para el funcionamiento eficiente de las industrias. La continuidad del servicio, la frecuencia, la duración de los cortes de suministro y las características de la forma de onda de tensión y corriente son factores importantes para evaluar la calidad de la energía eléctrica en un punto específico de una red eléctrica. Estas pueden verse afectadas por cargas no lineales, como equipos electrónicos y convertidores de potencia, que producen distorsiones armónicas, lo que deteriora la calidad de la energía y puede causar pérdidas, daños y fallas en equipos y sistemas eléctricos [2].

Los problemas en una red eléctrica pueden incluir sobrecargas en la red, fallas en la maquinaria, ruido y vibraciones, daños en motores eléctricos y fallas en transformadores que operan con cargas reducidas. Un análisis descriptivo del sistema eléctrico, adquisición de datos con un analizador de red trifásica y diagnóstico exhaustivo para evaluar la calidad de la energía son todos componentes del enfoque metodológico. El estudio confirma que cualquier cambio

en el suministro de energía puede causar problemas en los equipos de la empresa, como sobretensiones, disminuciones de tensión y transitorios [3].

En un estudio realizado en la corporación ecuatoriana de aluminio CEDAL S.A. la cual contaba con problemas en la operatividad por distintas fallas eléctricas, además se identificó que la planta carecía de un análisis de calidad de energía eléctrica en el área de extrusión zona en la cual se encontraban la mayoría de las fallas. La investigación presentó soluciones a los problemas de calidad de energía mediante el cálculo de filtros de acuerdo con la normativa IEEE 519-2014 para resolver las perturbaciones eléctricas en los transformadores [4].

En la finca la cordillera en Cantón Mejía en Ecuador se realizó un análisis de calidad de la energía donde se utilizó un analizador de redes FLUKE 435 II, que cumplió con la normativa ARCERNNR 002/20 y las normas internacionales IEEE 1159 e IEEE 519. En este estudio se plantearon soluciones a través de simulaciones en el software ETAP 20.0.0 para mejorar la seguridad y la calidad de energía del sistema eléctrico para evitar los efectos negativos en la economía de la empresa. La simulación mostró que, durante las horas de trabajo normales, el transformador de 100 KVA presentaba perturbaciones eléctricas significativas, con una distorsión total de la demanda (TDD) promedio del 29,11% y un bajo factor de potencia promedio de 0,81. Los autores detectaron armónicos de corriente que excedían los límites reglamentarios, así como la falta de un sistema de puesta a tierra adecuado. Se recomendó la instalación de un filtro pasivo de tercer orden para mitigar los armónicos de corriente y corregir el factor de potencia, así como la creación de un sistema completo de puesta a tierra [5].

La calidad de la energía se ha vuelto esencial en la industria moderna para garantizar operaciones eficientes y confiables. La proliferación de sistemas altamente automatizados y tecnológicamente complejos ha aumentado su exposición a problemas de calidad de energía como fluctuaciones de voltaje, interrupciones transitorias y armónicos. Las normas internacionales, como la IEEE 519 y la IEC 61000, promueven la eficiencia operativa, la vida útil prolongada de los equipos y la seguridad laboral al abordar estos problemas y garantizar una calidad de energía óptima en las instalaciones industriales [6].

2.1 Situación problemática

La empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. son líderes en la construcción de plantaciones forestales para uso industrial. La empresa fabrica y vende tableros de madera como Fibraplac, Moldupaxi y Duraplac utilizando los productos de la cosecha forestal. Los tableros de fibra de densidad media (MDF) son uno de sus productos más conocidos.

Sin embargo, la deficiente calidad de la energía causa problemas importantes en el sistema eléctrico. Los armónicos, las fallas en equipos sensibles, las sobrecargas en la red eléctrica, el sobrecalentamiento de la maquinaria, las vibraciones, el ruido, el daño en los motores y las fallas en los transformadores son algunos de estos problemas. Estos problemas pueden reducir la eficiencia de la producción y, por lo tanto, la rentabilidad de la fábrica.

En los últimos seis años, Aglomerados Cotopaxi S.A. ha enfrentado un desafío significativo en cuanto a la calidad de la energía que recibe y consume. Un caso notable es la variación en el factor de potencia, que ha causado pérdidas significativas en el punto de suministro para la empresa. La empresa ha tenido que recurrir a equipos adicionales de alto costo para mejorar esta situación. Sin embargo, la calidad de la energía en esta empresa se ha visto afectada constantemente, y este estudio busca identificar las causas.

2.2 Formulación del problema

El problema con la línea de producción de MDF en la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. radica en que la red eléctrica de la planta ha experimentado interrupciones y fallas frecuentes, lo que ha ocasionado una disminución en la productividad y considerables pérdidas económicas.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación

Calidad de Energía Eléctrica en la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.

2.3.2 Campo de Acción

330000 Ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05
Aplicaciones Eléctricas

2.4 BENEFICIARIOS

Beneficiarios directos: Aglomerados Cotopaxi S.A.

Beneficiarios indirectos: Empresas industriales privadas y públicas.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La línea de producción de tableros de MDF de Aglomerados Cotopaxi S.A. emplea una amplia gama de maquinaria y equipos eléctricos sensibles a las perturbaciones eléctricas de la red. Problemas como el sobrecalentamiento de motores, un cambio notable en el factor de potencia, variaciones en la frecuencia, daños en equipos y armónicos pueden reducir significativamente la eficiencia operativa y aumentar los costos de mantenimiento y operación. Por tanto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de la calidad de la energía en esta línea de producción, ya que se ha identificado como la más problemática dentro de la empresa.

Para asegurar una operación eficiente y minimizar los costos, es necesario cumplir con normativas locales como la ARCERNNR 002/20 [33]. Estas regulaciones establecen límites aceptables para la calidad del servicio eléctrico, incluyendo la distorsión de voltaje y corriente, y los índices que rigen el entorno industrial. Mejorar la calidad de la energía no solo es crucial para mantener la continuidad y la confiabilidad de la producción, sino que también contribuye a la sostenibilidad y competitividad de la empresa en el mercado [7].

En consecuencia, este estudio, al identificar y proponer soluciones a los problemas de calidad de energía, proporcionará beneficios directos a Aglomerados Cotopaxi S.A., mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos asociados a las interrupciones y daños en los equipos. Además, generará beneficios indirectos para otras empresas industriales, tanto públicas como privadas, al servir como referencia y guía para la implementación de mejoras en la calidad de la energía.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

Realizar un análisis sobre la calidad de la energía eléctrica en la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., mediante medición y simulación, con el fin de identificar problemas en la red eléctrica.

2.6.2 Específicos

- Revisar la información bibliográfica relacionada con la calidad de energía en la industria, enfocándose en normativas nacionales e internacionales relevantes.
- Realizar un levantamiento del diagrama unifilar de la línea de producción de MDF en Aglomerados Cotopaxi S.A
- Desarrollar una simulación del sistema eléctrico correspondiente a la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.
- Analizar el comportamiento del sistema simulado comparado con los datos del levantamiento.

2.7 SISTEMA DE TAREAS

Un esquema detallado de las actividades necesarias para alcanzar los objetivos específicos del proyecto se presenta en la Tabla 2.1. En esta tabla se enumeran las tareas a realizar, los resultados esperados y las herramientas e instrumentos requeridos para cada objetivo. Para proponer soluciones viables a los problemas identificados, estas actividades incluyen la revisión de la literatura sobre calidad de energía, la creación y análisis del diagrama unifilar de la línea de producción de MDF, la simulación del sistema eléctrico y el análisis de su comportamiento, utilizando herramientas como analizadores de red y software especializado.

Tabla 2.1. Sistema de tareas.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, medios e instrumentos
Revisar información bibliográfica relacionada con la calidad de energía en la industria, enfocándose en normativas nacionales e internacionales relevantes.	Revisión bibliográfica referente a la calidad de energía en un sistema eléctrico en la industria.	Información relacionada con calidad de energía en la industria.	Investigación relacionada al tema basada en artículos científicos, normativas, libros y tesis de pregrado y posgrado.
	Investigación de normativas nacionales e internacionales relacionadas con calidad de energía.	Base de indicadores, documentos, Papers relacionados con normativa de calidad de energía	Recopilación de Normativas, Papers y Tesis que apliquen estas mismas.
Realizar un levantamiento del diagrama unifilar de la línea de producción de MDF en Aglomerados Cotopaxi S. A	Instalación de un analizador de red en un intervalo de tiempo en la línea de producción de MDF, para extraer el estado general.	Base de datos con la información del análisis	Editor de texto, Programa para el manejo de bases de datos.
	Análisis de calidad de energía con los datos obtenidos por el analizador de red y comparándolo con normativa.		Fluke 1570 Fluke 435-II

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, medios e instrumentos
Desarrollar una simulación del sistema eléctrico correspondiente a la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.	Levantamiento de información referente a las características de los equipos.	Simulación del sistema eléctrico en software especializado	Software para solución de Flujos de Potencia, armónicos, etc.
	Simulación del sistema eléctrico.		
Analizar el comportamiento del sistema simulado y plantear soluciones acordes a los problemas encontrados.	Elaboración de un análisis comprendiendo las partes más problemáticas, proponiendo soluciones viables en el apartado económico.	Simulaciones de diferentes casos de estudio, planteando posibles soluciones.	Investigación cuantitativa, recopilación de normativas para el diseño de soluciones, catálogos de equipos.

3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO

En este capítulo se analizan los principios esenciales del análisis de la calidad de la energía, respaldados por una revisión detallada de bibliografía especializada, artículos científicos y documentos técnicos relevantes para la investigación. Se exploran los conceptos básicos de la calidad de la energía, los factores que la afectan y los métodos disponibles para su mejora.

3.1 CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La calidad de la energía eléctrica se refiere al suministro de energía a equipos y dispositivos bajo condiciones que aseguren su operación continua, sin comprometer su rendimiento ni causar fallos en sus componentes. Esto abarca la regulación de parámetros como el nivel de tensión, la forma de la onda, la presencia de armónicos, la distorsión armónica total y la estabilidad de la frecuencia, entre otros [1].

3.2 PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

Los cambios en los parámetros eléctricos, como la tensión, la corriente y la potencia, pueden causar anomalías o fallos en el funcionamiento de los equipos. Estas alteraciones, son conocidas como "perturbaciones eléctricas", en la Figura 3.1 se muestra la clasificación de las perturbaciones. Los dispositivos eléctricos que emplean componentes electrónicos de potencia suelen ser fuentes de estas irregularidades, las cuales pueden dañar equipos sensibles o de baja potencia, como los dispositivos de control [8]. En la Tabla 1 del Anexo A, se ofrece un resumen de los principales tipos de perturbaciones, junto con sus causas y efectos.

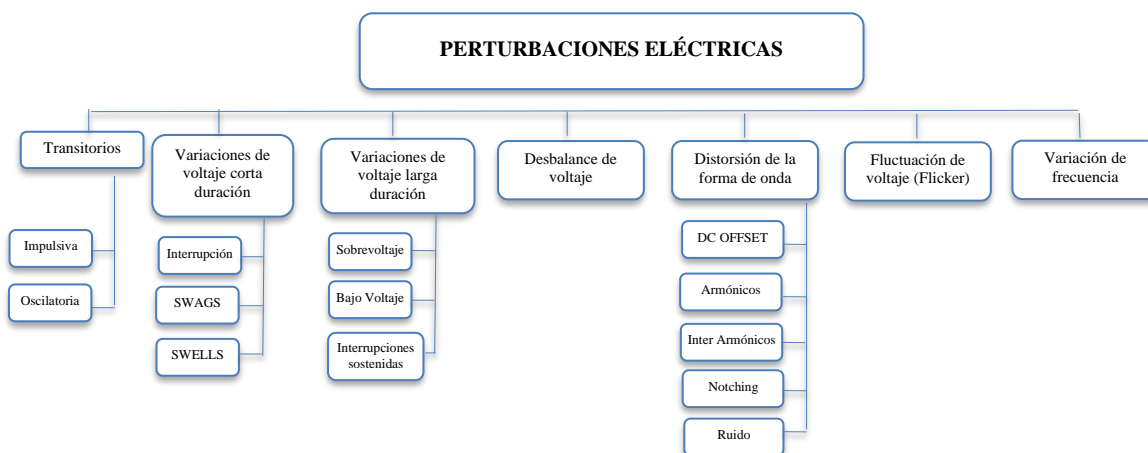


Figura 3.1. Clasificación de perturbaciones [9].

3.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Las transformadas de Fourier y de Wavelet son dos herramientas matemáticas fundamentales para el análisis y procesamiento de señales en los dominios del tiempo y la frecuencia. Cada una presenta ventajas y desventajas, dependiendo del tipo de aplicación y el objetivo específico que se persiga. La transformada de Fourier es especialmente útil para el análisis de señales estacionarias, es decir, aquellas que permanecen relativamente constantes a lo largo del tiempo. En contraste, la transformada de Wavelet es más adecuada para señales no estacionarias, que muestran cambios abruptos o transitorios. Esta última ofrece una resolución temporal y frecuencial superior, lo que la hace particularmente flexible y precisa para capturar los detalles de las señales. La transformada de Wavelet utiliza funciones denominadas wavelets, que son similares a las sinusoides empleadas en la transformada de Fourier, pero con una duración finita y un soporte compacto [9].

3.3.1 Análisis de Fourier

El análisis de Series de Fourier (S.F.) es una herramienta matemática que permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia. Esto es útil para estudiar el comportamiento de las señales en diferentes dominios, como el tiempo, la frecuencia o el espacio. La S.F. se puede aplicar a señales continuas o discretas, y existen diferentes tipos de transformadas de Fourier según el caso. La Serie de Fourier se emplea en el análisis de señales periódicas y continuas, mientras que la Transformada de Fourier se utiliza para analizar señales continuas, pero no periódicas [9]. Como se muestra en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4):

$$y(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos(h\omega t) + b_k \sin(h\omega t)) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \quad (2)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(h\omega t) dt \quad (3)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(h\omega t) dt \quad (4)$$

Donde:

- $y(t)$: La señal periódica original en el dominio del tiempo.
- a_0 : El término de la componente continua o promedio de la señal.
- $\sum_{h=1}^{\infty}$: La sumatoria infinita de las componentes armónicas.
- a_h : Los coeficientes de Fourier correspondientes a las componentes cosenoidales.
- $\cos(h\omega t)$: Las funciones cosenoidales con frecuencia $(h\omega t)$.
- b_k : Los coeficientes de Fourier correspondientes a las componentes senoides.
- $\sin(h\omega t)$: Las funciones senoides con frecuencia $(h\omega t)$.
- h : El índice de los armónicos, un número entero que indica los múltiplos de la frecuencia fundamental.
- ω : La frecuencia angular fundamental de la señal, relacionada con el período T por $\omega=2\pi/T$

En resumen, la Serie de Fourier descompone una señal periódica $y(t)$ en una suma de términos cosenoidales y senoides, cada uno con su propia frecuencia, amplitud y fase, determinada por los coeficientes a_h y b_k . Esto permite analizar y entender las diferentes componentes frecuenciales de la señal original.

3.3.2 La transformada discreta de Fourier

Por otro lado, la Transformada Discreta de Fourier (T.D.F.) se aplica al análisis de señales discretas, es la base de muchos sistemas digitales que procesan señales, como los conversores A/D, los analizadores de redes o los filtros digitales. La T.D.F. convierte una señal discreta en una suma finita de senos y cosenos, lo que facilita su análisis y manipulación [10]. Algunos ejemplos prácticos de la aplicación de la SF son el control de temperatura en cámaras frigoríficas, el estudio de la calidad eléctrica o la compresión de imágenes y sonido como muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Comparación entre las cuatro formas del análisis de Fourier [9].

Propiedad de tiempo	Periódica (t, n)	N periódica (t, n)
Continua (t)	Serie de Fourier (SF)	Transformada de Fourier (TF)
Discreta (n)	Serie de Fourier en tiempo discreto (SFTD)	Transformada de Fourier en tiempo discreto (TFTD)

3.3.3 La transformada Wavelet

La Transformada Wavelet (TW) es una herramienta matemática que permite analizar señales complejas y no estacionarias, como las que se encuentran en muchos campos de la ingeniería y la ciencia. La TW se basa en el uso de una función llamada ondícula, que se puede ajustar en tiempo y frecuencia para extraer la información relevante de la señal. Una de las ondículas más utilizadas es la de Morlet, que tiene la forma de una onda modulada por una envolvente gaussiana [11]. La TW de Morlet se puede aplicar a una señal (t) mediante la ecuación (5).

$$\Psi_{(t)} = e^{i\Omega t} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\theta}\right)^2} \quad (5)$$

Donde:

- $e^{i\Omega t}$: representa la parte oscilatoria de la ondícula. Esta parte describe la componente sinusoidal de la función, donde Ω es la frecuencia angular.
- $e^{\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\theta}\right)^2}$: es la envolvente gaussiana que modula la onda. Esta parte describe cómo la amplitud de la onda disminuye a medida que se aleja del centro, con θ siendo un parámetro que controla el ancho de la envolvente.

En esta fórmula, $e^{i\Omega t}$ representa la parte oscilatoria de la ondícula, mientras que $e^{\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\theta}\right)^2}$ es la envolvente gaussiana que modula la onda, proporcionando la capacidad de ajustar y analizar la señal en diferentes escalas de tiempo y frecuencia.

3.4 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

3.4.1 Efectos producidos por los armónicos

La presencia de armónicos en la red eléctrica puede tener efectos adversos sobre las cargas no lineales o sensibles conectadas al mismo sistema, como los dispositivos electrónicos de baja potencia. Estos efectos dependen de la magnitud de los armónicos y pueden incluir fallas en los equipos y pérdidas económicas [12]. En la Tabla 3.2. se pueden ver algunos de los efectos producidos por los armónicos sobre los equipos eléctricos a corto y largo plazo.

Tabla 3.2. Efectos en los equipos eléctricos [12].

Efectos	
Corto plazo	Largo plazo
<ul style="list-style-type: none">• Los dispositivos de protección pueden activarse de manera inesperada.• Aumento de las pérdidas por efecto Joule, lo que provoca deterioro en los bancos de condensadores debido a la elevación de la temperatura.• Funcionamiento anómalo de las cargas no lineales, especialmente de las cargas sensibles.	<p>Falla de transformadores debido a la saturación de corriente en el entrehierro.</p> <p>Daño en los bancos de condensadores.</p> <p>Efectos de resonancia que pueden llegar a causar la destrucción de los bancos de condensadores.</p>

3.4.2 Efectos de resonancia

En una red sin capacitores, los armónicos de corriente se distribuyen entre las distintas cargas del sistema. Sin embargo, es necesario contar con bancos de capacitores conectados a la red para compensar la potencia reactiva demandada por los componentes inductivos o capacitivos de los equipos eléctricos. Esta compensación se logra ajustando el parámetro conocido como factor de potencia [13].

Existe una correlación significativa entre los armónicos y los bancos de condensadores, donde estos últimos pueden amplificar la magnitud de los armónicos debido a un fenómeno conocido como resonancia. Este fenómeno ocurre en sistemas con cargas que tienen componentes reactivos, tanto capacitivos como inductivos, a través de los cuales fluye una corriente alterna con una frecuencia específica. En este contexto, la componente reactiva se anula cuando la reactancia inductiva y capacitiva se igualan, resultando en un sistema que se comporta como puramente resistivo. En tal estado, la corriente y la tensión en fase, logrando

un factor de potencia unitario $f. d. p = 1$. en la cual se produce este fenómeno se conoce como frecuencia de resonancia f_0 [13].

Para una comprensión más detallada, se recurre a la formulación matemática, como se presenta en las ecuaciones (6) y (7). La Figura 3.2 muestra un circuito RLC en serie, a partir del cual se explica el efecto de resonancia.

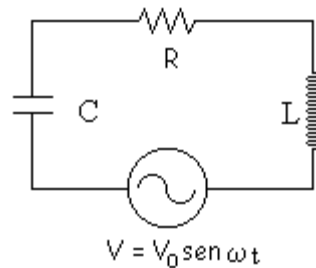


Figura 3.2. Circuito RLC. [13].

Del circuito, se obtiene la impedancia resultante,

$$\bar{Z} = \bar{R} + j\bar{X} = \bar{R} + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (6)$$

Donde:

- \bar{Z} : es la impedancia total del circuito.
- \bar{R} : es la resistencia del circuito.
- j : es la unidad imaginaria.
- \bar{X} : es la reactancia total del circuito, que puede ser capacitiva o inductiva.
- ω : es la frecuencia angular de la señal alterna, definida como $\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia en hertz.
- L : es la inductancia del circuito.
- C : es la capacitancia del circuito.

Al despejar, obtenemos una ecuación que describe la condición de resonancia, como se muestra en la ecuación (7):

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

Donde:

- Siendo f_0 la frecuencia de resonancia.
- 2π : Es una constante que relaciona la frecuencia angular con la frecuencia lineal.

- $2\pi\sqrt{LC}$: Representa el producto de la inductancia (L) y la capacitancia (C) en un circuito RLC.

Durante el fenómeno de resonancia, la admitancia del sistema aumenta, ya que es directamente proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la impedancia. Como resultado, la corriente en el circuito alcanza su valor máximo. Si la corriente contiene armónicos, estos también se verán amplificados [14].

La Figura 3.3 ilustra cómo varía la corriente con respecto a la frecuencia de la fuente de alimentación. En esta gráfica, la resonancia se manifiesta como un pico, indicando la frecuencia específica en la cual el circuito resuena. Este comportamiento es crucial para comprender las propiedades resonantes del sistema y los posibles efectos adversos, como la amplificación de armónicos.

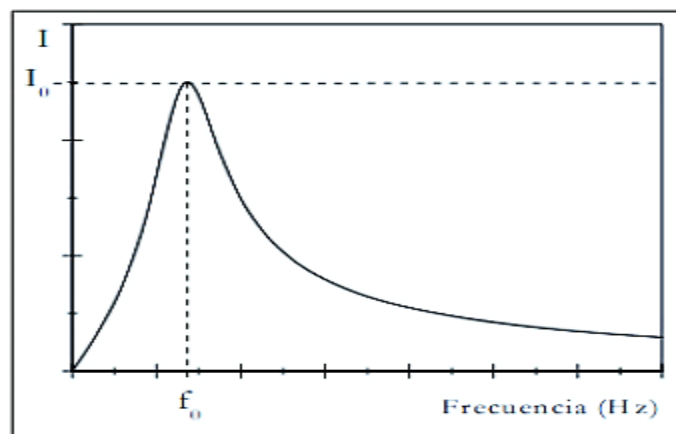


Figura 3.3. Curva corriente – frecuencia y pico de resonancia [15].

3.4.3 Efectos causados por el impacto de los armónicos

En la Tabla 3.3. se presentan diversos fenómenos eléctricos y su relación con los armónicos, destacando el impacto significativo que tienen sobre los sistemas eléctricos. La tabla ilustra cómo estos armónicos pueden influir en la eficiencia, estabilidad y rendimiento general de dichos sistemas, subrayando la importancia de gestionar y mitigar sus efectos para mantener una operación deseada.

Tabla 3.3. Fenómenos Afectados por los armónicos [16], [17].

Fenómeno	Descripción
Activación de protecciones	La mayoría de los equipos cuenta con sistemas de protección que se activan al detectar alteraciones significativas de la corriente, como dispositivos diferenciales, térmicos, magnéticos o magnetotérmicos.

Fenómeno	Descripción
Vibración, ruido y acoplamiento	Las vibraciones en máquinas rotativas pueden ser causadas por desajustes de pernos o sujetadores, o por factores internos relacionados con la electricidad, especialmente las altas frecuencias de los armónicos debido a interferencias electromagnéticas. Estas afectan transformadores, tableros eléctricos y motores eléctricos.
Deterioro de la onda de tensión	Las corrientes armónicas deforman la tensión, alterando la forma de onda de la señal fundamental y reduciendo sus valores pico, fenómeno conocido como achatamiento.
Calentamiento de cables	El aumento de la frecuencia armónica incrementa la corriente en los conductores de corriente alterna, causando sobrecalentamiento en conductores y equipos eléctricos debido al efecto Joule y al efecto skin.

La Figura 3.4. muestra los impactos que pueden experimentar los conductores eléctricos cuando se incrementa la frecuencia de la corriente que los atraviesa. Este incremento provoca el fenómeno del efecto skin, donde la corriente tiende a concentrarse en la superficie del conductor debido a la mayor impedancia a frecuencias más altas. Esto resulta en un aumento significativo de la resistencia y, consecuentemente, del calentamiento por efecto Joule [18].



Figura 3.4. Efectos en conductores según el incremento de la frecuencia [12].

3.5 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN EQUIPOS DE ALTA POTENCIA CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA

En la Tabla 1 del Anexo A, se presenta una clasificación detallada de los efectos de los armónicos sobre diversos equipos de alta potencia conectados a la red eléctrica. Esta tabla aborda específicamente las consecuencias en condensadores de potencia, motores eléctricos, sistemas de protección de potencia, conductores neutros y transformadores. En el caso de los condensadores de potencia, se destaca que la presencia de armónicos amplifica la tensión y la corriente, lo que puede causar problemas como molestias acústicas, sobrecalentamientos, vibraciones, desgaste mecánico y envejecimiento prematuro [18].

Para los motores eléctricos, los armónicos pueden inducir pérdidas adicionales por efecto Joule y causar desgaste en los componentes mecánicos, afectando tanto la eficiencia como la

operación del motor. Los sistemas de protección de potencia, incluidos fusibles y relés, pueden verse comprometidos debido a una capacidad reducida para manejar interrupciones y a la degradación de su funcionamiento por el aumento de temperatura. Los conductores neutros pueden experimentar calentamiento excesivo y degradación bajo la influencia de armónicos, especialmente los de tercer orden, lo que puede llevar a disparos frecuentes de protecciones y sobre corriente [18].

Finalmente, los transformadores enfrentan un aumento en las pérdidas de núcleo y devanados, vibraciones y una disminución en el rendimiento general, lo que compromete su funcionalidad y vida útil. Además, se describe cómo los armónicos afectan el factor de potencia, presentando ecuaciones para su cálculo en presencia de estas distorsiones, proporcionando una base esencial para el análisis y mejora de la eficiencia en sistemas eléctricos de alta potencia [17].

