



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

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ÁREA DE ASERRADERO  
PERTENECIENTE A LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.**

PROPUESTA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO

**AUTORES:**

Franklin David Guanoluiza Tigma  
Kevin Andres Silva Punina

**TUTORA:**

Ing. MSc. Jessica Nataly Castillo Fiallos

**LATACUNGA, AGOSTO, 2025**

Latacunga, Julio del 2025

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **FRANKLIN DAVID GUANOLUIZA TIGMASA** y **KEVIN ANDRES SILVA PUNINA** declaramos ser autores del proyecto de titulación “**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ÁREA DE ASERRADERO PERTENECIENTE A LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.**”, siendo la **ING. MSC. JESSICA NATALY CASTILLO FIALLOS** tutora del presente trabajo de titulación; 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 de titulación, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



---

Franklin David Guanoluiza Tigmasa

C.C: 0503629107



---

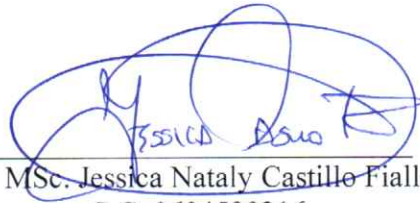
Kevin Andres Silva Punina

C.C: 1804691440

Latacunga, Julio del 2025

### **AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ÁREA DE ASERRADERO PERTENECIENTE A LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”**, propuesto por los estudiantes **FRANKLIN DAVID GUANOLUIZA TIGMASA** y **KEVIN ANDRES SILVA PUNINA** de la Carrera de **ELECTRICIDAD**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. MSc. Jessica Nataly Castillo Fiallos

C.C. 0604590216

**TUTORA**

Latacunga, Julio del 2025

### **AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES**

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ÁREA DEL ASERRADERO PERTENECIENTE A LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”**, propuesto por los estudiantes **FRANKLIN DAVID GUANOLUIZA TIGMASA** y **KEVIN ANDRES SILVA PUNINA** de la Carrera de **ELECTRICIDAD**, me permito indicar que los estudiantes han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN** en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Lector 1

Ing. MSc. Ortiz Gonzalez Yadyra Monserrath  
CC: 1722464110

Lector 2

Ing. MSc. Vasquez Teneda Franklin Hernán  
CC: 1710434497

Lector 3

Ing. MSc. Freire Freire Armando Salvador  
CC: 0503842833

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradecemos a Dios por darnos la fuerza, sabiduría, entendimiento y las ganas de seguir adelante en este largo camino de formación académica hasta cumplir el objetivo que tanto hemos deseado, “EL DE SER INGENIEROS”.*

*A nuestros padres por el apoyo incondicional, sus palabras de aliento, el cariño y amor que día a día han sido el motor para seguir adelante y superar cada barrera.*

*Como no agradecer a los docentes que han sido parte de este proceso, en especial al Ingeniero Gabriel Pesantez y a la Ingeniera Jessica Castillo por su gran apoyo y conocimientos brindados para llevar a cabo este proyecto de titulación.*

*También a la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., por permitirnos realizar este proyecto de investigación dentro de sus instalaciones.*

*Por último, a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirnos sus puertas y acogernos como parte de su familia “UTEKINA”.*

***Franklin Guanoluiza, Kevin Silva***

## **DEDICATORIA**

*“Dedicamos este trabajo a quienes creyeron en nosotros cuando ni siquiera nosotros mismos lo hacíamos. Su apoyo silencioso fue la chispa que encendió cada página de este proyecto.”*

*A nuestros padres quienes son los pilares de nuestra vida, hermanos y a quienes han sido parte de este proceso.*

***Franklin Guanoluiza, Kevin Silva***

## ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN PERSONAL .....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	PROBLEMA.....	3
2.1.1.	Situación Problemática.....	3
2.1.2.	Formulación del Problema.....	4
2.2.	OBJETICO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3.	JUSTIFICACIÓN .....	4
2.4.	BENEFICIARIOS .....	5
2.4.1.	Directos.....	5
2.4.2.	Indirectos .....	5
2.5.	OBJETIVOS .....	5
2.5.1.	General.....	5
2.5.2.	Específicos.....	5
2.6.	HIPÓTESIS Y SISTEMA DE TAREAS.....	5
2.6.1.	Hipótesis.....	5
2.6.2.	Sistemas de Tareas.....	6
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	7
3.1.	PERTURBACIONES ELÉCTRICAS .....	7
3.1.1.	Transitorios.....	7
3.1.1.1.	Transitorio Impulsivo.....	7
3.1.1.2.	Oscilatorio .....	7
3.1.2.	Variaciones de Corta Duración.....	8
3.1.3.	Variaciones de Larga Duración .....	8
3.1.4.	Desbalance.....	8
3.1.5.	Distorsión de Forma de la Onda .....	9

3.1.6.	Fluctuaciones de Voltaje .....	9
3.1.7.	Variaciones de Frecuencia.....	9
3.1.8.	Regulación ARCONEL 009/24.....	9
3.1.8.1.	Nivel de Voltaje .....	9
3.1.8.2.	Perturbaciones Rápidas de Voltaje (Flicker).....	10
3.1.8.3.	Distorsión Armónica de Voltaje.....	11
3.1.8.4.	Desequilibrio de Voltaje .....	12
3.1.9.	Distorsión Armónica de Corriente.....	12
3.2.	REGULACIONES Y NORMAS RELACIONADAS.....	14
3.2.1.	Regulación Nacional.....	14
3.2.2.	Normativa Internacional .....	15
3.3.	MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	15
3.3.1.	Conductores .....	15
3.3.2.	Transformador .....	16
3.3.3.	Capacitores .....	16
3.3.4.	Tipos de Filtros.....	17
3.3.4.1.	Filtros Pasivos .....	17
3.3.4.2.	Filtros Activos .....	19
3.3.4.3.	Filtro Activo en Serie .....	19
3.3.4.4.	Filtro Activo en Paralelo .....	19
3.3.4.5.	Filtro Activo Híbrido o Mixto.....	19
3.3.5.	Teoría P-Q Para el Diseño del Filtro Activo .....	19
3.4.	CASOS DE USO RELACIONADOS .....	24
4.	METODOLOGÍA.....	25
4.1.	INDUCCIÓN, RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN .....	26
4.1.1.	Descripción de la Empresa .....	26
4.1.2.	Área de Estudio .....	27

4.1.3.	Levantamiento de Información.....	27
4.1.4.	Descripción del Sistema Eléctrico.....	28
4.1.5.	Levantamiento de Cargas del Transformador 1200kVA.....	29
4.1.6.	Levantamiento de Cargas del Transformador 750kVA.....	29
4.2.	ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA UNIFILAR TRAF0 750kVA .....	29
4.3.	COLOCACIÓN DEL ANALIZADOR DE RED .....	30
4.3.1.	Determinación del Lugar .....	30
4.3.2.	Instalación.....	30
4.3.3.	Registro y Recopilación de Datos .....	32
4.4.	SIMULACIÓN .....	33
4.4.1.	Diagrama Unifilar en el Software ETAP.....	33
4.4.2.	Introducción de Armónicos al Sistema.....	34
4.5.	TRATAMIENTO DE DATOS .....	36
4.5.1.	Interpretación de Datos.....	36
4.6.	APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS PARA MEJORAR LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE ENERGÍA .....	37
4.6.1.	Filtro Activo en Simulink .....	37
4.6.1.1.	Modelado del Sistema Eléctrico.....	37
4.6.1.1.1.	Fuente de Alimentación.....	38
4.6.1.1.2.	Carga no Lineal.....	39
4.6.1.1.3.	Modelado del Filtro Activo.....	40
4.6.2.	Filtro Pasivo en ETAP .....	41
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	45
5.1.	ANÁLISIS CONTINUO DURANTE 7 DÍAS EN EL TRAF0 750kVA.....	45
5.1.1.	Análisis de Nivel de Voltaje.....	45
5.1.1.1.	Voltaje Nominal Fase-Fase .....	45
5.1.1.2.	Voltaje en el Neutro .....	47

5.1.1.3.	Desequilibrio de Voltaje .....	47
5.1.2.	Análisis de Corriente .....	48
5.1.2.1.	Análisis de Corriente de Línea .....	48
5.1.2.2.	Desequilibrio de Corriente .....	49
5.1.3.	Potencia Activa.....	50
5.1.3.1.	Desbalance de Potencia Activa .....	51
5.1.4.	Potencia Reactiva .....	51
5.1.4.1.	Desbalance de Potencia Reactiva.....	52
5.1.5.	Potencia Aparente.....	53
5.1.5.1.	Desbalance de Potencia Aparente .....	53
5.1.6.	Factor de Potencia .....	54
5.1.7.	Distorsión Armónica .....	55
5.1.7.1.	Distorsión Armónica Total de Voltaje de Fase .....	55
5.1.8.	Armónico Individual de Voltaje Línea Neutro.....	56
5.1.9.	Armónico Individual de Corriente Línea Neutro. ....	57
5.1.10.	Distorsión de Demanda Total de Corriente .....	59
5.1.11.	Presencia de Flickers Trafo 750kVA.....	59
5.2.	ANÁLISIS EN HORAS LABORALES.....	60
5.2.1.	Análisis de Voltaje .....	61
5.2.1.1.	Voltaje Nominal Fase-Fase .....	61
5.2.1.2.	Voltaje en el Neutro .....	62
5.2.1.3.	Desequilibrio de Voltaje .....	63
5.2.2.	Análisis de Corriente .....	64
5.2.2.1.	Análisis de Corriente de Línea .....	64
5.2.3.	Desequilibrio de Corriente.....	66
5.2.4.	Potencia Activa.....	66
5.2.5.	Desbalance de Potencia Activa .....	67
5.2.6.	Potencia Reactiva. ....	68

5.2.7.	Desbalance de Potencia Reactiva .....	69
5.2.8.	Potencia Aparente.....	70
5.2.9.	Desbalance de Potencia Aparente.....	70
5.2.10.	Factor de Potencia.....	71
5.2.11.	Distorsión Armónica Total de Voltaje.....	72
5.2.12.	Armónico Individual de Voltaje Línea Neutro .....	73
5.2.13.	Armónico Individual de Corriente Línea Neutro.....	74
5.2.14.	Distorsión de Demanda Total de Corriente .....	76
5.2.15.	Flickers.....	76
5.3.	PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA	77
5.3.1.	Propuesta 1 - Filtro Activo .....	77
5.3.2.	Implementación del Filtro Activo.....	80
5.3.3.	Propuesta 2 – Filtro Pasivo .....	82
5.3.4.	Implementación del Filtro Pasivo.....	83
5.4.	COMPARACIÓN ENTRE EL FILTRO ACTIVO Y PASIVO.....	84
5.4.1.	Efectividad.....	84
5.4.2.	Costo de Implementación .....	85
5.4.3.	Beneficio por kWh.....	85
5.4.4.	Comparación Técnica .....	86
5.5.	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA EL FP.....	86
5.5.1.	Activación del Banco de Condensadores .....	87
5.5.2.	Costo de Automatización del Banco de Condensadores .....	88
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	89
7.	REFERENCIAS .....	91
8.	ANEXOS.....	95

ANEXO A.....	95
ANEXO B.....	96
ANEXO C.....	97
ANEXO D.....	97
ANEXO E.....	98
ANEXO F.....	101
ANEXO G.....	104
ANEXO H.....	110
ANEXO I.....	111
ANEXO J.....	112
ANEXO K.....	113
ANEXO L.....	114
ANEXO M.....	115
ANEXO N.....	116
ANEXO O.....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tareas del Plan de Titulación. ....	6
Tabla 3.1 Niveles de voltaje [5].....	10
Tabla 3.2 Rango de voltaje admisibles [5]. ....	10
Tabla 3.3 Límites máximos de armónicos de voltaje [5]. ....	12
Tabla 3.4 Nivel máximo de distorsión armónica de corriente correspondientes impares [5]. .	13
Tabla 3.5 Nivel máximo de distorsión armónica de corriente correspondientes pares [5]. ....	14
Tabla 4.1 Características Transformador TRAFO_1200kVA.....	28
Tabla 4.2 Características Transformador TRAFO_750kVA.....	28
Tabla 5.1 Voltaje Nominal Fase-Fase Trafo 750KkVA.....	46
Tabla 5.2 Voltaje en el Neutro.....	47
Tabla 5.3 Desequilibrio de Voltaje.....	47
Tabla 5.4 Nivel de corriente de Línea Trafo 750kVA.....	48
Tabla 5.5 Desequilibrio de Corriente. ....	50
Tabla 5.6 Potencia Activa.....	50
Tabla 5.7 Desbalance de Potencia. ....	51
Tabla 5.8 Potencia Reactiva. ....	52
Tabla 5.9 Desbalance de Potencia Reactiva. ....	53
Tabla 5.10 Potencia Aparente.....	53
Tabla 5.11 Desbalance de Potencia Aparente. ....	54
Tabla 5.12 Factor de Potencia. ....	54
Tabla 5.13 Distorsión armónica de Voltaje. ....	55
Tabla 5.14 Voltaje Línea Neutro. ....	56
Tabla 5.15 Armónicos Impares de Corriente.....	58
Tabla 5.16 Distorsión de Demanda Total de Corriente.....	59

Tabla 5.17 Flickers Trafo 750kVA.....	59
Tabla 5.18 Voltaje nominal fase-fase en horas laborales trafo 750kVA.....	61
Tabla 5.19 Voltaje en el Neutro en Horas Laborables. ....	62
Tabla 5.20 Desequilibrio de Voltaje en Horas Laborales.....	63
Tabla 5.21 Nivel de Corriente de Línea en Horas Laborales .....	65
Tabla 5.22 Desequilibrio de Corriente en Horas Laborables. ....	66
Tabla 5.23 Potencia Activa en Horas Laborables.....	67
Tabla 5.24 Desbalance de Potencia Activa en Horas Laborales .....	68
Tabla 5.25 Potencia Reactiva en Horas Laborales. ....	68
Tabla 5.26 Desbalance de Potencia Reactiva en Horas Laborales.....	69
Tabla 5.27 Potencia Aparente en Horas Laborales.....	70
Tabla 5.28 Desbalance de Potencia Aparente en Horas Laborales. ....	71
Tabla 5.29 Factor de Potencia en Horas Laborales. ....	71
Tabla 5.30 Distorsión armónica de Voltaje Horas Laborables.....	72
Tabla 5.31 Voltaje Línea Neutro Horas Laborables.....	73
Tabla 5.32 Armónicos impares de corriente.....	75
Tabla 5.33 Distorsión de Demanda Total de Corriente. ....	76
Tabla 5.34 Presencia de Flickers en Horas Laborales. ....	76
Tabla 5.35 Armónicos correspondientes a los escenarios iniciales.....	78
Tabla 5.36 Error porcentual entre lo medido y lo simulado.....	79
Tabla 5.37 Resultados obtenidos a partir de la introducción del filtro al sistema.....	80
Tabla 5.38 Valor del quinto armónico obtenido a partir de la simulación. ....	82
Tabla 5.39 Resultados a partir de la introducción del filtro. ....	83
Tabla 5.40 Efectividad entre el Filtro Activo y Pasivo. ....	84
Tabla 5.41 Comparación de costos entre el filtro pasivo y activo.....	85

Tabla 5.42 Beneficio económico en \$. ....	86
Tabla 5.43 Características de cada uno de los filtros. ....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Suma de corrientes Triplens en el neutro [11].	16
Figura 3.2 Tipos de filtros activos [13].	17
Figura 3.3 Diagrama de Bloques de un Filtro Activo PQ [16].	20
Figura 3.4 Esquema de Filtro Activo Shunt con Capacitor [16].	21
Figura 3.5 Cálculo de potencia de alimentación instantánea [17].	22
Figura 3.6 Resultados del filtrado de una señal de voltaje sinusoidal balanceada [17].	23
Figura 3.7 Estrategia de Control de Corriente en Sistemas Balanceados Trifásicos [17].	23
Figura 3.8 Resultados del Control en una Señal con Distorsión [17].	24
Figura 4.1 Diagrama de procesos para el desarrollo de la metodología.	25
Figura 4.2 Ubicación de la empresa en análisis "Agglomerados Cotopaxi S.A."	27
Figura 4.3 Área de estudio.	27
Figura 4.4 Ubicaciones sugeridas para el monitoreo en un sistema típico de baja tensión (La flecha indica la ubicación sugerida) [8].	30
Figura 4.5 Analizador de Redes Fluke 1775.	31
Figura 4.6 Conexión del analizador al sistema trifásico [18].	31
Figura 4.7 Ubicación del Analizador de Redes en Transformador 750kVA.	31
Figura 4.8 Librería principal de espectros armónicos [ETAP].	34
Figura 4.9 Edición del espectro de armónicos [ETAP].	34
Figura 4.10 Ingreso de parámetros del espectro armónico [ETAP].	35
Figura 4.11 Ubicación de la Carga con armónicos en la barra principal del sistema [ETAP].	35
Figura 4.12 Sistema General de la Planta [Simulink].	38
Figura 4.13 Fuente de Alimentación [Simulink].	38
Figura 4.14 Carga del Sistema [Simulink].	39
Figura 4.15 Subsistema (Carga no Lineal) [Simulink].	40

Figura 4.16 Subsistema Filtro Activo [Simulink].	41
Figura 4.17 Dimensionamiento del filtro pasivo [ETAP].	43
Figura 4.18 Valores correspondientes al filtro pasivo [ETAP].	43
Figura 4.19 Ubicación del filtro en la barra principal del sistema [ETAP].	44
Figura 5.1 Voltaje RMS en cada Fase.	46
Figura 5.2 Voltajes en el Neutro.	47
Figura 5.3 Desequilibrio de Voltaje.	48
Figura 5.4 Corriente de Línea.	49
Figura 5.5 Corriente en el Neutro.	49
Figura 5.6 Desequilibrio de Corriente.	50
Figura 5.7 Potencia Activa por Fases.	51
Figura 5.8 Potencia Reactiva por Fases.	52
Figura 5.9 Potencia Aparente por Fases.	53
Figura 5.10 Distorsión Harmónica Total de Voltaje	55
Figura 5.11 Distorsión armónica individual de voltaje.	57
Figura 5.12 Comportamiento de los armónicos impares de corriente.	58
Figura 5.13 Flickers.	60
Figura 5.14 Voltaje RMS por Fase en Horas Laborables.	62
Figura 5.15 Voltaje en el Neutro en Horas Laborables TRAF0 750kVA.	63
Figura 5.16 Desequilibrio de Voltaje en Horas Laborables.	64
Figura 5.17 Corrientes de Línea por Fases en Horas Laborables.	65
Figura 5.18 Corriente en el Neutro en Horas Laborales.	65
Figura 5.19 Desequilibrio de Corriente en Horas Laborales.	66
Figura 5.20 Potencia Activa por Fases en Horas Laborales.	67
Figura 5.21 Potencia Reactiva por Fases en Horas Laborales.	69

Figura 5.22 Potencia Aparente por Fases en Horas Laborales. ....	70
Figura 5.23 Comportamiento del factor de potencia por fases durante las horas laborales. ....	72
Figura 5.24 Distorsión armónica individual de voltaje horas laborables. ....	74
Figura 5.25 Comportamiento de los armónicos impares de corriente horario laboral. ....	75
Figura 5.26 Presencia de Flickers por Fases en Horas Laborales. ....	77
Figura 5.27 Señal de voltaje del sistema [Simulink]. ....	78
Figura 5.28 Señal de corriente del sistema [Simulink]. ....	78
Figura 5.29 Espectro armónico del sistema [Simulink]. ....	79
Figura 5.30 Perfil de corriente del sistema [Simulink]. ....	80
Figura 5.31 Espectro armónico del sistema después de la implementación del filtro activo [Simulink]. ....	81
Figura 5.32 Resultado de voltaje y corriente después de la implementación del filtro activo [Simulink]. ....	82
Figura 5.33 Presencia de armónicos en la barra principal y en la carga [ETAP]. ....	83
Figura 5.34 Reducción de armónicos la implementación del filtro pasivo [ETAP]. ....	84
Figura 5.35 Factor de potencia sin activación del banco de condensadores [ETAP]. ....	87
Figura 5.36 Factor de potencia después de la activación del banco de condensadores [ETAP]. ....	87

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN EL ÁREA DE ASERRADERO PERTENECIENTE A LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”

### **Autores:**

Franklin David Guanoluiza Tigmasa

Kevin Andres Silva Punina

### **RESUMEN**

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el estado actual de la calidad de energía en el área del aserradero de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., con base en registros obtenidos mediante el analizador de redes FLUKE 1775, y proponer soluciones para la mitigación de distorsiones armónicas, con énfasis en la corriente. Para ello, se modeló el sistema eléctrico y las cargas del aserradero empleando los entornos MATLAB–Simulink y ETAP 21.0.1, lo que permitió evaluar el comportamiento armónico bajo condiciones reales de operación, conforme a la regulación ecuatoriana ARCONEL 009/24 y normas internacionales como la IEEE 519-2014, IEEE Std 1159-1995 e IEEE 1100.

Durante el análisis se identificaron altos niveles de distorsión armónica en la corriente, siendo el armónico de quinto orden (300 Hz) el más significativo. Como medidas de mitigación, se desarrollaron dos propuestas: un filtro pasivo sintonizado, implementado en ETAP, y un filtro activo tipo shunt, basado en la teoría de potencia instantánea P–Q, diseñado y simulado en MATLAB–Simulink.

Los resultados indicaron que el filtro pasivo permitió reducir el quinto armónico de corriente en un promedio del 37,18 % en los puntos críticos del sistema, mientras que el filtro activo alcanzó una atenuación del 38,54 %. Aunque la forma de onda obtenida no fue completamente sinusoidal debido a limitaciones del modelo, ambas soluciones demostraron mejoras sustanciales en la calidad de energía y permitieron cumplir con los límites establecidos en las normativas vigentes.

**Palabras clave:** calidad de energía, armónicos, filtro activo, teoría P-Q, filtro pasivo.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED FACULTY**

**TITLE:** “POWER QUALITY ANALYSIS IN THE SAWMILL AREA OF THE COMPANY AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.”

**Authors:**

Franklin David Guanoluiza Tigmasa  
Kevin Andres Silva Punina

**ABSTRACT**

The objective of this research was to analyze the current state of power quality in the sawmill area of the company Aglomerados Cotopaxi S.A., based on records obtained using the FLUKE 1775 power quality analyzer, and to propose solutions for the mitigation of harmonic distortions, with emphasis on current-related disturbances. To this end, the electrical system and the sawmill loads were modeled using the environments MATLAB–Simulink and ETAP 21.0.1, which enabled the evaluation of harmonic behavior under real operating conditions, in accordance with the Ecuadorian regulation ARCONEL 009/24 and international standards such as IEEE 519-2014, IEEE Std 1159-1995, and IEEE 1100.

The analysis identified high levels of current harmonic distortion, with the fifth-order harmonic (300 Hz) being the most significant. To mitigate this issue, two proposals were developed: a tuned passive filter, implemented in ETAP, and a shunt active filter, based on the instantaneous power theory (P–Q), designed and simulated in MATLAB–Simulink.

The results showed that the passive filter achieved an average reduction of 37,18% in the fifth harmonic current at critical points in the system, while the active filter attained a higher attenuation of 38.54%. Although the resulting waveform was not entirely sinusoidal due to model limitations, both solutions demonstrated substantial improvements in power quality and compliance with the established regulatory limits.

**Keywords:** power quality, harmonics, active filter, P–Q theory, passive filter.

## 1. INFORMACIÓN PERSONAL

**Tema del Proyecto:** Análisis De La Calidad De Energía En El Área De Aserradero Perteneciente A La Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.

**Modalidad de Titulación:**

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

**Carrera:** Electricidad

**Trabajo de Titulación vinculado al proyecto:** Estrategias de planeación de sistemas eléctricos en el contexto de la transición energética.

Equipo de Trabajo:

**Estudiantes:** Guanoluiza Tigma Franklin David

Silva Punina Kevin Andres

**Tutor de Titulación:** Ing. MSc. Castillo Fiallos Jessica Nataly

**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:** Control y optimización en el uso de la energía eléctrica del sector industrial, comercial y residencial.

## 2. INTRODUCCIÓN

La globalización de la industria ha aumentado la conciencia sobre las deficiencias en la calidad de la energía en todo el mundo, debido a que la competitividad a nivel industrial es cada vez mayor para ajustarse al desarrollo tecnológico [1], lo que conlleva a la implementación de maquinaria más productiva. En ocasiones, estos equipos son la fuente de problemas adicionales de calidad de la energía cuando se automatizan procesos completos siendo en última instancia, un problema impulsado por el consumidor [2].

El concepto de calidad de energía se refleja en la interpretación de varios problemas y fenómenos eléctricos que se caracterizan por incremento o disminución de tensión, corriente en un punto dentro del sistema de potencia. Estas variaciones o perturbaciones en la red son anomalías dentro del circuito eléctrico que generan alteraciones de magnitud con respecto a su valor nominal en un periodo de tiempo determinado [3].

Los problemas de calidad de energía se presentan cuando existe alguna interrupción en el flujo de energía o alguna desviación de la tensión, frecuencia o corriente lo cual provoca un mal funcionamiento de los equipos y repercute directamente en la economía o bienestar del usuario. Los efectos de estos problemas van desde el aumento de pérdidas de energía, daños a los equipos, aumento del costo de facturación eléctrica y deterioro de la confiabilidad y disponibilidad del sistema eléctrico en general [4].

En este contexto, la Regulación ecuatoriana vigente denominada ARCONEL 009/24 [5], emitida por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad en el país, indica los requisitos técnicos que deben cumplir los diferentes sistemas eléctricos con respecto a la calidad de energía, protección y eficiencia operativa, en donde se establecen indicadores, índices y límites que deben regirse para las empresas eléctricas de distribución y consumidores, según corresponda. Según lo establecido por la Normativa IEEE 519-2014 [6], esta práctica se debe aplicar en los puntos de enlace entre los propietarios u operadores del sistema y los usuarios del sistema eléctrico.

La empresa Aglomerados Cotopaxi S.A., la cual fue fundada en 1978 se dedica a la fabricación de productos derivados de la madera y está constituida por once naves de trabajo, siendo la nave de aserradero la línea principal dentro de la cadena de producción, la cual fue establecida en 1995 con el objetivo de maximizar el aprovechamiento del recurso forestal [7].

A través de los años, el área de aserradero se ha expandido y aumentado su capacidad tecnológica lo cual ha producido cambios en el sistema eléctrico [7]. Sin embargo, estas modificaciones no se han acompañado de un análisis indispensable de la calidad de energía, ni tampoco se ha realizado la documentación y diagramación de esquemas unifilares en donde se refleje de manera real el estado actual de la infraestructura eléctrica.

Por esta razón, se plantea el presente proyecto en donde su principal objetivo está en el análisis de la calidad de energía en el área de aserradero de la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. debido a la falta de estudios previos, para lo cual se realiza la elaboración de planos unifilares actualizados tomando en cuenta la infraestructura actual, y la realización de simulaciones en software especializado, todo bajo los parámetros que dicta la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. Con esto se espera que los resultados del estudio generen una base sólida para el mejoramiento de la eficiencia operativa, así como garantizar del desempeño de los equipos a largo plazo.

## **2.1. PROBLEMA**

### **2.1.1. Situación Problemática**

La empresa AGLOMERADOS COTOPAXI S.A., estableció una línea de aserradero con el propósito de maximizar el aprovechamiento del recurso forestal, desde entonces, esta área ha experimentado un crecimiento continuo en términos de equipos y tecnología, sin embargo, no cuenta con estudios ni esquemas unifilares actualizados que reflejen la situación actual del sistema eléctrico.

El aumento en la demanda por la introducción de nueva maquinaria ha requerido que se instale un nuevo centro de transformación, destinado a proporcionar la energía indispensable para el funcionamiento óptimo de los equipos nuevos. Esta falta de información, así como la ausencia de un análisis del sistema eléctrico, dan las pautas para generar un estudio en donde se puedan corregir los problemas generados por el aumento de maquinaria, que conlleva a diversas variaciones en el comportamiento de los perfiles de voltaje y en el factor de potencia. Conseguir la corrección de estos problemas es indispensable para optimizar el uso de la energía, reducir las pérdidas eléctricas y mejorar la eficiencia global dentro de la planta.

Por esta razón se propone realizar un análisis de la calidad de energía basado en los parámetros de la Regulación ARCONEL 009/24 [5], la cual indica los requisitos técnicos y regulatorios que permitan asegurar la calidad del suministro eléctrico con respecto al consumidor, así como la inclusión de los diagramas unifilares mediante el uso de software especializado.

### **2.1.2. Formulación del Problema**

La expansión continua de la línea de producción en el área de aserradero requiere analizar los parámetros de calidad de energía, así como una actualización de los diferentes diagramas del sistema eléctrico, complementados con simulaciones en software especializado para garantizar los resultados.

## **2.2. OBJETIVO Y CAMPO DE ACCIÓN**

El objeto del estudio es analizar la Calidad de Energía de la empresa aplicando la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

## **2.3. JUSTIFICACIÓN**

La calidad de la energía eléctrica es un factor crítico dentro de la operación de los procesos industriales, especialmente en sistemas que poseen maquinaria de gran consumo energético como lo es el aserradero de Aglomerados Cotopaxi S.A., donde los equipos dependen de un suministro estable y confiable para garantizar una operación eficiente. Por esta razón, el analizar la calidad de energía permite identificar y mitigar estos problemas, optimizando los recursos eléctricos y garantizando una operación constante de la planta.

Por otro lado, el cumplimiento de la Regulación ARCONEL 009/24 [5], garantiza que la empresa opere dentro de los estándares regulatorios establecidos por la entidad competente. Esta normativa establece límites específicos sobre parámetros de calidad de energía, así también busca que el consumidor opere con eficiencia energética y así pueda proteger tanto a los equipos como a sus componentes de un suministro deficiente. Mediante este estudio, se busca evaluar el estado actual de la calidad de energía en la empresa y de ser el caso, proponer mejoras que aseguren el cumplimiento normativo, eviten sanciones y mejoren la competitividad de la empresa en el mercado.

El análisis de la calidad de energía en el área de aserradero de la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. es indispensable por razones técnicas, económicas y operativas, especialmente

considerando los cambios realizados en la maquinaria y por lo tanto en el sistema eléctrico dentro del área. La incorporación de equipos nuevos y la salida de motores antiguos dentro del aserradero representan una oportunidad para analizar y mejorar la calidad operativa de la planta.

## **2.4. BENEFICIARIOS**

### **2.4.1. Directos**

La Empresa beneficiaria de este proyecto de investigación es Aglomerados Cotopaxi S.A.

### **2.4.2. Indirectos**

Los beneficiarios indirectos comprenden a los usuarios ubicados en el entorno cercano a la empresa.

## **2.5. OBJETIVOS**

### **2.5.1. General**

Realizar un análisis de calidad de energía en el área de aserradero de la Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. mediante la medición y simulación del sistema eléctrico.

### **2.5.2. Específicos**

- Revisar el estado del arte actual del análisis de calidad de energía eléctrica.
- Realizar un levantamiento de información de la zona bajo estudio que reflejen todas las actualizaciones y mejoras implementadas, asegurando una documentación técnica precisa y actualizada del sistema eléctrico
- Realizar una simulación para evaluar la operación del sistema eléctrico bajo carga.
- Plantear soluciones correctivas en caso de identificar problemas de calidad de energía en la línea del área bajo estudio.

## **2.6. HIPÓTESIS Y SISTEMA DE TAREAS**

### **2.6.1. Hipótesis**

La elaboración de planos unifilares, junto con la medición y simulación del sistema eléctrico del área del aserradero, permite evaluar la calidad de la energía eléctrica, identificando

desviaciones respecto a la normativa vigente y proponiendo medidas correctivas que optimicen el desempeño del sistema.

### 2.6.2. Sistemas de Tareas

En la Tabla 2.1 observa a detalle el sistema de tareas que permiten dar cumplimiento al presente proyecto de investigación.

Tabla 2.1 Tareas del Plan de Titulación.

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividades (tareas)</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
Revisar el estado del arte actual del área del análisis de calidad de energía eléctrica	Investigación y revisión de literatura sobre los estándares y prácticas actuales en análisis de calidad de energía eléctrica.	Informe sobre el estado del arte y las mejores prácticas en calidad de energía.	Revisiones bibliográficas y análisis de normativas.
Realizar un levantamiento de información de la zona bajo estudio	Recolección y documentación de toda la información relevante sobre las actualizaciones y mejoras en el sistema eléctrico del área bajo estudio para la realización de diagramas unifilares.	Documentación técnica precisa y actualizada del sistema eléctrico.	Herramientas de recolección de datos y software AutoCAD.
Realizar una simulación para evaluar la operación del sistema eléctrico bajo diferentes condiciones de carga	Modelado y simulación del sistema eléctrico considerando diversas condiciones de carga para evaluar su comportamiento y rendimiento.	Informe de simulación con análisis del rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.	Software de simulación ETAP 21.0.1 y análisis de sistemas eléctricos.
Plantear soluciones correctivas en caso de identificar problemas en la línea del área bajo estudio	Identificación de problemas a partir de la simulación y análisis, y desarrollo de propuestas para soluciones correctivas.	Propuestas de soluciones correctivas detalladas y plan de acción para su implementación.	Herramientas de análisis de problemas y desarrollo de soluciones en el software SIMULINK.

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

La fundamentación teórica desarrollada en este capítulo se la realiza mediante una búsqueda de información sobre los temas más relevantes relacionados con la calidad de energía eléctrica, basados en normativas nacionales e internaciones, con el objetivo de proporcionar un enfoque preciso acerca de los principales problemas que se pueden presentan en un sistema eléctrico industrial, así como las posibles soluciones para cada uno de ellos. A continuación, se presenta cada una de las secciones correspondientes conjuntamente con sus respectivos conceptos.

#### **3.1. PERTURBACIONES ELÉCTRICAS**

En este apartado se detallan cada una de las perturbaciones existentes dentro de los sistemas eléctricos, para lo cual en el ANEXO A, se observa un breve resumen de sus principales características dadas por la Normativa IEEE Std 1159-1995 [8].

##### **3.1.1. Transitorios**

Son perturbaciones que poseen frecuencias hasta 3 MHz y se consideran de los más perjudiciales dentro de un sistema eléctrico [8].

###### **3.1.1.1. Transitorio Impulsivo**

Este fenómeno se manifiesta como un cambio drástico en los niveles de tensión o corriente, caracterizado por valores pico extremadamente altos que se mantienen en una sola dirección de polaridad. Generalmente, se producen por descargas atmosféricas (rayos), y se caracterizan por tiempos de transición extremadamente breves, que pueden darse en el rango de milisegundos, microsegundos o incluso nanosegundos [8].

###### **3.1.1.2. Oscilatorio**

A diferencia del transitorio impulsivo, este tipo de fenómeno se caracteriza por un cambio rápido en la polaridad de la señal y se lo clasifica dependiendo del valor de su frecuencia bajo tres categorías: de baja frecuencia, con valores inferiores a 5 kHz y una duración que oscila entre 0.3 y 50  $\mu$ s, asociados a efectos producidos por transformadores; los de mediana frecuencia, con valores entre 5 kHz y 500 kHz con una duración normal en el orden de decenas de microsegundos; finalmente se tiene los de alta frecuencia, que superan los 500 kHz y cuya duración se mantiene en el rango de los microsegundos [9].

### 3.1.2. Variaciones de Corta Duración

Este fenómeno agrupa aquellas interrupciones de breve duración que se generan por la conexión de grandes cargas que demandan altas corrientes de arranque, como ocurre con los motores industriales [8]. Según el punto de falla, se presentan los siguientes efectos:

- **Swell:** Aumento temporal de tensión, que va entre 1.1 p.u y 1.2 p.u en un periodo de 0.5 ciclos a 1 minuto.
- **Sag:** Disminución momentánea de tensión, con valores entre 0.1 p.u y 0.9 p.u dentro del mismo rango de tiempo.
- **Interrupción:** Implica la pérdida total de voltaje por debajo de 0.1 p.u en un periodo inferior a 1 minuto.

### 3.1.3. Variaciones de Larga Duración

Dentro de este tipo de fenómeno se incluyen las variaciones de voltaje que alcanzan el límite de tiempo de 1 minuto, originadas por fluctuaciones de carga y operaciones de conmutación dentro del sistema eléctrico. Estas variaciones pueden manifestarse como interrupciones sostenidas, en donde el voltaje disminuye en más del 10% del valor nominal; caídas de voltaje, con valores entre 0.8 y 0.9 p.u.; sobrevoltajes, con incrementos entre 1.1 y 1.2 p.u.; y, sobrecargas de corriente [9].

### 3.1.4. Desbalance

Se conoce como la relación en porcentaje de la componente de secuencia negativa y positiva de corriente o voltaje [8], representada por la ecuación 1:

$$\text{Desbalance (\%)} = \frac{|\text{Comp}_{\text{neg}}|}{|\text{Comp}_{\text{pos}}|} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

- **Comp<sub>neg</sub>:** Componente de secuencia negativa.
- **Comp<sub>pos</sub>:** Componente de secuencia positiva.

Normalmente dentro de un sistema trifásico esta relación se encuentra con valores menores al 3% [8].

### **3.1.5. Distorsión de Forma de la Onda**

La distorsión de forma de onda se refiere a la desviación de una onda sinusoidal ideal en estado estacionario. Este fenómeno puede clasificarse en diferentes tipos, entre los cuales se encuentra la desviación de corriente continua (D.C.), los armónicos, los interarmónicos, las muescas (notching) y el ruido [8].

### **3.1.6. Fluctuaciones de Voltaje**

Este fenómeno corresponde a cambios aleatorios de voltaje cuyo valor varía entre 0.95 y 1.05 p.u., producidos principalmente por la presencia de hornos de arco [8].

### **3.1.7. Variaciones de Frecuencia**

Representa la desviación de la frecuencia fundamental de la señal, provocada por el cambio en la velocidad de rotación de los generadores a causa del desequilibrio entre la generación disponible y la demanda [8].

### **3.1.8. Regulación ARCONEL 009/24**

Según la Regulación ARCONEL 009/24 [5], la cual trata sobre la calidad del servicio eléctrico de distribución y comercialización de energía eléctrica que se encuentra actualmente vigente, establece los siguientes índices e indicadores:

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker).
- Distorsión armónica de voltaje.
- Desequilibrio de voltaje.
- Distorsión armónica de corriente.

#### **3.1.8.1. Nivel de Voltaje**

En la Tabla 3.1 se muestra la clasificación de los niveles de voltaje que se consideran para el desarrollo de la propuesta que se encuentra dentro de la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

Tabla 3.1 Niveles de voltaje [5].

Nivel de Voltaje	Variación Admisible
Alto Voltaje Grupo 1	Mayor a 138 kV
Alto Voltaje Grupo 2	Mayor a 40 kV y menor igual a 138 kV
Medio Voltaje	Mayor a 0.6 kV y menor igual a 40kV
Bajo Voltaje	Menor igual a 0.6 kV

La calidad del nivel de voltaje en un punto del sistema eléctrico se calcula mediante la ecuación 2:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100[\%] \quad (2)$$

Donde:

- $\Delta V_k$ : Indica la variación del voltaje de entrada con respecto al voltaje nominal en el punto k.
- $V_k$ : Representa el voltaje de entrada en ese punto, determinado como el promedio de las medidas registradas al menos cada 3 segundos, dentro de un periodo de 10 minutos.
- $V_N$ : Voltaje nominal en el punto k.

En la Tabla 3.2 se detalla los rangos de voltaje admisibles con respecto a la clasificación de la Tabla 3.1.

Tabla 3.2 Rango de voltaje admisibles [5].

Nivel de Voltaje	Variación Admisible
Alto Voltaje	±5,0%
(Grupo 1 y Grupo 2)	
Medio Voltaje	±6,0%
Bajo Voltaje	±8,0

### 3.1.8.2. Perturbaciones Rápidas de Voltaje (Flicker)

La norma IEEE 1159 [8], define a este fenómeno como la percepción visual de inestabilidad, provocada por fluctuaciones en la distribución espectral de una fuente de luz a lo largo del tiempo. Por su parte la Regulación ARCONEL 009/24 [5], propone una formulación matemática que permite calcular la afectación de los flickers de corta duración, basada en mediciones de variaciones de voltaje en intervalos de 10 minutos, la cual se muestra en la ecuación 3:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (3)$$

Donde:

- **P<sub>st</sub>**: Índice de severidad para un flicker de corta duración
- **P<sub>0,1</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>10</sub>, P<sub>50</sub>**: Niveles de efecto que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del intervalo de medición.

El índice de severidad en el punto de medición no puede superar la unidad [5].

### 3.1.8.3. Distorsión Armónica de Voltaje

Se evalúa la distorsión armónica individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje (THD) conforme a lo establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. Dichas evaluaciones se realizan mediante las ecuaciones 4,5 y 6:

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (4)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100[\%] \quad (5)$$

$$THD_k = \left[ \frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100[\%] \quad (6)$$

Donde:

- **V<sub>h,k</sub>**: Representa el armónico de voltaje h en el intervalo k durante 10 minutos.
- **V<sub>h,i</sub>**: Corresponde al valor rms de componente armónica de voltaje h (para h = 2, 3, ..., 50), medido cada 3 segundos (i = 1, 2, ..., 200).
- **DV<sub>h,k</sub>**: Es el factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h, dentro del intervalo k de 10 minutos.
- **THD<sub>k</sub>**: Factor de distorsión armónica total de voltaje.
- **V<sub>h,1</sub>**: Es el valor rms de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

A continuación, en la Tabla 3.3, se mencionan los límites máximos admisibles de armónicos para cada nivel de voltaje.

Tabla 3.3 Límites máximos de armónicos de voltaje [5].

Nivel de Voltaje	DV <sub>h,k</sub> [%]	THD <sub>h,k</sub> [%]
Medio Voltaje	3	5
Bajo Voltaje	5	8
Alto Voltaje (G1)	1,5	2,5
Alto Voltaje (G2)	1	1,5

#### 3.1.8.4. Desequilibrio de Voltaje

Según la Norma IEEE 1159 [8], el desequilibrio de voltaje corresponde a la relación entre las componentes de secuencia negativa y positiva, generalmente se representa en forma porcentual. Para estimar este índice en un punto determinado del sistema, la Regulación ARCONEL 009/24 [5], establece la ecuación 7, la cual permite evaluar el desequilibrio de voltaje:

$$\text{Desequilibrio de voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \times 100[\%] \quad (7)$$

Donde:

- $V^-$  y  $V^+$ : son las componentes de secuencia negativa y positiva, respectivamente, calculado como el promedio de mediciones registradas en un intervalo de 10 minutos.