3.6 NORMATIVAS APLICADAS

Las normativas internacionales y nacionales desempeñan un papel crucial en la regulación y control de la calidad de la energía eléctrica. La IEEE [19] junto con la IEC [20] ha establecido estándares rigurosos para el análisis y control de perturbaciones armónicas y otros aspectos de la calidad de potencia. En particular, la norma IEEE 519 [21] "Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia" proporciona directrices específicas para limitar los valores de armónicos permitidos en sistemas eléctricos, asegurando la compatibilidad electromagnética.

La IEC también ha desarrollado normas relevantes, aunque generalmente menos estrictas que las de la IEEE [20], enfocándose en la "Compatibilidad electromagnética". Por otro lado, la normativa nacional ARCENNER 002/20 [33], establece las regulaciones a nivel nacional. De acuerdo [22] considera realizar el análisis de los siguientes parámetros:

- Nivel de voltaje
- Distorsión armónica de corriente
- Perturbación rápida de voltaje (FLIKER)
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrio de voltaje
- Distorsión armónica de corriente

En la Tabla 2 del Anexo A, se presenta una comparación detallada de las principales características de algunas normas vigentes a nivel internacional respecto a la regulación de la calidad de energía. Esta comparación abarca aspectos cruciales como los límites permisibles de distorsión armónica, las metodologías de medición y los criterios de evaluación de la calidad del suministro eléctrico. Así mismo, la Tabla 3, Tabla 4 y la Tabla 5 del mismo anexo detallan los límites específicos para la distorsión armónica de tensión y de corriente, respectivamente, proporcionando una guía esencial para el cumplimiento de los estándares internacionales.

3.7 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN PARA PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA

Para abordar los problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica, la literatura especializada identifica varios enfoques principales. El primer enfoque es la atenuación de perturbaciones armónicas mediante técnicas como la implementación de reactancias de línea, especialmente eficaces para mitigar armónicos impares que afectan a motores eléctricos. Otro método incluye la aplicación de reactancias antimónicas en bancos de condensadores, diseñadas para contrarrestar la presencia de armónicos no deseados.

Adicionalmente, se destaca el uso de filtros pasivos y activos como una solución efectiva para la reducción de armónicos. Los filtros pasivos, ya sean de tipo serie o paralelo, funcionan bloqueando o absorbiendo armónicos específicos, mientras que los filtros activos utilizan tecnología avanzada para eliminar perturbaciones en tiempo real. Estos dispositivos están diseñados para asegurar que tanto la corriente como la tensión que circulan por la red eléctrica sean lo más senoidales posible, mejorando así la estabilidad y eficiencia del sistema [17].

En la Tabla 6 anexa se enumeran y describen algunos de los métodos más comunes para tratar los problemas de calidad de la energía. A continuación, se detalla cada una de estas estrategias, incluyendo los tipos de filtros pasivos y activos, junto con sus aplicaciones más comunes.

3.7.1 Diseño de filtros pasivos

Los filtros pasivos son dispositivos clave en la mitigación de armónicos en sistemas eléctricos. En la Tabla 3.4 se detallan los tipos de filtros pasivos más comunes, así como una breve descripción de su funcionamiento e impacto en la red eléctrica.

Tabla 3.4 Tipos de filtros.

Tipo de Filtro	Funcionamiento
Filtros Pasivos Serie	Detienen la propagación de armónicos particulares hacia otras cargas o el sistema de potencia mediante un circuito LC que crea una alta impedancia sintonizada a una frecuencia específica. Permiten que solo los armónicos deseados circulen entre la carga y el filtro.
Filtros Pasivos Paralelo	Actúan como una baja impedancia para los armónicos que se desean filtrar, comportándose como un sumidero. Son eficaces y económicos, transportando solo las frecuencias deseadas y suministrando la potencia reactiva requerida.

En un filtro, la parte capacitiva está relacionada con los $kVAr$ del filtro, mientras que la parte inductiva crea una resonancia en serie con el capacitor a la frecuencia de ajuste, proporcionando así una baja impedancia para el armónico que se desea filtrar [23].

Asimismo, para la sintonización de los filtros, se consideran tanto la potencia reactiva como la potencia capacitiva, con el objetivo de reducir los armónicos significativos. Las ecuaciones relevantes son:

Reactancia del Filtro en la ecuación (8):

$$X_{filtro} = \frac{(V_{nominal})^2}{Q_c(VAr)} \quad (8)$$

$$Donde Q_c = P \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

Reactancia Capacitiva en la ecuación (9) y la ecuación (10):

$$X_{cap} = h^2 \cdot X_L \quad (9)$$

$$X_{cap} = \frac{h^2}{h^2 - 1} X_{filtro} \quad (10)$$

Valor del capacitor (C_{farad}) en la ecuación (11):

$$C_{farad} = \frac{1}{\omega X_{cap}} \quad (11)$$

Inductancia del filtro en la ecuación (12) y (13):

$$X_L = \frac{X_{cap}}{h^2}, por tanto L_{henrios} = \frac{X_{henrios}}{\omega} \quad (12)$$

$$Z = R + j \left(L_{henrios} \omega - \frac{1}{C_{farad} \omega} \right) \quad (13)$$

Factor de calidad en la ecuación (14):

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (14)$$

Donde:

- Q_C : Potencia reactiva que el filtro suministrara
- $V_{nominal}$: Tensión nominal
- X_{cap} : Reactancia capacitiva del filtro
- X_L : Reactancia inductiva del filtro
- X_{filtro} : Reactancia del filtro
- C_{farad} : Capacitor (uf)
- $L_{henrios}$: Inductor (Hr)
- $\omega = 2\pi f$: frecuencia angular

Según la normativa IEEE 519 [20], se establece que las cargas eléctricas deben operar normalmente con una probabilidad del 95 % del valor máximo de armónicos permitidos. Por lo tanto, se recomienda que el factor de calidad sea lo más alto posible, idealmente entre 70 y 80, para asegurar un funcionamiento adecuado incluso cuando los contenidos de armónicos superen los valores límite durante períodos breves, sin riesgo de daños para las cargas eléctricas.

3.7.2 Diseño de Filtros Activos

Los filtros activos, también conocidos como “Acondicionadores activos de líneas de potencia” (A.P.L.C.), tienen como principal objetivo la reducción de los armónicos en los sistemas eléctricos. Estos dispositivos están diseñados para asegurar que tanto la corriente como la tensión que circulan por la red sean lo más senoidales posible, mejorando así la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Los filtros activos emplean diversas topologías, dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación [24].

La Figura 3.5 muestra cómo las cargas no lineales conectadas a la red generan formas de onda de tensión y corriente que no son ondas senoidales perfectas. Esta formad de onda aplicada

a una red con impedancia no nula, produce una distorsión en la forma de la tensión en los puntos de conexión de los equipos a la red [24].

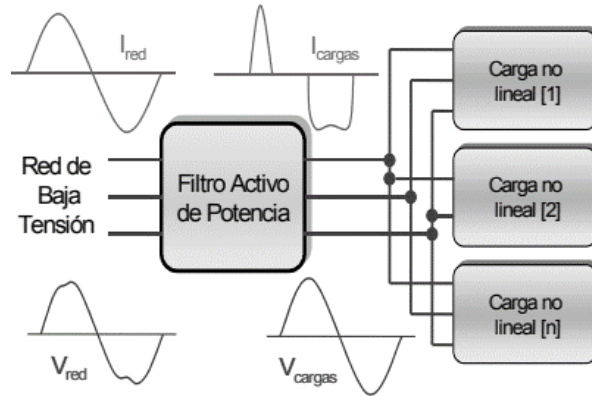


Figura 3.5. Filtro activo de potencia [24].

Los componentes principales de un filtro activo incluyen un inversor de tensión (VSI), un elemento de almacenamiento de energía (generalmente un condensador), circuitos de medición de tensiones y corrientes, y un circuito de control. Este último se encarga de la obtención de consignas, el control y la generación de las señales moduladas que actúan sobre el convertidor. Además, el filtro activo puede contar con transformadores y bobinas para su conexión a la red. La Figura 3.6 presenta la estructura simplificada en bloques de un filtro activo de potencia [24].

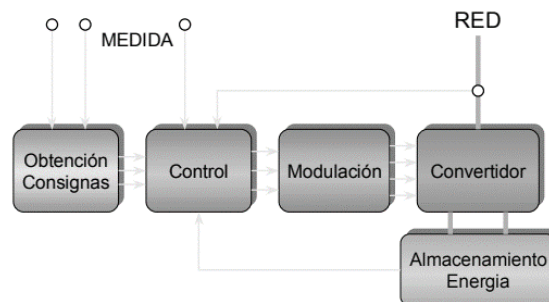


Figura 3.6. Diagrama de bloques de un filtro activo de potencia [24].

El control de los filtros activos en paralelo se estructura en torno a componentes clave como sensores de corriente para medir las entradas al filtro, un circuito de control típicamente PI o P, y un modulador PWM. Estos elementos trabajan en conjunto para gestionar los armónicos de corriente detectados. Es fundamental que la tensión del bus del inversor sea siempre mayor que la de la red eléctrica; para asegurar esta condición, se ajusta la consigna de corriente utilizando la tensión del bus [24].

La meta es permitir que el filtro activo absorba y elimine los armónicos no deseados, almacenando la energía necesaria en un condensador para mantener su tensión por encima del máximo de la red en todo momento. Algunos modelos de filtros activos utilizan un control de corriente basado en bandas de histéresis, ofreciendo simplicidad y rápida respuesta, aunque con la limitación de una frecuencia de conmutación del inversor variable [24].

En la Tabla 7 del anexo A, se proporciona un resumen de los distintos tipos y aplicaciones más comunes de los filtros activos.

La Figura 3.7 muestra una solución avanzada que combina diversas técnicas para mejorar la calidad de la energía eléctrica. En este caso, se utiliza un P.L.L. (Phase-Locked Loop) para la sincronización en la teoría de la potencia instantánea. El PLL es un sistema de control que mantiene la fase de una señal de referencia en sincronización con otra señal de entrada.

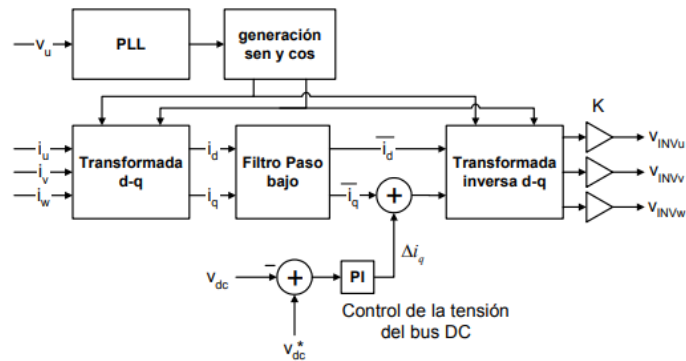


Figura 3.7. Consignas y control para un filtro activo de potencia [12].

3.7.3 Cálculo Del Factor K Del Transformador

En dispositivos como los convertidores de frecuencia variable, los armónicos generados típicamente suelen ser de orden 5, 7, 11 y 13. Por otro lado, en equipos como conmutadores de fuentes de alimentación, los armónicos más comunes son de orden 3. Estos armónicos pueden provocar un calentamiento excesivo en los transformadores, especialmente cuando sus amplitudes superan significativamente el valor de la componente fundamental de corriente [25].

Para calcular el factor K, es esencial conocer la magnitud de las componentes armónicas presentes en el sistema eléctrico. La ecuación (15) muestra nos indica el cálculo de este parámetro:

$$k = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (15)$$

Donde:

- $\frac{I_h}{I_s}$: Distorsión individual
- h : número del armónico

Para garantizar una adecuada elección del factor K en diversas instalaciones, ya sean industriales, en edificaciones u otras aplicaciones, se recomienda comenzar con la medición de los parámetros eléctricos relevantes. Con base en los resultados, se realiza el cálculo correspondiente y se procede a la selección del transformador. En la etapa de diseño, es fundamental evaluar las cargas potenciales que se instalarán, considerando también proyecciones para posibles aumentos futuros de carga. Es importante destacar que:

- $K_{carga} < K_{transformador}$
- $K_{carga} = 3.1,$
- $K_{transformador} = 4$

Al calcular el factor K de un transformador para evaluar su capacidad frente a distorsiones armónicas, es crucial considerar todos los armónicos presentes en el sistema eléctrico. Esto asegura una evaluación precisa de cómo estos armónicos afectan al transformador, evitando sobredimensionamientos que podrían resultar en costos innecesarios. De este modo, se garantiza que el transformador seleccionado pueda manejar eficientemente las distorsiones armónicas, manteniendo su vida útil y asegurando una operación eficiente a largo plazo [25]. La Tabla 3.5 muestra los valores más comunes establecidos por normativas para el factor K en transformadores.

Tabla 3.5. Factor K normalizados [25].

Categoría
K-04
K-09
K-13
K-20
K-30
K-40

3.7.4 Método de reconexión de cargas

Este método implica la desconexión de cargas que se consideran generadoras de armónicos significativos en la red eléctrica. El procedimiento es el siguiente: en primer lugar, se desconecta la carga y se realizan las mediciones correspondientes para evaluar la magnitud de los armónicos. Con base en los datos obtenidos, se pueden extraer conclusiones preliminares que, en algunos casos, pueden hacer innecesaria una segunda medición. De lo contrario, se reconecta la carga a la red y se efectúa una segunda medición en el mismo punto evaluado para reevaluar la magnitud de los armónicos. La comparación de estos dos conjuntos de resultados permite obtener una respuesta más precisa sobre la influencia de la carga en la generación de armónicos [12].

La expresión matemática del circuito con la carga desconectada se utiliza para determinar la magnitud de la tensión armónica, representada por la ecuación (16):

$$V_{h0} = Z_s I_{h0} \quad (16)$$

En la Figura 3.8 se puede observar la forma de onda resultante con la superposición de la onda armónica.

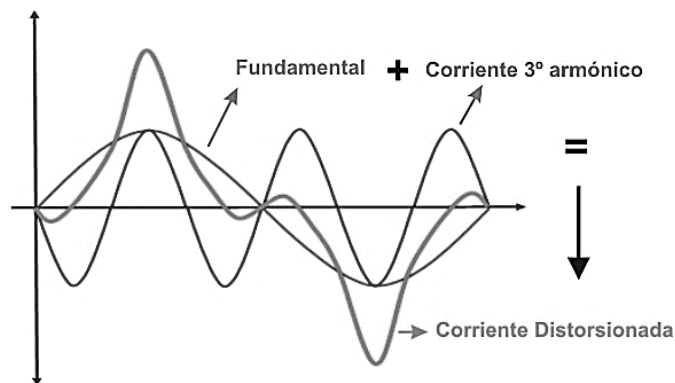


Figura 3.8. Superposición de armónicos de tensión y corriente de orden 3 [26].

Cuando el circuito tiene la carga conectada, la tensión armónica se calcula mediante la siguiente ecuación (17):

$$V_{hc} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} I_{hc} = V_h - \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} V_{h0} \quad (17)$$

Donde:

- V_{h0} : Tensión armónica de la fuente (V).
- V_h : Tensión armónica total de la fuente (V).
- V_{hc} : Tensión armónica de la carga (V).
- I_{hc} : Corriente armónica en la carga (A).
- Z_s : Impedancia de la fuente (Ω).
- Z_c : Impedancia de la carga (Ω).

Es importante considerar que las mediciones realizadas son momentáneas y pueden variar con los cambios en las cargas conectadas a la red. Además, la precisión de las mediciones depende del conocimiento exacto de las impedancias Z_s y Z_c , excepto en situaciones donde $|Z_s| \ll |Z_c|$ [26], lo cual se expresa mediante la ecuación (18):

$$V_h \cong V_h - V_{h0} \quad (18)$$

3.7.5 Método de superposición de THDv y THDi

Este método consiste en analizar las señales de tensión y corriente armónica, conocidas como THDv (distorsión armónica total en voltaje) y THDi (distorsión armónica total en corriente), durante un intervalo de tiempo conforme a las normativas vigentes [27]. La aplicación de este método es sencilla y se basa en la superposición de gráficas de ambas señales. Si las dos señales presentan similitudes, se puede concluir que la carga está generando una perturbación armónica significativa.

Esto se explica porque, según la ley de Ohm, como lo menciona la ecuación (19), la tensión y la corriente son directamente proporcionales. Por lo tanto, la relación estrecha entre la tensión y la corriente armónica indica que la carga está contribuyendo de manera considerable a las distorsiones armónicas [28].

$$V_h = I_h * R_h \quad (19)$$

Donde:

- V_h : Tensión armónica.
- I_h : Corriente armónica.
- R_h : Impedancia armónica.

3.8 PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y CONSIDERACIONES SOBRE CALIDAD DE ENERGÍA.

Los Sistemas de Puesta a Tierra (S.P.T.) son cruciales para garantizar la seguridad y la integridad de las instalaciones eléctricas. Estos sistemas proporcionan un camino de baja resistencia para la corriente eléctrica en caso de una falla, lo que ayuda a proteger tanto a las personas como a los equipos contra descargas eléctricas peligrosas. Además, los S.P.T. son fundamentales para controlar las sobretensiones y descargas atmosféricas, minimizando así el riesgo de daños en los componentes eléctricos. Existen varios tipos de sistemas de puesta a tierra, incluidos los sistemas funcionales, de protección y combinados, cada uno diseñado para satisfacer necesidades específicas según el entorno y los requisitos de la instalación. Implementar un S.P.T. adecuado no solo mejora la calidad de la energía al reducir las interferencias electromagnéticas y asegurar la estabilidad de la tensión, sino que también contribuye significativamente a la longevidad y rendimiento confiable de los equipos electrónicos [29].

3.8.1 Verificación de Medición de Sistemas de Puesta a Tierra

Una conexión a tierra adecuada es esencial para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del sistema eléctrico. Esta conexión debe cumplir con tres requisitos fundamentales:

- **Ruta de Baja Impedancia:** Proporcionar un camino de baja impedancia para el retorno de la corriente de falla, permitiendo que el protector contra sobretensiones actúe rápidamente y elimine la falla.
- **Diferencia de Potencial Baja:** Mantener una diferencia de potencial baja entre las partes metálicas expuestas para prevenir riesgos a las personas.
- **Control de Sobretensión:** Controlar las sobretensiones para proteger los equipos y sistemas.

Además, los dispositivos y sistemas electrónicos varían significativamente en su inmunidad a interferencias y transitorios tal como se indica en [29]. Algunas configuraciones de sistemas de procesamiento electrónico presentan desafíos para ser correctamente conectadas a tierra en instalaciones típicas de fábricas u oficinas. En tales casos, es fundamental prestar especial atención a los detalles de la conexión a tierra. La Tabla 3.6 muestra las ecuaciones puntuales relacionadas con la puesta a tierra y la calidad de energía eléctrica, proporcionando una referencia clara para el diseño y evaluación de estos sistemas.

Tabla 3.6. Ecuaciones Puntuales sobre Puesta a Tierra y Calidad de Energía [30]

Concepto	Ecuación	Descripción
Resistencia de Tierra (R)	$R = \rho L/A$	Resistencia de un conductor en función de su resistividad (ρ) longitud (L) y área (A).
Impedancia de Tierra (Z)	$Z = R + j\omega L$	Impedancia que incluye resistencia (R) e inductancia (ωL).
Tensión de Línea	$V_L = \sqrt{3} * V_P$	Tensión de Fase y línea en sistemas trifásicos
Tensión de Paso V_p	$V_p = I * \rho \left(\frac{1}{2\pi d_1} - \frac{1}{2\pi d_2} \right)$	Diferencia de potencial en el suelo en función de las distancias d_1 y d_2 .

4. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo en la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., la cual cuenta con una potencia instalada de 7,3 MW. El proceso metodológico comenzó con el levantamiento exhaustivo de información, que incluyó la actualización del diagrama unifilar de la empresa y la recopilación de datos sobre la infraestructura eléctrica existente, las características de los equipos y la distribución de cargas.

Una vez recopilada la información inicial, se procedió a la instalación de los equipos de medición en puntos estratégicos del sistema eléctrico, siguiendo las directrices establecidas en la normativa IEEE Std 1159 y la normativa ecuatoriana ARCENNR 002/20 [33]. Los analizadores de calidad de energía se ubicaron en puntos críticos, como la salida del transformador de 1500 kVA, la entrada del variador del Motor Ventilador Secadero, el Caldero Benecke, el transformador Padmounted de 1000 kVA, la Línea de Recubrimiento del transformador Padmounted de 1500 kVA, el transformador de 2000 kVA y la salida a la Subestación Lasso, de acuerdo con las recomendaciones de la IEEE Std 519.

Además, se realizaron mediciones detalladas del sistema de puesta a tierra, tanto en los puntos de conexión de las mesas de trabajo como en las puestas a tierra individuales de los transformadores. A partir de los datos recolectados, se establecieron parámetros clave para el análisis de la calidad de energía, tales como niveles de tensión, corriente, factor de potencia, distorsión armónica total (THD) y variaciones de voltaje (sags y swells).

Finalmente, con el uso de software especializado, se realizaron simulaciones para analizar el comportamiento del sistema eléctrico y se propusieron soluciones como la implementación filtros pasivo y activo y un banco de capacitores para mejorar la calidad de la energía en la línea de producción. La metodología empleada busca garantizar que el sistema eléctrico cumpla con las normativas vigentes, incluyendo la normativa ecuatoriana ARCENNR 002/20, y funcione de manera eficiente y confiable.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

El objetivo de este proyecto es evaluar la calidad de la energía eléctrica en la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. Para ello, se propone una metodología estructurada en varias etapas clave. La primera etapa consiste en la recolección de datos y la creación de un diagrama unifilar preliminar, lo cual proporciona los datos base

necesarios para el estudio. A continuación, se selecciona el lugar óptimo para la ubicación del analizador de calidad de energía eléctrica, asegurando que se capturen mediciones representativas del sistema. Posteriormente, se realiza un análisis exhaustivo de los datos obtenidos en los diferentes puntos de medición, seguido de una revisión detallada de las medidas del sistema de puesta a tierra.

El diseño final de los diagramas unifilares se realiza en AutoCAD, donde también se determina qué datos específicos se integrarán al software de simulación ETAP. El sistema se modela en ETAP, incorporando armónicos y revisando los flujos de potencia. Finalmente, se plantean soluciones y mejoras con base en los análisis, asegurando la optimización del sistema eléctrico en la línea de producción y el cumplimiento de los estándares de calidad de energía establecidos por las normativas ARCENER 002-20 [33] y IEEE 519 [31]. Todo esto se detalla en la Figura 4.1, que ilustra cada una de las etapas del proceso realizado en este estudio.

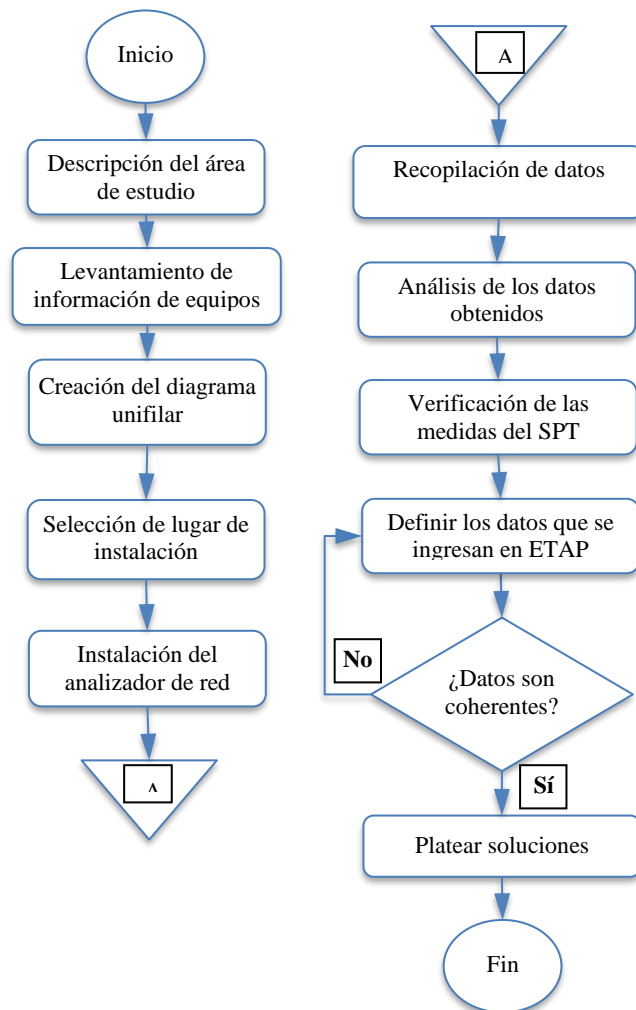


Figura 4.1. Diagrama de Flujo del análisis de calidad de la energía realizado.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La información relevante sobre la empresa incluye la ubicación precisa, especificando la ciudad y la provincia, la producción, así como el entorno energético, considerando la proximidad a subestaciones eléctricas y la calidad del suministro de energía en la región. Es fundamental describir las características del sistema eléctrico, especificando si es monofásico, bifásico o trifásico, y el nivel de tensión de alimentación, además de documentar la capacidad instalada total y el consumo energético real de la planta, desglosando estos datos por líneas de producción o áreas específicas.

También se debe identificar y clasificar las cargas conectadas al sistema, incluyendo equipos de producción y sistemas auxiliares, con una descripción detallada de los equipos críticos, auxiliares y de proceso, así como una evaluación de las condiciones operativas, como horarios de funcionamiento y picos de demanda. Adicionalmente, es esencial analizar los históricos de fallas en las líneas y sublíneas de trabajo.

4.1.1 Línea de producción de MDF

La empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. está situada en la Panamericana Norte, km 21 desde Latacunga, en la parroquia de Lasso, provincia de Cotopaxi, Ecuador. Esta empresa cuenta con un sistema eléctrico trifásico que se alimenta desde la subestación Lasso con una tensión en medio voltaje de 13,8 kV, operada por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi (ELEPCO S.A.). El alimentador llega a la subestación de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. que tiene una capacidad instalada de 9,5 MW y un consumo promedio de 4,33 MW, desde aquí se alimenta los diferentes sistemas de la planta, uno de ellos es la línea de producción de MDF, la misma que cuenta con una capacidad instalada de 7 MW y un consumo real de 3,3 MW. Esta línea se divide en dos grupos de producción, los cuales están detallados en la Tabla 5.1.