Los rangos límite para el índice de desequilibrio de voltaje en un punto no debe superar el 2% para cualquier nivel de voltaje [5].

#### 3.1.9. Distorsión Armónica de Corriente

Los índices que permiten evaluar la distorsión armónica individual de corriente, así como la distorsión de demanda total, según lo establecido en la Regulación ARCONEL 009/24 [5], se encuentran definidas mediante las ecuaciones 8, 9 y 10:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (8)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \times 100[\%] \quad (9)$$

$$TDD_k = \left[ \frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \times 100 \quad (10)$$

Donde:

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

Los límites de distorsión de demanda total y distorsión armónica individual de corriente para valores impares y pares se visualizan en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5 respectivamente, tomando en cuenta que para armónicos pares se ajustan a un 25% de los límites indicados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4 Nivel máximo de distorsión armónica de corriente correspondientes impares [5].

Nivel máximo de armónicos impares (%) de la corriente máxima de demanda.						
Icc/ll	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabla 3.5 Nivel máximo de distorsión armónica de corriente correspondientes pares [5].

Nivel máximo de armónicos pares (%) de la corriente máxima de demanda.						
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub>	3<h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20	1	0,5	0,375	0,15	0,075	1,25
20<50	1,75	0,875	0,625	0,25	0,125	2
50<100	2,5	1,125	0,375	0,375	0,175	3
100<1000	3	1,375	0,5	0,5	0,25	3,75
>1000	3,75	1,75	0,625	0,625	0,35	5

Donde:

- **I<sub>cc</sub>**: Corriente máxima de cortocircuito en el PCC.
- **I<sub>L</sub>**: Corriente máxima de carga a frecuencia fundamental a 60 Hz.

Tal como lo establece la Regulación ARCONEL 009/24 [5], la determinación de los límites permisibles para cada uno de los armónicos de corriente de orden impar debe basarse en el cálculo expresado en la ecuación 11. Este cálculo depende del cociente entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto de conexión (I<sub>cc</sub>) y la corriente de carga máxima (I<sub>L</sub>), ya que este parámetro define el nivel de rigidez del sistema frente a perturbaciones armónicas. En función de este cociente, la normativa establece umbrales máximos específicos para cada orden armónico.

$$\% \text{ hamónico} = \frac{I_{cc}}{I_L} \quad (11)$$

## 3.2. REGULACIONES Y NORMAS RELACIONADAS

### 3.2.1. Regulación Nacional

La Regulación ARCONEL 009/24 [5], entregada por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, cumple con varios estándares internacionales como la norma IEEE Std 519-2014 [6] y varias normas IEC (61000-4-11, 61000-4-30, 61000-4-15, 61000-4-7, entre otras). Dentro de esta regulación se aborda la calidad del servicio en la distribución y comercialización de energía eléctrica mediante la evaluación de índices como el nivel de voltaje, perturbaciones rápidas de voltaje (flicker), distorsión armónica de voltaje, desequilibrio de voltaje y distorsión armónica de corriente.

Así también, establece rangos admisibles para estos parámetros, definiendo los criterios y requisitos técnicos necesarios para que las instalaciones eléctricas y los sistemas de distribución cumplan con estándares de eficiencia, calidad del servicio y seguridad, lo cual garantiza un suministro confiable de energía eléctrica en el país, promoviendo la sostenibilidad y el cumplimiento de normativas técnicas en la infraestructura energética [5].

### **3.2.2. Normativa Internacional**

Con respecto a la normativa internacional, el presente estudio contempla varias que sirven para la conexión del analizador de red, así como para establecer el nivel aceptable de THD en las cargas, así como en el sistema eléctrico en general, por lo cual en el ANEXO B, se observa la recopilación de normas con su descripción, así como sus ventajas y características.

### **3.3. MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS**

Los sistemas eléctricos generalmente son afectados de manera constante por el comportamiento de las cargas, lo que produce variaciones de voltaje y corriente, y por consecuencia generan problemas de desgaste temprano de los equipos como conductores eléctricos, motores y transformadores [10].

Actualmente existen varios métodos para mitigar los armónicos dentro de instalaciones eléctricas lo cual depende del nivel de distorsión lo cual se puede determinar mediante un estudio de calidad de energía. Dentro de esto existen diversas soluciones las cuales se abordarán a detalle a continuación.

#### **3.3.1. Conductores**

En sistemas trifásicos con presencia de armónicos, es necesario utilizar un conductor neutro de mayor calibre que los conductores de fase. Esto permite que el neutro soporte adecuadamente la suma de las corrientes que circulan y retornan por medio de él. En la Figura 3.1 se visualiza el comportamiento del tercer armónico (triplen) en cada fase, el cual es idéntico en todas ellas, generando una frecuencia tres veces mayor que la fundamental [11].

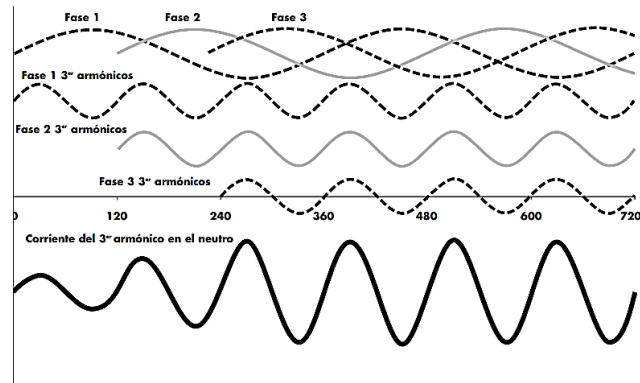


Figura 3.1 Suma de corrientes Triplén en el neutro [11].

### 3.3.2. Transformador

Los avances tecnológicos han llevado al desarrollo de transformadores diseñados para mitigar armónicos mediante un factor  $k$ , que mide su capacidad para manejar corrientes no sinusoidales. Estos transformadores incluyen aislamiento galvánico entre los devanados primario y secundario, así como blindaje electrostático, que los protege de las pérdidas y el sobrecalentamiento causados por los armónicos [12]. Además, están preparados para manejar cargas adicionales derivadas de altos niveles de distorsión armónica sin superar su temperatura de operación. El factor  $k$  se puede determinar a partir de la ecuación 12:

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2 \quad (12)$$

Donde:

- $I_h$ : componente de corriente del armónico de orden  $h$
- $I_{RMS}$ : corriente total RMS del sistema
- $h$ : orden del armónico (1: fundamental, 3, 5, 7, ...)
- $h^2$ : pondera más fuertemente los armónicos de mayor orden

### 3.3.3. Capacitores

Los bancos de capacitores sirven como una opción ideal para mejorar el factor de potencia, pero también actúan como filtros de armónicos, ya que tienen una alta capacidad de formar un circuito resonante que interactúa con la inductancia propia de los cables [10].

### 3.3.4. Tipos de Filtros

Existen diversos tipos de filtros de los cuales se distingue su aplicación en cuanto al paso de la frecuencia de corte. El filtro pasa alto (Figura 3.2 (b)) evitan el paso de señales con una frecuencia menor a la de corte y permiten el paso de las señales mayores a la frecuencia fundamental. Por el contrario, el filtro pasa bajo (Figura 3.2 (a)) bloquea las señales altas y da paso a las señales con menor relación a la frecuencia de corte determinada.

Por otro lado, el filtro pasa banda (Figura 3.2 (c)) elimina las frecuencias que se encuentran fuera del corte inferior y superior del diseño específico. Mientras que el filtro rechaza banda, elimina las frecuencias que se encuentran dentro del rango determinado en el diseño por las frecuencias fundamentales [13].

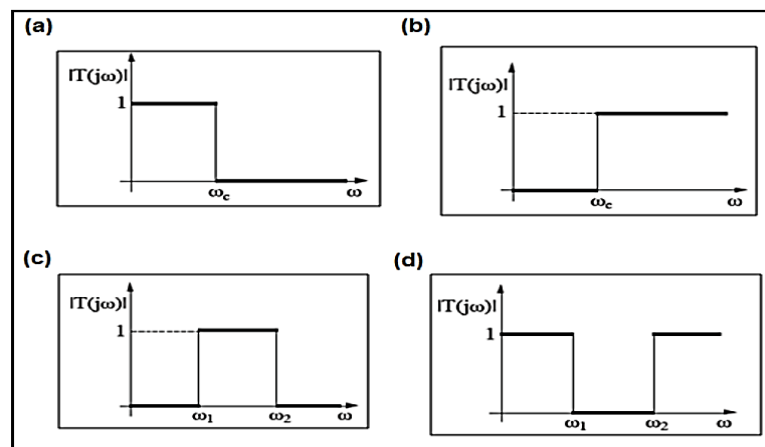


Figura 3.2 Tipos de filtros activos [13].

#### 3.3.4.1. Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son aquellos que trabajan dentro de un ancho de banda limitado y frecuencias específicas, siendo uno de los más utilizados dentro del sector industrial, debido a su fácil aplicación y que no requieren de fuente de alimentación externa para su funcionamiento. Entre sus desventajas se encuentra que al utilizar componentes pasivos genera problemas de resonancia. Entre los principales filtros pasivos se encuentran la serie, paralelo, sintonizado, pasa altos y Butterworth [10].

Del mismo modo, en la sintonización de los filtros se consideran tanto la potencia reactiva como la capacitiva, con el fin de minimizar la presencia de armónicos de magnitud significativa. Este procedimiento se basa en el uso de las siguientes expresiones matemáticas [14]:

Reactancia del Filtro en la ecuación:

$$X_{\text{filtro}} = \frac{(V_{\text{nominal}})^2}{Q_c(\text{VAR})} \quad (13)$$

Donde

$$Q_c = P * (\tan\theta_1 - \tan\theta_2)$$

Reactancia Capacitiva en la ecuación y la ecuación:

$$X_{\text{cap}} = h^2 * X_L \quad (14)$$

$$X_{\text{cap}} = \frac{h^2}{h^2 - 1} * X_{\text{filtro}} \quad (15)$$

Valor del capacitor ( $C_{\text{farad}}$ ) en la ecuación

$$C_{\text{farad}} = \frac{1}{\omega X_{\text{cap}}} \quad (16)$$

Inductancia del filtro en la ecuación

$$X_L = \frac{X_{\text{cap}}}{h^2}, \text{ por lo tanto } L_{\text{henrios}} = \frac{X_{\text{henrios}}}{\omega} \quad (17)$$

$$Z = R + j\left(L_{\text{henrios}}\omega - \frac{1}{C_{\text{farad}}\omega}\right) \quad (18)$$

Factor de calidad en la ecuación

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (19)$$

Donde:

- $Q_c$  : Potencia reactiva que el filtro suministrara
- $V_{\text{nominal}}$  : Tensión nominal
- $X_{\text{cap}}$  : Reactancia capacitiva del filtro
- $X_L$  : Reactancia inductiva del filtro

- $X_{\text{filtro}}$  : Reactancia del filtro
- $C_{\text{farad}}$  : Capacitor (uf)
- $L_{\text{henrios}}$  : Inductor ( $Hr$ )
- $w = 2\pi f$  : frecuencia angular

#### **3.3.4.2. Filtros Activos**

Los filtros activos son dispositivos más sofisticados y están diseñados para solucionar los problemas que tienen principalmente los filtros pasivos ya que introducen la electrónica de potencia para monitorear en tiempo real un amplio rango de frecuencias, ajustando su señal armónica resultante [10]. Entre sus funciones destacan se puede realizar la mitigación de armónicos, control de THD dentro de un sistema eléctrico, corrección del factor de potencia y control e inspección del flujo de corriente.

#### **3.3.4.3. Filtro Activo en Serie**

Como se mencionó anteriormente, estos filtros se utilizan principalmente en la mitigación de armónicos y flickers de voltaje, así como el aseguramiento de que el voltaje en los terminales de la carga sea sinusoidal [15].

#### **3.3.4.4. Filtro Activo en Paralelo**

Diferenciándose de la conexión en serie, este tipo de filtro ayuda a mitigar los armónicos de corriente ya que las corrientes del sistema en la red como en las cargas se suman generando una curva sinusoidal. Su uso principalmente corresponde a aplicaciones de corrección del factor de potencia y control de fugas de corrientes [15].

#### **3.3.4.5. Filtro Activo Híbrido o Mixto.**

Este tipo de filtros se diseñan mediante la conjunción de conexiones en serie y paralelo, lo cual permite mejorar los resultados de voltaje y corriente sinusoidal en los terminales de carga [15].

#### **3.3.5. Teoría P-Q Para el Diseño del Filtro Activo**

La Teoría P-Q hace uso de la transformada de Clarke y permite calcular las corrientes y voltajes de estado estacionario en el marco de referencia [15].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (20)$$

Las corrientes estimadas por la ecuación 20, equivalen a las corrientes activas instantáneas resultantes de la teoría P-Q en el dominio  $\alpha\beta$ . La teoría P-Q es uno de los diversos métodos que se utilizan en el control de filtros activos, siendo sus principales características que se puede aplicar a sistemas trifásicos no balanceados o balanceados, con ondas de voltaje y corriente con o sin armónicos [16].

También se basa en la medición de valores instantáneos, lo que permite una excelente respuesta dinámica. Tiene una implementación que es simple con los procesadores de señales que existe en la actualidad. En la Figura 3.3, se muestra el diagrama de bloques que representa la arquitectura del diseño de un filtro de compensación de las corrientes en cada una de las fases de un sistema trifásico.

La teoría p-q es un enfoque ampliamente utilizado en el control de filtros activos para sistemas trifásicos, debido a sus características distintivas y ventajas. Se basa en el uso de valores instantáneos, lo que le otorga una excelente capacidad de respuesta dinámica, y sus cálculos, compuestos únicamente por expresiones algebraicas, son lo suficientemente simples como para implementarse con procesadores estándar. Esto hace que sea una herramienta eficaz y accesible para una amplia gama de aplicaciones [16].

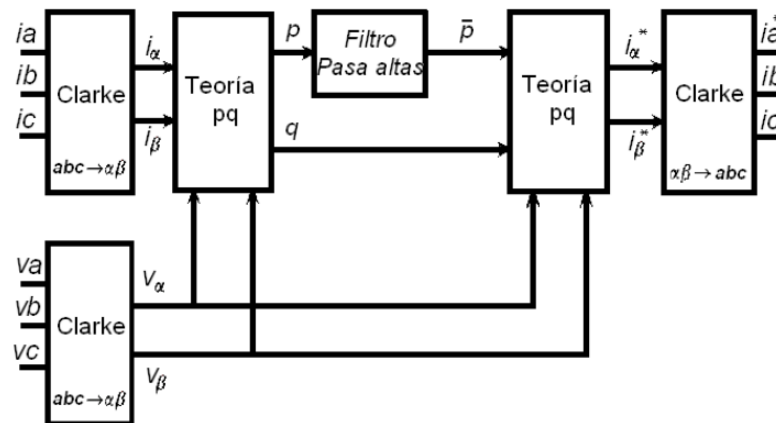


Figura 3.3 Diagrama de Bloques de un Filtro Activo PQ [16].

Una de las principales ventajas de la teoría p-q es que puede aplicarse tanto a sistemas trifásicos balanceados como desbalanceados, con o sin armónicos en las tensiones y corrientes. Esto la

convierte en una solución flexible para el control de calidad de energía en sistemas eléctricos complejos. Además, permite implementar dos estrategias de control principales: garantizar una potencia de suministro instantánea constante o mantener una corriente de suministro sinusoidal. Otro aspecto relevante es el papel del capacitor en el filtro activo tal y como se observa en la Figura 3.4. Este es necesario únicamente para almacenar y compensar los componentes  $\tilde{p}$  y  $\tilde{p}_0$  de la potencia instantánea, ya que estas cantidades deben almacenarse temporalmente antes de ser entregadas a la carga. Sin embargo, la potencia imaginaria instantánea ( $q$ ), que incluye la potencia reactiva convencional, puede ser compensada sin depender del capacitor. Esto implica que el tamaño del capacitor no está determinado por la cantidad de potencia reactiva a compensar, lo que simplifica el diseño y reduce los costos del sistema [16].

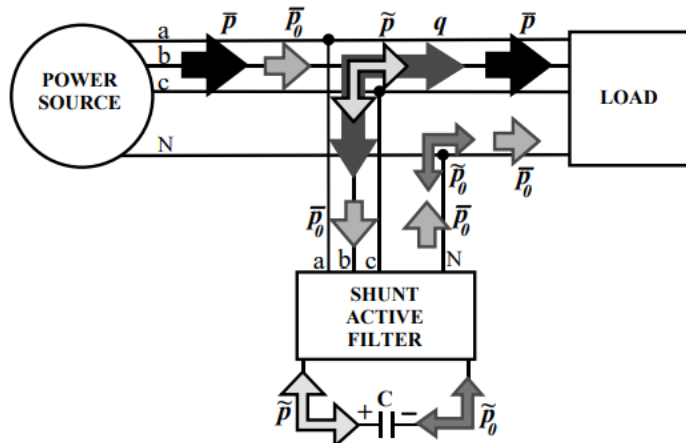


Figura 3.4 Esquema de Filtro Activo Shunt con Capacitor [16].

Para calcular la Corriente de compensación de referencia en  $\alpha - \beta$  se utiliza la ecuación 21 con los voltajes compensados como se observa:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - \tilde{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (21)$$

Debido a que la corriente de secuencia cero debe ser compensada, la corriente de referencia de compensación en la coordenada 0 es la propia  $i_0$  como lo menciona la ecuación 22:

$$i_{c0}^* = i_0 \quad (22)$$

Para obtener las corrientes de referencia de compensación en los puntos a-b-c, se aplica la transformación inversa tal y como se muestra en la ecuación 23:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (23)$$

Los cálculos realizados se los verifica de manera gráfica en la Figura 3.5 y corresponden a una estrategia de control de un filtro activo en derivación que garantiza una potencia de suministro instantánea constante [17].

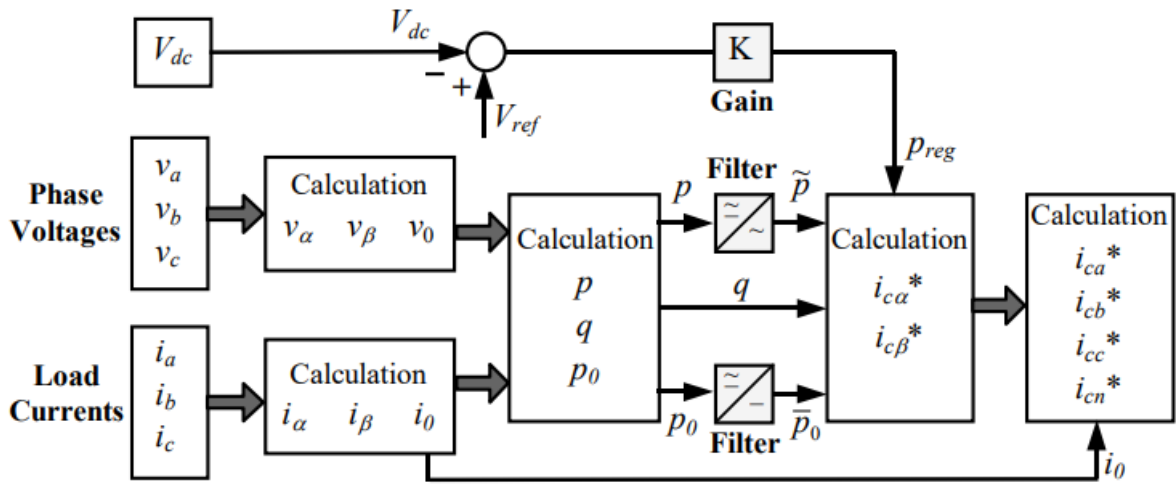


Figura 3.5 Cálculo de potencia de alimentación instantánea [17].

En sistemas trifásicos con voltajes balanceados se tiene que las corrientes de suministro de fase se hacen sinusoidales, balanceadas y están en fase con los voltajes como se observa en la Figura 3.6. De igual manera, La corriente del neutro se hace igual a cero, es decir se compensan los armónicos de corriente de tercer orden par; y finalmente la potencia instantánea suministrada,  $p_{3s}(t) = v_a \cdot i_{sa} + v_b \cdot i_{sb} + v_c \cdot i_{sc}$  se hace constante [17].

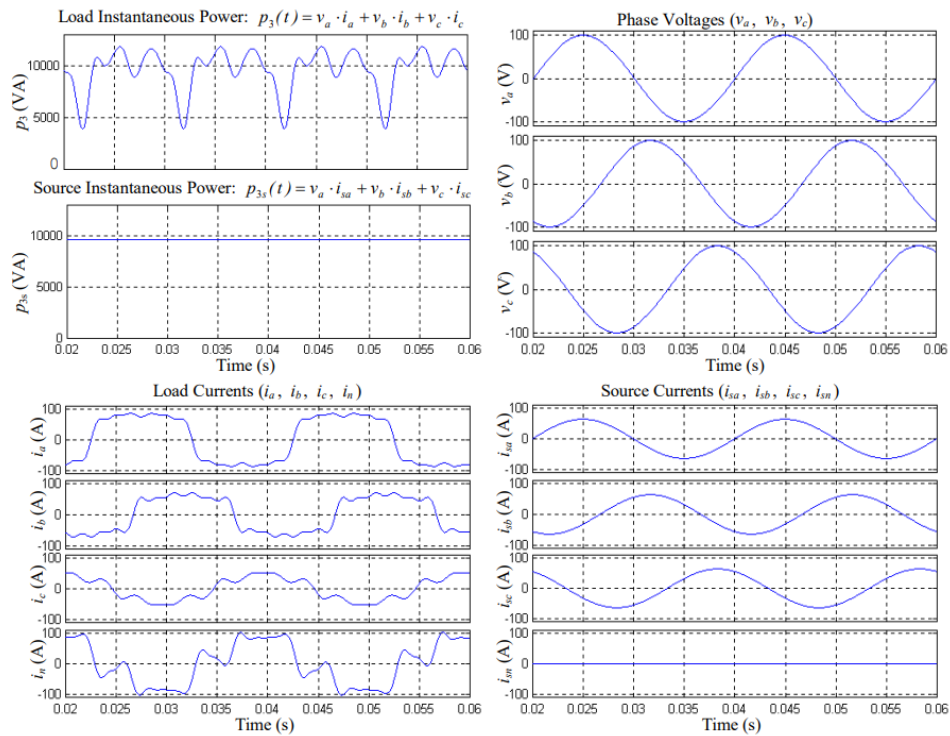


Figura 3.6 Resultados del filtrado de una señal de voltaje sinusoidal balanceada [17].

Por otro lado, cuando el voltaje de suministro es no sinusoidal o desbalanceada, produce una única diferencia en donde la corriente de suministro incluirá armónicos siendo dentro de la práctica una distorsión despreciable [17].

La estrategia de control de corriente sinusoidal de suministro se utiliza cuando los voltajes se encuentran distorsionados o desbalanceados y se desean corrientes sinusoidales. El diagrama de bloques que se observa en la Figura 3.7 indica los cálculos para este enfoque.

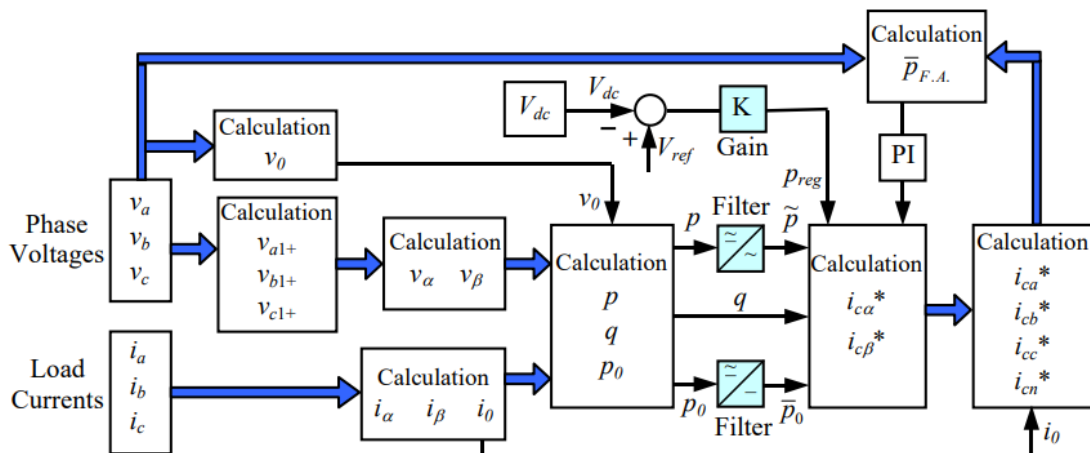


Figura 3.7 Estrategia de Control de Corriente en Sistemas Balanceados Trifásicos [17].

La implementación práctica de un filtro activo en derivación requiere la regulación del voltaje en el lado de corriente continua del inversor ( $V_{dc}$ ), donde  $V_{ref}$  corresponde al valor de referencia necesario para el funcionamiento adecuado del inversor del filtro activo [17].

En la Figura 3.8 se observan resultados de simulación para un sistema de potencia trifásico con un filtro activo en derivación. Dentro de ese se verifican las formas de onda correspondientes a dos ciclos de operación en estado estacionario; la potencia instantánea total en la carga y la fuente; las tensiones de fase, corrientes de carga y de fuente. En el caso de los voltajes distorsionados, la distorsión armónica total (THD) es igual al 10%, un valor mayor al regulado por cualquier estándar de calidad de energía.

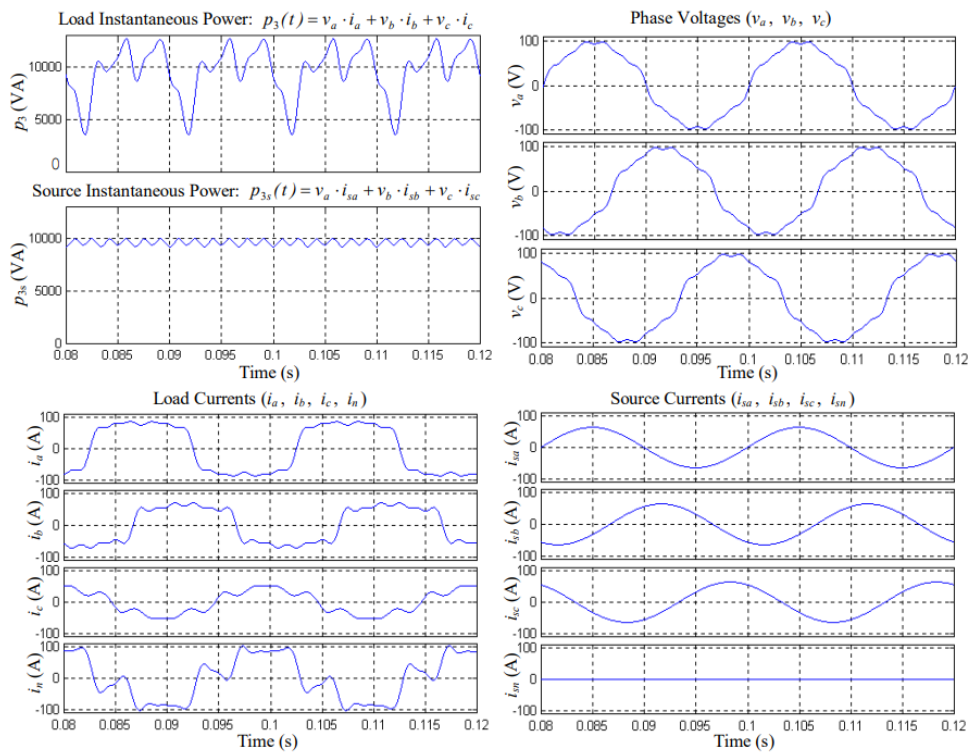


Figura 3.8 Resultados del Control en una Señal con Distorsión [17].

### 3.4. CASOS DE USO RELACIONADOS

En el ANEXO C se muestra una recopilación de casos en donde se encuentra inmersa la aplicación de temas relacionados con el estudio de calidad de energía, así como las soluciones o propuestas para su corrección por parte de los autores.

## 4. METODOLOGÍA

En esta sección se muestra la metodología, procedimientos y técnicas de investigación, así como los materiales y herramientas que se utilizan para cumplir con cada uno de los objetivos planteados en la presente investigación.

En el marco del cumplimiento de la Regulación ARCONEL 009/24 [5], que establece los requisitos técnicos para garantizar la calidad de energía, se desarrolla un proceso metodológico presentado en la Figura 4.1 permite formular cada uno de los procedimientos que se llevan a cabo para el análisis y procesamiento de la información para el desarrollo del estudio.

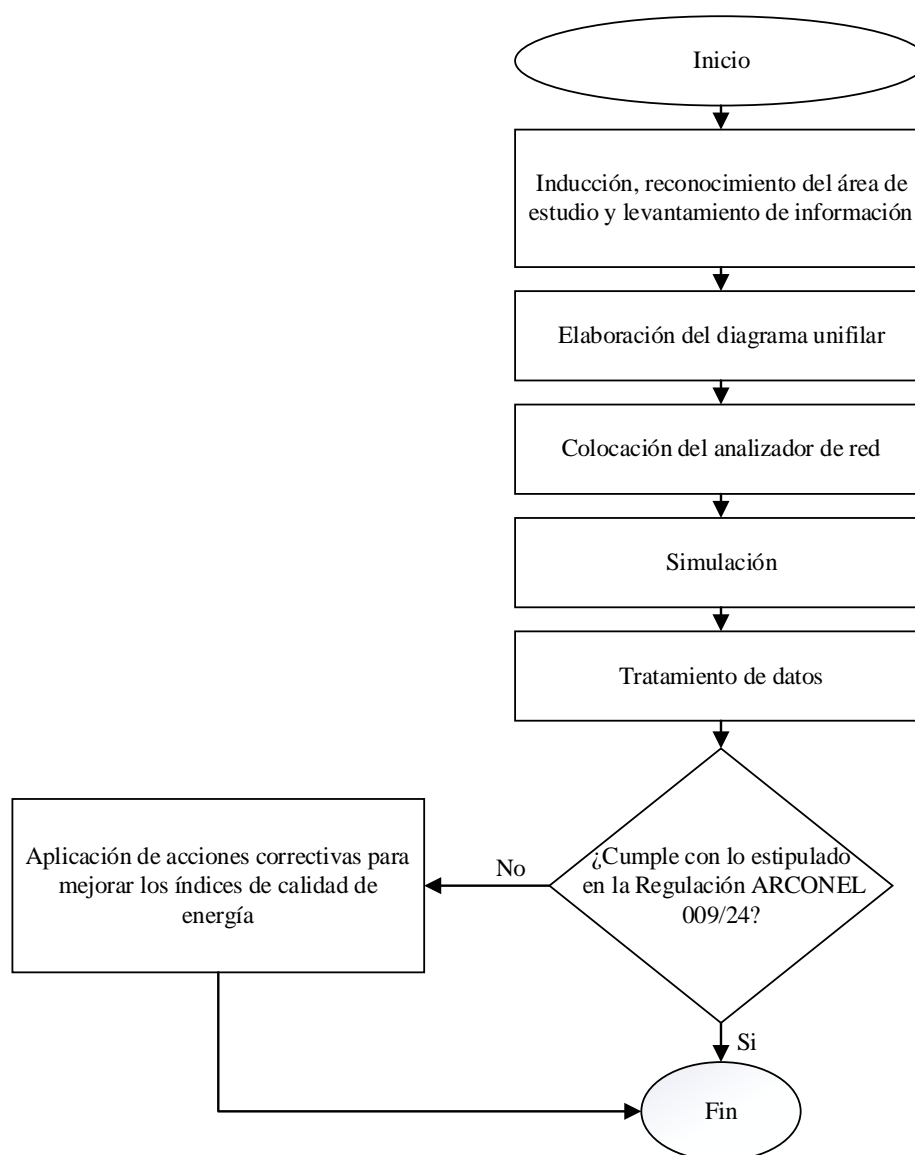


Figura 4.1 Diagrama de procesos para el desarrollo de la metodología

El proceso para evaluar y asegurar el cumplimiento de los índices de calidad de energía en la Empresa Aglomerados S.A. empieza por el reconocimiento de la infraestructura eléctrica y maquinaria presente en el área, tomando en cuenta niveles de voltajes, corrientes y demás magnitudes eléctricas correspondientes a los equipos instalados, para la recopilación de datos que permitan llevar a cabo la elaboración de diagramas unifilares y reconocer lugares clave para la instalación del analizador de red conforme indica la normativa IEEE Std 1159-1995 [8], con el objetivo de registrar los parámetros eléctricos a ser analizados.

Posteriormente, todos los datos recopilados serán representados en el software ETAP para simular el comportamiento del sistema eléctrico de manera didáctica con el fin de poder observar de mejor manera los datos obtenidos con el analizador de red para su análisis y comparación con las regulaciones y normativa vigentes ARCONEL 009/24 [5] y IEEE Std 1159-1995 [8].

Finalmente, si se cumple con la normativa, el proceso finaliza, en caso contrario, de existir índices fuera de rango, se pasa a la aplicación de acciones correctivas, las cuales pueden incluir la instalación de filtros activos para reducir o mitigar aquellos problemas. Una vez ejecutadas las acciones correctivas, se retoma el análisis de datos para comprobar si se ha alcanzado el cumplimiento normativo.

#### **4.1. INDUCCIÓN, RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN**

En esta etapa se realiza una visita técnica preliminar a las instalaciones eléctricas del área de estudio para identificar las características del sistema y el alcance del análisis, siendo este paso muy esencial para definir los parámetros y condiciones específicas del entorno, así como, la familiarización con las normativas de seguridad para la prevención de riesgos laborales durante las visitas a la empresa.

##### **4.1.1. Descripción de la Empresa**

La empresa analizada en este estudio es “AGLOMERADOS COTOPAXI S.A” la cual es una fábrica ecuatoriana que se encarga de la fabricación de diversos productos de madera como molduras, aglomerados, MDF, entre otros. Se encuentra ubicada en la provincia de Cotopaxi, específicamente en la vía Lasso – Tanicuchi en las coordenadas geográficas Latitud: -0.7434,

Longitud: -78.6122 que se observa en la Figura 4.2. Esta empresa cuenta con diversas áreas entre las cuales se encuentran: MDF, Aglomerado, Aserradero, Recubrimiento, Junta de chapado, Producto terminado, Molduras, entre otras.

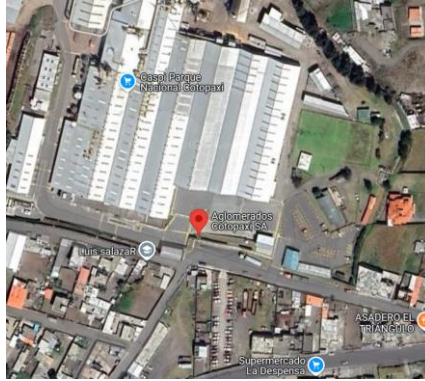


Figura 4.2 Ubicación de la empresa en análisis "Aglomerados Cotopaxi S.A.".

#### 4.1.2. Área de Estudio

El estudio se centra en el Aserradero que forma parte de las 11 áreas de trabajo de la empresa Aglomerados Cotopaxi S.A. cómo se señala en la Figura 4.3, siendo el punto inicial del proceso de producción.



Figura 4.3 Área de estudio.

#### 4.1.3. Levantamiento de Información

En esta fase se realiza el reconocimiento de cada uno de los componentes que conforman el área de estudio de la empresa, identificando procesos y máquinas que permiten su funcionamiento. Con esta información se procede a identificar cada uno de los circuitos que son alimentados por cada transformador y de esta manera poder verificar las cargas con sus respectivas características de potencia, calibre de conductores y protecciones. Con esta información se realizaron cada uno de los diagramas unifilares que conforman el esquema eléctrico de la empresa.

#### 4.1.4. Descripción del Sistema Eléctrico

El sistema que posee actualmente la empresa “Aglomerados Cotopaxi” se compone por 2 transformadores trifásicos principales de 13.8kV que se conectan a la red eléctrica de distribución que provienen desde la barra de 69kV ELEPCO – LASSO, los cuales tienen una capacidad de 1200kVA y 750kVA los cuales distribuyen las cargas bajo una tensión de 440V y un transformador para servicios auxiliares de 45kVA que reduce el voltaje a 220V. Las principales características del TRAF0\_1200kVA y TRAF0\_750kVA se las observa en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2 respectivamente.

Tabla 4.1 Características Transformador TRAF0\_1200kVA.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Marca</b>	ECUATRAN S.A.
<b>Potencia</b>	1200 kVA
<b>Voltaje en Primario</b>	13,8 kV
<b>Voltaje en Secundario</b>	0,44 kV
<b>Corriente en Secundario</b>	1574.6A
<b>Tipo de Conexión</b>	DY5
<b>Frecuencia Nominal</b>	60 Hz
<b>Norma</b>	ANSI
<b>Líquido Aislante</b>	Aceite
<b>Zcc</b>	5,7 %

Tabla 4.2 Características Transformador TRAF0\_750kVA.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Marca</b>	ECUATRAN S.A.
<b>Potencia</b>	750 kVA
<b>Voltaje en Primario</b>	13,8 kV
<b>Voltaje en Secundario</b>	0,44 kV
<b>Corriente en Secundario</b>	984.1A
<b>Tipo de Conexión</b>	DY5
<b>Frecuencia Nominal</b>	60 Hz
<b>Norma</b>	ANSI
<b>Líquido Aislante</b>	Aceite
<b>Zcc</b>	5,7 %

#### **4.1.5. Levantamiento de Cargas del Transformador 1200kVA**

Para determinar la potencia instalada del sistema se requiere realizar el levantamiento de las cargas de cada uno de los transformadores analizados. En el ANEXO D, se muestra el listado de todas las cargas que conforman el área MEBOR de la empresa “AGLOMERADOS COTOPAXI”, en donde las de mayor consumo energético son las sierras de la 1 a la 4 que poseen una potencia de 75kW, produciendo una potencia instalada en este transformador de 311.98kW.

#### **4.1.6. Levantamiento de Cargas del Transformador 750kVA**

En cuanto al TRAF0\_750 kVA se verifica que posee una potencia total instalada de 857.67kW, en el cual las cargas más relevantes son el motor del chipeador que posee una potencia de 100kW, las sierras 1 y 2 del HMK-16 con una potencia de 90kW y los motores de aspiración y ventilación con 55kW en el ANEXO E, se observa el detalle de cada una de las cargas de las cuales se encuentra conectado el transformador de 750kVA.

Cabe mencionar que el estudio de centra solamente en este transformador, ya que posee la mayor carga del área y por otro lado el transformador de 1200 kVA se encontraba fuera de servicio por pruebas de funcionamiento, por cual no se pudo instalar el analizador de red para el registro de datos.

#### **4.2. ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA UNIFILAR TRAF0 750kVA**

En este punto se procede a realizar los diagramas unifilares del sistema eléctrico perteneciente al área de Aserradero en el Software AutoCAD para representar de manera clara la distribución de los componentes eléctricos tales como alimentadores, protecciones, transformadores y cargas asociadas.

El transformador de 750 kVA se conecta al tablero principal con una tensión de 440 V mediante cuatro conductores de cobre tipo XLPE calibre 5X350 MCM, cuyas fases se conecta a protecciones de 1200 y 2000A. Este transformador entrega energía a determinados procesos como: remanufactura, chipeador, descortezador, sistema de iluminación y fuerza del área, caldero entre otras como se observa en el ANEXO F.

### 4.3. COLOCACIÓN DEL ANALIZADOR DE RED

#### 4.3.1. Determinación del Lugar

Para registrar de manera correcta los datos, y según menciona la normativa IEEE Std 1159-1995 [8], la cual indica que para el monitoreo de calidad de energía en una instalación eléctrica se debe colocar el dispositivo de medición en el secundario del transformador principal de servicio, es decir en el tablero principal como se muestra en la Figura 4.4.

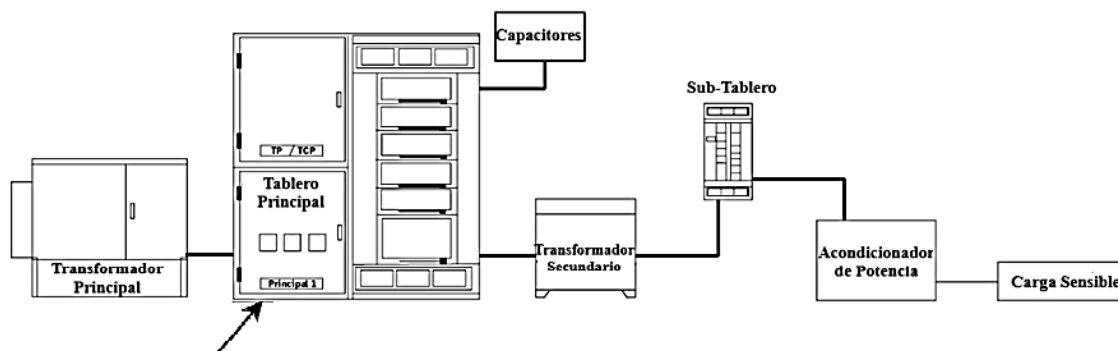


Figura 4.4 Ubicaciones sugeridas para el monitoreo en un sistema típico de baja tensión (La flecha indica la ubicación sugerida) [8].

El analizador de red se debe colocar aguas abajo del sistema, con el fin de registrar de manera individual los parámetros eléctricos en cada uno de los alimentadores principales.

#### 4.3.2. Instalación

Para esto se utiliza el analizador de redes FLUKE 1775 que se observa en la Figura 4.5, el cual se conecta al neutro y a las tres fases del transformador de 750 kVA. En un sistema trifásico, para las conexiones de corriente se colocan las pinzas alrededor de los conductores de las fases A (L1), B (L2), C (L3) y del neutro. Estas pinzas incluyen una flecha que señala la dirección correcta de la señal, la cual debe apuntar hacia la carga. En cuanto a las conexiones de voltaje, se debe iniciar con la conexión a tierra y luego continuar, en orden, con el neutro (N), seguido de las fases A (L1), B (L2) y C (L3) [18], en la Figura 4.6 se ilustra lo mencionado.



Figura 4.5 Analizador de Redes Fluke 1775.

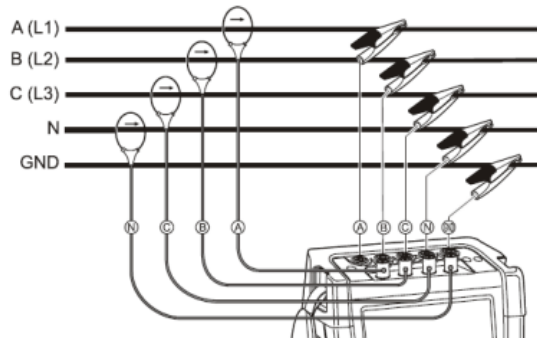


Figura 4.6 Conexión del analizador al sistema trifásico [18].