4.2 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS DISPOSITIVOS

En esta etapa, es fundamental recopilar datos precisos sobre los componentes eléctricos de la empresa, Para ello se considera la información de las principales cargas del sistema, así como la longitud, y distribución de los circuitos. Incluyendo transformadores, conductores aéreos y subterráneos, equipos, de protección en media y baja tensión, cargas en baja y media tensión, y bancos de condensadores en ambos niveles de tensión. Para este levantamiento de información, se utilizaron diversos equipos de medición especializados (analizadores de calidad de energía,

pinzas amperimétricas y multímetros digitales) que permitieron obtener un diagnóstico completo y detallado del sistema eléctrico.

4.2.1 Levantamiento del Diagrama Unifilar

Después de recolectar los datos técnicos del lugar de estudio, se procede a representar estos datos en el software AutoCAD. Esta representación incluye la fuente de alimentación, la acometida en media tensión, los seccionadores de media tensión, los transformadores, los interruptores de baja tensión, la acometida en baja tensión y las cargas conectadas. Todos estos elementos se representan utilizando una simbología adecuada y estandarizada utilizada en la empresa, asegurando una clara y precisa visualización del sistema unifilar.

La Figura 4.2 muestra el proceso que se debe seguir para medir las magnitudes eléctricas, el cual será utilizado para evaluar la calidad de energía en la línea de producción de MDF en Aglomerados Cotopaxi S.A.

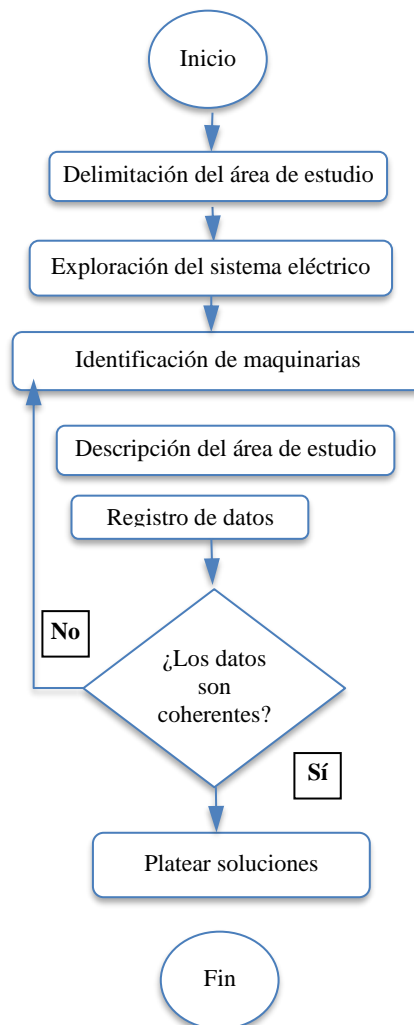


Figura 4.2. Diagrama de Flujo del área de estudio y análisis de datos [33].

4.3 SECCIÓN DEL LUGAR DE INSTALACIÓN DEL ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La normativa IEEE Std. 1159 [21], proporciona recomendaciones sobre los puntos óptimos de monitoreo en una instalación eléctrica para evaluar la calidad de la energía. En la Figura 4.2, se presenta un esquema general que ilustra las ubicaciones sugeridas para la instalación de analizadores de redes. Siguiendo estas directrices, en el presente caso de estudio, los analizadores de redes se ubicaron estratégicamente en el lado secundario del transformador y en las cargas sensibles.

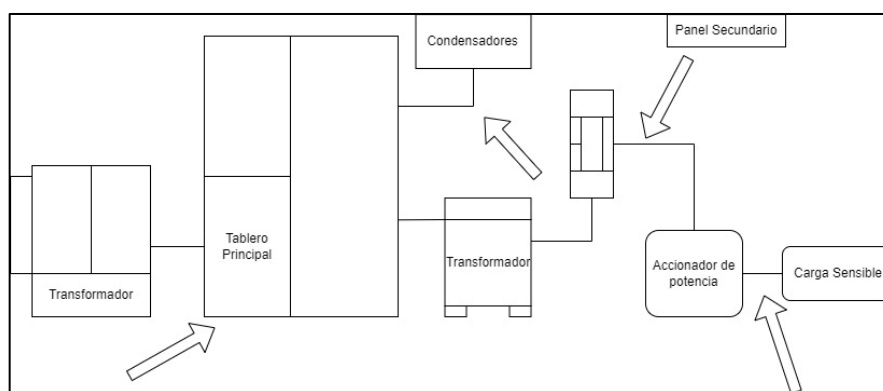


Figura 4.3. Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico [32].

La ubicación de los analizadores en el secundario del transformador permite una medición precisa de los parámetros de calidad de energía que afectan directamente a las cargas, como las variaciones de tensión, los armónicos y las interrupciones transitorias. Las mediciones en la entrada del drive sirven para captar específicamente las perturbaciones que pueden influir en el rendimiento de los convertidores de frecuencia. En este contexto se puede argumentar que la instalación de los analizadores de calidad de energía eléctrica en las cargas sensibles es crucial para detectar perturbaciones que puedan comprometer el funcionamiento de equipos críticos, como variaciones de tensión, flickers y otros eventos que puedan afectar su operación segura y eficiente. Para realizar estas medidas se considera la normativa ARCERNR 002/20 [33], la cual establece que la medición, registro y almacenamiento de los valores en cada punto seleccionado se lleva a cabo durante un período de evaluación no inferior a siete días continuos, con intervalos de medida máximos de 10 minutos.

4.3.1 Criterios para la selección del equipo

La selección de los equipos se realizó teniendo en cuenta los requisitos especificados en la ARCENNR 002/20 [33]. En este contexto, se eligió el analizador de redes FLUKE 435-II, este equipo se conectó a la segunda medición. Además, se incorporó el analizador de calidad de energía FLUKE 1750, que ofrece capacidades avanzadas para medir y analizar la calidad de la energía eléctrica. Este dispositivo está diseñado para realizar registros detallados y continuos de los parámetros eléctricos, el cual fue instalado en los diferentes puntos de medición para bajo voltaje y la última medición para medio voltaje, el cual se detalla en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Ubicación y equipos de medición por nivel de voltaje.

Medición	Ubicación	Equipo	Nivel de Voltaje
1	Salida del Transformador de 1500 Kva	FLUKE 1750	Bajo Voltaje
2	Entrada del variador del Motor Ventilador Secadero (transformador 1500 kVA)	FLUKE 435-II	Bajo Voltaje
3	Caldero Benecke (transformador 1500 kVA)	FLUKE 1750	Bajo Voltaje
4	Transformador Padmouted de 1000 kVA	FLUKE 1750	Bajo Voltaje
5	Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA	FLUKE 1750	Bajo Voltaje
6	Transformador de 2000 kVA	FLUKE 1750	Bajo Voltaje
7	Subestación Lasso	FLUKE 1750	Medio Voltaje

4.3.2 Instalación del analizador de calidad de energía eléctrica

De acuerdo con lo especificado [33], se llevó a cabo la instalación del equipo de medición en el lado secundario de los transformadores con conexión delta-estrella. Antes de iniciar la recolección de datos, se revisó el diagrama fasorial en la pantalla y se verificaron los parámetros de potencia, voltaje y corriente de las tres líneas. Se comprobó que los cables de voltaje y las sondas amperimétricas estuvieran correctamente conectados. La configuración se observa en la Figura 4.4.

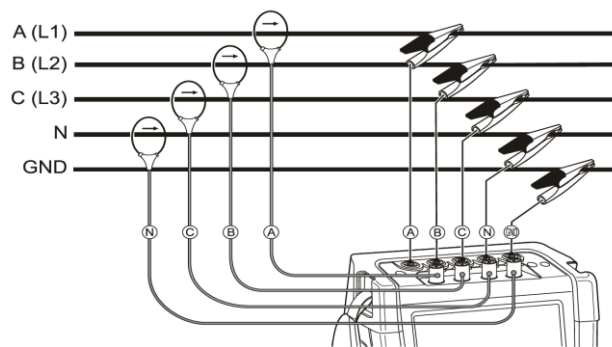
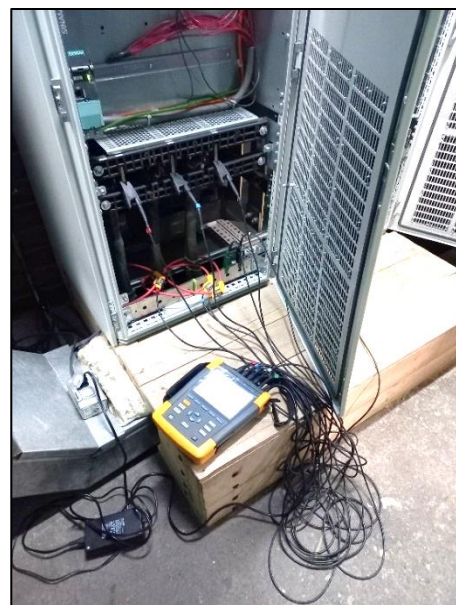


Figura 4.4. Conexión del analizador de calidad de energía eléctrica [32].

Se procedió a ubicar los equipos de medición de calidad de energía en los tableros y equipos principales para determinar los parámetros de estudio propuestos, La instalación de los dos equipos se presenta en la Figura 4.5:



a) Analizador de Red Fluke 1750



b) Analizador de red 435 – II.

Figura 4.5. Instalación de analizadores de red.

4.3.3 Descarga de datos

Para completar el proceso descrito, se transfiere la información del analizador de carga al ordenador mediante una tarjeta SD de 8 GB. Los parámetros necesarios para su tabulación y análisis se pueden extraer en cualquier momento dentro del intervalo total de medición. Los datos de tensión, corrientes armónicas, potencia, factor de potencia, flicker, sags y swells del período de análisis se exportan utilizando el programa Power Analyze de Fluke, que organiza la información en una hoja de Excel para su posterior análisis [32].

4.4 ANÁLISIS DE DATOS

Considerando lo mencionado en la sección 4.3, se procede a realizar la tabulación de los datos obtenidos durante el periodo de medición. Para ello, se han recopilado lecturas de los parámetros eléctricos clave cada 30 segundos durante un periodo continuo de 7 días. Los datos recolectados fueron organizados en intervalos de 10 minutos, calculando el promedio de las mediciones correspondientes a cada intervalo según [33].

Esta tabulación nos permite observar la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo para observar tendencias y tomar decisiones que permitan mejorar la calidad de la energía bajo los parámetros de voltaje y corriente, el factor de potencia y el límite de distorsión como lo indica la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Parámetros eléctricos por evaluar en el estudio de calidad de la energía eléctrica [33], [36], [37], [39].

Categoría	Parámetro	Fórmula	Descripción
Parámetros de Voltaje	Nivel de voltaje	$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100[\%]$	ΔV_k : Variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto k.
			V_k : Voltaje de suministro en el punto k, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos.
		V_N : Voltaje nominal en el punto k.	
	Flickers	$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0.1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}$	P_{st} : índice del flicker $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$: Niveles de efecto flicker que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del intervalo de medición.
Desbalance de voltajes	Desequilibrio de voltaje = $\left \frac{V^-}{V^+} \right \times 100 [\%]$	$\frac{V^-}{V^+}$ V^+ : Componente de voltaje de secuencia positiva.	
Armónicos de tensión		$THD_k = \left[\frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100$	$V_{h,k}$ Armónica de voltaje h en el intervalo k cada 10 minutos.
			$V_{h,1}$ Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje.
		$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100\%$	$V_{h,k}$: Armónica de voltaje h en el intervalo k cada 10 minutos.

Categoría	Parámetro	Fórmula	Descripción
			$V_{h,1}$: Valor eficaz (<i>rms</i>) de la componente fundamental de voltaje.
	Tensión RMS	$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_w} \sum_{n=0}^{T_w} u_n^2}$	u_n : Datos obtenidos del analizador de red.
Parámetros de Corriente	Nivel de corriente	$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_w} \sum_{n=0}^{T_w} i_n^2}$	ΔI_k : Variación de la corriente respecto a la corriente nominal en el punto k.
			I_{rms} : Corriente en el punto k, determinada como el promedio de las medidas registradas en un intervalo de tiempo definido.
			i_n : Corriente nominal en el punto k.
Factor de Potencia	Factor de Potencia	$FP = \frac{P}{S}$	FP : Factor de potencia, relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S).
			P : Potencia activa.
			Q : Potencia reactiva.
Límites de Distorsión	Distorsión en Voltaje	$TDD_k = \left[\frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100\%$	TDD_k : Distorsión de demanda total en el punto k.
			$I_{h,1}$: Componente de la corriente fundamental. $I_{h,k}$: Corriente de la armónica h en el punto k.
	Distorsión en Corriente	$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100\%$	$DI_{h,k}$: Distorsión individual de la corriente h en el punto k expresada como un porcentaje. $I_{h,k}$: Corriente de la armónica h en el punto k. $I_{h,1}$: Corriente de la componente fundamental (primera armónica).

4.4 VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La correcta implementación y mantenimiento del sistema de puesta a tierra es fundamental para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de cualquier instalación eléctrica. Un sistema de puesta a tierra bien diseñado no solo protege contra descargas eléctricas y fallos en el sistema, sino que también asegura la estabilidad operativa, minimizando el riesgo de daños en equipos sensibles. En este contexto, se ha llevado a cabo una evaluación detallada del sistema de puesta a tierra de la instalación, utilizando equipos especializados para medir su efectividad

y asegurar que cumple con los estándares requeridos según [29], en la se muestra los pasos a seguir dentro

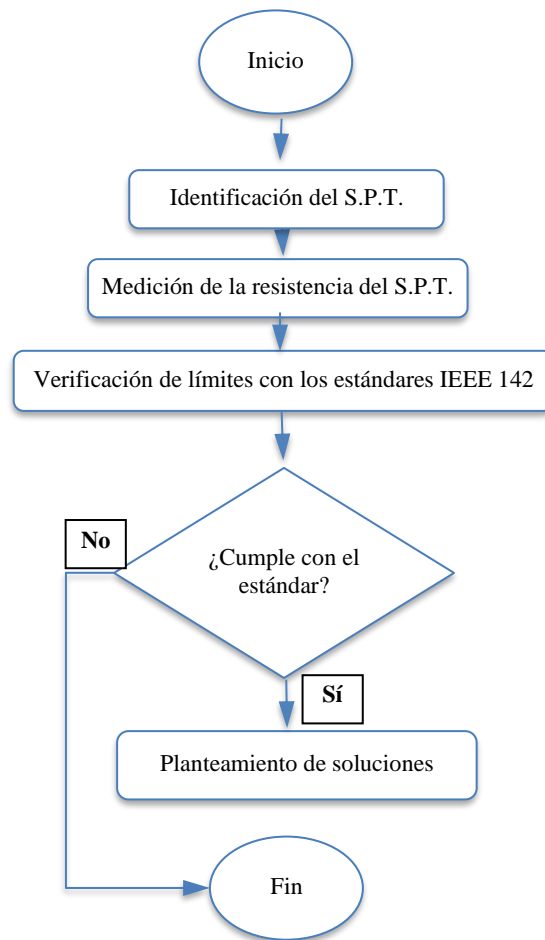


Figura 4.6. Diagrama de flujos de verificación de medidas del S.P.T. [29].

4.4.1 Medida de Sistema de Puesta a Tierra

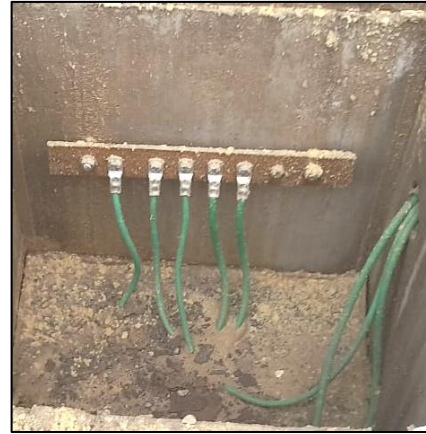
Para la medición del sistema de puesta a tierra, se utilizó la pinza de resistencia de tierra "Fluke 1630-2FC". Este dispositivo, también conocido como medidor de resistencia de tierra, se emplea para realizar mediciones en la barra equipotencial de tierra de cada uno de los transformadores y de los armarios eléctricos principales. La elección de este equipo se debió a su capacidad para medir la resistencia de la tierra sin necesidad de desconectar el sistema, proporcionando datos precisos y confiables sobre la efectividad del sistema de puesta a tierra [29].

Estas mediciones son fundamentales para garantizar que la instalación cumpla con los estándares de seguridad y que la capacidad de protección del sistema frente a descargas eléctricas y sobretensiones sea adecuada. Además, se asegura que todos los equipos eléctricos

estén adecuadamente conectados a tierra, minimizando riesgos operativos y mejorando la seguridad general de la instalación [29]. En la Figura 4.7 se observa la medición en los puntos mencionados:



a) Puestas de tierra individual de transformadores.



b) Punto de conexión de puesta a

Figura 4.7 Mediciones de las puestas a tierra de la Línea de MDF en Aglomerados Cotopaxi S.A.

4.4.2 Recomendaciones de seguridad

En Aglomerados Cotopaxi S.A., el personal de planta brindó acompañamiento y dotación de EPP durante la conexión del analizador de red, el encargado de la empresa realizó este proceso utilizando un casco Clase E, guantes aislantes para la manipulación de equipos conectados a la red, calzado dieléctrico, lentes y ropa de seguridad de composición de algodón para baja tensión o de poliéster para altas tensiones [34].

4.5 SIMULACIÓN EN ETAP

Una vez tabulados los datos, se procede a la simulación del comportamiento del sistema eléctrico bajo distintas condiciones de operación en ETAP. Utilizando los promedios de los parámetros medidos, se implementaron modelos matemáticos que replican las condiciones de carga, variaciones de voltaje, y fluctuaciones de frecuencia observadas durante el periodo de monitoreo. La simulación nos permitió prever el impacto de diferentes escenarios, tales como picos de demanda, caídas de tensión o introducción de armónicos, sobre la estabilidad del sistema para optimizar el rendimiento del sistema y asegurar su conformidad con los estándares normativos. Para la creación del diagrama unifilar en ETAP 19.1, se sigue un proceso meticuloso que incluye varios pasos clave. Primero, se genera un escenario de simulación que refleja las condiciones reales de operación del sistema eléctrico. Este escenario actúa como un entorno virtual donde se pueden probar y analizar diversas configuraciones y condiciones de carga.

A continuación, se procede al ingreso detallado de datos en la plataforma ETAP, esto incluye la definición de la fuente de alimentación, especificando los parámetros de tensión, capacidad y características del suministro. Además, se incorporan los datos de los conductores, incluyendo sus características de material, sección y longitud, para asegurar una representación precisa de las pérdidas y caídas de tensión.

Los transformadores se ingresan con sus especificaciones técnicas completas, como la relación de transformación, la potencia nominal y las impedancias, lo que es crucial para evaluar correctamente el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de carga. Asimismo, se detallan los dispositivos eléctricos y electrónicos, como seccionadores, interruptores y protecciones, para simular adecuadamente las respuestas del sistema ante fallos o cambios operativos.

Las cargas y motores, especialmente aquellos de alta potencia, son ingresados con una atención particular a los detalles de su operación, incluyendo los factores de demanda y los perfiles de carga. Esto es especialmente importante para analizar los picos de demanda y la gestión de la energía reactiva. Todo el proceso de modelado y simulación se realiza conforme a las especificaciones de la norma IEEE 519 [22], que establece los límites y procedimientos para el control de armónicos y la calidad de la energía. Esto asegura que el análisis y las recomendaciones sean acordes a los estándares internacionales, garantizando la fiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico diseñado.

Además, se utilizaron los resultados obtenidos de los analizadores de calidad de energía para identificar y ubicar los armónicos presentes en el sistema mediante el software de simulación. Esta herramienta permitió visualizar la distribución y magnitud de los armónicos, facilitando su análisis detallado.

4.5.1 Datos que se contemplan para la simulación

Los datos recopilados del sistema eléctrico de Aglomerados Cotopaxi S.A. se introducen en el software seleccionado para llevar a cabo la simulación. Los parámetros que se tienen en cuenta para el diseño abarcan:

- Transformadores de potencia
- Tipo y calibre de conductores
- Cargas lineales y no lineales
- Distancias de distribución de conductores

4.5.2 Implementación en Software ETAP

Los estudios por realizar en el software ETAP son:

- Armónicos de tensión, generación en la red eléctrica
- Armónicos de corriente, generación dentro de un sistema (planta industrial)

Se pueden realizar distintos estudios, como:

- Correr flujo de armónico
- Correr escaneo de frecuencia: sirve para determinar cuál es la frecuencia del sistema y cuál es la frecuencia del área donde vamos a trabajar con finalidad de instalar un banco de condensadores no genere una frecuencia destructiva y afecte la red.

Para visualizar la creación del sistema se puede observar en el Anexo 2 desde la creación que muestra la Figura 0.9 hasta la Figura 0.24 que nos muestra el comportamiento del sistema.

4.6 ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS OBTENIDA

Basándose en la información recopilada por los analizadores de calidad de energía Fluke 1750, Fluke 435 y Fluke 1775, se procede a aplicar la normativa ARCERNR 002/20 [33], que establece estándares y límites para la calidad del suministro eléctrico en instalaciones industriales. Esta normativa especifica los niveles permitidos de distorsión armónica, límites de flickers y otros parámetros clave que deben ser controlados para asegurar un suministro de energía seguro y eficiente. En el Anexo A, Tabla 3, se detallan las ecuaciones y los principales puntos a considerar según esta normativa, así como los métodos de cálculo y las medidas correctivas recomendadas para cumplir con los requisitos. Esta información es esencial para evaluar el cumplimiento normativo de las instalaciones y para planificar ajustes necesarios en el sistema eléctrico.

El estudio en cuestión abarca los siguientes parámetros:

A) Parámetros de Voltaje:

- Nivel de voltaje
- Flickers
- Desbalance de voltajes
- Armónicos de tensión
- Tensión RMS
- Factor de potencia

B) Parámetros de Corriente:

- Nivel de corriente

C) Límites de Distorsión:

- Distorsión en Voltaje
- Distorsión en Corriente

4.7 PLANTEAR SOLUCIONES

Con base en los resultados obtenidos y las simulaciones realizadas, se deben identificar las posibles soluciones para mejorar la calidad del suministro eléctrico y minimizar los efectos negativos de las distorsiones armónicas, fluctuaciones de voltaje, y bajo factor de potencia. A continuación, se presenta una tabla que compara las diferentes tecnologías disponibles, detallando las ventajas y desventajas de cada una, con un enfoque en la elección entre filtros pasivos, activos, y bancos de condensadores. En la Tabla 4.3 se puede ver un comparativo de las posibles soluciones a desarrollar.

Tabla 4.3. Comparación de Tecnologías para la Mejora de la Calidad del Suministro Eléctrico [6].

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Impedancias	- Simplicidad en el diseño.	- No eliminan armónicos; solo limitan su efecto.
Filtro pasivo	- Efectivo en la eliminación de armónicos específicos.	- Efectividad limitada a ciertas frecuencias específicas.
	- Bajo costo y fácil implementación.	- Puede resonar con la red, causando amplificación de armónicos.
	- No requiere alimentación externa.	- Su tamaño puede ser considerable para bajas frecuencias.
Filtro activo	- Eficaz para una amplia gama de armónicos.	- Mayor costo inicial y complejidad de instalación.
	- Ajustable y adaptable a condiciones cambiantes de carga.	- Requiere alimentación externa.
	- Mejora el factor de potencia.	- Mantenimiento más complejo.
Banco de condensadores	- Mejora el factor de potencia, reduciendo pérdidas de energía.	- Puede generar resonancias con armónicos.
	- Puede compensar cargas inductivas.	- Efectividad limitada a compensación de potencia reactiva.
	- Reducción en la facturación de energía reactiva.	- Puede requerir mantenimiento regular y protección contra sobrecarga.

4.7 CASOS DE ESTUDIO

Este estudio analiza la incorporación de bancos de condensadores, filtros pasivos y filtros activos como soluciones para la mitigación de armónicos, utilizando los softwares ETAP y MATLAB para la simulación y análisis. Además, se han investigado y considerado otros métodos de corrección de armónicos basados en artículos, publicaciones científicas y tesis, que aportan diferentes enfoques y técnicas para mejorar la calidad de la energía eléctrica.

4.8.1 Banco de capacitores

En el caso de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., se pueden emplear dos métodos para determinar los requisitos de corrección del factor de potencia:

Dimensionamiento

- **A partir de los datos de la empresa**

Este método ofrece una estimación aproximada de la potencia reactiva necesaria. Aunque generalmente proporciona resultados aceptables, en casos con regímenes de consumo irregulares, como los que pueden ocurrir en Aglomerados Cotopaxi S.A., los resultados podrían no ser satisfactorios.

- **A partir de mediciones**

Este método es más preciso y se considera idóneo y el que se consideró en este estudio. Implica la medición directa de parámetros como la potencia efectiva (kW), la potencia reactiva y el $\cos \varphi$ (factor de potencia). Con estos datos, se determina el valor medio de $\cos \varphi$ a partir de los registros obtenidos. Este valor es esencial para calcular la capacidad de los capacitores necesarios para la corrección del factor de potencia [6].

Una vez determinado el $\cos \varphi$ de la instalación y la potencia promedio en kW, se procede a seleccionar los capacitores adecuados para lograr un $\cos \varphi$ superior a 0,92 e inferior a 1. Este enfoque asegura que los capacitores seleccionados no solo sean adecuados en términos de capacidad sino también en cuanto al voltaje de operación que garantiza una corrección efectiva del factor de potencia y una mejora en la eficiencia energética de la empresa según la ecuación (20):

$$Q_c = P_{cons} * factor [Kvar] \quad (20)$$

Donde:

- Q_c : Potencia reactiva del banco de capacitores.
- P_{cons} : Potencia real de consumo de la instalación.
- $factor$: Factor de multiplicación dado por tabla.

Una vez calculado el valor de la potencia de los capacitores, es crucial identificar los modelos de capacitores disponibles en el mercado como se observa en la Figura 4.8, junto con sus respectivas potencias y voltajes.



Figura 4.8 Capacitor para compensación [35].

Este proceso asegura la selección adecuada de los capacitores, alineando las necesidades específicas de la instalación con las opciones comerciales disponibles, y optimizando así la corrección del factor de potencia y la eficiencia energética de la empresa.

Ubicación

El banco de capacitores puede instalarse en tres ubicaciones distintas:

- A la salida del transformador principal.
- A la entrada de cada tablero de distribución principal.
- Directamente en cada carga de tipo inductivo.