También se sugiere desenergizar los sistemas eléctricos antes de realizar cualquier conexión, siempre que sea posible, adicionalmente se enfatiza el uso obligatorio de equipo de protección personal y la importancia de no trabajar en solitario [18]. En nuestro caso, las conexiones fueron efectuadas por personal autorizado por la empresa. En la Figura 4.7 se muestra el analizador de red instalado en el tablero principal del área de Aserradero, exactamente en el lado secundario del transformador de 750 kVA donde se distribuyen las cargas.

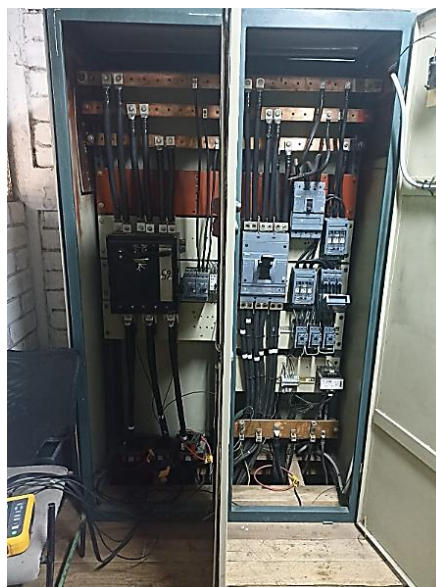


Figura 4.7 Ubicación del Analizador de Redes en Transformador 750kVA.

### **4.3.3. Registro y Recopilación de Datos**

El proceso de recolección de datos en el transformador de 750 kVA se llevó a cabo desde las 10:00 a.m. del 6 de marzo de 2025 hasta las 10:10 a.m. del 13 de marzo de 2025, cumpliendo así con el periodo mínimo de medición de siete días establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

Las lecturas se registraron en intervalos de un minuto, asegurando que el tiempo máximo entre mediciones no superara los 10 minutos mencionados en la misma Regulación [5], con el fin de garantizar una mayor precisión en los datos obtenidos.

Entre los datos registrados para su respectivo análisis están los siguientes:

- Voltaje
- Corriente
- Potencias activa, reactiva y aparente.
- Armónicos de corriente y voltaje
- Desbalance de voltaje, corriente y potencia.
- Flickers
- Factor de Potencia

Para llevar a cabo el procesamiento de los datos obtenidos, es indispensable la instalación del software Fluke Energy Analyze Plus, el cual puede descargarse desde el sitio web oficial de Fluke. Esta aplicación permite visualizar y analizar la información registrada por el analizador de red de forma eficiente. Además, facilita la exportación de datos en formatos compatibles, como archivos estándar de Microsoft Excel (.xlsx), lo que permite una mayor facilidad en la lectura de los datos medidos. Asimismo, ofrece herramientas para la generación de informes a partir de normativas vigentes en el software que se ajustan a las regulaciones utilizadas en el estudio, en este caso la normativa utilizada fue la IEEE 519-2014 [6].

Cabe mencionar, que el período autorizado por la empresa fue limitado asegurando solamente el tiempo mínimo de registro de datos establecido por la Regulación [5], debido que la instalación del analizador de red debía realizarse sin interferir con el monitoreo continuo de las otras áreas operativas de la planta.

#### **4.4. SIMULACIÓN**

Habiendo cumplido con las fases 4.1.1 y 4.1.2 se lleva a cabo la simulación del sistema eléctrico en el Software ETAP 21.0.1, el cual permite observar de manera interactiva el comportamiento de dicho sistema con respecto a los elementos y parámetros ingresados para la simulación.

Esta herramienta facilita la visualización de parámetros eléctricos como caídas de voltaje, niveles de corrientes y potencia, además del ingreso de armónicos en el sistema a partir de los datos registrados en la fase 4.3.3.

##### **4.4.1. Diagrama Unifilar en el Software ETAP**

Con el diagrama unifilar realizado en el Software AutoCAD y la base de datos con las características de cada uno de los elementos que conforman el sistema eléctrico del área de aserradero como motores, conductores, cargas especiales, transformadores, entre otras, se procede a su simulación para lo cual:

- Se agrega cada uno de los componentes propios del sistema conforme al levantamiento de información.
- Conexión de los componentes del sistema siguiendo el diagrama unifilar realizado en AutoCAD.
- Configuración de los parámetros eléctricos en cada uno de los elementos utilizados.
- Puesta en marcha de la simulación después de una breve revisión de todo el sistema eléctrico para comprobar su funcionamiento inicial.

El sistema modelado puede observarse en el ANEXO G, donde se presenta de forma gráfica la distribución e interconexión de los diferentes elementos eléctricos que componen la red del área de aserradero, permitiendo visualizar con claridad la disposición estructural del sistema.

Cabe mencionar que, para el modelamiento de la fuente externa, se consideró como valor referencial una potencia de cortocircuito de 280 MVAsc, correspondiente a la subestación Laso, según lo establecido en un estudio técnico previamente realizado [19].

#### 4.4.2. Introducción de Armónicos al Sistema

ETAP 20.0.1 ofrece una librería con una amplia gama de espectros armónicos de las marcas comerciales más reconocidas y utilizadas a nivel mundial lo que facilita el análisis de calidad de energía con estándares de referencia como se muestra en la Figura 4.8.

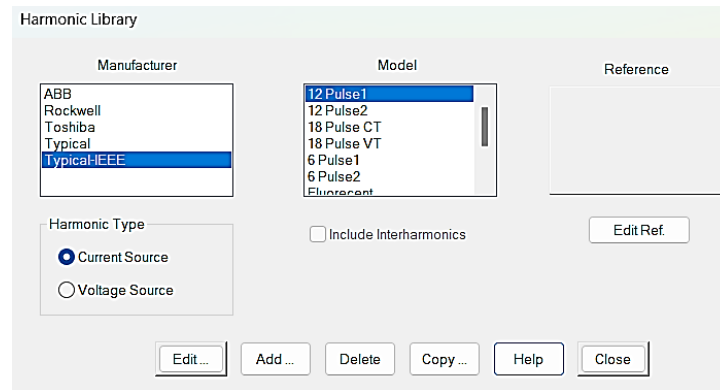


Figura 4.8 Librería principal de espectros armónicos [ETAP].

El módulo de análisis de armónicos de ETAP permite la simulación de fuentes de tensión y corrientes armónicas, así como la facilidad de editar y crear diversos escenarios acordes a las necesidades del estudio. En este caso se optó por definir un nuevo espectro de armónicos de corriente con el nombre AGLOMERADOS basado en la normativa IEEE 519 bajo la cual se extrajeron los datos del analizador de red, como se muestra en la Figura 4.9.

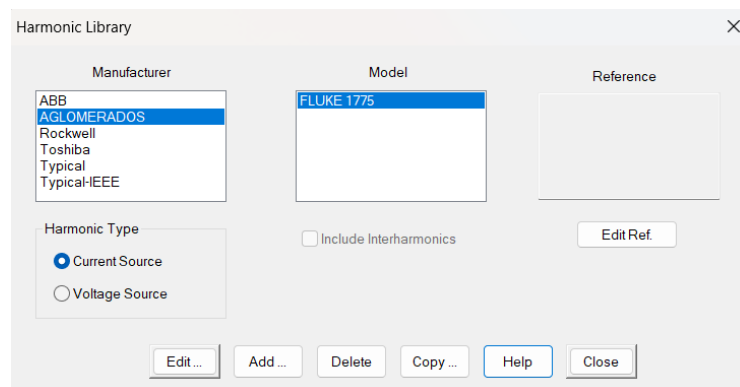


Figura 4.9 Edición del espectro de armónicos [ETAP].

A continuación, se ingresan los valores registrados correspondientes a cada armónico considerando únicamente los impares hasta el grado 13, así también se configura la frecuencia y número de impulsos, siendo en este caso 60 Hz y 6 respectivamente como se muestra en la Figura 4.10.

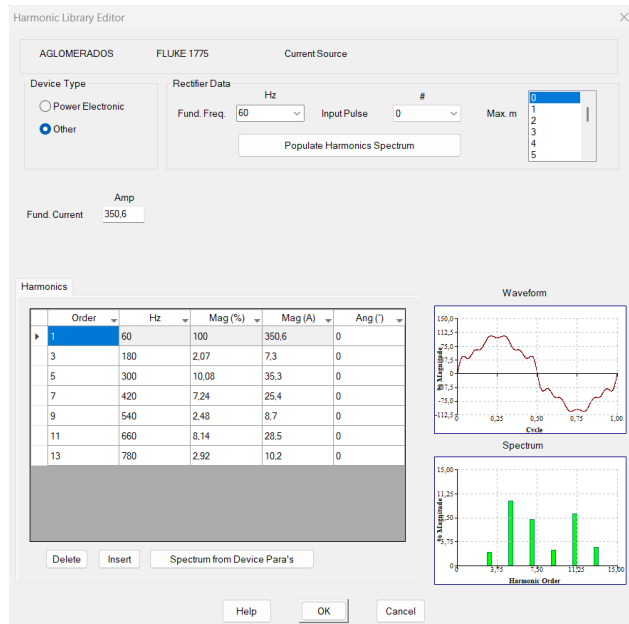


Figura 4.10 Ingreso de parámetros del espectro armónico [ETAP].

Con todos los parámetros previamente definidos, se procedió a insertar la librería de armónicos en una de las cargas del sistema, con el objetivo de simular el comportamiento de una carga no lineal. Para ello, se utilizó una carga estática disponible en la biblioteca de ETAP, la cual fue asignada a la barra principal, en concordancia con la ubicación del analizador de redes.

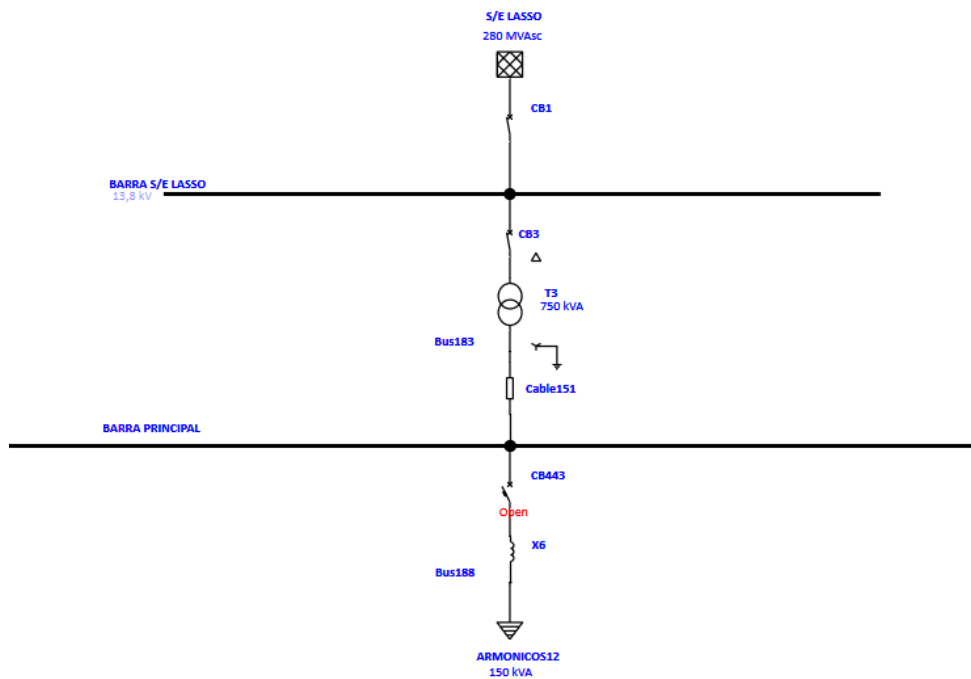


Figura 4.11 Ubicación de la Carga con armónicos en la barra principal del sistema [ETAP].

Dicha ubicación fue seleccionada conforme a disposiciones de la empresa y del personal técnico responsable del área, quienes establecieron la necesidad de realizar el estudio específicamente en ese punto, debido a la ausencia de estudios previos que permitieran caracterizar la distorsión armónica en ese nodo del sistema. Esta configuración se visualiza en la Figura 4.11.

#### **4.5. TRATAMIENTO DE DATOS**

En cumplimiento de lo establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5], se realizó la medición de parámetros eléctricos con un intervalo de tres segundos durante siete días consecutivos, específicamente en la fase 4.3.3 de la sección 4.3. Los datos registrados fueron procesados mediante el software Fluke Energy Analyze Plus y exportados a un archivo compatible con Excel para su posterior análisis.

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se calculó un promedio general considerando la totalidad de los datos registrados durante los siete días de monitoreo continuo. Adicionalmente, se realizó un segundo promedio, esta vez tomando únicamente las muestras correspondientes a las horas laborales, definidas como de 08:00 a 16:00 de lunes a viernes, y de 08:00 a 14:00 los días sábados, excluyendo el día domingo debido a la inactividad operativa. Esta segmentación permitió obtener una visión clara del comportamiento del sistema tanto en condiciones generales como durante los periodos de mayor demanda.

##### **4.5.1. Interpretación de Datos**

Con los datos correctamente ordenados y tabulados se procede a la verificación del cumplimiento de los índices especificados en la regulación y normativas vigentes de parámetros de calidad de energía las cuales son: ARCONEL 009/24 [5], IEEE 519-2014 [6] y la IEEE 1100 [19].

Estas normativas dan las pautas para la toma de decisiones al describir e indicar los fenómenos eléctricos que se pueden presentar en un sistema eléctrico, dando a conocer índices bajo los cuales se pueda considerar aceptable o inaceptable la presencia variaciones, desbalances, distorsiones, presencia de armónicos, Flickers en cuanto a las magnitudes eléctricas, así también con respecto al comportamiento del factor de potencia.

## **4.6. APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS PARA MEJORAR LOS ÍNDICES DE CALIDAD DE ENERGÍA**

En el caso existir índices fuera de los rangos aceptados por las Regulación ARCONEL 009/24 [5], así como de las normativas IEEE 519-2014 [6] y la IEEE 1100 [19], se deben buscar medidas correctivas que mejoren los índices de calidad de energía según corresponda, para lo cual se pretende el diseño de:

- Filtro pasivo que reduzca los niveles de armónicos presentes en el sistema.
- El diseño de un filtro activo siguiendo la Teoría PQ el cual permite reducir la cantidad de armónicos de voltaje y corriente.

Esta implementación se realizará en dos entornos: en Simulink del software MATLAB R2021a para el diseño del filtro activo, y en ETAP para el diseño del filtro pasivo. Ambos programas, gracias a sus librerías, permiten integrar los componentes necesarios para el desarrollo del sistema eléctrico, así como para la incorporación de los filtros requeridos que garanticen el cumplimiento de los índices de calidad de energía.

### **4.6.1. Filtro Activo en Simulink**

#### **4.6.1.1. Modelado del Sistema Eléctrico**

Como se muestra en la Figura 4.12, el sistema eléctrico simulado está compuesto por una fuente trifásica conectada en serie con su impedancia equivalente, representando las condiciones reales de una red de distribución. A continuación, se encuentra un bloque de medición de voltaje y corriente trifásicos que permite monitorear los parámetros eléctricos en el punto de entrada del sistema.

Posteriormente, la red alimenta a una carga no lineal trifásica que representa dispositivos electrónicos industriales, los cuales generan distorsiones armónicas sobre la forma de onda de corriente. Este comportamiento se analiza a través de bloques de medición adicionales que capturan las señales de voltaje y corriente en el punto de carga.

Además, el sistema incluye un interruptor (breaker) que permite activar o desactivar un filtro activo tipo PQ basado en el modelo facilitado e la página oficial de Matlab [20], encargado de mitigar los efectos de los armónicos generados por la carga no lineal. Finalmente, se han incorporado bloques de respuesta que facilitan la visualización de los efectos del filtrado en

tiempo real, permitiendo una evaluación integral del comportamiento del sistema ante perturbaciones de calidad de energía.

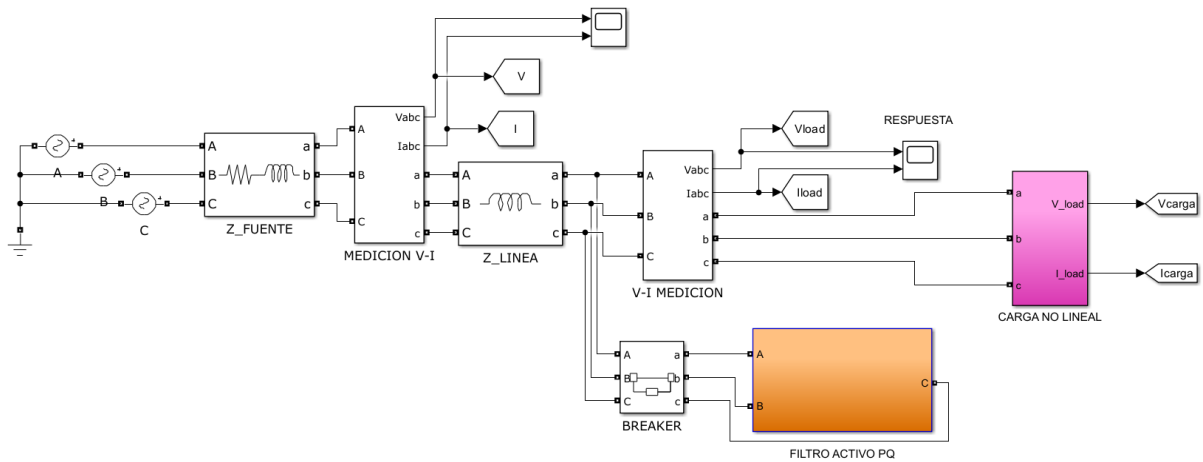


Figura 4.12 Sistema General de la Planta [Simulink].

A continuación, se describe en detalle cada uno de estos componentes con el fin de facilitar la comprensión del funcionamiento general del sistema, así como su interacción dentro del entorno eléctrico simulado. Esta descripción permitirá identificar el papel específico de cada bloque en el análisis del comportamiento de las señales eléctricas y en la evaluación del impacto de las cargas sobre la calidad de la energía.

#### 4.6.1.1.1. Fuente de Alimentación

La fuente de alimentación del sistema ha sido implementada mediante el bloque AC Voltage Source, conectado en serie con su correspondiente impedancia, tal como se muestra en la Figura 4.13. Se han ingresado tensiones de 500 V, 501 V y 499 V con un desfase correspondiente a una secuencia de fase negativa (ACB) y una frecuencia de 60 Hz, con el objetivo de simular las condiciones reales de una fuente trifásica ligeramente desbalanceada.

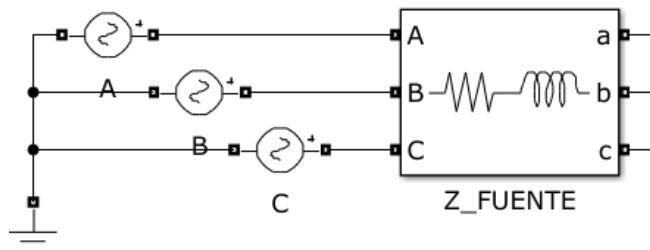


Figura 4.13 Fuente de Alimentación [Simulink].

Como se muestra en la Figura 4.14, la carga correspondiente a los motores se ha modelado mediante el bloque Three-Phase Parallel RLC Load, el cual se conecta en paralelo a la red eléctrica trifásica. En este bloque se definieron parámetros fundamentales del sistema, como el nivel de voltaje, la frecuencia de operación (60 Hz), y los valores de potencia activa y reactiva, de acuerdo con los requerimientos de la carga.

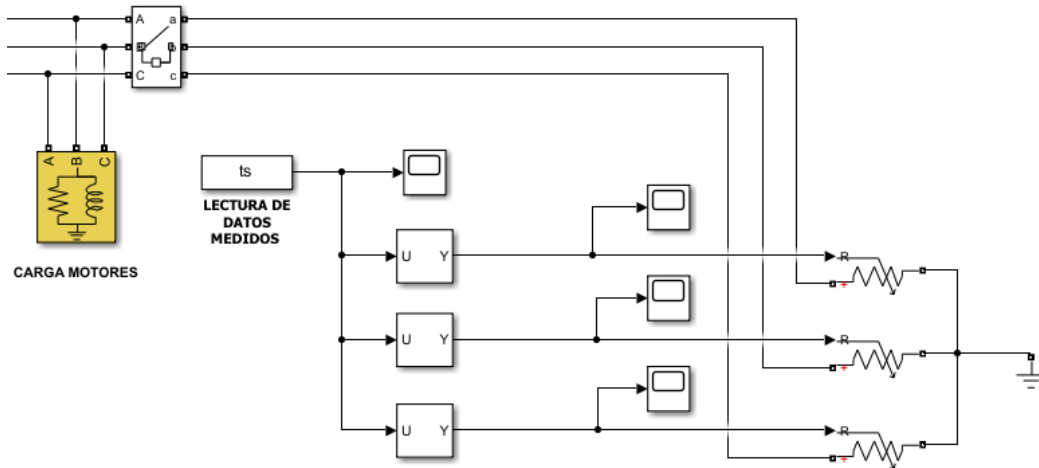


Figura 4.14 Carga del Sistema [Simulink]

Con el fin de llevar este modelo a condiciones más cercanas a un sistema real, se incorporó un sistema de inyección dinámica de impedancias mediante el bloque From Workspace, el cual recibe los datos medidos por el equipo Fluke 1775, específicamente los valores de potencia activa y reactiva, los cuales son procesados para calcular las resistencias equivalentes, las cuales varían en el tiempo conforme a las condiciones medidas.