El esquema de instalación incluye la ubicación a la salida del transformador y en los tableros de distribución.

4.8.2 Filtro pasivo

Un filtro pasivo está diseñado para mitigar armónicos específicos, comúnmente de orden 3 y 5, proporcionando una baja impedancia a la frecuencia del armónico que se desea reducir. Esto permite que la corriente armónica pase a través del filtro en lugar de circular por el sistema eléctrico, mejorando así la calidad de la energía eléctrica [6].

Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de los filtros pasivos, es importante seguir el orden de las ecuaciones (8), (9), (10), (11), (12), (13) y (14) mencionadas en el capítulo 3.

- **Análisis de Armónicos:** Identificar los armónicos más relevantes cuyo valor sobrepase las normativas vigentes, en base al cual se obtiene la frecuencia.
- **Selección del Tipo de Filtro:** Una vez se identifica el armónico y por tanto la frecuencia se debe dimensionar los componentes para mitigar dicha onda. La elección en ste caso dependerá si se trata de un armónico instalado de forma transversal o longitudinal a la red eléctrica [6].
- **Cálculo de Componentes:** Determinar los valores específicos de los componentes (resistencias, inductancias y capacitancias) necesarios para atenuar las frecuencias de armónicos identificadas [6].
- **Validación del Diseño:** Utilizar simulaciones en ETAP y cálculos para validar el diseño del filtro y ajustar los valores de los componentes según sea necesario.

Como parte de la metodología, se procedió con el cálculo de filtros destinados a minimizar la distorsión de energía provocada por los armónicos en el Bus 55. Este método será igualmente aplicable a los demás buses. Para ilustrar el procedimiento de cálculo, se seleccionó uno de los armónicos de mayor magnitud en donde se observa en las ecuaciones (21) hasta la ecuación (25).

Pasos:

Obtención de la potencia reactiva.

$$kVAr = kW[Tan(Cos^{-1})(FPa) - Tan(Cos^{-1})(FPn)] \quad (21)$$

Cálculo del banco capacitivo.

$$C_{banco} = \frac{MVAR}{W(KV_L^2)} \quad (22)$$

Donde:

W= frecuencia angular

Cálculo de impedancia efectiva.

$$X_{efect} = \frac{(KV_L^2)}{MVAR} \quad (23)$$

Cálculo de impedancia capacitiva.

$$X_c = \left[\frac{h^2}{h^2 - 1} \right] (X_{efect}) \quad (24)$$

Cálculo de impedancia inductiva.

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (25)$$

Ubicación

Los filtros pasivos deben ser ubicados estratégicamente en el sistema eléctrico para maximizar su efectividad en la mitigación de armónicos encontrados en este análisis. Las ubicaciones recomendadas son:

- **Subestaciones:** Instalar filtros pasivos en las subestaciones principales ayuda a mitigar los armónicos generados por grandes equipos industriales antes de que se distribuyan a otras partes del sistema.
- **Paneles de distribución:** Colocar filtros en los paneles de distribución donde se conectan las cargas no lineales, como motores y variadores de velocidad, permite un tratamiento más localizado de los armónicos.
- **En variadores de velocidad:** Se debe identificar que variadores de velocidad no cuentan con filtros en la entrada y salida del equipo, esto puede ayudar a reducir el impacto de los armónicos sobre otros equipos.

4.8.3 Filtro activo

Un filtro activo está diseñado para reducir una amplia gama de armónicos en un sistema eléctrico, no solo un armónico específico. Puede mitigar armónicos de baja y alta frecuencia, generalmente desde el 2° hasta el 25° armónico o más, dependiendo de la configuración y capacidad del filtro. A diferencia de los filtros pasivos, los filtros activos pueden adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes de la red, lo que les permite reducir eficazmente múltiples armónicos simultáneamente y mejorar la calidad de la energía en tiempo real [35]. En la Figura 4.9 se observa un filtro activo del área comercial.



Figura 4.9. Composición del filtro activo [35].

Dimensionamiento

El dimensionamiento de los filtros activos implica varios pasos clave para asegurar su correcto dimensionamiento y selección:

- **Evaluación de la Carga:**

Medición de Armónicos: Realizar mediciones precisas de los niveles y frecuencias de armónicos presentes en el sistema utilizando analizadores de calidad de energía.

Identificación de Puntos Críticos: Identificar las ubicaciones y equipos que generan mayores niveles de armónicos y que más afectan la calidad de energía.

Ubicación

La ubicación estratégica de los filtros activos en la planta de producción es muy importante para maximizar su efectividad en la mitigación de armónicos y la mejora de la calidad de energía. Las ubicaciones recomendadas son:

- **Cerca de Grandes Cargas No Lineales:** Instalar filtros activos cerca de variadores de velocidad, hornos de arco, rectificadores y otros equipos que generan altos niveles de armónicos. Esta proximidad permite una corrección más efectiva de las distorsiones armónicas generadas por estas cargas.
- **Subestaciones:** Colocar filtros activos en las subestaciones principales permite una corrección más amplia y centralizada de armónicos y la mejora del factor de potencia para todo el sistema eléctrico.
- **Paneles de Distribución:** Instalar filtros activos en los paneles de distribución donde se conectan múltiples cargas no lineales ayuda a mitigar los armónicos de manera localizada y eficiente.
- **Selección del Filtro Activo:**

Capacidad de Compensación: Determinar la capacidad de compensación requerida en términos de potencia reactiva (kVAR) y corriente armónica. Seleccionar un filtro activo que pueda manejar esta capacidad.

Características del Filtro: Elegir un filtro activo con las características adecuadas, como capacidad de respuesta rápida, rango de frecuencia de operación, y capacidad de adaptación a cambios en la carga.

- **Configuración y Ajuste:**

Programación Inicial: Configurar el filtro activo para que compense efectivamente los armónicos identificados y mejore el factor de potencia.

Ajuste Dinámico: Utilizar la capacidad de los filtros activos para ajustarse dinámicamente a las variaciones en la carga y los niveles de armónicos, asegurando una corrección continua y efectiva.

Descripción de la Programación

La metodología descrita para el procesamiento de datos de THD (Distorsión Armónica Total) en MATLAB comienza con la carga de datos desde un archivo Excel que contiene mediciones de calidad de energía eléctrica. Los datos de las fases A, B y C se extraen y se

calcula el THD promedio para cada fase. A continuación, se definen los parámetros de simulación, incluyendo la frecuencia de muestreo y el período de muestreo, y se crea un vector de tiempo basado en la longitud de la señal. Se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para transformar la señal al dominio de la frecuencia, permitiendo la identificación y eliminación de componentes armónicas superiores a un umbral específico. Posteriormente, se utiliza la Transformada Inversa de Fourier (IFFT) para obtener la señal filtrada. La metodología asegura que el vector de tiempo para la señal filtrada coincida en longitud con la señal filtrada y se identifican los valores máximos del THD antes y después del filtrado. Finalmente, se generan gráficos comparativos para visualizar los cambios en el THD, mostrando la eficacia del filtro en la reducción de componentes armónicas no deseadas. Esta técnica proporciona una forma robusta de evaluar y mejorar la calidad de la energía eléctrica mediante análisis en el dominio de la frecuencia.

- **Cargar Datos:**

Archivo: Se define el nombre del archivo Excel que contiene los datos de distorsión armónica total (THD) (`filename_thd = 'THD.xlsx'`);).

Leer Datos: Se lee la hoja específica del archivo Excel que contiene los datos de interés (`data_superior_thd = readtable(filename_thd, 'Sheet', 'Tabla superior')`);).

Extraer Datos: Se extraen las columnas relevantes correspondientes a las fases A, B y C (`AN_THD, BN_THD, CN_THD`).

- **Calcular el THD Promedio:**

Promedio: Se calcula el THD promedio para cada fase tomando la media de los valores de las tres fases (`THD_media = mean([AN_THD, BN_THD, CN_THD], 2)`);).

- **Definir Parámetros de Simulación:**

Frecuencia de Muestreo: Se establece una frecuencia de muestreo arbitraria ($F_s = 1000$);).

Período de Muestreo: Se calcula el período de muestreo en función de la frecuencia ($T = 1/F_s$);).

Longitud de la Señal: Se determina la longitud total de la señal ($L = \text{length}(\text{THD_media})$);).

Vector de Tiempo: Se genera un vector de tiempo con base en la longitud de la señal ($t = (0:L-1)*T$);).

- **Aplicar la Transformada de Fourier:**

Transformada de Fourier: Se realiza la transformada rápida de Fourier (FFT) para convertir la señal de THD al dominio de la frecuencia ($\text{THD_fft} = \text{fft}(\text{THD_media});$).

Frecuencias de la FFT: Se calculan las frecuencias correspondientes a los componentes de la FFT ($f = F_s * (0:(L/2))/L;$).

- **Eliminar Componentes Armónicas:**

Umbral de Frecuencia: Se define un umbral de frecuencia para filtrar componentes armónicas no deseadas ($\text{harmonics_threshold} = 60;$).

Filtrado de Armónicos: Se eliminan las componentes de frecuencia superiores al umbral estableciendo esos valores en cero ($\text{THD_filtered_fft}(f > \text{harmonics_threshold}) = 0;$).

- **Transformada Inversa de Fourier:**

Obtener Señal Filtrada: Se aplica la transformada inversa de Fourier (IFFT) para reconstruir la señal temporal después de filtrar las armónicas ($\text{THD_media_filtered} = \text{ifft}(\text{THD_filtered_fft}, 'symmetric') * 0.35;$).

- **Ajustar Vector de Tiempo:**

Vector de Tiempo Filtrado: Se asegura que el vector de tiempo para la señal filtrada tenga la misma longitud que el vector de señal filtrada ($t_filtered = (0:\text{length}(\text{THD_media_filtered})-1) * T;$).

- **Encontrar Valores Máximos:**

Antes del Filtro: Se identifican los valores máximos del THD antes de aplicar el filtro ($[\text{max_THD_before}, \text{idx_before}] = \text{max}(\text{THD_media});$).

Después del Filtro: Se identifican los valores máximos del THD después de aplicar el filtro ($[\text{max_THD_after}, \text{idx_after}] = \text{max}(\text{THD_media_filtered});$).

- **Visualización de Resultados:**

Graficar THD Antes del Filtro: Se genera un gráfico mostrando el THD antes de la aplicación del filtro, destacando el valor máximo encontrado (subplot(2, 1, 1); plot(t, THD_media, '-');).

Graficar THD Después del Filtro: Se crea un gráfico que muestra el THD después de la aplicación del filtro, también destacando el valor máximo (subplot(2, 1, 2); plot(t_filtered, THD_media_filtered, '-');).

4.8.4 Factor K

Tras realizar la simulación del diagrama unifilar utilizando el software ETAP, se obtienen resultados simulados que incluyen los armónicos de voltaje, corriente y ángulo de voltaje para cada bus.

Bus 55

Valor *RMS* para voltaje:

$$RMS_V = \sqrt{(V_{h1}^2) + (V_{h2}^2) + (V_{h2}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{hn}^2)} \quad (26)$$

Valor *RMS* para corriente:

$$RMS_i = \sqrt{(I_{h1}^2) + (I_{h2}^2) + (I_{h2}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{hn}^2)} \quad (27)$$

Una vez obtenidos los valores RMS del Bus 55, se procede a calcular el porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD) para los voltajes y corrientes.

$$THD_V = \left[\frac{\sqrt{(V_{h2}^2) + (V_{h3}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{h5}^2) + (V_{hn}^2)}}{V_{h1}} \right] (100) \quad (28)$$

Valor *THD* para corriente:

$$THD_i = \left[\frac{\sqrt{(I_{h2}^2) + (I_{h3}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{h5}^2) + (I_{hn}^2)}}{V_{h1}} \right] (100) \quad (29)$$

Para el cálculo del factor de potencia, que generalmente se obtiene a partir de los valores de potencia y ángulos respectivos, se debe tener en cuenta que el software ETAP no proporciona ángulos de corriente. En su lugar, se aplica una ecuación alternativa para determinar el factor de potencia, la cual involucra el THD_i :

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (30)$$

Por último, se realiza el cálculo para K para dimensionamientos de transformadores:

$$Factor\ K = \sum I_n^2 h^2 = (I_{h1}^2)(1^2) + (I_{h2}^2)(2^2) + (I_{h3}^2)(2^2) + (I_{h4}^2)(4^2) + (I_{hn}^2)(n^2) \quad (31)$$

Para conocer el valor I individual, que será multiplicado por su número armónico:

$$I_{hn} = \frac{Ih}{RMS_i} \quad (32)$$

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis efectuado en la línea de producción de MDF de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. junto con propuestas para abordar los problemas identificados. Se presentarán los resultados de una simulación del sistema eléctrico, la cual permitirá visualizar de manera más clara los distintos escenarios y las posibles acciones correctivas a implementar.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA LÍNEAS DE PRODUCCIÓN MDF DE LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI

La empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. está situada en la Panamericana Norte, km 21 desde Latacunga, en la parroquia de Lasso, provincia de Cotopaxi, Ecuador. Esta empresa cuenta con un sistema eléctrico trifásico que se alimenta desde la subestación Lasso con una tensión en medio voltaje de 13,8 kV, operada por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi (ELEPCO S.A.). El alimentador llega a la subestación de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. que tiene una capacidad instalada de 9.5MW y un consumo promedio de 4.33MW, desde aquí se alimenta los diferentes sistemas de la planta, uno de ellos es la línea de producción de MDF, la misma que cuenta con una capacidad instalada de 7 MW y un consumo real de 3.3 MW. Esta línea se divide en dos grupos de producción, los cuales están detallados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Tipos de servicios de la Línea de Producción de MDF.

Categoría	Equipos
Servicios auxiliares	<ul style="list-style-type: none">• Caldero Vyncke• Caldero Benecke• Línea Recubrimiento• Línea de Molduras
Procesamiento de material	<ul style="list-style-type: none">• Descortezado• Chipeador• Unidad de limpieza• Desfibrado• Dosificación• Secadero• Formación• Prensas• Formateo

5.2 SISTEMA ELÉCTRICO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN MDF

Para la elaboración del diagrama unifilar de la línea de producción de MDF en Aglomerados Cotopaxi S.A., se realizó un exhaustivo levantamiento de información. Durante este proceso,

se identificaron los niveles de voltaje, los cables, los dispositivos de protección, los transformadores, los motores y las cargas especiales involucradas en el proceso productivo, como se detalla en la Tabla 9 y la Tabla 10 del Anexo A. Estos elementos están representados en el diagrama unifilar que se puede observar en el ANEXO

Según los datos recopilados, que se pueden observar en las Tabla 11, Tabla 12 y la Tabla 13, se presentan los principales parámetros de tensión, corriente y potencia necesarios para modelar el sistema eléctrico.

En la Tabla 5.2. se muestra el transformador con más cargas conectadas, el Transformador Padmounted de 1500 kVA, que alimenta un total de nueve circuitos, incluyendo compresores, secadero, formación de bandas y prensas, entre otros. Este transformador gestiona una mayor diversidad de equipos con diferentes niveles de potencia y características de consumo.

Tabla 5.2. Cargas conectadas al transformador Padmounted 1500kVA.

Circuitos		Alimentación Trifásica	Potencia Aparente	f.p.	Longitud de cable	Calibre	Temperatura
Nº	Descripción	Voltaje AC	KVA		[m]	AWG/MCM	°C
1	Descortezado	440	38,89	0,90	80	3(1/3/0AWG)	75
2	Caldero Benecke	440	32,81	0,82	50	3(2X250MCM)	75
3	M1 Ventilador Caldero Benecke	440	36,87	0,82	20	3(2X4AWG)	75
4	Caldero Vyncke	440	144,04	0,90	10	3(2X400MCM)	75
5	M261 Ventilador Secade	440	293,56	0,90	30	3(2XSOOMCM)	75
6	Chieador Palmak (backup)	440	86,42	0,90	80	3(1X3/0AWG)	
7	Linea Recubrimiento	440	210,36	0,90	40	3(2X250MCM)	75 75
8	Linca Molduras	440	228,57	0,92	90	3(3XSOOMCM)	75

5.2.1 Selección del objeto de estudio y colocación de los analizadores de calidad de energía

A partir de los datos obtenidos durante el levantamiento de información en Aglomerados Cotopaxi S.A., se detectó un bajo factor de potencia en varias áreas de la planta, lo cual afecta

negativamente la calidad de la energía eléctrica. Este problema puede provocar ineficiencias en el sistema eléctrico y potenciales penalizaciones económicas. Para abordar esta situación, se decidió realizar un análisis exhaustivo de la calidad de la energía. Se emplearon diferentes tipos de analizadores, como el Fluke 1750 para mediciones en medio voltaje y el Fluke 435 para bajo voltaje, con el objetivo de medir y registrar parámetros clave como se observa en el diagrama unifilar en el ANEXO D. Estos dispositivos fueron instalados estratégicamente para evaluar de manera integral el sistema eléctrico, identificar las perturbaciones y planificar las acciones correctivas necesarias para optimizar el factor de potencia y mejorar la calidad de la energía en la planta.

5.3 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES

De acuerdo con la norma ARCERNNR 002/20 [33], es obligatorio colocar el analizador de red en cada fase durante un período mínimo de siete días consecutivos. En este estudio, se colocaron analizadores de red en seis puntos diferentes para cubrir todo el esquema de estudio, considerando que hay cuatro transformadores que alimentan las sublíneas de producción de MDF: tres en baja tensión y uno en media tensión. En los seis casos analizados, se incluyeron las cargas conectadas a los tres transformadores de baja tensión, que presentan las cargas no lineales e inductivas más significativas. Además, se realizó una medición a la salida del alimentador de la subestación Lasso para evaluar la calidad de la energía suministrada.

5.3.1 Análisis de voltaje

- **Medición 1 Transformador Padmouted de 1500 kVA**

Para el análisis de la calidad de la energía eléctrica en este caso de estudio, se utilizaron dos analizadores de red. El primer analizador, un Fluke 1750, fue instalado en el lado secundario del transformador. El segundo analizador, un Fluke 430, se ubicó en la misma barra, donde se encuentra el variador de frecuencia de mayor potencia.

Los datos registrados por los analizadores de red fueron capturados cada 3 segundos, en intervalos de 10 minutos, desde el 20 de octubre de 2023 a las 15:20 hasta el 27 de octubre de 2023 a las 21:00 como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Fecha de instalación del analizador de red y promedio de voltaje en el Transformador Padmouted de 1500 kVA (Medición 1 y Medición 2).

Promedio Voltaje Vrms				
Fecha		Analizador de red Fluke 1750		
Inicio	Finalización	AN	BN	CN
20/10/2023	27/10/2024	236,25	235,48	238,05
Fecha		Analizador de red Fluke 435		
Inicio	Finalización	AN	BN	CN
20/10/2023	27/10/2024	229,16	231,25	226,16

En la Tabla 5.4 se presenta un promedio de las mediciones de cada fase del estudio, obtenidas de ambos analizadores. Este enfoque permitió comparar los datos y evaluar su consistencia y similitud, proporcionando una visión detallada de la calidad de la energía en diferentes puntos del sistema.

Tabla 5.4. Diferencia de los promedios entre los dos analizadores de red Fluke 435 vs Fluke 1750.

FASES	AN	BN	CN
FLUKE 1570	236,25	235,48	238,05
FLUKE 435	229,16	231,25	226,16
Diferencia	7,09	4,23	11,89
Porcentaje de error	0,3	0,2	0,5

Se ha determinado que la fase AN presenta una variación mínima del 3% en los datos de voltaje registrados por los dos analizadores de red. Este hallazgo se visualiza en la Figura 5.1, que muestra los valores de voltaje durante el mismo período. Los resultados evidencian una alta estabilidad en la fase AN, con mediciones que coinciden de manera precisa, lo que destaca la consistencia de los datos y la precisión de los equipos utilizados. De igual manera, la Figura 0.1 del Anexo C revela que la fase BN tiene una variación igualmente pequeña del 2%. Por otro lado, la Figura 0.2 indica que la fase CN presenta una variación del 5%. Estos datos corroboran la estabilidad general del sistema y la exactitud de los instrumentos en la captura de las fluctuaciones de voltaje.

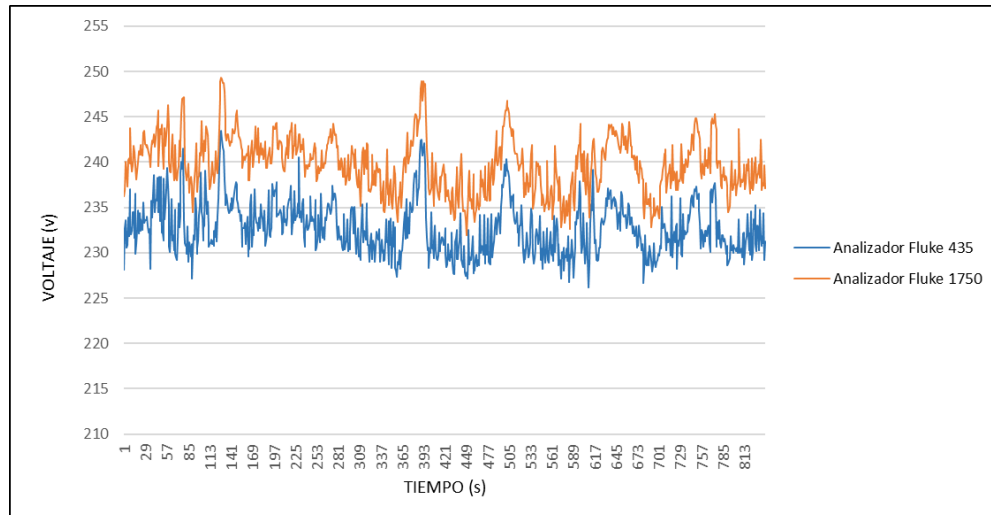


Figura 5.1. Comparación de voltajes tomados en la fase AN por el analizador de red Fluke 435 vs el analizador de red Fluke 1750.

En el Anexo A se presentan tablas detalladas que incluyen los promedios de voltaje y las fechas de instalación de los equipos de medición en diversos puntos de la instalación eléctrica, la Medición 2 en la entrada del variador del Motor Ventilador Secadero. La Medición 3, correspondiente al Caldero Benecke y reflejada en la Tabla 14, destaca un valor atípico de 300 voltios en la fase AN, que no coincide con los promedios de otras mediciones. Además, se detallan los datos del Transformador Padmouted de 1000 kVA como Medición 4 en la Tabla 15, la Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA como Medición 5 en la Tabla 16, el Transformador de 2000 kVA como Medición 6 en la Tabla 17, y la Subestación Lasso como Medición 7 en la Tabla 18.

Estas tablas proporcionan una visión exhaustiva de las condiciones de voltaje y del comportamiento del sistema en puntos críticos del sistema eléctrico de la línea de producción, los cuales se encuentran dentro del promedio del voltaje fundamental, que es de 254 V.

5.3.2 Desequilibrio de voltaje Fase-Neutro

La norma ARCERNR 002/20 [33], establece los criterios para evaluar la calidad del voltaje en las redes eléctricas. Según esta norma, el voltaje se considera adecuado si el 95% o más de las muestras tomadas, se encuentran dentro de los rangos especificados. Para "Aglomerados Cotopaxi S.A.", que opera en bajo voltaje, el rango permitido es de $\pm 8\%$, mientras que para medio voltaje es de $\pm 6\%$. En este estudio, se analizaron los niveles de voltaje fase-neutro en los puntos de medición y se compararon con los niveles normativos, verificando el cumplimiento de los parámetros de calidad y asegurando la estabilidad del suministro eléctrico.

- **Medición 1 Transformador Padmounted de 1500 kVA**

En la Tabla 5.5 se presentan los valores RMS Fase-Neutro obtenidos con el analizador de redes Fluke 1750, que incluyen los valores medios, máximos y mínimos registrados durante un período de siete días, calculando un promedio diario.

Tabla 5.5. Niveles de voltaje Fase-Neutro 254 [v] del Transformador Padmounted de 1500[kVA].

Analizador de red Fluke 1750									
Fecha	Promedio Voltaje Vrms			Máximo Voltaje Vrms			Mínimo Voltaje Vrms		
	AN	BN	CN	AN	BN	CN	AN	BN	CN
20/10/2023	240,88	234,09	239,26	244,16	237,24	242,45	236,24	230,86	235,94
21/10/2023	241,43	234,78	239,57	249,36	242,07	246,08	234,49	230,01	234,55
22/10/2023	241,23	234,42	239,33	244,38	237,6	242,53	237,92	231,49	236,24
23/10/2023	239,57	233,20	238,17	248,95	241,71	246,74	233,39	228,43	233,12
24/10/2023	238,4	232,26	237,18	246,77	239,52	243,85	231,97	228,79	232,87
25/10/2023	238,37	232,34	237,30	244,25	237,66	242,70	232,59	228,84	233,35
26/10/2023	239,43	233,13	238,23	244,85	237,84	243,31	232,83	228,07	232,89
27/10/2023	239,01	232,68	237,67	245,30	238,49	243,55	234,47	229,40	234,08

La Tabla 5.6 presenta los resultados basados en los datos de la Tabla 5.5 que muestra el voltaje del sistema eléctrico se mantiene en 254 V fase-neutro, dentro del rango de tolerancia de $\pm 8\%$ establecido por la normativa ARCERNR 002/20 [33]. Este cumplimiento garantiza que la maquinaria del circuito opere con el voltaje adecuado. La primera medición confirma que los valores registrados cumplen con lo estipulado por la normativa, asegurando una operación segura y eficiente de los equipos.

Tabla 5.6. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.

Fecha	$\Delta V [\%] V_{AN-VN}$	$\Delta V [\%] V_{BN-CN}$	$\Delta V [\%] V_{CN-AN}$
20/10/2023	7,09%	6,06%	7,09%
21/10/2023	6,79%	5,82%	6,79%
22/10/2023	6,84%	5,83%	6,84%
23/10/2023	7,48%	6,50%	7,48%
24/10/2023	7,91%	6,95%	7,91%
25/10/2023	7,86%	6,88%	7,86%
26/10/2023	7,62%	6,60%	7,62%
27/10/2023	7,78%	6,77%	7,78%
Mínimo	6,8%	5,8%	6,8%
Máximo	7,9%	7,0%	7,9%
Límite ACERNR 002/20	8%	8%	8%
Observación	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

En la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 23, Tabla 25, Tabla 27 y la Tabla 29 se presentan los valores RMS Fase-Neutro obtenidos con los analizadores de redes de calidad de energía, incluyendo

los valores medios, máximos y mínimos registrados durante un período de siete días en las fechas mencionadas para cada medición, calculando un promedio diario. Estos valores sirven para realizar el análisis detallado en la Tabla 5.7.