Finalmente, esta resistencia variable es implementada utilizando el bloque Variable Resistor, que permite simular una resistencia cuyo valor es controlado por una señal de entrada, lo que permite representar el comportamiento dinámico de los motores dentro del sistema.

#### 4.6.1.1.2. Carga no Lineal

En la Figura 4.14, se muestra el modelo de una carga no lineal trifásica implementada en el entorno de Simulink. Esta carga está compuesta por una fuente de armónicos, un rectificador trifásico tipo puente de diodos y un circuito de filtrado conformado por inductancias y capacitores. La fuente de armónicos tiene como objetivo simular las perturbaciones típicas generadas por equipos electrónicos industriales como fuentes conmutadas o variadores de velocidad. A continuación, la energía alterna se convierte en continua mediante un rectificador

trifásico, el cual es responsable de introducir armónicos en la red debido a su comportamiento no lineal. Posteriormente, se incorpora un filtro LC que suaviza la señal de salida, pero que también puede interactuar con la impedancia del sistema y provocar fenómenos de resonancia.

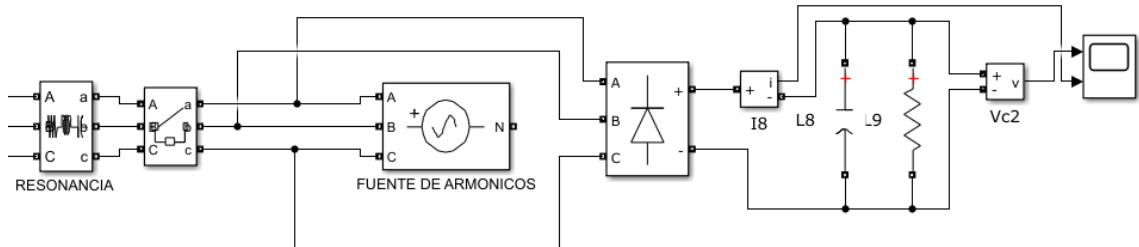


Figura 4.15 Subsistema (Carga no Lineal) [Simulink].

#### 4.6.1.1.3. Modelado del Filtro Activo

Para el modelado se toma como referencia el filtro de potencia activo en paralelo facilitado en página oficial de Matlab [20]. En la Figura 4.16, se representa la estructura de control de un filtro activo tipo shunt basado en la teoría de potencia instantánea en coordenadas  $\alpha\beta$  (también conocida como teoría P-Q). El sistema inicia con la transformación de las señales trifásicas de voltaje y corriente desde el sistema abc al sistema  $\alpha\beta$  utilizando transformadas de Clarke. Posteriormente, se determinan las componentes activa y reactivas instantáneas de potencia, a partir de las cuales se extraen las componentes no deseadas mediante filtros pasa altos (HPF). Estas señales se utilizan para calcular las corrientes de referencia ( $I_{ref}$ ) que el filtro debe inyectar para compensar las distorsiones armónicas y los desbalances presentes en la red.

Las corrientes de referencia generadas en coordenadas  $\alpha\beta$  se convierten nuevamente a abc mediante una transformada de Clarke inversa. Dichas señales se comparan con las corrientes medidas, y la señal de error resultante se regula a través de un controlador PI. La señal modulada resultante se envía a una técnica de control por histéresis, que comanda los interruptores del inversor trifásico, el cual a su vez está conectado en paralelo al sistema. Este inversor actúa como la etapa de potencia del filtro, generando las corrientes compensatorias. En conjunto, este esquema permite al filtro activo suprimir armónicos, compensar reactivos y mejorar el perfil de corriente entregado por la fuente.



Cálculo de impedancias capacitivas ecuación 14:

$$C_{\text{banco}} = \frac{121,0849 \text{ kVAr}}{2\pi * 60(440V^2)}$$

$$C_{\text{banco}} = 0,001659027 * 1000000$$

$$C_{\text{banco}} = 1659,03\mu\text{F}$$

Donde:

**w**: Frecuencia angular

Cálculo de impedancia efectiva ecuación 15:

$$X_{\text{efect}} = \frac{440V^2}{121,08 \text{ kVAr}}$$

$$X_{\text{efect}} = 1,60 \Omega$$

Cálculo de impedancias capacitiva ecuación 16:

$$X_c = \left[ \frac{5^2}{5^2 - 1} \right] (1,60\Omega)$$

$$X_c = 1,67\Omega$$

Cálculo de impedancia inductiva ecuación 17:

$$X_L = \frac{1,67}{5^2}$$

$$X_L = 0,07\Omega$$

La Figura 4.17, presentada a continuación muestra la ventana de configuración utilizada para el dimensionamiento del filtro pasivo mediante la herramienta Harmonic Filter Sizing del software ETAP. En esta configuración, se especificó un filtro sintonizado al quinto armónico de corriente, con el fin de mitigar la distorsión armónica generada por cargas no lineales presentes en el sistema. Para ello, se ingresaron tanto el orden armónico como la corriente armónica correspondiente de 35.28 A, que resulta de multiplicar el porcentaje de armónico (10,08%) y la corriente fundamental (350.62A), y se seleccionó la opción de corrección del factor de potencia, tomando en cuenta el valor mínimo medido de 0.84 para llevarlo a un valor

de 0.96 superando el valor mínimo establecido por la Resolución Nro. ARCONEL 022/2024 [22].

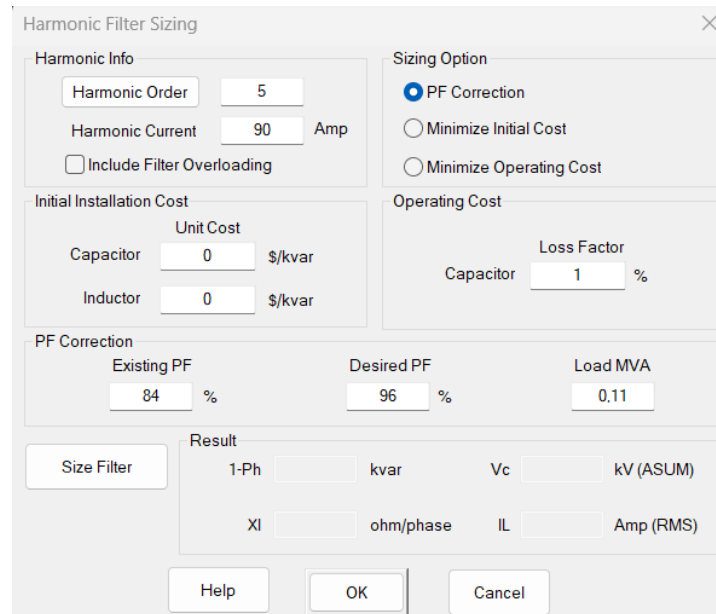


Figura 4.17 Dimensionamiento del filtro pasivo [ETAP].

Una vez realizado el cálculo, se obtuvieron los valores de los componentes que conforman el filtro pasivo tipo Single-Tuned, como se observa en la Figura 4.18. En cuanto al factor de calidad  $Q$ , se utilizó un valor de 20 basado en [20], donde se menciona un rango de 20 a 50 para valores de armónicos bajos, permitiendo que el filtro esté sintonizado de forma precisa al armónico de orden 5.

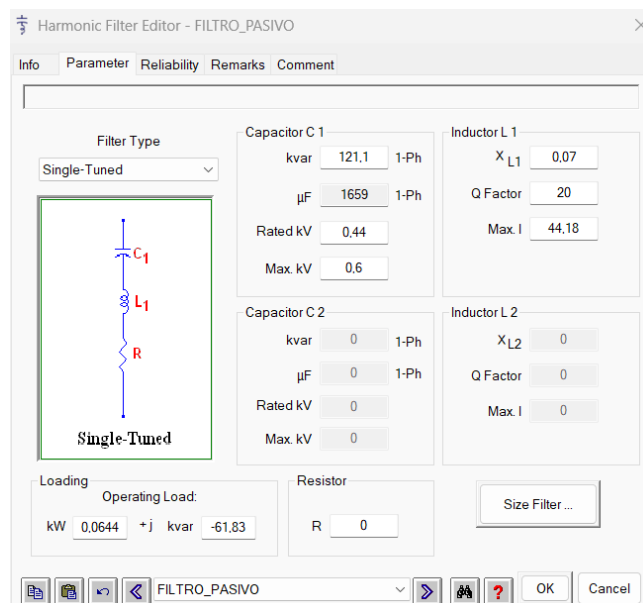


Figura 4.18 Valores correspondientes al filtro pasivo [ETAP].

La simulación realizada en ETAP permite analizar el comportamiento del sistema con y sin la presencia del filtro, evaluando parámetros clave como los perfiles de voltaje y corriente, el espectro armónico y el cumplimiento de los límites establecidos por la norma IEEE 519 [6].

Dado que la carga generadora de armónicos se encuentra conectada a la barra principal, se procedió a instalar el filtro pasivo en la misma barra, con el fin de observar de manera directa su efecto en la mitigación de los armónicos presentes. Esta disposición se puede visualizar en la Figura 4.19.

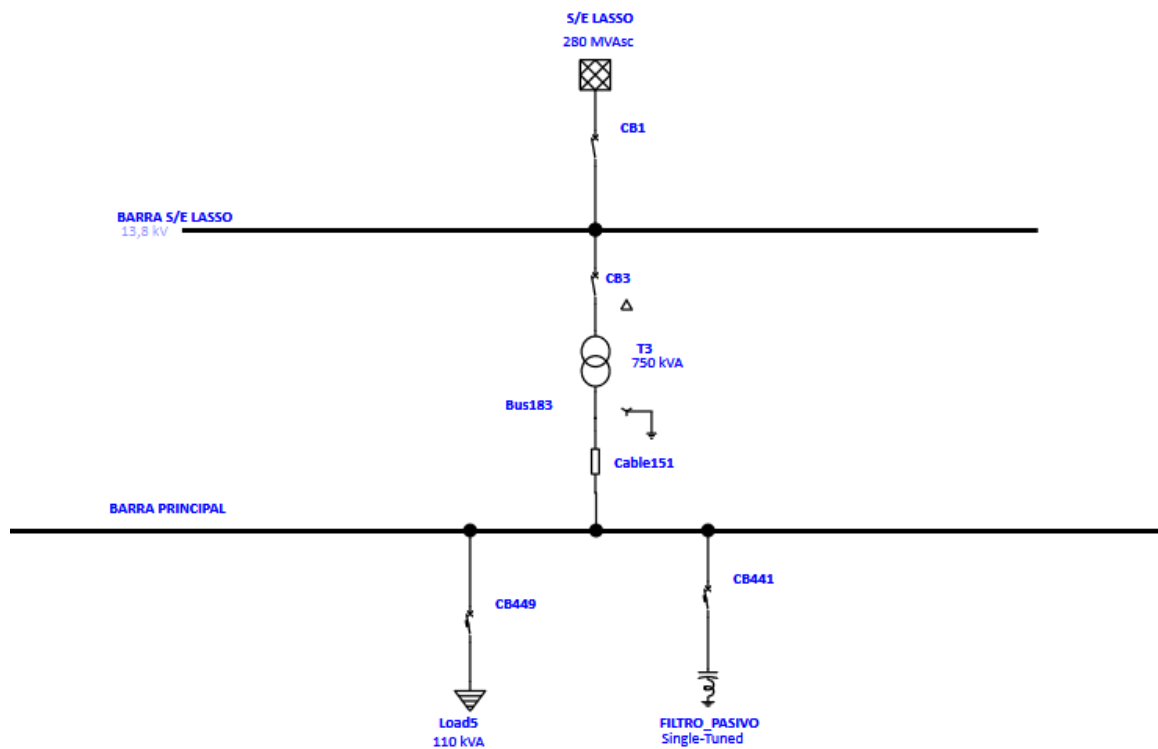


Figura 4.19 Ubicación del filtro en la barra principal del sistema [ETAP].

Cabe señalar que, para el modelado de la red externa, se consideró una potencia de cortocircuito de referencia de 280 MVA, correspondiente a la subestación Lasso, según lo establecido en el estudio previo [21].

## **5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Para el presente apartado, se consideran dos análisis; el primero conforme a la Regulación ARCONEL 009/24 [5], la cual se enfoca en un estudio continuo durante 7 días con mediciones en un intervalo de 3 segundos. Para el segundo caso se consideran las horas de operación del sistema, con el fin obtener una evaluación más precisa del impacto que generan las maquinas en la calidad de energía del área en estudio, considerando 8 horas de trabajo continuo de lunes a viernes, y un horario de 6 horas correspondiente al día sábado, siendo este una jornada de trabajo adicional. A continuación, se explica cada uno de los análisis correspondientes.

### **5.1. ANÁLISIS CONTINUO DURANTE 7 DÍAS EN EL TRAF0 750kVA**

#### **5.1.1. Análisis de Nivel de Voltaje**

Según indica la Regulación ARCONEL 009/24 [5], se cumple con un nivel de voltaje óptimo cuando más del 95% de los registros de voltajes en todas las fases están dentro de los límites permitidos de las variaciones de voltaje que para este caso es del  $\pm 8 \%$ . A continuación, se presentan los resultados de voltaje nominal en el transformador de 750kVA mediante el analizador de redes.

##### **5.1.1.1. Voltaje Nominal Fase-Fase**

La Tabla 5.1, muestra los valores correspondientes a voltaje RMS entre fases que se obtuvieron mediante el analizador de redes considerando medidas promedio durante un periodo de 7 días de registro cumpliendo con la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. Para esto se promediaron los valores registrados en cada fase consolidando así los resultados que se detallan en la Tabla mencionada.

Además, para comprobar si los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites mencionados en la normativa de referencia se realiza el cálculo del porcentaje mediante la ecuación 2.

Reemplazando los datos se obtienen los resultados observados en la Tabla 5.1, en donde se visualiza que el sistema eléctrico de la empresa posee una variación promedio de nivel de voltaje de 3.39% que se encuentra dentro del nivel establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5], indicando la aceptabilidad del sistema.

Tabla 5.1 Voltaje Nominal Fase-Fase Trafo 750KkVA.

Fases	Voltaje (V)	Nivel de Voltaje (%)	Nivel de Voltaje Promedio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
AB	456,108	3,66	3,39	8	Cumple
BC	455,184	3,45			
CA	453,471	3,06			

El comportamiento del voltaje entre cada una de las fases durante el periodo de tiempo analizado, se representa de manera global en la Tabla 5.1, donde se observan los picos máximos de voltaje en cada una de las líneas, siendo estos 472,45V en AB, 471,99V en BC y 469,56V en CA.

Esto se debe a que la empresa opera únicamente en un turno de 8 horas diarias, de lunes a viernes, siendo el horario de 8:00 a.m a 16:00 p.m, donde hay mayor demanda industrial por ende existe menor sobretensión, por el contrario, en las demás horas dicho valor se eleva debido a la desconexión de cargas.

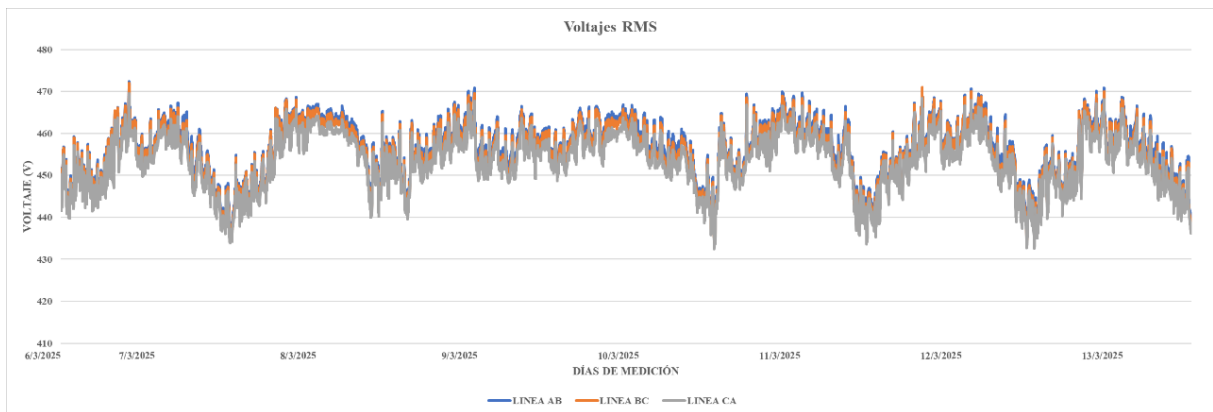


Figura 5.1 Voltaje RMS en cada Fase.

- Las representaciones individuales del comportamiento de cada línea (AB, BC, CA) pueden consultarse en el ANEXO H.

### 5.1.1.2. Voltaje en el Neutro

En la Tabla 5.2, se muestra el voltaje promedio medido en el neutro del transformador de 750kVA que corresponde a 0,062V. Se considera que el nivel óptimo de operación según la norma IEEE 1100 [19], en la línea de neutro debe ser 0 o en el peor de los casos menor de 1V por lo que el transformador se encuentra dentro de los rangos de operación.

Tabla 5.2 Voltaje en el Neutro.

Fase	Voltaje (V)	Limite (V)	Detalle
N	0,062	1	Cumple

En la Figura 5.2 se muestra el comportamiento de voltaje en el neutro, donde se aprecia de mejor manera que los datos medidos se encuentran por debajo de límite establecido por la norma vigente IEEE 1100 [19].

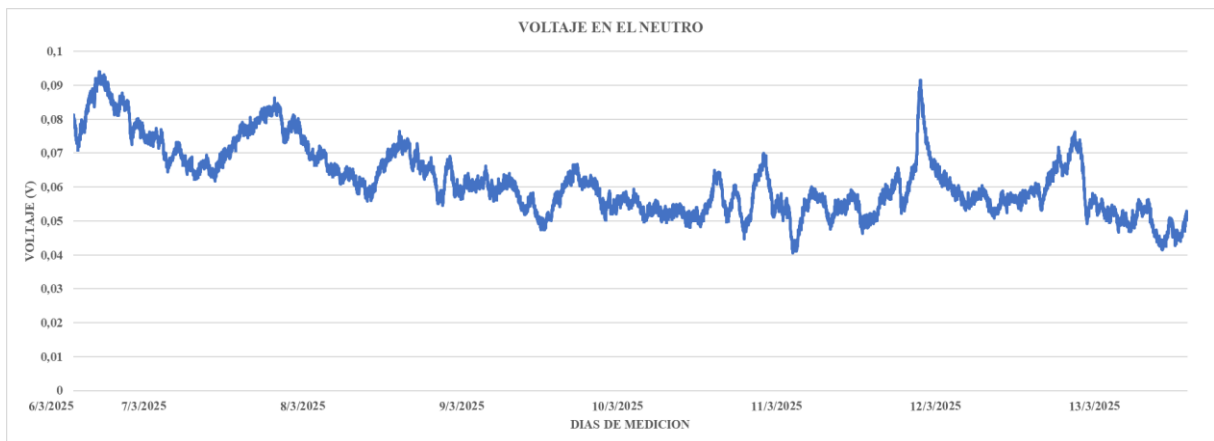


Figura 5.2 Voltajes en el Neutro.

### 5.1.1.3. Desequilibrio de Voltaje

En base a la Regulación ARCONEL 009/24 [5], la cual se hace mención en este estudio, el valor límite para el desequilibrio de voltaje en un punto no debe superar al 2% en todos los niveles de voltaje. En la Tabla 5.3, se muestra que el transformador de 750kVA posee un desequilibrio de voltaje promedio de 0.366% el cual se encuentra dentro de los parámetros establecidos para este factor.

Tabla 5.3 Desequilibrio de Voltaje.

Desequilibrio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
0,366	2,00	Cumple

En la Figura 5.3 se muestra el perfil de desequilibrio de voltaje, en la cual se puede verificar que los valores están dentro del límite establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

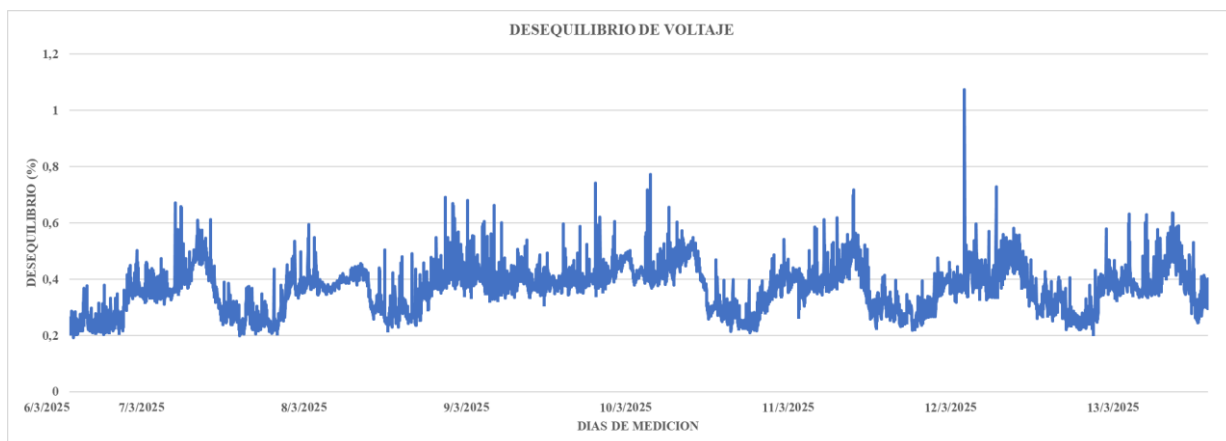


Figura 5.3 Desequilibrio de Voltaje.