A partir de los resultados de los promedios de los voltajes, se procede a realizar el cálculo con la ecuación del desequilibrio de voltajes. Los resultados muestran que el voltaje del sistema eléctrico se mantiene en 254 V fase-neutro, dentro del rango de tolerancia de $\pm 8 \%$ establecido por la normativa ARCERNR 002/20 [33] para bajo voltaje. Sin embargo, la última medición, realizada en medio voltaje, indica que la norma requiere que el voltaje esté dentro del $\pm 6\%$. Este análisis se presenta en la Tabla 5.7, donde se observa que la Medición 7 no cumple con la normativa. Adicionalmente, en esta tabla se desglosan las tablas en las que se pueden encontrar estos datos en el Anexo A.

Tabla 5.7. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.

Medición	Ubicación	Tabla	ARCERNR 002/20
2	Entrada del variador del Motor Ventilador Secadero (transformador 1500 kVA)	Tabla 20	Cumple
3	Caldero Benecke (transformador 1500 kVA)	Tabla 22	Cumple
4	Transformador Padmouted de 1000 kVA	Tabla 24	Cumple
5	Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA	Tabla 26	Cumple
6	Transformador de 2000 kVA	Tabla 28	Cumple
7	Subestación Lasso	Tabla 30	Cumple

5.3.3 Análisis de desequilibrio de corriente

En el ámbito industrial, el desequilibrio de corriente se considera aceptable si se mantiene dentro del rango de $\pm 2\%$ a $\pm 3\%$, lo cual es crucial para asegurar la eficiencia operativa del sistema eléctrico y prevenir el sobrecalentamiento y desgaste prematuro de los equipos como se observa en el primer punto de medición que se observa en la Tabla 5.8, según [33].

Sin embargo, las mediciones presentadas en la Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34 y Tabla 35 no cumplen con estos estándares. Este análisis se basa en el cálculo de un promedio máximo diario en cada fase, evaluando el desequilibrio de corriente a lo largo del tiempo. Es importante destacar que, en la última medición, registrada en la Tabla 36 correspondiente a un sistema de

medio voltaje, el desequilibrio de corriente supera el límite del 2% establecido por la normativa ARCERNR 002/20 [33].

Tabla 5.8. Desequilibrio de corriente del Transformador 1500 kVA.

Desequilibrio de corriente analizador Fluke 1750							
Fecha	Corriente [A]					Desequilibrio %	Observación < 3%
	Fase A	Fase B	Fase C	Max	Promedio		
20/10/2023	1044,72	825,20	994,30	1044,72	954,74	8,61%	No cumple
21/10/2023	973,51	760,12	935,44	973,51	889,69	8,61%	No cumple
22/10/2023	963,19	756,49	915,20	963,19	878,29	8,81%	No cumple
23/10/2023	1115,07	877,66	1072,56	1115,07	1021,86	8,36%	No cumple
24/10/2023	1192,79	953,36	1151,75	1192,79	1099,30	7,84%	No cumple
25/10/2023	1129,93	899,27	1090,10	1129,93	1039,77	7,98%	No cumple
26/10/2023	1235,77	985,29	1186,27	1235,77	1135,78	8,09%	No cumple
27/10/2023	1034,42	821,12	999,50	1034,42	951,68	8,00%	No cumple

5.3.4 Análisis de desbalance de potencia activa

En la Tabla 37, Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41 y la Tabla 42 se detallan las potencias mínimas, medias y máximas calculadas a partir de los datos registrados por el analizador de calidad de energía eléctrica. Se observa que el desbalance de potencia activa en cada una de las fases de cada día no cumple con el porcentaje de aceptación del 5% establecido por la normativa ARCERNR 002/20 [33] para bajo voltaje. Sin embargo, en la última medición realizada en medio voltaje, el límite de aceptación es del 3%, según la misma normativa. Estos cálculos se realizaron determinando la potencia activa máxima (P_{max}) y mínima (P_{min}) entre las fases, y el desbalance se calculó utilizando la fórmula: $Desbalance = (P_{max} - P_{min}) / P_{prom} \times 100$, donde P_{prom} es la potencia activa promedio de las tres fases, como se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Porcentaje de desbalance potencia activa cada una de las fases, Transformador 1500 kVA.

Porcentaje de desbalance de potencia activa en las fases analizador Fluke 1750											Límite ARCENNR 002-20 5%
Promedio Potencia Activa [%]			Máximo Potencia Activa [%]		Mínimo Potencia Activa [%]			Promedio	Máxima	Mínima	
Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase A	Fase B	Fase C	Desbalance A-C	Desbalance A-B	Desbalance B-C	
2,40%	24,86%	0,00%	3,69%	23,86%	0,64%	25,32%	0,00%	24,86%	23,86%	25,32%	No cumple
3,77%	25,99%	0,00%	5,32%	24,38%	19,78%	34,00%	0,00%	25,99%	24,38%	34,00%	No cumple
2,42%	25,27%	0,00%	2,64%	24,64%	9,38%	32,96%	0,00%	25,27%	24,64%	32,96%	No cumple
3,91%	25,39%	0,00%	5,51%	23,50%	4,01%	32,33%	0,00%	25,39%	23,50%	32,33%	No cumple
3,64%	23,94%	0,00%	4,17%	23,80%	9,24%	29,54%	0,00%	23,94%	23,80%	29,54%	No cumple
3,80%	24,42%	0,00%	5,02%	24,03%	7,33%	32,35%	0,00%	24,42%	24,03%	32,35%	No cumple
3,07%	24,13%	0,00%	5,64%	24,65%	2,07%	27,31%	0,00%	24,13%	24,65%	27,31%	No cumple
4,20%	25,03%	0,00%	4,24%	25,04%	3,41%	26,25%	0,00%	25,03%	25,04%	26,25%	No cumple

5.3.5 Análisis del factor de potencia

En la Tabla 5.10 se detallan los cálculos del factor de potencia para cada una de las mediciones realizadas. Se puede resumir que las únicas mediciones que no cumplen con el factor de potencia establecido por la normativa ARCERNNR 002/20 [33], son las mediciones 3 y 4. La tablas presentan los valores mínimos, medios y máximos del factor de potencia (FP) calculados a partir de los datos registrados por el analizador de calidad de energía eléctrica. Se observa que el factor de potencia en cada una de las fases, en las mediciones mencionadas, no cumple con el porcentaje de aceptación requerido por la normativa. El factor de potencia se calcula utilizando la siguiente fórmula:

Tabla 5.10. Resultado del factor de potencia en las diferentes mediciones.

Medición	Ubicación	Tabla	ARCERNNR 002/20
1	Salida del Transformador de 1500 Kva	Tabla 43	Cumple
2	Entrada del variador del Motor Ventilador Secadero (transformador 1500 kVA)	Tabla 44	Cumple
3	Caldero Benecke (transformador 1500 kVA)	Tabla 45	No Cumple
4	Transformador Padmouted de 1000 kVA	Tabla 46	No Cumple
5	Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA	Tabla 47	Cumple
6	Transformador de 2000 kVA	Tabla 48	Cumple
7	Salida a la Subestación Lasso	Tabla 49	No Cumple

5.3.6 Distorsión Armónica Total de Voltaje de las seis mediciones de bajo voltaje

La Tabla 5.11 muestra la Distorsión Armónica Total (T.H.D) del sistema, expresada en porcentaje de voltaje (% V THD) en diversos puntos de medición a lo largo de varios días. Esta tabla incluye los valores diarios de THD para seis mediciones distintas, además de los valores promedio, máximos y mínimos correspondientes a cada una de ellas. Se destaca que todos los valores registrados en cada medición se encuentran dentro del margen permitido por la normativa IEEE 519.

Tabla 5.11. Resumen de THD en las mediciones de bajo voltaje.

Distorsión armónica total de sistema						
V THD %						
Días	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Medición 6
1	5,44	7,12	3,53	6,93	5,32	2,77
2	4,85	7,56	3,49	6,25	5,35	2,85
3	4,93	7,48	3,54	6,39	5,38	2,61
4	5,21	7,50	3,31	7,08	5,77	1,85
5	5,38	7,72	3,36	7,20	5,27	2,67
6	5,26	7,62	3,43	7,21	5,51	1,86
7	5,57	7,38	3,41	7,01	5,17	1,76
Promedio	5,23	7,50	3,44	6,87	5,39	2,34
Max	5,57	7,72	3,54	7,21	5,77	2,85
Min	4,85	7,12	3,31	6,25	5,17	1,76
Norma IEEE 519 [%]	8	8	8	8	8	8
Observación	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

5.3.7 Armónicos de voltaje

En la Tabla 5.12 se presenta un resumen de los armónicos de voltaje detectados en cada medición realizada con el analizador de calidad de energía. Se observa que en las mediciones 2 y 3 se detecta un armónico de orden 5, y en la medición 4 también se registra un armónico de orden 2. Las demás mediciones cumplen con el porcentaje permitido según lo establecido en la norma IEEE 519 [22].

Tabla 5.12. Variación de voltaje 254 V del Transformador Padmounted de 1500kVA.

Medición	Ubicación	Tabla	ARCERNR 002/20
1	Salida del Transformador de 1500 Kva	Tabla 50	Cumple
2	Entrada del variador del Motor Ventilador Secadero (transformador 1500 kVA)	Tabla 51	No cumple
3	Caldero Benecke (transformador 1500 kVA)	Tabla 52	No Cumple
4	Transformador Padmouted de 1000 kVA	Tabla 53	No Cumple
5	Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA	Tabla 54	Cumple
6	Transformador de 2000 kVA	Tabla 55	Cumple
7	Subestación Lasso	Tabla 56	Cumple

5.3.8 Armónicos de Corriente

Para realizar el análisis de los armónicos de corriente se debe calcular con las ecuaciones (33), (34), (35) y (36) que se expresan a continuación:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_{Lpu}} \quad (33)$$

$$I_{cc} = \frac{1}{X_{pu}} \quad (34)$$

$$I_L = \frac{S}{V * \sqrt{3}} \quad (35)$$

$$I_{Lpu} = \frac{I_{fase}}{I_L} \quad (36)$$

En la Tabla 5.13, se observa que la relación I_{cc}/I_{Lpu} , calculada anteriormente y que se encuentra dentro del rango de $20 < 50$, corresponde a un valor de TDD del 7 %. Este valor está dentro de los límites aceptables, lo que indica que en las mediciones 1, 5, 6 y 7 la distorsión armónica está adecuadamente controlada según la norma IEEE 519 [29], que se muestra en la Tabla 5, ya que se encuentran dentro del porcentaje permitido. Sin embargo, las mediciones 2, 3 y 4 no cumplen con lo establecido por la norma.

Tabla 5.13. Resumen de los armónicos de corriente presentes en cada una de las mediciones.

Medición	Ubicación	Tabla	ARCERNR 002/20
1	Salida del Transformador de 1500 Kva	Tabla 57	Cumple
2	Entrada del variador del Motor Ventilador Secadero (transformador 1500 kVA)	Tabla 58	No cumple
3	Caldero Benecke (transformador 1500 kVA)	Tabla 59	No Cumple
4	Transformador Padmouted de 1000 kVA	Tabla 60	No Cumple
5	Línea de Recubrimiento del transformador Padmouted de 1500 kVA	Tabla 61	Cumple
6	Transformador de 2000 kVA	Tabla 62	Cumple
7	Entrada al alimentador de la planta Aglomerados Cotopaxi S. A.	Tabla 63	Cumple

En la Tabla 5.14 se observa la descripción de los armónicos presentes en las mediciones realizadas y los equipos afectados en la línea de MDF.

Tabla 5.14. Detalle de los armónicos de corriente en el Sistema Eléctrico de MDF.

Medición	Tabla	Armónico presente	Equipo al que afecta en el Sistema eléctrico de MDF
2	Tabla 58	3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 y 25	Motores, cables

Medición	Tabla	Armónico presente	Equipo al que afecta en el Sistema eléctrico de MDF
3	Tabla 59	5	Motores, cables, fuentes de poder
4	Tabla 60	3, 5 y 17	Motores, transformadores, cables

5.3.9 Medición del Sistema de Puesta Tierra

Las mediciones obtenidas en las puestas a tierra se presentan en la Tabla 5.15, donde se muestran los valores registrados.

Tabla 5.15. Medidas resistencia tomadas en la línea de producción de MDF.

Lugar de medición	Resistencia Ω
Transformador 2500 kVA	1.085
Transformador 2000 kVA	1.620
Transformador 1500 kVA	0.942
Transformador 1000 kVA	0.027
Malla de puesta a tierra 5x5 m	1.680
Malla de puesta a tierra 6x6 m	0.118

Estos valores indican la resistencia de puesta a tierra en cada transformador, medida en ohmios (Ω). Idealmente, valores bajos, como el del transformador de 1000 KVA (0,027 Ω), son deseables, ya que reflejan una mejor conexión a tierra.

Basándonos en las mediciones de resistencia de puesta a tierra realizadas en la línea de producción de MDF, observamos que todos los valores registrados están por debajo del estándar recomendado de 5,0 ohmios según la normativa [29]. Esto indica que los transformadores y las mallas de puesta a tierra en la línea de producción cumplen con los criterios de seguridad eléctrica establecidos.

5.4 ESTADO ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN MDF

A partir de la información recolectada sobre la infraestructura eléctrica de la línea de producción de MDF, se ha realizado un análisis detallado de la misma línea, identificando los siguientes parámetros a corregir:

- **Desbalance de Corriente**

Se ha identificado un desequilibrio significativo en diversas áreas de la planta, particularmente en el Transformador de 1000 kVA y en el Variador Secadero MDF, donde los valores exceden el 5% permitido según la normativa ARCENNR 002-20 [33]. Este desbalance podría estar generando problemas potenciales de sobrecalentamiento en los motores, lo que a

su vez puede causar vibraciones indeseadas y estrés mecánico, afectando la eficiencia operativa y la vida útil de los equipos.

- **Factor de potencia**

En general, se registran valores de factor de potencia que cumplen con la normativa ARCENNR 002-20 [33], con excepción de algunos casos como el Transformador de 1000 kVA y la Línea de Recubrimiento, donde se observan valores fuera de los rangos permitidos. Esto sugiere la necesidad de mejorar la eficiencia energética en esos puntos específicos.

- **Armónicos de Voltaje**

Se identifican problemas con armónicos de voltaje que exceden el 5% para algunos equipos como el Transformador de 1000 kVA y el Transformador de 2000 kVA. Esto podría provocar distorsiones en la red eléctrica y afectar el rendimiento de los equipos sensibles a la calidad de la energía.

- **Armónicos de Corriente**

Se detectan problemas de armónicos de corriente, especialmente en el Transformador de 1000 kVA y el Caldero Benecke, donde se superan los límites establecidos por la regulación IEEE 519 [22]. Estos armónicos pueden causar calentamiento adicional en los equipos eléctricos y afectar su vida útil.

- **Sistema de Puesta a Tierra**

Las mediciones de resistencia de puesta a tierra muestran valores que cumplen con los estándares de seguridad eléctrica, aunque existen variaciones significativas entre diferentes áreas. Solo se recomienda optimizar las conexiones y hacer una continua inspección para identificar posibles puntos de mantenimiento.

5.4 SOLUCIONES PROPUESTAS A IMPLEMENTAR EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE MDF

Basándonos en los hallazgos observados en la línea de producción de MDF, se evaluarán las siguientes acciones para estudiar el impacto de estas soluciones en la fiabilidad y eficiencia de la infraestructura eléctrica:

- **Desbalance de Corriente**

Es crucial realizar un análisis detallado de las causas subyacentes del desequilibrio significativo detectado en áreas críticas como el Transformador de 1000 kVA y el Variador Secadero MDF. Se sugiere implementar un mantenimiento preventivo regular para mitigar las vibraciones y el estrés mecánico que podrían estar contribuyendo al desequilibrio. Además, se recomienda considerar la instalación de dispositivos de monitoreo continuo para detectar y corregir desviaciones de corriente de manera proactiva.

- **Factor de potencia**

Dado que algunos equipos, como el Transformador de 1000 kVA, presentan valores de factor de potencia fuera de los rangos permitidos, se recomienda implementar medidas correctivas, como la instalación de capacitores, para mejorar la eficiencia energética. Esto no solo optimizará el uso de la energía, sino que también ayudará a cumplir con las normativas establecidas, reduciendo así los costos operativos relacionados con la energía reactiva.

- **Armónicos de Voltaje y Corriente**

Para abordar los problemas identificados con los armónicos de voltaje y corriente, especialmente en los Transformadores de 1000 kVA y 1500 kVA, se sugiere la instalación de filtros de armónicos adecuados. Estos dispositivos ayudarán a mitigar las distorsiones en la red eléctrica y a proteger los equipos sensibles, mejorando así la calidad de la energía y prolongando la vida útil de los activos eléctricos.

- **Sistema de Puesta a Tierra**

Aunque las mediciones actuales cumplen con los estándares de seguridad eléctrica, se recomienda realizar una revisión continua de las conexiones de puesta a tierra para identificar posibles puntos de mejora y llevar a cabo un mantenimiento preventivo. Esto garantizará que la conexión a tierra cumpla con los estándares en todas las áreas de la planta, minimizando los riesgos de descargas eléctricas y asegurando un entorno seguro para las operaciones.

5.4 SIMULACIÓN Y MODELADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ETAP 19.0.1

Para realizar la simulación del diagrama unifilar de la industria, se utilizó el software ETAP 19.0.1. Este software permite corroborar los datos tomados por el analizador de redes, el cual

ayudó a identificar los puntos críticos en la instalación eléctrica de la empresa. Además, ETAP facilitó la propuesta de correcciones para mitigar los problemas detectados.

5.4.1 Diseño del esquema del sistema eléctrico

El diseño del esquema y el ingreso de datos en el software ETAP 19.0.1 se realizaron con base en un levantamiento detallado del sistema eléctrico de los transformadores más relevantes, los cuales subdividen la línea de producción, como se detalla en la Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12 y la Tabla 13. Este proceso también incluyó descripciones específicas de cables, presentadas en la Tabla 64 y Tabla 65, así como las cargas de mayor potencia, variadores, motores, protecciones, y acometidas principales y secundarias en media y baja tensión. El diagrama correspondiente se presenta en el ANEXO E

Una vez obtenido el diagrama unifilar con todos los datos detallados, especificaciones técnicas y valores medidos de consumo en amperaje de las cargas, se ingresó el esquema eléctrico en el software ETAP 19.0.1.

- **Selección e ingreso de datos en el software**

Ya modelado el esquema eléctrico industrial en ETAP 19.0.1, se ingresaron los datos recopilados en las secciones correspondientes de la interfaz, como las pestañas de "Información", "Clasificación" y "Cortocircuito" como se observa en la Figura 5.2. Estos datos son fundamentales para realizar un análisis detallado del flujo de armónicos.

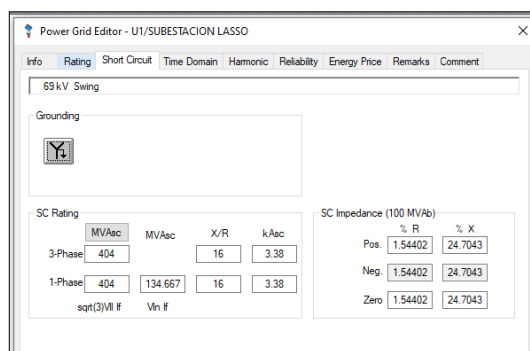


Figura 5.2. Ingreso datos (Power Grid Editor).

- **Creación del espectro armónico**

El software ETAP incluye una biblioteca con varios espectros armónicos predefinidos y permite la adición de nuevos espectros armónicos, siempre que se cuente con los porcentajes correspondientes del contenido armónico, como se muestra en la Figura 5.3. En este caso, se

generaron nuevos espectros armónicos de corriente utilizando los datos obtenidos con los analizadores Fluke 1750 y Fluke 435. Para cada espectro, se ingresaron los valores del porcentaje de armónicos correspondientes a los órdenes del 1 al 25, ya que a partir del orden 25 en adelante, los valores son muy bajos y no tienen un impacto significativo en el sistema eléctrico. La Figura 0.3, Figura 0.4, Figura 0.5, Figura 0.6, Figura 0.7 y la Figura 0.8 muestran los resultados de la medición de armónicos en cada uno de los puntos de estudio.

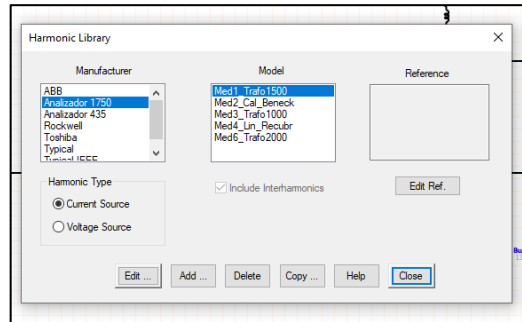


Figura 5.3. Librería de espectros armónicos.

- **Reporte de resultados en el escenario cero**

En la Tabla 66 se muestran los valores de %THD de corriente en todo el esquema eléctrico de la línea de producción MDF que se subieron al software. Podemos observar el comportamiento de esta distorsión armónica en los siguientes buses: en el bus 8, se registra un valor de 5.57%; en los buses 10, 18, 27, 29 y 30, un valor de 12,13%; en el bus 59, un valor de 14,01%; en los buses 31 y 54, un valor de 5,73%; en los buses 36 y 42, un valor de 11,7%; y en el bus 43, un valor de 31,20%.

Es importante destacar que los armónicos de corriente de 5° orden se originan principalmente en los buses 42 y 43. Estos buses se encuentran aguas abajo del esquema eléctrico, lo que provoca que los armónicos se propaguen aguas arriba hacia otros buses como el 36 y el 59, entre otros.

En la Tabla 67, se presentan los valores de distorsión armónica de voltaje en los diferentes buses del sistema. La mayoría de los buses muestran valores de distorsión dentro de los límites permitidos del 5% según la norma IEEE 519. Sin embargo, en el bus 43 se observa un valor que excede este límite, mientras que los buses 42 y 36 presentan valores elevados, pero dentro de los límites normativos. Estos valores elevados en los buses 42 y 36 se deben a la presencia de varios equipos, como variadores de frecuencia, que contribuyen a la distorsión armónica.

5.4.2 Cálculo del banco de capacitor

- Cálculo y dimensionamiento de capacidad de los condensadores.

Datos:

$$P = 90,5 \text{ kW}$$

$$Q = 193,26 \text{ kVAr}$$

$$S = 214,36 \text{ kVA}$$

$$\text{Cos}(\varphi_1) = 0,6$$

Obtención del ángulo:

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0,6) * \frac{180}{\pi}$$

φ_1 reemplazando en $\text{Tan}(\varphi_1)$

φ_1 reemplazando en $\text{Tan}(53,13)$

$$\text{Tan}(\varphi_1) = \text{Tan}\left(\frac{53,13 * \pi}{180}\right)$$

Factor de potencia deseado:

$$\cos(\Phi_2) = 0,98$$

Obtención de ángulo deseado:

$$\Phi_2 = \cos^{-1}$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{0,98 * 180}{\pi}\right)$$

$$\Phi_2 = 11,48$$

Reemplazando:

φ_2 en $\text{Tan}(\varphi_2)$

$\text{Tan}(11,48)$

$$\text{Tan}(\varphi_2) = \text{Tan}\left(\frac{11,48 * \pi}{180}\right)$$

$$\text{Tan}(\varphi_2) = 0,203$$

Hallando la potencia reactiva del condensador:

$$QC_1 = P \times (\text{Tan}(\varphi_1) - \text{Tan}(\varphi_2))$$

$$QC_1 = 90,5 \times (1,33 - 0,203) \text{ kVAr}$$

$$QC_1 = 102,29$$

Utilizando la tabla de factor k

$$fp_{inicial} = 0,6$$

$$fp_{final} = 0,98$$

$$k = 1,13$$

$$QC_2 = k * P$$

$$QC_2 = 1,13 * 09,5$$

$$QC_2 = 102,27 \text{ kVAr}$$

Se necesita ≈ 100 kVAr para corregir fp de 0,6 a 0,98

Capacidad del condensador necesario para la corrección.

$$\omega = 2\pi \times f$$

$$\omega = 2\pi \times 60$$

$$\omega = 376,99$$

$$C = QC/(\omega \times v_{rms}^2)$$

$$C = \frac{102,27}{\omega \times v_{rms}^2}$$

$$C = \frac{102,27}{376,99 \times 440^2}$$

Total, capacidad de condensadores en μf

$$C = 1401,51 \mu f$$

- **Resultados de la implementación del banco de capacitor**

La Figura 5.4 ilustra el comportamiento de la curva de impedancia (en ohmios) en función del orden de los armónicos cuando los bancos de condensadores están operativos en las barras. Este análisis es crucial para comprender cómo la presencia de capacitores afecta la respuesta del sistema a diferentes armónicos, permitiendo identificar posibles resonancias y sus impactos en la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Al observar la curva de impedancia, podemos evaluar la necesidad de implementar medidas correctivas, como filtros armónicos, para mitigar los efectos adversos y asegurar un rendimiento óptimo del sistema.

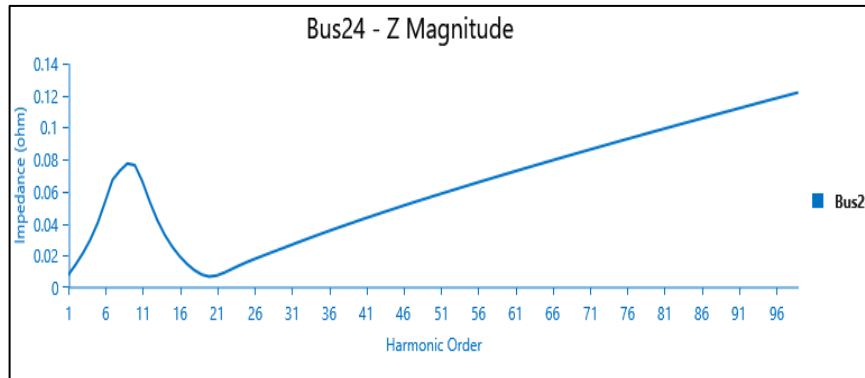


Figura 5.4. Armónico con Banco de Capacitores Cerrado en el Bus 20.

La Figura 5.5 muestra el comportamiento de la curva de impedancia (en ohmios) en relación con el orden de los armónicos cuando se retira un banco de capacitores en la barra 20. Este análisis es fundamental para comprender cómo la desconexión de los capacitores influye en la respuesta del sistema eléctrico a diferentes armónicos. La curva de impedancia revela las variaciones en la resonancia y la estabilidad del sistema al remover los capacitores, proporcionando información valiosa para evaluar y diseñar estrategias de mitigación de armónicos.

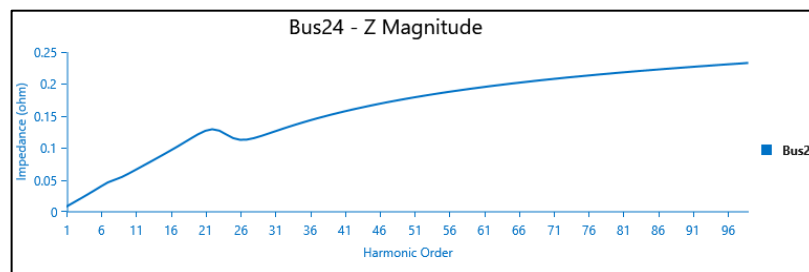


Figura 5.5. Armónicos con Banco de Capacitores Abierto en el Bus 20.

5.4.3 Diseño del filtro pasivo

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la configuración del sistema eléctrico empleando el software ETAP. En este estudio, se calcularon los valores del porcentaje de Distorsión Total de Armónicos (THD) tanto para el voltaje que se encuentran en la Tabla 50, Tabla 51, Tabla 52, Tabla 53, Tabla 54, Tabla 55 y la Tabla 56, como para la corriente en cada uno de los buses del sistema como muestran la Tabla 57, Tabla 58, Tabla 59, Tabla 60, Tabla 61, Tabla 62 y la Tabla 63. Este análisis es fundamental para evaluar la eficacia del nuevo filtro 4 y su impacto en la calidad de la energía, asegurando así la reducción de las distorsiones armónicas y la mejora del desempeño general del sistema eléctrico.

En la Tabla 66 y la Tabla 67 se muestran los valores de %THD de distorsión armónica de voltaje en los buses, los cuales se encuentran dentro de los límites permitidos del 5%. tomando como referencia la norma IEEE 519. Sin embargo, como se puede observar, el bus 43 excede este límite, presentando una distorsión superior al 5%. Por otro lado, los buses 42 y 36 muestran niveles de distorsión elevados, aunque sin superar el umbral establecido por la norma.

Este análisis permite identificar los puntos críticos del sistema eléctrico y tomar medidas correctivas para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad de energía.

Para minimizar los armónicos de corriente, identificamos los puntos de generación de armónicos a través de una simulación de flujo armónico en el módulo ETAP. En base a este análisis, se determinó la necesidad de dimensionar un filtro pasivo específicamente para la barra 24, uno de los ramales con mayor carga. La Tabla 5.16 muestra que un filtro tiene como objetivo reducir significativamente los niveles de distorsión armónica, mejorando así la calidad de la energía y asegurando un funcionamiento más eficiente y seguro del sistema eléctrico como se observa en la Figura 5.6. A continuación, el cálculo del filtro pasivo.

Obtención de la potencia reactiva.

$$kVAr = kW[Tan(Cos^{-1})(FPa) - Tan(Cos^{-1})(FPn)]$$

$$kVAr = 3.06$$

Cálculo del banco capacitivo.

$$C_{banco} = \frac{MVAR}{W(KV_L^2)}$$

Donde:

W= frecuencia angular

$$C_{banco} = 0.00000157f$$

Cálculo de impedancia efectiva.

$$X_{efect} = \frac{(KV_L^2)}{MVAR}$$

$$X_{efect} = 63.26\Omega$$

Cálculo de impedancia capacitiva.

$$X_c = \left[\frac{h^2}{h^2 - 1} \right] (X_{efect})$$

$$X_c = 65.89\Omega$$

Cálculo de impedancia inductiva.

$$XL = \frac{Xc}{h^2}$$

$$XL = 2.64\Omega$$

Tabla 5.16. Distorsión armónica de corriente en carga 5 Prensas.

Distorsión de Corriente				
ID Bus		Fundamental	RMS	THD
Desde Bus	A Bus	Amperios	Amperios	%
Bus24	Bus20	437.13	437.33	3.05

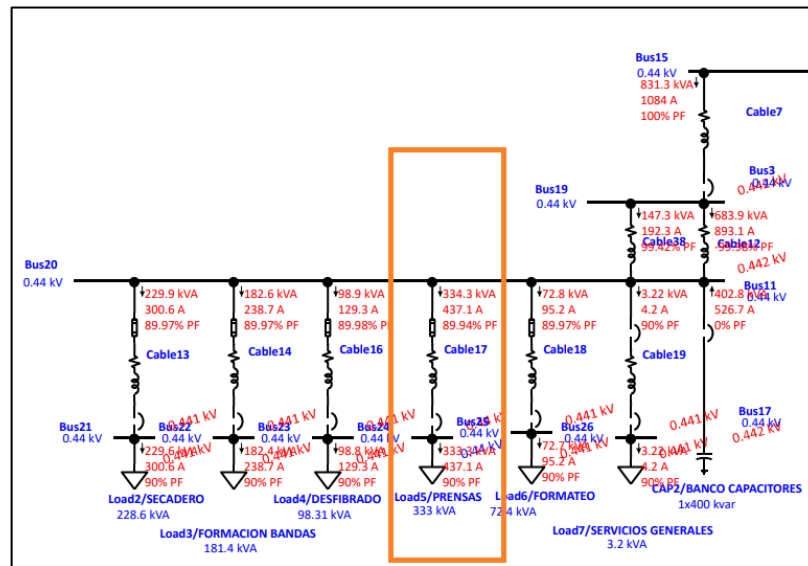


Figura 5.6. Identificación de Magnitudes Eléctricas en la Carga 5 de Prensas.

La Figura 5.7 presenta las magnitudes eléctricas asociadas a la carga 5 de Prensas, incluyendo potencia activa, potencia reactiva, corriente y factor de potencia. Este análisis detallado es crucial para evaluar el comportamiento de la carga y determinar la necesidad de instalar un filtro pasivo. La instalación del filtro pasivo en esta carga específica permitirá optimizar el rendimiento eléctrico, reducir las pérdidas y mejorar la eficiencia del sistema, garantizando así una operación más estable y confiable.

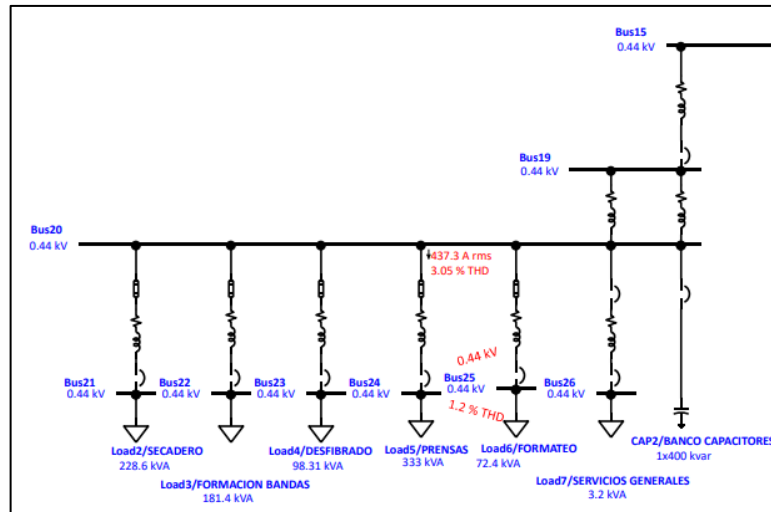


Figura 5.7. Identificación donde existe armónico de corriente.

Identificamos la potencia activa, la potencia aparente y el factor de potencia a partir de los valores del flujo de carga. Estos datos son esenciales para el dimensionamiento preciso de un filtro pasivo. Al analizar estos parámetros, podemos determinar la capacidad y las características necesarias del filtro para optimizar el rendimiento del sistema eléctrico, mejorar la calidad de la energía y reducir las distorsiones armónicas. La Tabla 5.17 muestra el enfoque que garantiza un filtro pasivo eficaz y eficiente en la mitigación de problemas relacionados con la calidad de la energía.

Tabla 5.17. Valor de potencia P, S y factor de potencia del flujo de carga.

ID Cable	ID Bus	kVA Flow	kW Flow	% PF
Cable17	Bus24	333.3	229.9	89.94

La Figura 5.8 muestra la creación de un filtro pasivo para reducir el quinto armónico en la barra 24.

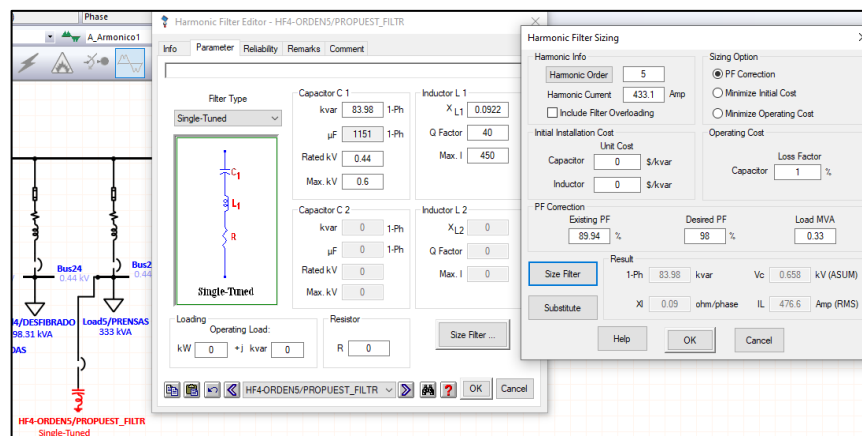


Figura 5.8. Diseño de Filtro Pasivo para el Bus 24.

La Figura 5.8 muestra los parámetros necesarios para diseñar un nuevo filtro pasivo en el módulo de ETAP. Estos parámetros incluyen la corriente armónica en amperios, el factor de potencia existente y el deseado, así como los datos del capacitor y del inductor. Este conjunto de información es crucial para la configuración y dimensionamiento adecuado del filtro, asegurando su efectividad en la mitigación de armónicos y la mejora de la calidad de la energía en la barra 24.

- **Filtro Pasivo de Armónicos Diseñado para la Mitigación en el Orden 5**

Este filtro pasivo ha sido diseñado específicamente para mitigar los armónicos en el orden 5, con el objetivo de reducir su impacto en el sistema eléctrico. El diseño se centra en optimizar la capacidad del filtro para absorber y minimizar las distorsiones armónicas en este rango específico, como lo muestra la Tabla 5.18.

Tabla 5.18. Tipo de filtros pasivos sintonizados individualmente.

Filtro	Barra conectada	Capacitor C1			Inductor L1			R
		ID	kV	Max kV	kvar	XI	Q Fact.	Max I
HF1- ORDEN5/PROPUEST_FILT R	Bus42	0.44	0.6	52.04	0.15	40	350	0
HF2- ORDEN5/PROPUEST_FILT R	Bus43	0.44	0.44	59.36	0.13	10	350	0
HF3- ORDEN5/PROPUEST_FILT R	Bus55	0.44	0.44	141.13	0.05	40	400	0
HF4- ORDEN5/PROPUEST_FILT R	Bus24	0.44	0.6	83.98	0.09	40	450	0

- **Resultados de flujos de armónicos después de instalar un filtro pasivo**

Escenario 1:

La Figura 5.9 muestra la comparación de la distorsión de voltaje total (THD %) en dos escenarios distintos. En el “Escenario 0”, que representa la situación actual de la línea MDF en la empresa, se observan mayores niveles de distorsión armónica en la mayoría de las barras, lo que resalta la necesidad de dimensionar uno o varios filtros armónicos de diferente orden. En el “Escenario 1”, se modela en el software ETAP la implementación de un filtro armónico de orden 5 en la barra 42, logrando reducir la distorsión armónica del 4,69%, en el escenario 0 al 2,56% en el escenario 1. Esta reducción significativa sugiere una mejora considerable en la calidad de la energía a través del sistema eléctrico.

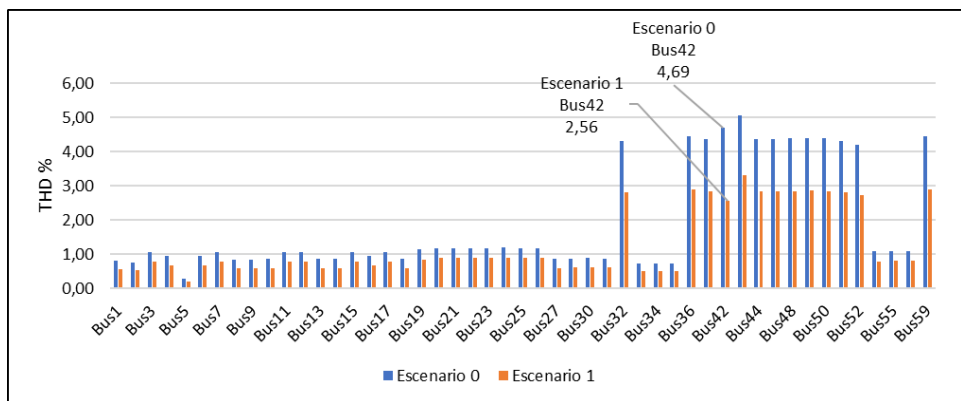


Figura 5.9. Mitigación de armónicos en el escenario 1.

Escenario 2:

Dentro del análisis del escenario 2, se obtienen los siguientes resultados: la barra 43, tomada como punto de referencia, presenta un porcentaje de armónicos del 5,05% en el escenario cero. Al insertar el filtro en la barra 43, el nivel de armónicos se reduce al 2,74% como se observa en la Figura 5.10.

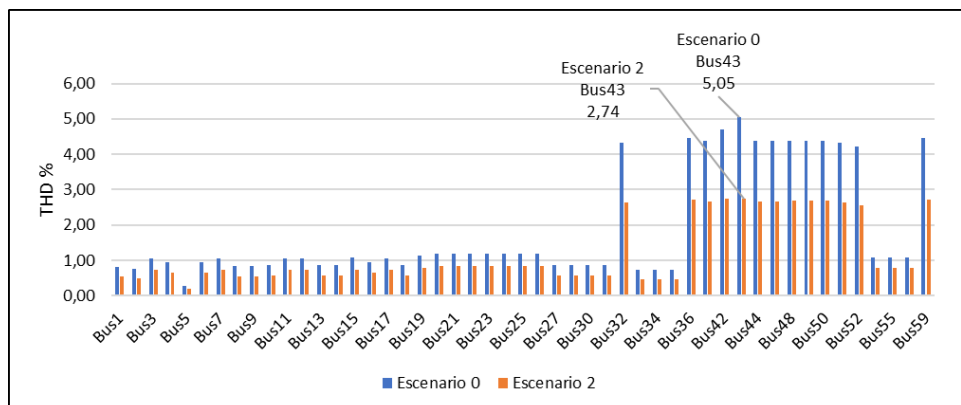


Figura 5.10. Mitigación de armónicos en el escenario 2.

Escenario 3:

Dentro del análisis del escenario 3, se obtienen los siguientes resultados: la barra 55, tomada como punto de referencia, presenta un porcentaje de armónicos del 1,09% en el escenario cero. Al insertar el filtro en la barra 55, el nivel de armónicos se reduce al 0,49% como se observa en la Figura 5.11.

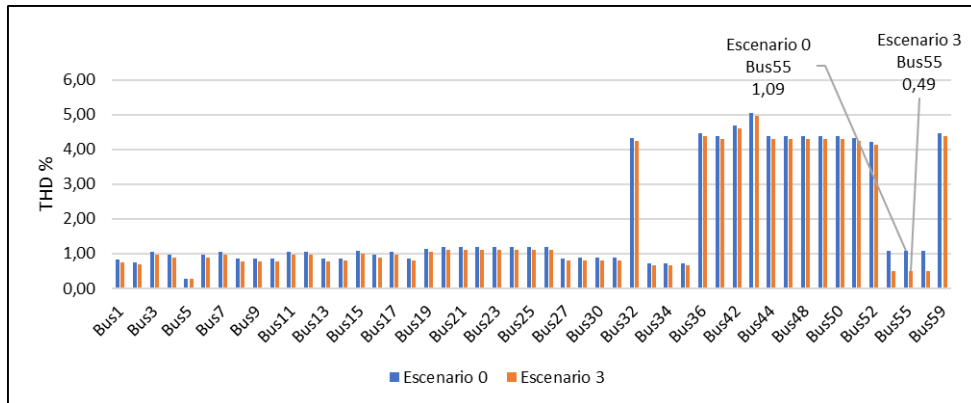


Figura 5.11. Mitigación de armónicos en el escenario 3.

Escenario 4:

Dentro del análisis del escenario 4, se obtienen los siguientes resultados: la barra 24, tomada como punto de referencia, presenta un porcentaje de armónicos del 1,20% en el escenario cero. Al insertar el filtro en la barra 24, el nivel de armónicos se reduce al 0,77% como se observa en la Figura 5.12.

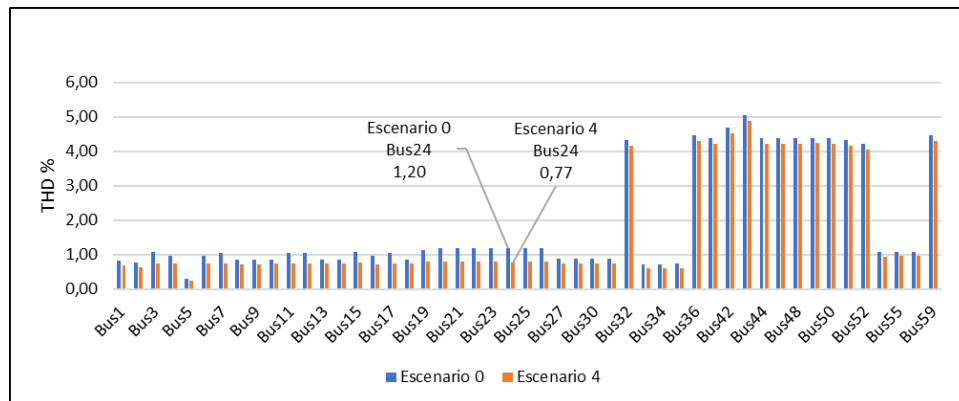


Figura 5.12. Mitigación de armónicos en el escenario 4.

Escenario 5:

Dentro del análisis del escenario 5, se obtienen los siguientes resultados: la barra 32, tomada como punto de referencia, presenta un porcentaje de armónicos del 4,32% en el escenario cero. Al insertar el filtro en la barra 32, el nivel de armónicos se reduce al 2,33% como se observa en la Figura 5.13.

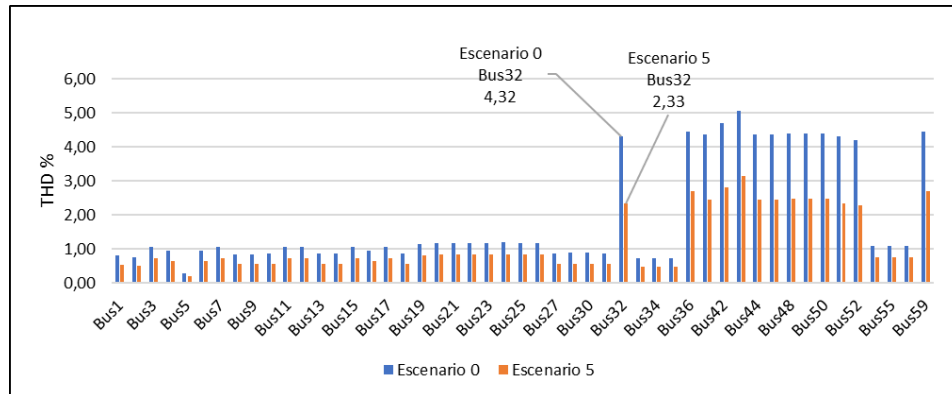


Figura 5.13. Mitigación de armónicos en el escenario 5.

5.4.4 Diseño del filtro activo para mitigar armónicos de tensión y corriente

Los datos de los armónicos de tensión y corriente se han analizado para demostrar distorsiones significativas en las diferentes fases del sistema eléctrico. En cuanto a los armónicos de tensión, las pruebas muestran valores de distorsión elevados en las fases AN, BN y CN, con promedios superiores al 3% y picos superiores al 4%. Estos niveles de distorsión están por encima de los estándares aceptables, lo que indica que tienen un impacto directo y negativo en la estabilidad del sistema y la eficiencia operativa. Los altos niveles de distorsión armónica en la tensión pueden causar resonancias, sobrecalentamiento del equipo y una reducción de la vida útil de los componentes del sistema.

Sin embargo, los armónicos de corriente de las fases A, B y C muestran niveles de distorsión preocupantes. A pesar de que los promedios fueron mucho más bajos, se registraron picos del 23 % en la corriente. Estas fluctuaciones en la corriente armónica pueden aumentar las pérdidas del sistema y acelerar el desgaste de los componentes eléctricos, lo que afecta su rendimiento y confiabilidad a largo plazo. Las elevadas distorsiones de corriente pueden aumentar las pérdidas por calor y causar fallas anticipadas en los equipos eléctricos.

- **Resultados**

Se utilizaron los datos de los archivos Excel para identificar los patrones y niveles de armónicos presentes en las distintas fases. En la Figura 5.14 se pueden ver los valores de armónicos y los valores máximos y medios para cada armónico, así como los armónicos que se encuentran por fuera de rango. En este caso vemos como se tiene un problema de 5to armónico. Superando el 5%.

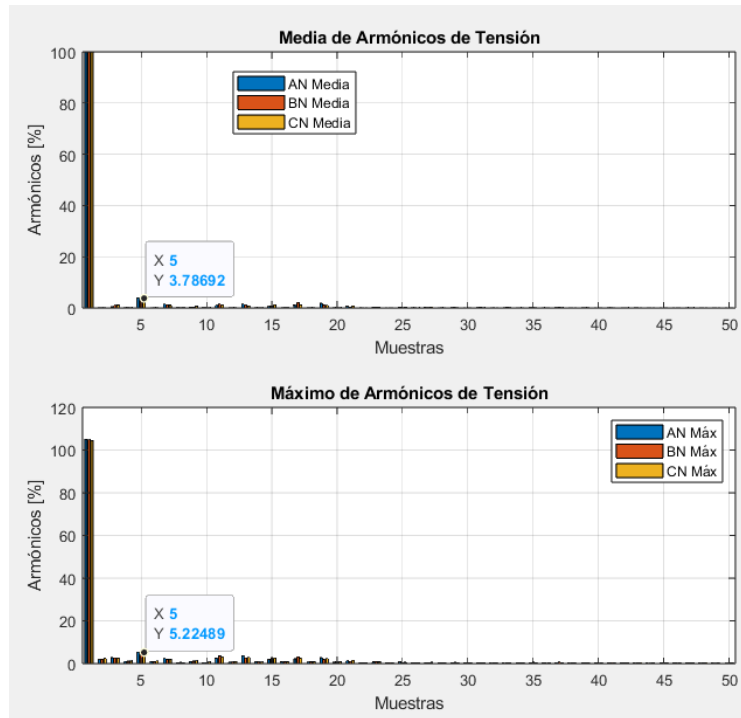


Figura 5.14. Armónicos de tensión presentes en el sistema.

En la Figura 5.15 podemos ver los armónicos de corriente para cada una de las fases y podemos observar cómo se tienen altos niveles de armónicos de tercer y quinto orden superando ambos el 20%. Aunque la normativa no indica un valor mínimo, es importante reducir el impacto de los armónicos de 3er orden y 5to orden ya que estos generan sobrecalentamiento en el neutro, pérdidas de energía y contaminación electromagnética en equipos y bancos de condensadores.

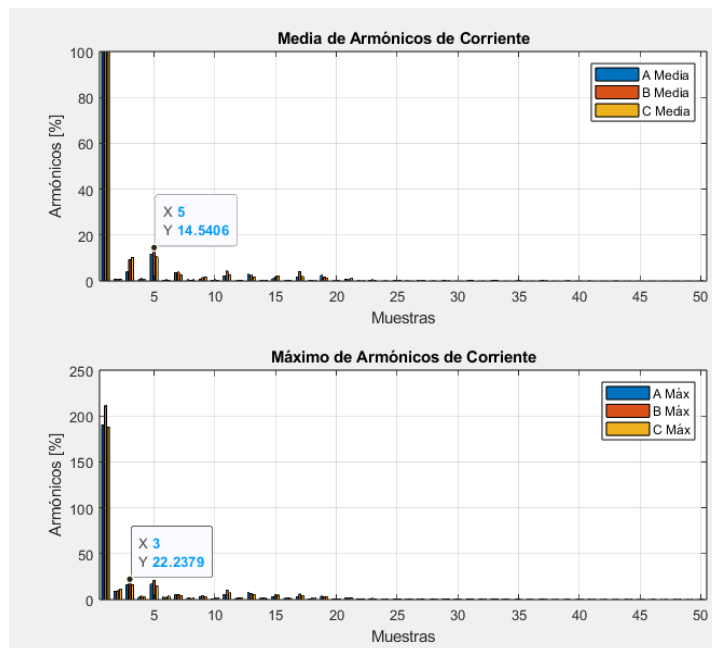


Figura 5.15. Armónicos de corriente presentes en el sistema.

Una comparación detallada de los valores esperados del Total Harmonic Distortion (THD) antes y después de la implementación de un filtro activo se encuentra en la Figura 5.16. El gráfico inferior muestra el THD después de la implementación del filtro activo, lo que demuestra una reducción significativa en los niveles de distorsión armónica. La reducción de los valores máximos de THD destaca la efectividad del filtro activo en la reducción de armónicos, mejorando la calidad de la energía eléctrica y reduciendo el impacto negativo de las armónicas en el sistema.