## 5.1.2. Análisis de Corriente

### 5.1.2.1. Análisis de Corriente de Línea

En la Tabla 5.4 se observan los niveles de corriente registrados en el Trafo\_750kVA en donde se verifica que tiene valor promedio que ronda los 128.58A. El comportamiento en cada una de las fases se puede observar en la Figura 5.4, donde se evidencian picos recurrentes de corriente, los cuales representan el arranque de los motores de mayor potencia a lo largo del periodo de registro. Adicional se tiene una corriente promedio en el neutro de 1.07A lo que indica que puede existir una fuga de corriente en el sistema como se puede observar en la Figura 5.5.

Tabla 5.4 Nivel de corriente de Línea Trafo 750kVA.

Fase	A	Promedio Total (A)
A	129,25	128,58
B	133,32	
C	123,16	
N	1,07	-

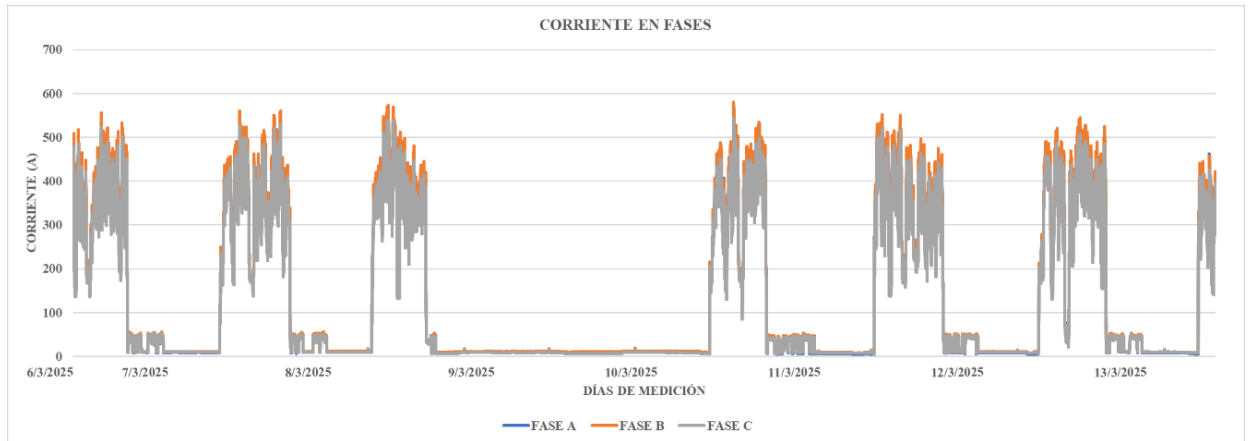


Figura 5.4 Corriente de Línea.

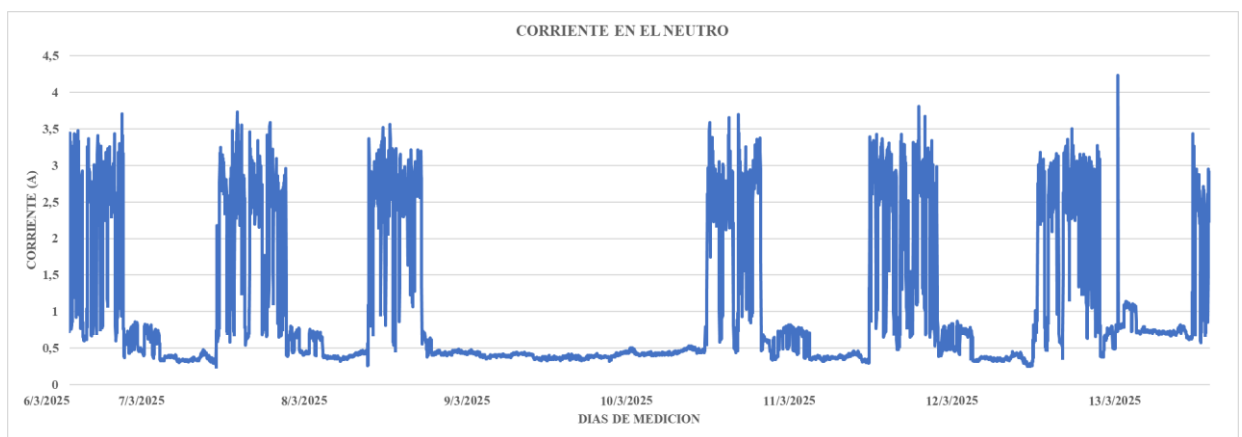


Figura 5.5 Corriente en el Neutro.

Las representaciones individuales del comportamiento de corriente por fase (A, B, C) pueden consultarse en el ANEXO I.

### 5.1.2.2. Desequilibrio de Corriente

No existe una normativa específica que indique los rangos de desequilibrio de corriente, sin embargo, en estudios como el de [22], menciona que este valor no debe superar el 3% ya que un valor mayor a estos puede generar incremento en las vibraciones de los equipos, estrés mecánico, aumento de las pérdidas y en el peor de los casos, sobrecalentamiento de los motores. En la Tabla 5.5, se observan los resultados de desequilibrio de corriente el cual está fuera del rango admisible, ya que el valor promedio registrado es de 10,78% lo que evidencia la presencia de problemas significativos en cuanto a desbalance o armónicos de corriente severos dentro del sistema.

Tabla 5.5 Desequilibrio de Corriente.

Desequilibrio (%)	Límite (%)	Detalle
10,78	3	No Cumple

En la Figura 5.6, se puede evidenciar con mayor claridad el comportamiento del desequilibrio de corriente a lo largo del periodo analizado. Los resultados indican que este parámetro se encuentra fuera del rango admisible anteriormente establecido del 3%. Este comportamiento está relacionado con la carga del área estudiada caracterizada por la presencia de motores de inducción que operan con arranques frecuentes y ciclos de funcionamiento variables.

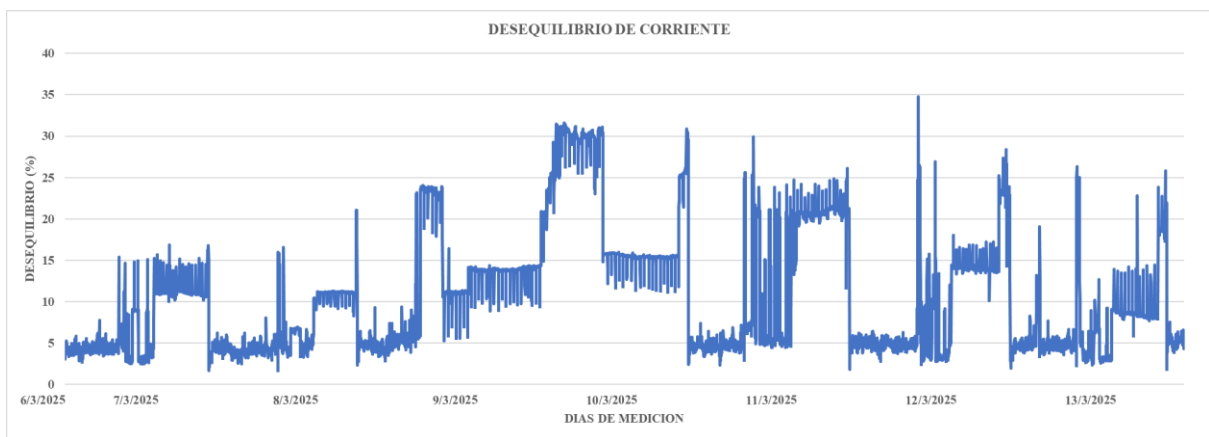


Figura 5.6 Desequilibrio de Corriente.

### 5.1.3. Potencia Activa

En la Tabla 5.6 se presentan los resultados de las potencias promedio cada una de las fases del TRAFO\_750kVA, en donde se observa una variación entre fases en un rango de 0,24kW y 2.39kW, siendo la fase A la que posee un valor más alto de 27.92kW.

Tabla 5.6 Potencia Activa.

Fase	(W)	(kW)	Total (kW)
A	27923,29	27,92	81,14
B	27684,45	27,68	
C	25533,41	25,53	

En la Figura 5.7, se puede apreciar con mayor claridad la diferencia que existe entre fases, evidenciando un comportamiento asimétrico en la distribución de las cargas.

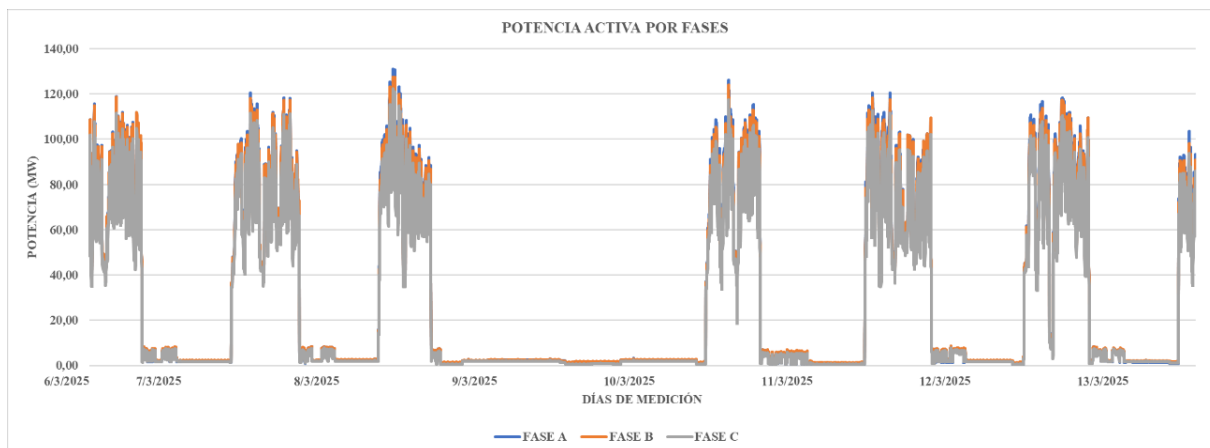


Figura 5.7 Potencia Activa por Fases.

Las representaciones individuales del comportamiento de potencia activa por fase (A, B, C) pueden consultarse en el ANEXO J.

### 5.1.3.1. Desbalance de Potencia Activa

De igual manera en la Tabla 5.7, se visualiza el desbalance promedio entre fases, el cual supera el valor máximo del 5% según la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

Esto se debe a la mala distribución de cargas especialmente en las fases BC y CA donde existe mayor porcentaje de desbalance de potencia activa por el contrario la fase AB se encuentra dentro del límite aceptable recomendado por la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

Tabla 5.7 Desbalance de Potencia.

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	1	6	5	No Cumple
B	8			
C	9			

### 5.1.4. Potencia Reactiva

En la Tabla 5.8, se presentan los valores de potencia reactiva pertenecientes al TRAFO\_750KVA, donde se visualiza un valor máximo de 20,20kVAr en la fase B, teniendo variaciones entre fases dentro de un rango de 0,53kVAr y 2,41kVAr.

Tabla 5.8 Potencia Reactiva.

Fase	(VAr)	(kVAr)	Total (kVAr)
A	17789,11	17,79	56,31
B	20203,23	20,20	
C	18319,02	18,32	

Como se muestra en la Figura 5.8, la diferencia entre fases es notable, lo que confirma la presencia de un comportamiento no balanceado en las cargas.

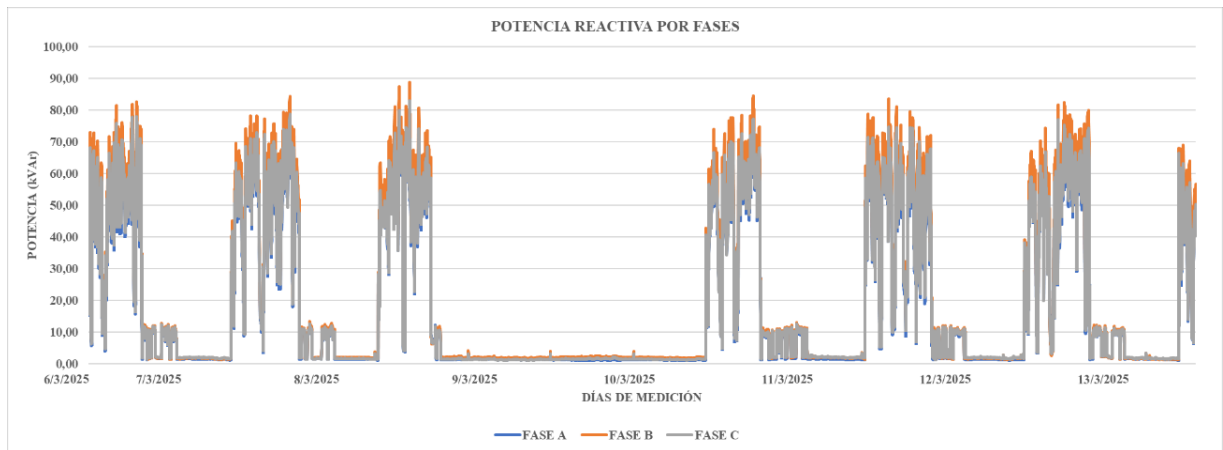


Figura 5.8 Potencia Reactiva por Fases.

Las representaciones individuales del comportamiento de potencia reactiva por fase (A, B, C) pueden consultarse en el ANEXO K.

#### 5.1.4.1. Desbalance de Potencia Reactiva

De igual manera en la Tabla 5.9, se visualiza el desbalance entre fases, los cuales superan en sus valores máximos el 5% según la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

En la línea A-B, el desbalance de potencia activa es bajo, mientras que el desbalance de potencia reactiva es alto y en la línea C-A ocurre lo contrario. Esta condición puede estar asociada a una distribución desigual de las cargas inductivas, donde los motores conectados presentan un consumo activo relativamente balanceado, pero absorben reactiva de forma no uniforme debido a diferencias en el estado de carga, eficiencia o factor de potencia individual.

Tabla 5.9 Desbalance de Potencia Reactiva.

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	12	8	5	No Cumple
B	10			
C	3			

### 5.1.5. Potencia Aparente

La potencia aparente del TRAF0\_750kVA se observa en la Tabla 5.10 donde se verifica que se tiene un valor máximo en la fase B con 34,59kVA y una variación en un rango de 1,34kVA y 6,42kVA. Así también la Figura 5.9, muestra el perfil de la potencia aparente donde se aprecia de mejor manera su comportamiento.

Tabla 5.10 Potencia Aparente

Fase	(VA)	(kVA)	Total (kVA)
A	33452,68	33,45	99,87
B	34592,29	34,59	
C	31820,12	31,82	

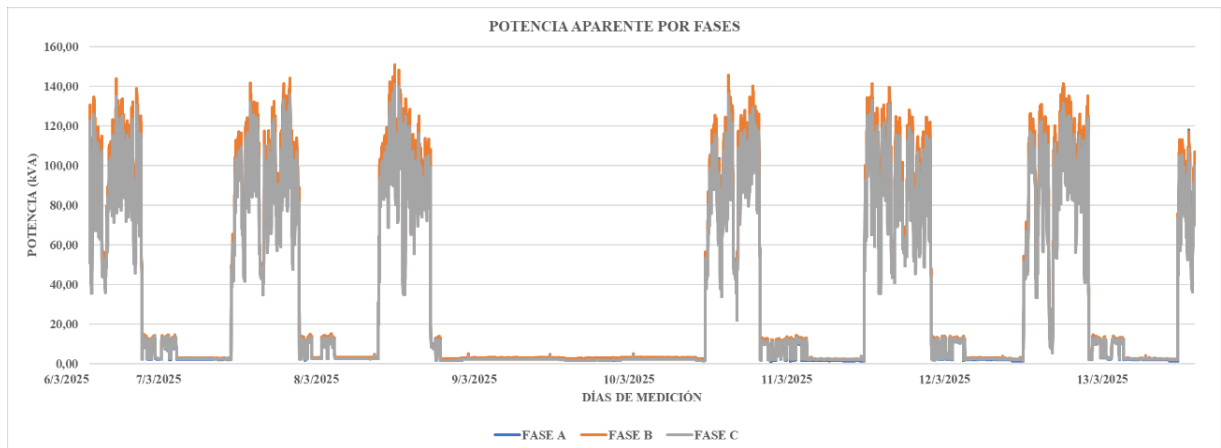


Figura 5.9 Potencia Aparente por Fases.

Las representaciones individuales del comportamiento de potencia aparente por fase (A, B, C) pueden consultarse en el ANEXO L.

#### 5.1.5.1. Desbalance de Potencia Aparente

De igual manera en la Tabla 2.1 se visualiza los desbalances de entre fases, los cuales superan en sus valores máximos el 5% según la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

Los resultados del análisis muestran que el desbalance de potencia aparente presenta un comportamiento similar al de la potencia activa, particularmente en la fase AB donde ambos porcentajes son bajos. Esto se debe a que la potencia aparente es una combinación vectorial de la potencia activa y reactiva, por lo tanto, si el desbalance en la potencia activa es bajo, y la potencia reactiva en esa línea no alcanza niveles excesivos, el resultado es una potencia aparente relativamente estable. En contraste, en fases como B-C o C-A, donde el desbalance activo es mayor, la potencia aparente refleja directamente esa condición.

Tabla 5.11 Desbalance de Potencia Aparente.

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	3	6	5	No Cumple
B	9			
C	5			

#### 5.1.6. Factor de Potencia

En la Tabla 5.12 se presentan los resultados del factor de potencia (FP) registrado en el TRAF0\_750 kVA durante un periodo de análisis continuo de 7 días. Donde se observa que el factor de potencia promedio no alcanza el límite mínimo establecido de 0,92 por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en su Resolución 022/24 [23].

Tabla 5.12 Factor de Potencia.

Fase	FP	FP Total	Límite	Detalle
A	0,74	0,71	0,92	No Cumple
B	0,72			
C	0,66			

Estas fluctuaciones evidencian un comportamiento inestable en la eficiencia del sistema eléctrico, caracterizada por la operación intermitente de motores de inducción. Durante los arranques y paradas frecuentes, así como en los periodos de baja carga, el consumo de potencia reactiva aumenta considerablemente, reduciendo el factor de potencia.

### 5.1.7. Distorsión Armónica

#### 5.1.7.1. Distorsión Armónica Total de Voltaje de Fase

Para poder conocer si el sistema eléctrico de la empresa “AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.” tiene presencia de armónico en cuanto al voltaje se refiere, se analiza el nivel de THD según las mediciones realizadas. Estos parámetros, según la regulación internacional generada por la norma ARCONEL 009/24 [5], para la medición de armónicos establece que para un  $V \leq 1.0$  kV el THD no puede superar el 8 %.

En la Tabla 5.13, se observan los resultados de la distorsión armónica en las 3 Fases del Trafo\_750kVA en donde se verifica que se tiene un valor promedio máximo de 3.11% encontrado en el sexto día de medición, también se observa que la Fase C tiene un mayor porcentaje de distorsión armónica individual con un 3.17%. En base a estos valores se comprueba que no existe un porcentaje alto que incumpla la normativa referente a la distorsión armónica de voltaje ya que no superan el 8%.

Tabla 5.13 Distorsión armónica de Voltaje.

Fase	THD (%)	THD Promedio (%)	Límite ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
A	5,37	5,53	8	Cumple
B	5,49			
C	5,74			

Así también la Figura 5.10 se muestra el perfil de distorsión armónica total de cada una de las Fases donde se parecía de mejor manera la aceptabilidad de los valores registrados.

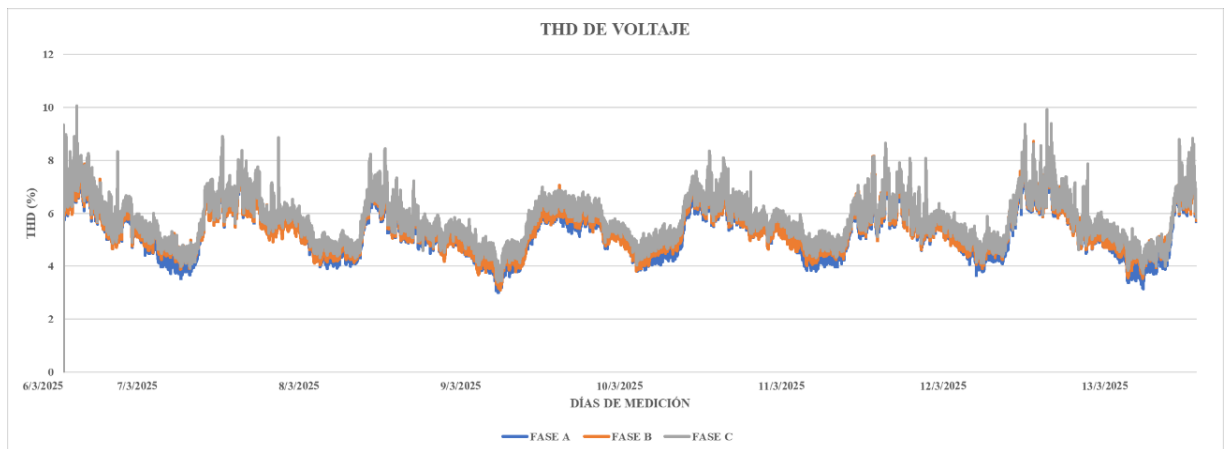


Figura 5.10 Distorsión Harmónica Total de Voltaje

Las representaciones individuales del comportamiento de la Distorsión Harmónica Total de Voltaje por fase (A, B, C) pueden consultarse en el ANEXO M.