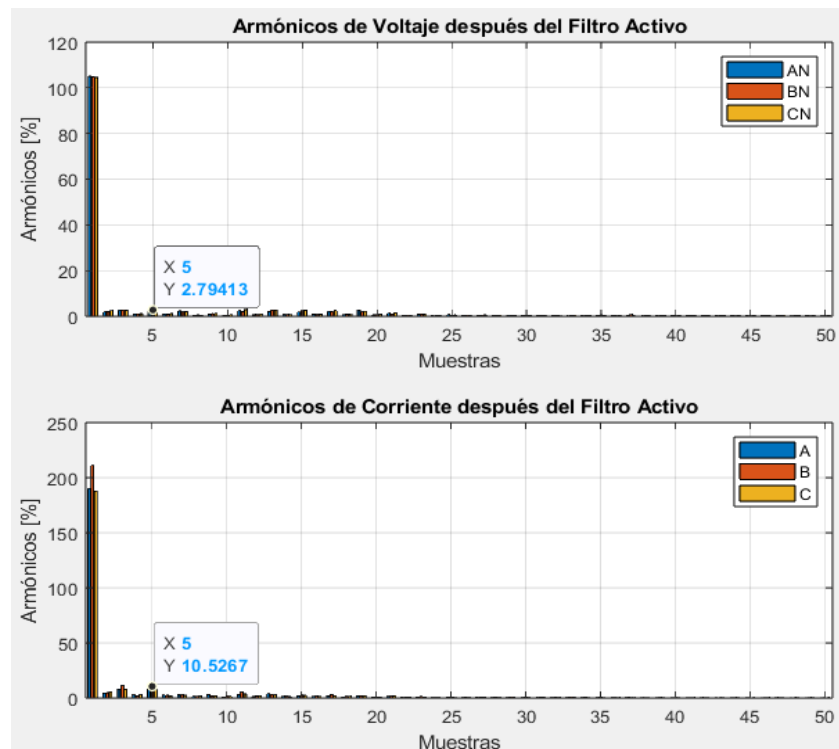


Figura 5.16. Armónicos de corriente y tensión esperados en el sistema luego de instalación del filtro activo.

Los valores esperados del Total Harmonic Distortion (T.H.D.) tanto antes como después de la implementación de un filtro activo en el sistema eléctrico se muestran en la Figura 5.17. Los niveles de THD sin filtro se encuentran en la parte superior del gráfico, con valores de hasta 6,61% que indican una distorsión armónica significativa en el sistema. Sin embargo, los valores de THD después de la aplicación del filtro activo se muestran en la parte inferior del gráfico. Los niveles de distorsión armónica han disminuido significativamente con un valor máximo registrado de 2,25%, lo que demuestra la eficacia del filtro para eliminar armónicos no deseados. Además, se puede ver como se tienen menos variaciones en el tiempo lo cual se traduce en una reducción de armónicos inyectados en el sistema. Esta disminución del THD mejora la calidad de la energía eléctrica y garantiza un funcionamiento más seguro y eficiente del sistema eléctrico.

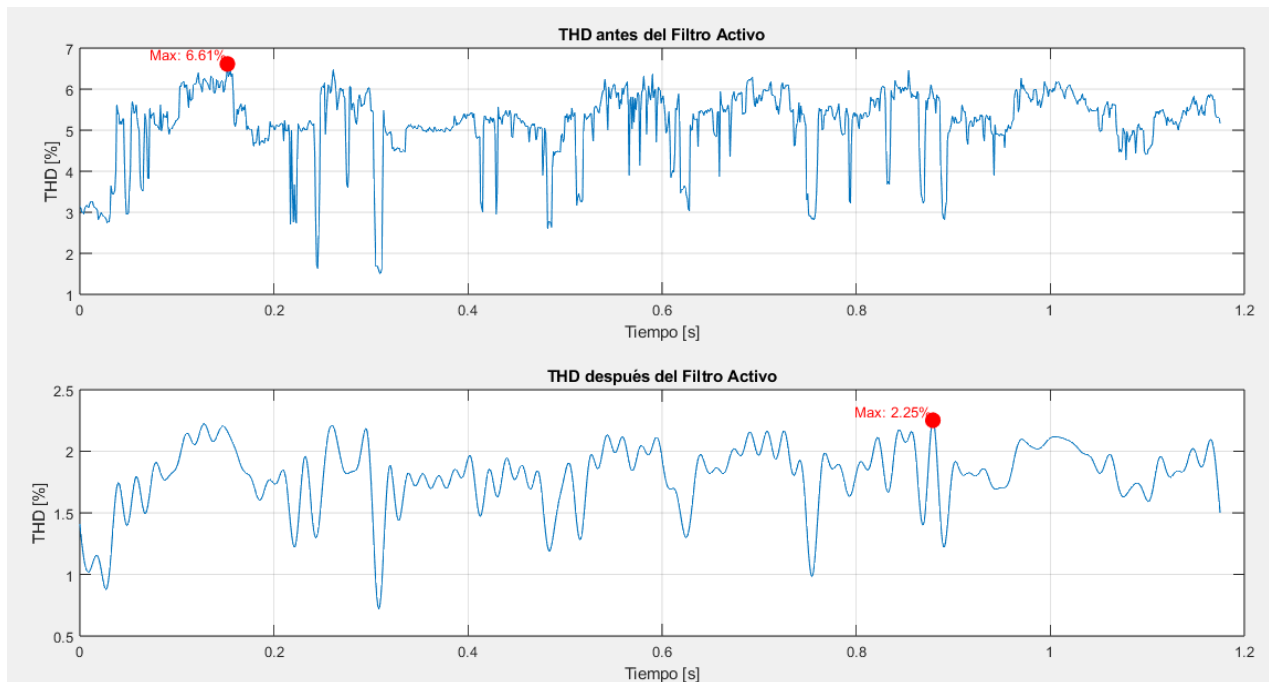


Figura 5.17. Valores esperados del THD antes y después de la implementación del filtro activo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede ver que la implementación de un filtro de armónicos puede reducir los armónicos de tensión de 5.22% a 2.79% y de corriente de 22.23% a 10,52%.

Factor K

Tras realizar la simulación del diagrama unifilar utilizando el software ETAP, se obtienen resultados simulados que incluyen los armónicos de voltaje, corriente y ángulo de voltaje para cada bus.

Bus 55

Valor *RMS* para voltaje:

$$RMS_V = \sqrt{(V_{h1}^2) + (V_{h2}^2) + (V_{h2}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{hn}^2)}$$

$$RMS_V = 0.446 \text{ kV}$$

Valor *RMS* para corriente:

$$RMS_i = \sqrt{(I_{h1}^2) + (I_{h2}^2) + (I_{h2}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{hn}^2)}$$

$$RMS_i = 241.1 \text{ A}$$

Una vez obtenidos los valores RMS del Bus 55, se procede a calcular el porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD) para los voltajes y corrientes.

$$THD_V = \left[\frac{\sqrt{(V_{h2}^2) + (V_{h3}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{h5}^2) + (V_{hn}^2)}}{V_{h1}} \right] \quad (100)$$

$$THD_V = 0.32\%$$

Valor *THD* para corriente:

$$THD_i = \left[\frac{\sqrt{(I_{h2}^2) + (I_{h3}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{h5}^2) + (I_{hn}^2)}}{V_{h1}} \right] \quad (100)$$

$$THD_i = 2.85\%$$

Para el cálculo del factor de potencia, que generalmente se obtiene a partir de los valores de potencia y ángulos respectivos, se debe tener en cuenta que el software ETAP no proporciona ángulos de corriente. En su lugar, se aplica una ecuación alternativa para determinar el factor de potencia, la cual involucra el *THDi*

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

$$FP = 0.9996$$

Por último, se realiza el cálculo para *K* para dimensionamientos de transformadores:

$$Factor K = \sum I_n^2 h^2 = (I_{h1}^2)(1^2) + (I_{h2}^2)(2^2) + (I_{h3}^2)(2^2) + (I_{h4}^2)(4^2) + (I_{hn}^2)(n^2)$$

Para conocer el valor *I* individual, que será multiplicado por su número armónico:

$$I_{hn} = \frac{Ih}{RMS_i}$$

$$Factor K = 1$$

Bus 32:

$$RMS_V = 0.435 \text{ kV}$$

$$RMS_i = 621.89 \text{ A}$$

$$THD_V = 4.38\%$$

$$THD_i = 3.53\%$$

$$FP = 0.999$$

$$Factor K = 0.999$$

Bus 43:

$$RMS_V = 0.439 \text{ kV}$$

$$RMS_i = 319.17 A$$

$$THD_V = 5.10\%$$

$$THD_i = 31.19\%$$

$$FP = 0.9547$$

$$Factor K = 0.955$$

Para Bus 42:

$$RMS_V = 0.438 kV$$

$$RMS_i = 326.51 A$$

$$THD_V = 4.77\%$$

$$THD_i = 11.71\%$$

$$FP = 0.9932$$

$$Factor K = 0.993$$

Para Bus 24:

$$RMS_V = 0.440 kV$$

$$RMS_i = 437.3 A$$

$$THD_V = 1.31\%$$

$$THD_i = 3.04\%$$

$$FP = 0.9995$$

$$Factor K = 1$$

5.4.5 Análisis técnico económico

Los costos económicos son aquellos que pueden cuantificarse en términos monetarios, aunque en algunos casos pueden resultar complejos de determinar. Se dividen en dos categorías: visibles y ocultos.

Costos Visibles:

- Mayor consumo eléctrico.
- Puntas de consumo eléctrico.
- Recargos o pagos por energía reactiva.

Costos Ocultos:

- Pérdidas en la distribución.
- Pérdidas de potencia y energía (debido al efecto Joule y pérdidas magnéticas).
- Ampliación de instalaciones.
- Paradas en los procesos productivos.

Estos costos pueden variar en función de las características específicas de la instalación y las cargas conectadas, y su impacto puede ser significativo.

La simulación de la propuesta de implementación de filtros armónicos en el sistema eléctrico de la línea MDF, utilizando el software ETAP, nos permite evaluar diversos escenarios para identificar la mejor opción para mitigar la distorsión armónica.

- **Análisis escenario 1**

La propuesta es la implementación del filtro armónico HF3 de 141,1 kVA, de orden 5 en el Bus 55 que es alimentación principal Chipeadora Globus con nivel de voltaje de 440V, para mitigar la distorsión armónica.

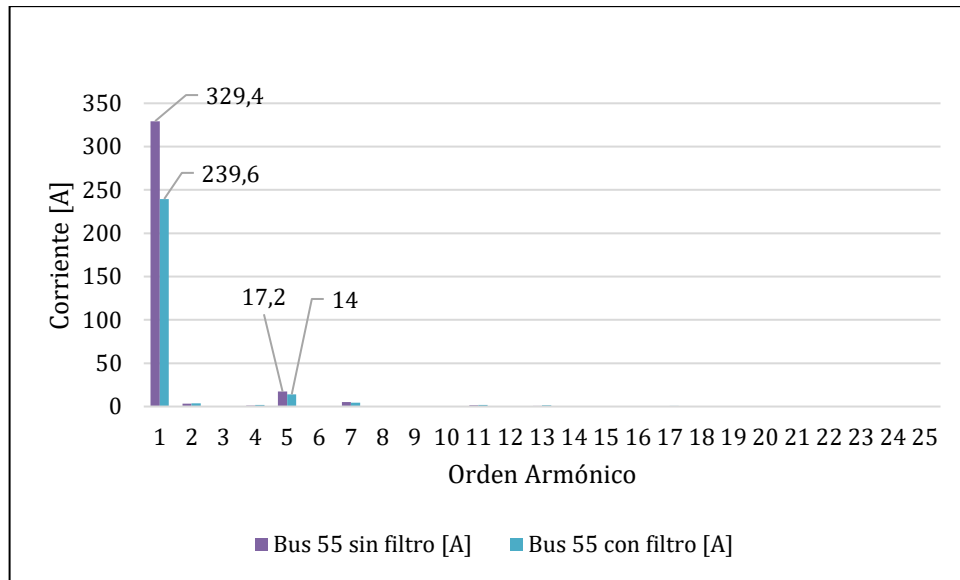


Figura 5.18. Comparación de corriente en Bus 55 con y sin filtro armónico.

La Figura 5.18 muestra la comparación de la corriente armónica en el Bus 55, que alimenta a la chipeadora Globus, con y sin filtro. Se observa una reducción de la corriente fundamental de 329,4 A a 239,7 A y una disminución del quinto armónico de 17,2 A a 14 A.

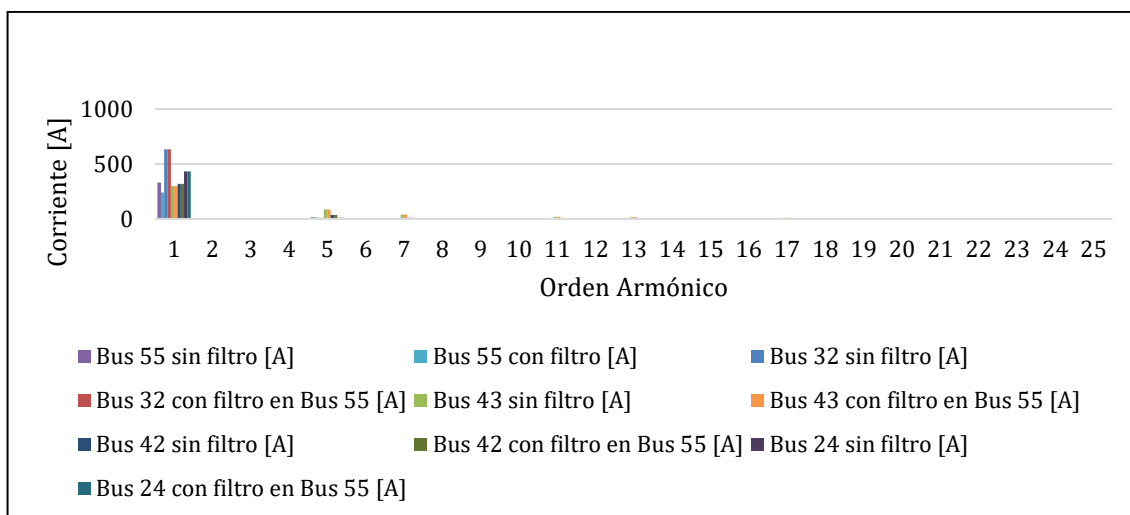


Figura 5.19. Comportamiento de Bus 32, 43,42, 24 con filtro armónico en el Bus 55.

En la Figura 5.19 muestra el comportamiento del Bus 32,43,42,24 ante la implementación de un filtro armónico en el Bus 55, en el cual podemos identificar que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica.

Tabla 5.19. Consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en dólares en la Alimentación Globus.

Bus 55, Alimentación Chipeador Globus						
Armónico	Sin Filtro Corriente [A]	Con Filtro Corriente [A]	Diferencia	Potencia Perdida [W]	Energía [Wh]	Ahorro Anual [\$/kWh]
Fundamental	329,40	239,60	89,80	1145,10	10031103,18	702,18
5	17,20	14,00	3,20	1,45	12740,36	0,89
7	5,00	4,40	0,60	0,05	447,99	0,03
TOTAL					0044291,54	703,10

La Tabla 5.19 muestra el consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en dólares en la alimentación Globus. Podemos observar que la implementación de un filtro armónico en el Bus 55, que alimenta a la chipeadora Globus, reduce significativamente la corriente fundamental de 329,4 A a 239,6 A, lo que se traduce en un ahorro anual de \$702,18 y una disminución de la energía perdida en 10031103,18 Wh. Aunque la reducción en los armónicos de quinto y séptimo orden es menor, contribuye a una mejora en la calidad de la energía, sumando un ahorro total anual de \$703.10. La mayor parte del beneficio económico proviene de la reducción de la corriente fundamental.

- **Análisis escenario 2**

La propuesta es la implementación del filtro armónico HF5 de 97,18 kvar, de orden 5 en el Bus 32 que es de la alimentación ventilador secadero con nivel de voltaje de 440V, para mitigar la distorsión armónica.

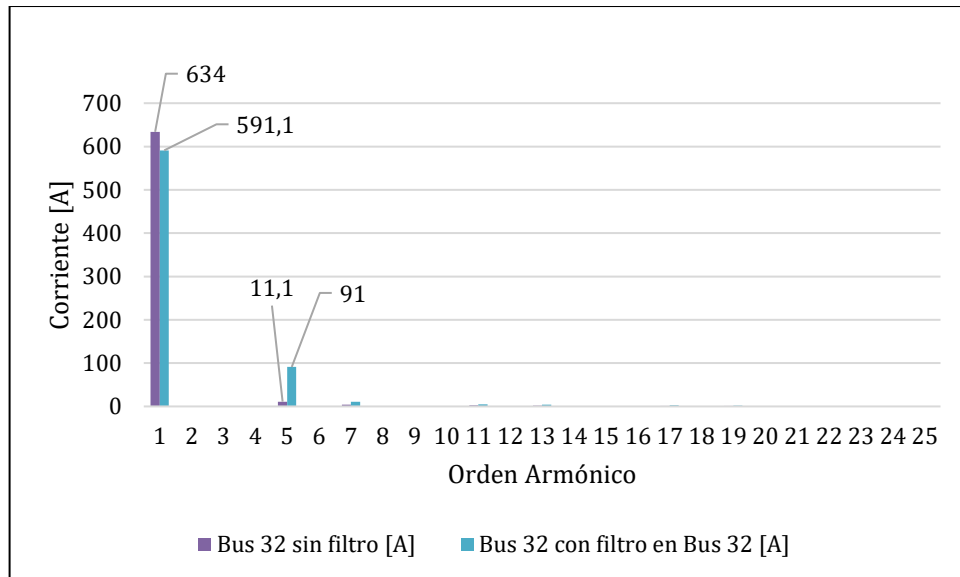


Figura 5.20. Comparación de corriente en Bus 32 con y sin filtro armónico.

La Figura 5.20 muestra la comparación de la corriente armónica en el Bus 32, que es la alimentación del ventilador secadero, con y sin filtro. Se observa una reducción de la corriente fundamental de 634 A a 591,1 A.

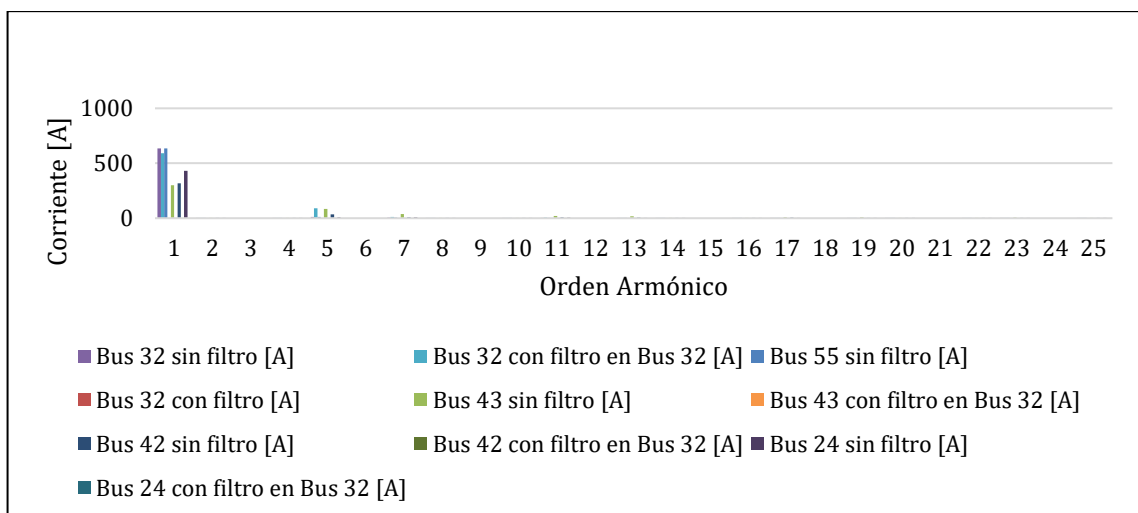


Figura 5.21. Comportamiento de Bus 55, 43, 42, 24 con filtro armónico en el Bus 32.

En la Figura 5.22 muestra el comportamiento del Bus 55,43,42,24 ante la implementación de un filtro armónico en el Bus 32, en el cual podemos identificar que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica.

Tabla 5.20. Consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en dólares en la Alimentación Ventilador Secadero.

Bus 32, Alimentación ventilador Secadero						
Armónico	Sin Filtro Corriente [A]	Con Filtro Corriente [A]	Diferencia	Potencia Perdida [W]	Energía [Wh]	Ahorro Anual [\$/kWh]
Fundamental	634	591.1	42.9	132.14	1157574.81	81.03
TOTAL					1157574.81	81.03

La Tabla 5.20 muestra el efecto de la implementación de un filtro armónico en el Bus 32, que alimenta al ventilador del secadero. La corriente fundamental se reduce de 634 A a 591,1 A, lo que representa una disminución de 42,9 A. Esta reducción en la corriente se traduce en una potencia perdida de 132,14 W, con una energía total perdida de 1157574,81 Wh y un ahorro anual de \$81,03.

- **Análisis escenario 3**

La propuesta es la implementación del filtro armónico HF2 de 59,36 kvar, de orden 5 en el Bus 43 que es de la alimentación ventilador secadero con nivel de voltaje de 440 V, para mitigar la distorsión armónica.

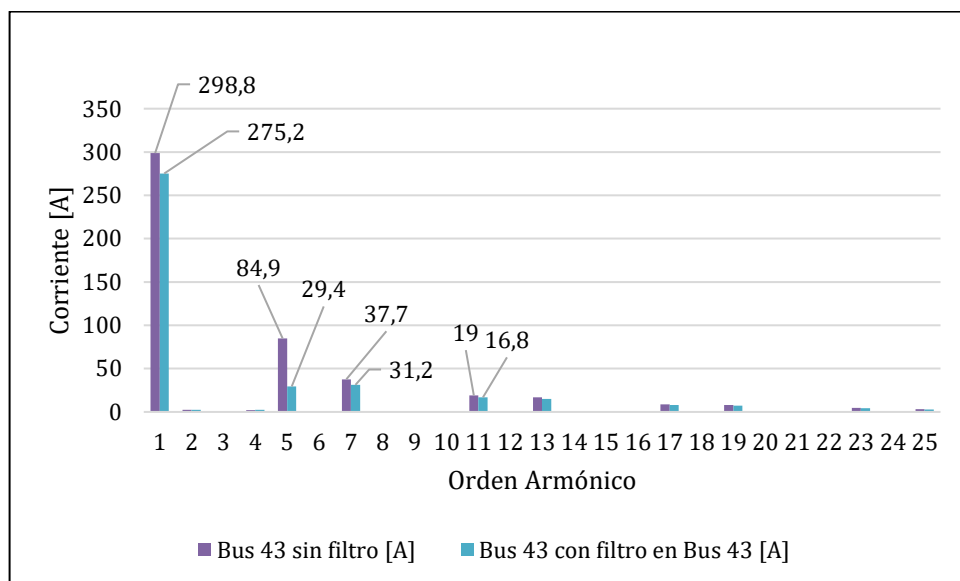


Figura 5.23. Comparación de corriente en Bus 43 con y sin filtro armónico.

La Figura 5.23 muestra la comparación de la corriente armónica en el Bus 43, que es la alimentación de Recubrimiento, con y sin filtro. Se observa una reducción de la corriente fundamental de 298,8 A a 275,2 A, en el quinto armónico de 84,9 A a 29,4 A.

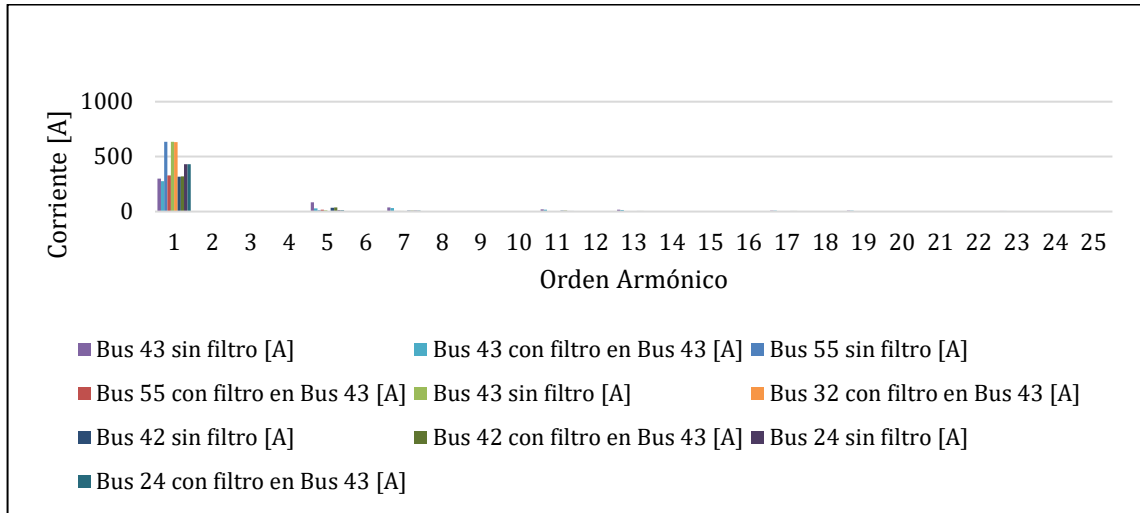


Figura 5.24. Comportamiento de Bus 55, 32,42, 24 con filtro armónico en el Bus 43.

En la Figura 5.24 muestra el comportamiento del Bus 55, 32, 42, 24 ante la implementación de un filtro armónico en el Bus 43, en el cual podemos identificar que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica.

Tabla 5.21. Consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en Alimentación Recubrimiento.

Bus 43, Alimentación Recubrimiento						
Armónico	Sin Filtro Corriente [A]	Con Filtro Corriente [A]	Diferencia	Potencia Perdida [W]	Energía Anual [Wh]	Ahorro Anual [\$/kWh]
Fundamental	298.8	275.2	23.6	79.09	692819.38	48.50
5	84.9	29.4	55.5	437.49	3832372.83	268.27
7	37.7	31.2	6.5	6.00	52576.81	3.68
11	19	16.8	2.2	0.69	6026.57	0.42
13	16.7	15.1	1.6	0.36	3188.86	0.22
17	8.9	7.9	1	0.14	1246.88	0.09
19	8.1	7.4	0.7	0.07	611.33	0.04
TOTAL					458842.67	321.22

La Tabla 5.21 muestra el impacto de la implementación de un filtro armónico en el Bus 43, que alimenta el sistema de recubrimiento. La corriente fundamental se reduce de 298,8 A a 275,2 A, lo que implica una disminución de 23,6 A, con una potencia perdida de 79.09 W y una energía anual perdida de 69281938 Wh, resultando en un ahorro anual de \$48,50. Además, se observan reducciones significativas en los armónicos, especialmente en el quinto armónico, que

disminuye de 84,9 A a 29,4 A, con una reducción de energía anual de 3832372,83 Wh y un ahorro de \$268,27. En total, la implementación del filtro reduce la energía perdida en 4.588,842,67 Wh, generando un ahorro anual total de \$321,22.

- **Análisis escenario 4**

La propuesta es la implementación del filtro armónico HF1 de 52,04 kVA, de orden 5 en el Bus 42 que es de la alimentación de Molduras con nivel de voltaje de 440V, para mitigar la distorsión armónica.

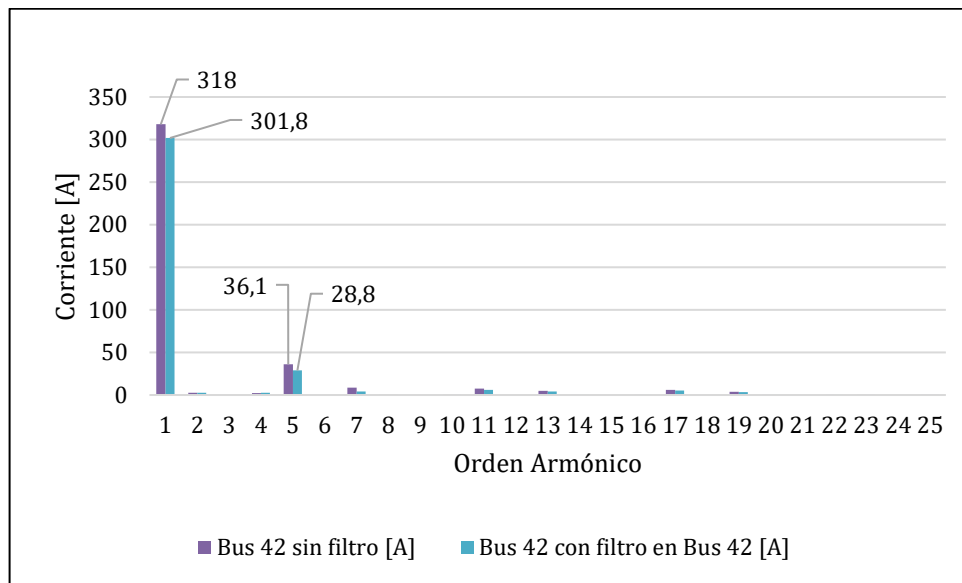


Figura 5.25. Comparación de corriente en Bus 42 con y sin filtro armónico.

La Figura 5.25 muestra la comparación de la corriente armónica en el Bus 42, que es la alimentación de Molduras, con y sin filtro. Se observa una reducción de la corriente fundamental de 318 A a 301,8 A, en el quinto armónico de 36,1 A a 288A.

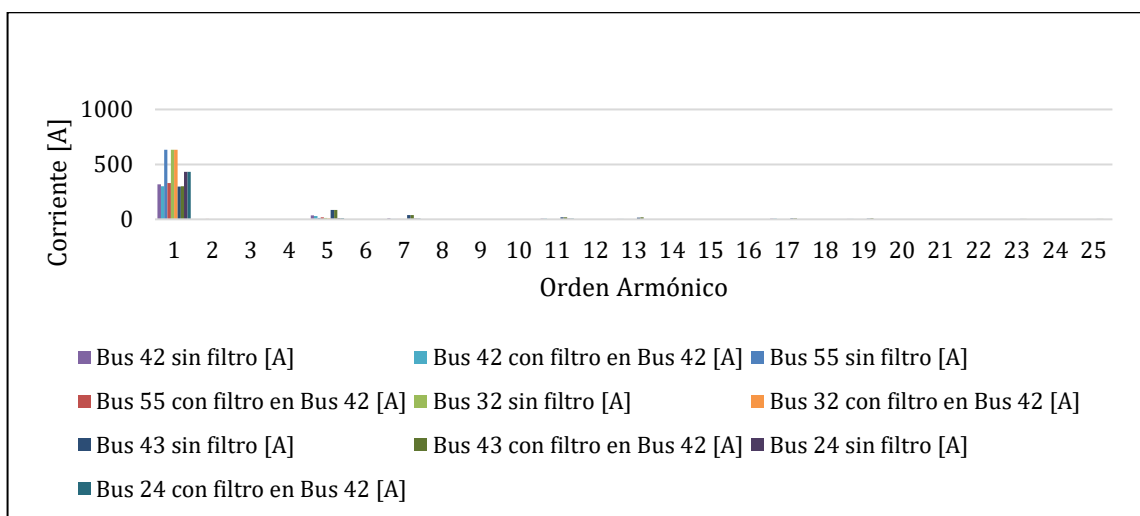


Figura 5.26. Comportamiento de Bus 55, 32, 43, 24 con filtro armónico en el Bus 42.

En la Figura 5.26 muestra el comportamiento del Bus 55, 32, 43, 24 ante la implementación de un filtro armónico en el Bus 42, en el cual podemos identificar que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica.

Tabla 5.22. Consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en dólares en Alimentación Molduras.

Bus 42, Alimentación Molduras						
Armónico	Sin Filtro Corriente [A]	Con Filtro Corriente [A]	Diferencia	Potencia Perdida [W]	Energía Anual [Wh]	Ahorro Anual [\$/kWh]
Fundamental	318	301.8	16.2	18.84	165068.62	11.55
5	36.1	28.8	7.3	3.83	33529.15	2.35
7	8.8	4.2	4.6	1.52	13317.87	0.93
11	7.5	6	1.5	0.16	1417.52	0.10
13	5	4.1	0.9	0.06	510.64	0.04
17	5.9	5.4	0.5	0.02	157.86	0.01
19	3.7	3.5	0.2	0.00	25.28	0.00
TOTAL					214026.95	14.98

La Tabla 5.22 presenta los efectos de la implementación de un filtro armónico en el Bus 42, que alimenta el sistema de molduras. La corriente fundamental se reduce de 318 A a 301,8 A, resultando en una disminución de 16,2 A, lo que genera una pérdida de potencia de 18,84 W y una energía anual perdida de 165068,62 Wh, con un ahorro anual de \$11,55. Adicionalmente, se observa una reducción en los armónicos, destacándose el quinto armónico, que disminuye de 36,1 A a 28,8 A, con un ahorro anual de \$2.35. En total, la implementación del filtro reduce la energía perdida en 214026,95 Wh, lo que equivale a un ahorro anual de \$14,98.

- **Análisis escenario 5**

La propuesta es la implementación del filtro armónico HF4 de 83,98 kvar, de orden 5 en el Bus 24 que es de la alimentación de Prensas con nivel de voltaje de 440V, para mitigar la distorsión armónica.

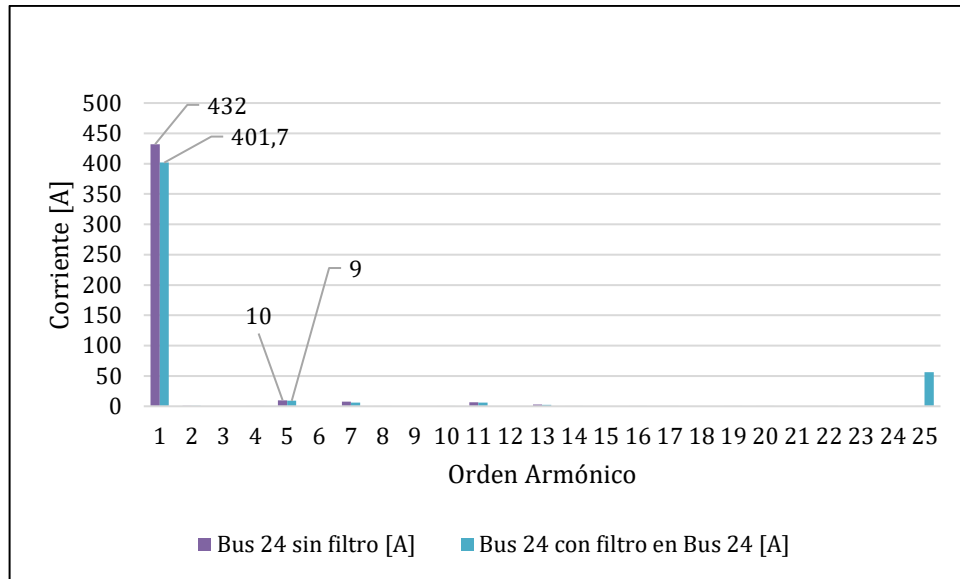


Figura 5.27. Comparación de corriente en Bus 24 con y sin filtro armónico.

La Figura 5.27 muestra la comparación de la corriente armónica en el Bus 24, que es la alimentación de Prensas, con y sin filtro. Se observa una reducción de la corriente fundamental de 432 A a 401,7 A, en el quinto armónico de 10 A a 9A.

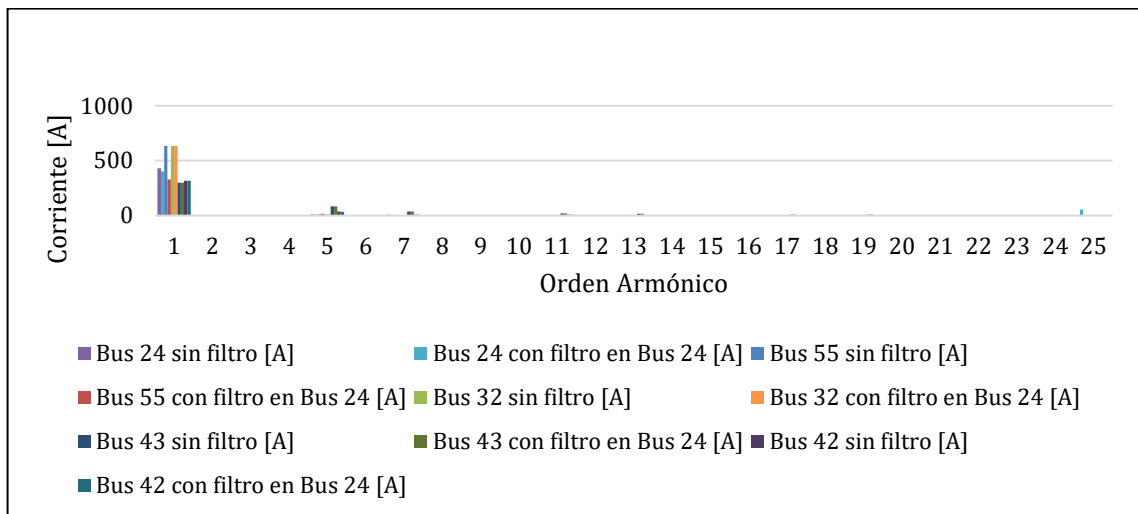


Figura 5.28. Comportamiento de Bus 55, 32,43, 42 con filtro armónico en el Bus 24.

En la Figura 5.28 muestra el comportamiento del Bus 55, 32, 43, 42 ante la implementación de un filtro armónico en el Bus 24, en el cual podemos identificar que el tipo de filtro impacta de manera significativa la reducción de contaminación armónica.

Tabla 5.23. Consumo de corriente por orden armónico y el ahorro en dólares en Alimentación Prensas.

Bus 24, Alimentación Prensas						
Armónico	Sin Filtro Corriente [A]	Con Filtro Corriente [A]	Diferencia	Potencia Perdida [W]	Energía Anual [Wh]	Ahorro Anual [\$/kWh]
Fundamental	432,00	401,70	30,30	130,37	1142039,91	79,94
5,00	10,00	9,00	1,00	0,14	1244,18	0,09
7,00	7,7	5,8	1,90	0,51	4492,36	0,31
11,00	6,7	5,9	0,80	0,09	796,90	0,06
13,00	2,8	2,3	0,50	0,04	311,41	0,02
17,00	0,449	0,157	0,29	0,01	106,31	0,01
TOTAL					1148991,08	80,43

La Tabla 5.23 describe el impacto de la implementación de un filtro armónico en el Bus 24, que alimenta las prensas. La corriente fundamental se reduce de 432 A a 401,7 A, lo que representa una disminución de 30,3 A, resultando en una pérdida de potencia de 130,37 W y una energía anual perdida de 1142039,91 Wh, con un ahorro anual de \$79,94. Además, se observan reducciones menores en los armónicos, especialmente en el séptimo armónico, que disminuye en 1,9 A, lo que ahorra 4492,36 Wh anualmente. En total, la implementación del filtro reduce la energía perdida en 1148991,08 Wh, generando un ahorro anual de \$80.43.

En conclusión, el análisis de los cinco escenarios para la implementación de filtros armónicos en la línea unifilar MDF revela que la Chipeadora Globus se destaca como la opción más beneficiosa. La comparación de los consumos de amperaje con y sin filtro en el armónico más significativo demuestra que esta propuesta no solo optimiza el rendimiento eléctrico, sino que también ofrece un ahorro anual de \$703,10. Este ahorro es significativamente superior al de los otros escenarios evaluados, que presentan beneficios menores en términos de reducción de costos. Por lo tanto, la Chipeadora Globus se presenta como la alternativa más viable y económicamente eficiente para la gestión de armónicos en la línea MDF.

El cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN) y el Retorno sobre la Inversión (ROI) uno de los métodos para evaluar la rentabilidad de la implementación de un filtro armónico. Como se detalla a continuación:

- **Valor Actual Neto (VAN)**

El VAN mide la diferencia entre el valor presente de los flujos de caja futuros generados por un proyecto y la inversión inicial. Si el VAN es positivo, el proyecto es rentable.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BTA_t}{(1+r)^t} - CTI$$

Donde:

- BTA_t es el beneficio total anual en el año t .
- r es la tasa de descuento (o costo de capital).
- CTI es el costo total de implementación.
- n es el período de análisis en años.

La implementación que el filtro armónico (cotización anexo x) junto costos técnicos generan un ahorro anual de 5800 USD durante 5 años, y la inversión inicial es 21784 USD. Si la tasa de descuento es 10%, el VAN se calcula de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{t=1}^5 \frac{5800}{(1+0.10)^t} - 21784$$

Desglosando los flujos de caja:

- Año 1: $\frac{5800}{(1.10)^1} = 6380 \text{ USD}$
- Año 2: $\frac{5800}{(1.10)^2} = 7018 \text{ USD}$
- Año 3: $\frac{5800}{(1.10)^3} = 7719.8 \text{ USD}$
- Año 4: $\frac{5800}{(1.10)^4} = 8491.7 \text{ USD}$
- Año 5: $\frac{5800}{(1.10)^5} = 9340.9 \text{ USD}$

Sumando estos valores:

$$VAN = 6380 + 7018 + 7719.8 + 8491.7 + 9340.9 = 38950.4$$

Un VAN de 13326.3 USD indica que el proyecto es rentable y añade valor a la empresa.

• Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea cero. Es una medida de la rentabilidad potencial de la inversión. Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, el proyecto es viable.

Fórmula:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{BTA_t}{(1+TIR)^t} - CTI$$

Donde:

- *TIR* es la tasa que hace que el VAN sea cero.

Utilizando los mismos flujos de caja del ejemplo del VAN, para encontrar la TIR debes resolver la ecuación:

$$0 = \frac{5800}{(1 + TIR)^1} + \frac{5800}{(1 + TIR)^2} + \frac{5800}{(1 + TIR)^3} + \frac{5800}{(1 + TIR)^4} + \frac{5800}{(1 + TIR)^5} - 2178,4$$

Este cálculo suele hacerse iterativamente o utilizando una calculadora financiera o software como Excel.

Una TIR del 10.36 % indica que el proyecto generará una tasa de retorno del 10.36% anual, lo cual es superior a la tasa de descuento del 10%, haciendo el proyecto atractivo.

- **Retorno sobre la inversión (ROI)**

El ROI mide la ganancia o pérdida generada en relación con la inversión inicial. Se expresa como un porcentaje y es una medida sencilla de la rentabilidad.

Fórmula:

$$ROI = \frac{Ganancia\ Neta}{Inversión\ Inicial} \times 100$$

Donde:

- *Ganancia Neta*: Es la diferencia entre los beneficios generados y el costo total de implementación.

Si los beneficios totales generados durante los 5 años son:

$$Ganancia\ Neta = (5800 \times 5) - 2178.4 = 29000 - 2178.4 = 7216\ USD$$

Entonces, el ROI sería:

$$ROI = \frac{7216}{2178.4} \times 100 = 331,25\%$$

Esto significa que la inversión genera un retorno del 331,25% sobre el capital invertido.

6. CONCLUSIONES

- El estudio encontró que el sistema eléctrico de la empresa generalmente mantiene niveles de voltaje dentro de los rangos permitidos por la normativa ARCERNNR 002/20. Sin embargo, se encontraron sobrevoltajes y desequilibrios de corriente en algunos puntos cruciales, como la Línea de Recubrimiento y el Caldero Benecke. Estos desequilibrios pueden provocar problemas operativos importantes, como sobrecalentamiento y desgaste prematuro de los equipos.
- La presencia de armónicos de tercer y quinto orden fue detectada en variadores secaderos de MDF y transformadores padmounted de 1500kVA durante el análisis de distorsión armónica con analizadores de red Fluke 1750 y Fluke 430. Estos armónicos pueden causar resonancias y sobrecalentamientos, alterando la estabilidad del sistema eléctrico. Las simulaciones realizadas en el ETAP 19.0.1 demostraron que la instalación de filtros pasivos, es una solución efectiva para estos problemas, reduciendo significativamente los niveles de distorsión armónica en puntos críticos del sistema.
- Se proponen varias soluciones basándose en los resultados. El uso de filtros armónicos es crucial para mejorar la calidad de la energía y garantizar que los equipos funcionen correctamente. Se recomienda que los bancos de condensadores sean sintonizados con armónicos de quinto orden para maximizar el factor de potencia y la eficiencia del sistema. Para garantizar la continuidad del suministro eléctrico y proteger los equipos críticos de interrupciones y fluctuaciones, es esencial instalar un sistema de U.P.S. Finalmente, el uso de un Sistema de Compensación Estática de Reactivos (S.V.C.) mejorará la calidad de la energía y la estabilidad del voltaje.
- Se encontró que es necesaria la instalación de filtros activos y/o pasivos en el tablero principal de distribución para mitigar los efectos del 5to armónico en el sistema de potencia de Aglomerados Cotopaxi S.A, así como instalar filtros en todas las maquinas que tengan variadores de velocidad.

- En conclusión, el estudio de armónicos realizado en la planta industrial Aglomerados Cotopaxi S.A., específicamente en la línea de producción de MDF, revela la presencia de distorsión de corriente en el sistema eléctrico, atribuida a cargas no lineales como variadores de velocidad y equipos electrónicos. La presencia de armónicos y variaciones en la tensión contribuyen significativamente a esta distorsión, la cual puede ocasionar una reducción en la vida útil de los equipos, deterioro de los conductores, y sobrecalentamientos en componentes eléctricos, como motores.
- El análisis de los cinco escenarios revela que la implementación del filtro armónico HF3 en el Bus 55 para la Chipeadora Globus es la opción más beneficiosa. La comparación de los consumos de amperaje con y sin filtro en el armónico más significativo demuestra que esta propuesta optimiza el rendimiento eléctrico y ofrece un ahorro anual de \$703.10, significativamente superior al de los otros escenarios evaluados. Por lo tanto, la Chipeadora Globus se presenta como la alternativa más viable y económicamente eficiente para la gestión de armónicos en la línea MDF.
- La implementación de filtros armónicos en los diferentes buses de la línea de producción MDF ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir la distorsión armónica y mejorar la eficiencia energética. En particular, la instalación del filtro armónico HF3 en el Bus 55, que alimenta a la Chipeadora Globus, ha resultado en una reducción significativa de la corriente fundamental y de los armónicos, lo que se traduce en un ahorro económico anual de \$703,10. Este escenario presenta el mayor beneficio entre los analizados, destacándose como la opción más viable para mejorar la calidad de la energía en la planta.
- Los cálculos financieros, como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Retorno sobre la Inversión (ROI), confirman la rentabilidad de la implementación de filtros armónicos en la línea de producción MDF. En particular, el proyecto de implementación de filtros en la Chipeadora Globus no solo mejora la calidad de la energía, sino que también ofrece un retorno sobre la inversión significativo, lo que justifica la adopción de esta medida tanto desde una perspectiva técnica como económica.

7. REFERENCIAS

- [1] M. Perez, “Calidad de la Energía Eléctrica,” in *Calidad de la Energía Eléctrica*, 2016.
- [2] J. L. Arizpe Islas, S. Neira Rosales, and A. López Escamilla, “Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia,” *Multidisciplinas de la Ingeniería*, vol. 1, no. 01, 2023, doi: 10.29105/mdi.v1i01.7.
- [3] CITEC UBB, *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos*. 2012.
- [4] S. J. Proaño Heredia, “ESTUDIO DEL ESTRÉS TÉRMICO EN LAS ÁREAS DE FUNDICIÓN Y EXTRUSIÓN EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A. CEDAL,” 2018.
- [5] X. Proaño, P. Potes, D. Jiménez, and G. Pesántez, “Evaluación de Eficiencia Energética del Sistema Eléctrico para Mejorar los Indicadores de Desempeño IDEn en la Finca ‘La Cordillera’ Perteneciente al Cantón Mejía, Provincia de Pichincha,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.508.
- [6] J. Jeffer Vera, F. Santamaría, and A. Jaramillo, “Análisis de calidad de potencia en un sistema industrial a partir de mediciones multipunto,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 17, no. 32, 2018, doi: 10.22395/rium.v17n32a9.
- [7] V. Sousa Santos, A. Zambrano Mejia, and E. NORIEGA ANGARITA, “Evaluación de problemas de calidad de energía y el factor de potencia en una industria con cargas eléctricas variables no lineales,” *Repositorio cuc*, no. 2020, 2020.
- [8] J. V. Bautista-Sánchez, “Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y sus perturbaciones en el SEP,” *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, vol. 3, no. 1, 2023, doi: 10.56183/iberotecs.v3i1.619.
- [9] GlobalRatings S.A., “Calificación primera emisión de obligaciones Aglomerados Cotopaxi S.A.,” Quito, Ecuador, 2021.
- [10] D. Arrigo, “Fourier Transform,” in *Synthesis Lectures on Mathematics and Statistics*, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-22087-6_6.
- [11] T. Guo, T. Zhang, E. Lim, M. Lopez-Benitez, F. Ma, and L. Yu, “A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities,” *IEEE Access*, vol. 10, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3179517.
- [12] A. Tejada and A. Llamas, “Efectos de las armónicas en los sistema eléctricos,” p. 8, 2010.

- [13] M. S. Esparza-González, J. A. Mata-Guerrero, and L. A. Castañeda-Ramos, “Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones,” *Conciencia Tecnológica*, no. 32, pp. 1–5, 2006.
- [14] ieb, “Energía vital. Conexión total.” [Online]. Available: <https://www.ieb.co/energia/>
- [15] a Tejada and a Llamas, “Efectos De Las Armónicas En Los Sistemas Eléctricos,” *Power*, 2010.
- [16] P. Ramon Pinyol, “ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN,” 2014. Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf
- [17] AESOLUCIONES, “LOS EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS y SUS SOLUCIONES,” 2017. Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://agngroup.net/papers/boletin%20aes%20soluciones%20armonicos.pdf>
- [18] A. Tejada and A. Llamas, “EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS,” 2010. Accessed: Aug. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228711468_Efectos_de_las_Armonicas_en_los_Sistemas_Electricos
- [19] V. E. Wagner *et al.*, “Effects of Harmonics on Equipment. Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, 1993.
- [20] IEEE Power and Energy Society, “IEEE Std 519 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” New York, Mar. 2014.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers Power & Energy Society, *IEEE Std 1159-IEEE. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2009, no. June. 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- [22] IEEE, “IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, vol. 2014, 2014.
- [23] L. Astudillo-Mora, A. Vásquez-Vega, and J. Rojas-Serrano, “Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia,” *Científica*, vol. 20, no. 1, pp. 3–11, 2016.

- [24] M. Lamich, “Filtros Activos de Potencia,” *XII Jornades de Conferències dEnginyeria Electrònica del Campus de Terrassa JCEE 2006*, 2019.
- [25] Manufacturas Eléctricas Orión, “Transformadores Trifásicos Secos con Factor K”.
- [26] J. Dariel Arcila, “ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,” *Armónicos En Sistemas Eléctricos*, 1999.
- [27] A. J. Yarin, G. N. Salazar, and J. Chávez, “Control de armónicos en transformador eléctrico de potencia de planta de manufactura mediante filtro pasivo incorporado optimizado con algoritmo de forraje bacterial,” *Tecnia*, vol. 31, no. 1, pp. 61–72, 2021, doi: 10.21754/tecnica.v21i2.1031.
- [28] E. Téllez-Ramírez, *Distorsión Armónica*, no. 222. Puebla, México: AP&C, 2015.
- [29] V. Mercado Polo, J. Bernardo Peña, and L. Pacheco, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de puesta a tierra,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, 2017.
- [30] V. Polo, J. Bernardo, and L. Pacheco, “Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, 2017.
- [31] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*, vol. 2009, no. June. 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- [32] B. F. Antamba-Valenzuela and A. F. Gómez-Calvopiña, “Estudio de la calidad de energía eléctrica en la Corporación Ecuatoriana de Aluminio Cedal S.A. ubicada en la ciudad de Latacunga en el año 2021,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 2021.
- [33] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, *Regulación Nro. ARCERNR 002/20 (Codificada). Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*, vol. 20. Ecuador, 2023, p. 35.
- [34] Amigo Safety, “Equipo de protección personal básicas para electricistas.” Accessed: Feb. 07, 2024. [Online]. Available: <https://blog.amigosafety.com/2021/10/equipo-de-proteccion-basico-para.html>
- [35] EPCOS, “Regulador de energía reactiva -BR6000-Manual-E-V50,” vol. 2, 2009.
- [36] M. Ángel Silva and G. Ordóñez, “Calidad de la energía eléctrica: diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interrupciones y caídas de tensión,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 4, no. 2, 2005.
- [37] M. Holguin and D. Gomezcoello, “Análisis de la calidad de energía eléct de la calidad de energía eléct,” *Universidad Politécnica Salesiana SEDE – GUAYAQUIL*, 2010.

- [38] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), “IEC 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods,” 2015
- [39] D. A. Saucedo Martinez and J. L. Taxis Villagran, “Factores Que Afectan La Calidad De La Energía Y Su Solución,” *Academia.Edu*, 2008.