### 5.1.8. Armónico Individual de Voltaje Línea Neutro

En este apartado se consideran únicamente los armónicos de orden impar, debido a que son los principales responsables de la distorsión de la forma de onda que afectan a la calidad de energía. Conforme a lo establecido en la normativa IEE 519 [6], se verifica el cumplimiento de los niveles individuales de los armónicos, como se observa en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Voltaje Línea Neutro.

Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
A	0,20495	Vharm_3	0,26	5	Cumple
B	0,33643				
C	0,24551				
A	4,04066	Vharm_5	4,19		Cumple
B	4,12505				
C	4,41568				
A	1,66179	Vharm_7	1,66		Cumple
B	1,71197				
C	1,65167				
A	0,19296	Vharm_9	0,19		Cumple
B	0,16798				
C	0,20272				
A	0,46623	Vharm_11	0,51		Cumple
B	0,52013				
C	0,54398				
A	0,23289	Vharm_13	0,25	Cumple	
B	0,26480				
C	0,23924				

En la Figura 5.11 se visualiza de manera más evidente el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa vigente IEEE 519-2014 [6], en lo que respecta a la calidad de la energía y los niveles de distorsión armónica presentes en el sistema.

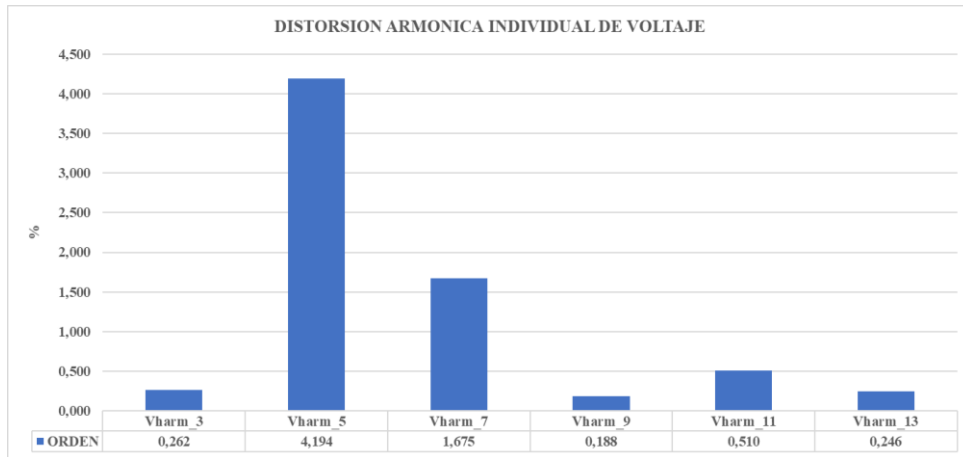


Figura 5.11 Distorsión armónica individual de voltaje.

En el ANEXO N se detalla cada uno de los armónicos de voltaje de orden impar hasta el armónico de orden 50 presentes en sistema.

#### 5.1.9. Armónico Individual de Corriente Línea Neutro.

Para conocer la aceptabilidad de los límites registrados por el analizador de red con lo recomendado por la normativa IEEE 519-2014 [6], es necesario determinar la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente en plena carga ( $I_{cc}/I_L$ ), donde  $I_L$  corresponde a la corriente RMS mediada con el analizador de red, siendo esta de 128,58A. Por otro lado,  $I_{cc}$  se obtiene en el software ETAP 21.0.1 mediante la simulación de una falla trifásica en la barra principal, es decir, donde se conectó el analizador de red, dando un valor de 18,628kA.

Al realizar el cálculo respectivo se determinó un valor de  $I_{cc}/I_L$  igual a 144,87A, el cual está dentro de un rango de  $100 < 1000$ , correspondiente a un valor máximo del 12% para los armónicos impares dentro del rango  $3 \leq h < 11$  y de 5,5% para el armónico de orden 13 como se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 5.15 Armónicos Impares de Corriente.

Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)	Límite IEEE 519-2014n (%)	Detalle			
A	0,71	Iharm_3	0,95	12	Cumple			
B	0,96							
C	1,17							
A	3,70	Iharm_5	3,82		12	Cumple		
B	3,95							
C	3,82							
A	2,34	Iharm_7	2,46			12	Cumple	
B	2,56							
C	2,47							
A	0,71	Iharm_9	0,71				12	Cumple
B	0,70							
C	0,72							
A	2,52	Iharm_11	2,69	5,5				Cumple
B	2,75							
C	2,82							
A	0,88	Iharm_13	0,91		5,5			Cumple
B	1,00							
C	0,86							

A continuación, en la Tabla 5.15 se detalla el cumplimiento o incumplimiento de cada uno de los armónicos en estudio, mientras que la Figura 5.12 representa su comportamiento correspondiente. Se observa que todos los armónicos se encuentran dentro de los límites establecidos.

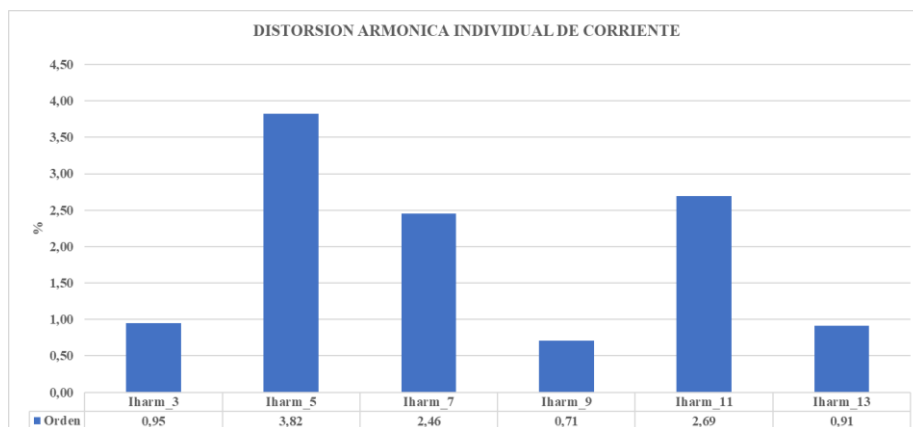


Figura 5.12 Comportamiento de los armónicos impares de corriente.

En el ANEXO O se detalla cada uno de los armónicos de corriente de orden impar hasta el armónico de orden 50 presentes en sistema.

#### 5.1.10. Distorsión de Demanda Total de Corriente

Conforme al cálculo del cociente  $I_{cc}/I_L$ , realizado según lo establecido en la norma IEEE 519-2014 [6], se obtuvo un valor de 144,87 A. Este resultado se encuentra dentro del rango de  $100 < I_{cc}/I_L < 1000$ , lo que corresponde a un límite máximo permitido del 15 % para la distorsión de demanda total de corriente (TDD). A partir de la ecuación 9 utilizada para el cálculo del TDD, y como se muestra en la Tabla 5.16, el valor medido se mantiene por debajo del umbral normativo establecido, lo que confirma el cumplimiento de este parámetro. Adicionalmente, el análisis de este índice permitió constatar la ausencia de armónicos individuales de corriente que superen los límites permitidos, lo cual corrobora que, en este aspecto, no se evidencian incumplimientos normativos.

Tabla 5.16 Distorsión de Demanda Total de Corriente.

TDD (%)	Límite IEEE 519-2014 (%)	Detalle
5,54	15	Cumple

#### 5.1.11. Presencia de Flickers Trafo 750kVA

Según se menciona en la Regulación ARCONEL 009/24 [5], el valor de parpadeo en cada fase no debe superar la unidad en el punto de medición establecido. En la Tabla 5.17, se presenta la respuesta de parpadeo registrada en el transformador TRAFO\_750kVA, donde se observa un valor máximo de 0,73% en la fase A y B. Al analizar los valores promedio durante el periodo evaluado, se evidencia que todos cumplen con los límites establecidos en la normativa de referencia.

Tabla 5.17 Flickers Trafo 750kVA.

Fase	Flicker	Límite	Detalle
A	0,73	1,00	Cumple
B	0,73		Cumple
C	0,72		Cumple

La Figura 5.13, presenta el perfil de ocurrencia de Flickers en cada una de las fases.

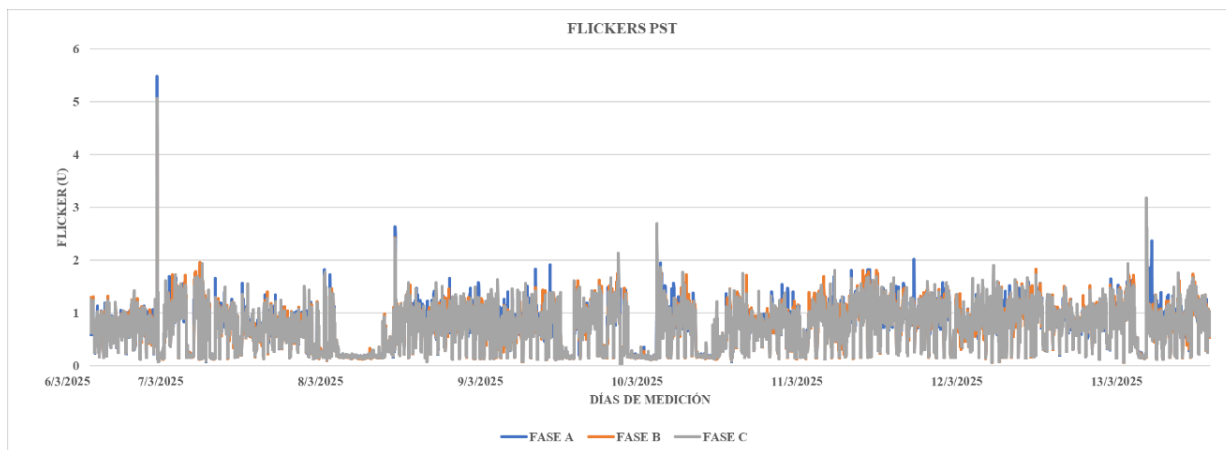


Figura 5.13 Flickers.

## 5.2. ANÁLISIS EN HORAS LABORALES

En el análisis preliminar se evidenció que no existían aparentes problemas considerables relacionados con armónicos de voltaje y corriente, resultado obtenido al considerar un período continuo de 24 horas durante siete días consecutivos. Sin embargo, es importante señalar que en el área del aserradero únicamente opera bajo una jornada laboral de 8 horas diarias de lunes a viernes de 8:00 A.M a 16:00 P.M, además de una jornada adicional de 6 horas los días sábado de 8:00 A.M a 14:00 P.M. Esto significa que durante el resto del tiempo (incluidas las noches y los domingos) el sistema permanece inactivo, lo que implica que el consumo eléctrico en esta área es mínimo o nulo. Este patrón de funcionamiento provoca que las condiciones eléctricas del sistema, como el voltaje, la corriente y la potencia, se mantengan en niveles bajos durante la mayor parte del tiempo, enmascarando así posibles problemas de distorsión armónica que podrían surgir durante la operación activa del sistema.

Bajo esta premisa, y con el objetivo de verificar el cumplimiento de los límites establecidos por la Regulación ARCONEL 009/24 [5], se plantea un nuevo enfoque de análisis únicamente en las horas efectivas de funcionamiento. Es decir, se examinará exclusivamente las 8 horas laborales de lunes a viernes y las 6 horas correspondientes al sábado, excluyendo los periodos en los que no hay actividad productiva, como los domingos. Esto permitirá evaluar con mayor precisión el comportamiento del sistema eléctrico cuando se encuentra en plena operación y, de este modo, identificar si existen o no problemas de armónicos que puedan comprometer la calidad de energía.

## 5.2.1. Análisis de Voltaje

### 5.2.1.1. Voltaje Nominal Fase-Fase

En el presente caso, se consideran medidas promedio correspondientes únicamente al horario laboral, con el fin de tener una visión más precisa del comportamiento del sistema en operación. Esto se debe a que, fuera del horario de trabajo, la demanda disminuye considerablemente, lo que puede ocultar posibles perturbaciones de voltaje que puede ocurrir cuando la carga está activa.

De acuerdo con lo establecido en la Regulación ARCONEL 009/24 [5], el límite permitido de variación de voltaje es del  $\pm 8 \%$ . A continuación, en la Tabla 5.18 se muestra los valores correspondientes a voltaje RMS entre fases medidos por el analizador de red y el cálculo de nivel de voltaje en el sistema mediante la ecuación 2.

Tras aplicar la ecuación correspondiente, se obtuvo un valor promedio de desviación del nivel de voltaje del 1,60%, el cual se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa vigente utilizada [5], lo que indica que el sistema opera dentro de parámetros aceptables de calidad de energía.

Tabla 5.18 Voltaje nominal fase-fase en horas laborales trafo 750kVA.

Fases	Voltaje (V)	Nivel de Voltaje (%)	Nivel de Voltaje Promedio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
AB	447,94	1,80	1.60	8	Cumple
BC	447,20	1,64			
CA	445,97	1,36			

En la Figura 5.14, se representa el perfil de voltaje únicamente en horario laboral, donde se evidencia que, a pesar de algunas fluctuaciones, los valores se mantienen dentro del rango permitido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5].

En este caso, considerando un voltaje nominal de 440V, los valores registrados se encuentran dentro del rango aceptable, comprendido entre 404,8V y 475,2V. Este resultado respalda que el sistema presenta un comportamiento estable y adecuado en cuanto a nivel de voltaje.

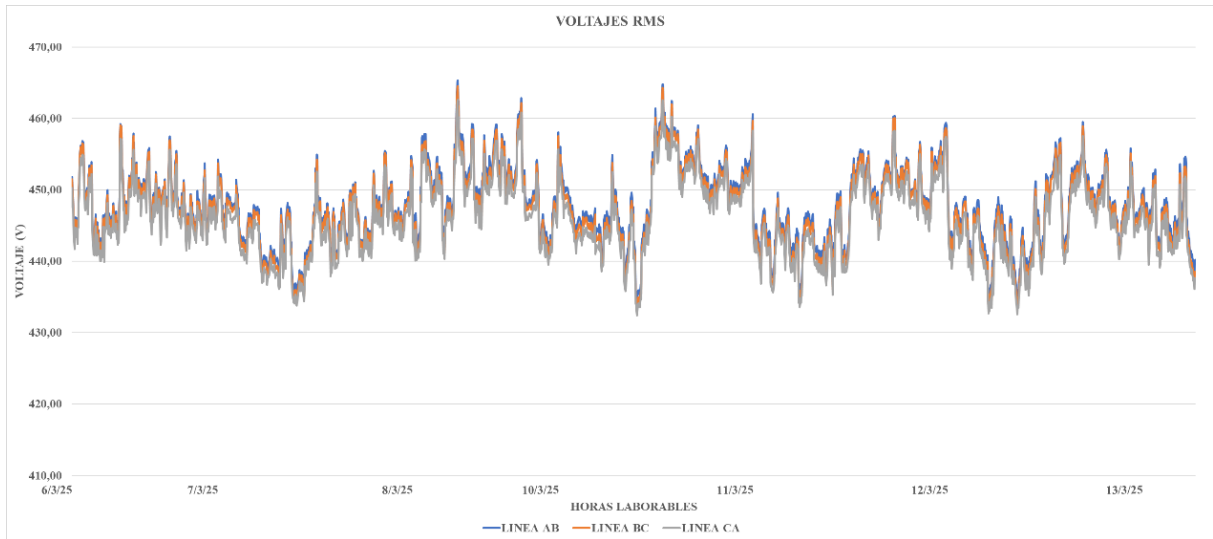


Figura 5.14 Voltaje RMS por Fase en Horas Laborables.

### 5.2.1.2. Voltaje en el Neutro

En la Tabla 5.19 se presenta el valor promedio del voltaje medido en el neutro del transformador de 750kVA en horas laborales, el cual corresponde a 0,065V. Si bien en condiciones ideales el voltaje en el neutro debería ser igual a 0V, en la práctica pueden presentarse pequeñas desviaciones debido a factores como el desbalance de cargas o la presencia de armónicos. No obstante, mientras este valor se mantenga por debajo del umbral establecido por la norma IEEE 1100 [19], el cual es de 1V, se considera que el sistema opera dentro de los parámetros aceptables.

Tabla 5.19 Voltaje en el Neutro en Horas Laborables.

Fase	Voltaje (V)	Limite (V)	Detalle
N	0,065	1	Cumple

Para observar de mejor manera el comportamiento del voltaje en el neutro en las horas laborales, en la Figura 5.15 se presentan los niveles de voltaje registrados, los cuales se mantienen dentro del rango recomendado por la IEEE 1100 [19], sin superar en ningún momento el valor máximo de 1V.



Figura 5.15 Voltaje en el Neutro en Horas Laborables TRAF0 750kVA.

### 5.2.1.3. Desequilibrio de Voltaje

De acuerdo con la Regulación ARCONEL 009/24 [5], citada en el presente estudio, el desequilibrio de voltaje en un punto del sistema no debe superar el 2 % en ninguno de los niveles de tensión. En la Tabla 5.20 se presenta el valor promedio de desequilibrio de voltaje correspondiente a las horas laborales en el transformador de 750 kVA, el cual fue de 0,28%, manteniéndose dentro de los límites establecidos por la regulación. Asimismo, en la Figura 5.16 se ilustra el comportamiento del desequilibrio de voltaje durante el periodo de análisis, evidenciando una operación estable del sistema en condiciones normales de carga.

Tabla 5.20 Desequilibrio de Voltaje en Horas Laborales.

Desequilibrio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
0,28	2,00	Cumple

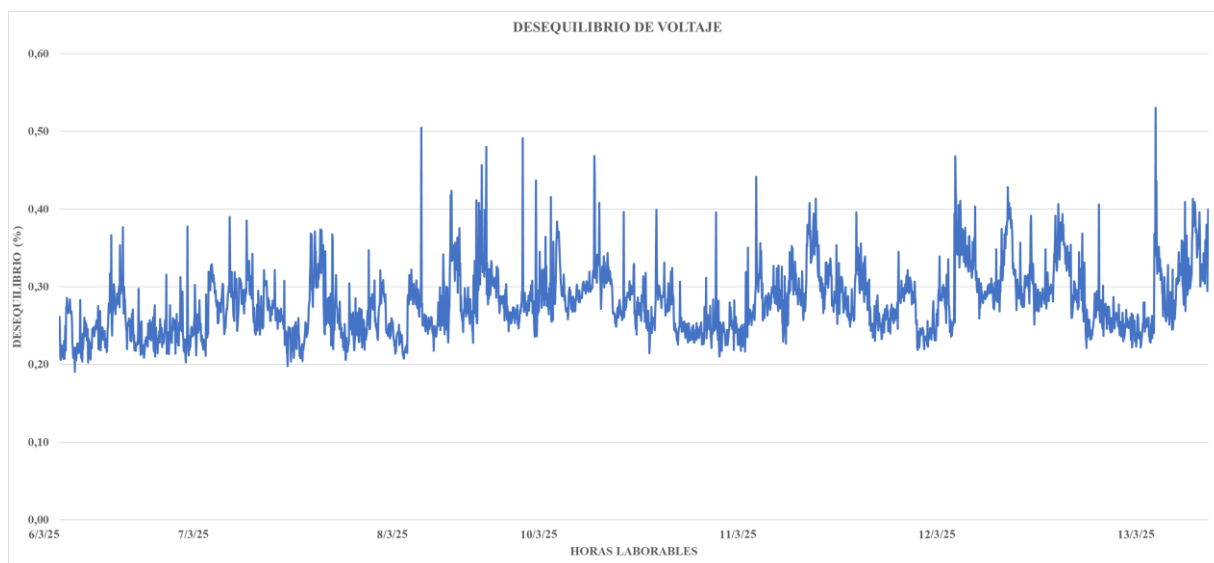


Figura 5.16 Desequilibrio de Voltaje en Horas Laborables.

## 5.2.2. Análisis de Corriente

### 5.2.2.1. Análisis de Corriente de Línea

En la Tabla 5.21 se presentan los niveles de corriente registrados en el transformador de 750 kVA durante el horario laboral, donde se verifica que la corriente promedio por fase es de aproximadamente 350,62A. Estos valores también se ilustran en la Figura 5.17, en la que se observan incrementos puntuales asociados al arranque de los motores de mayor potencia a lo largo del periodo de registro, limitado exclusivamente al tiempo de operación de la planta, donde se evidencian picos recurrentes de corriente, característicos del comportamiento operativo de la maquinaria del aserradero.

Por otro lado, se registra una corriente promedio en el conductor de neutro de 2,22 A. Si bien este valor es bajo en comparación con la corriente de fase, indica la presencia de un leve desbalance en el sistema. Este comportamiento puede atribuirse a diferencias en el consumo de los motores trifásicos, variaciones en las impedancias de las líneas o condiciones propias de arranque y operación. Además, la antigüedad y estado de los motores pueden influir en estas mediciones, debido a que, los motores con cierto desgaste o deterioro en sus bobinados y aislamiento pueden presentar desequilibrios internos que incrementan la corriente en el neutro. Asimismo, pueden generar mayores armónicos o irregularidades durante el arranque y operación, contribuyendo a valores superiores de corriente en este conductor, aunque, no representa una condición crítica, este fenómeno confirma que el sistema no opera en equilibrio

perfecto, lo cual es común en entornos industriales. La evolución de la corriente en el neutro durante las horas laborales puede observarse en la Figura 5.18.

Tabla 5.21 Nivel de Corriente de Línea en Horas Laborales

Fase	A	Promedio Total (A)
A	354,17	350,62
B	361,79	
C	335,90	
N	2,22	2,22

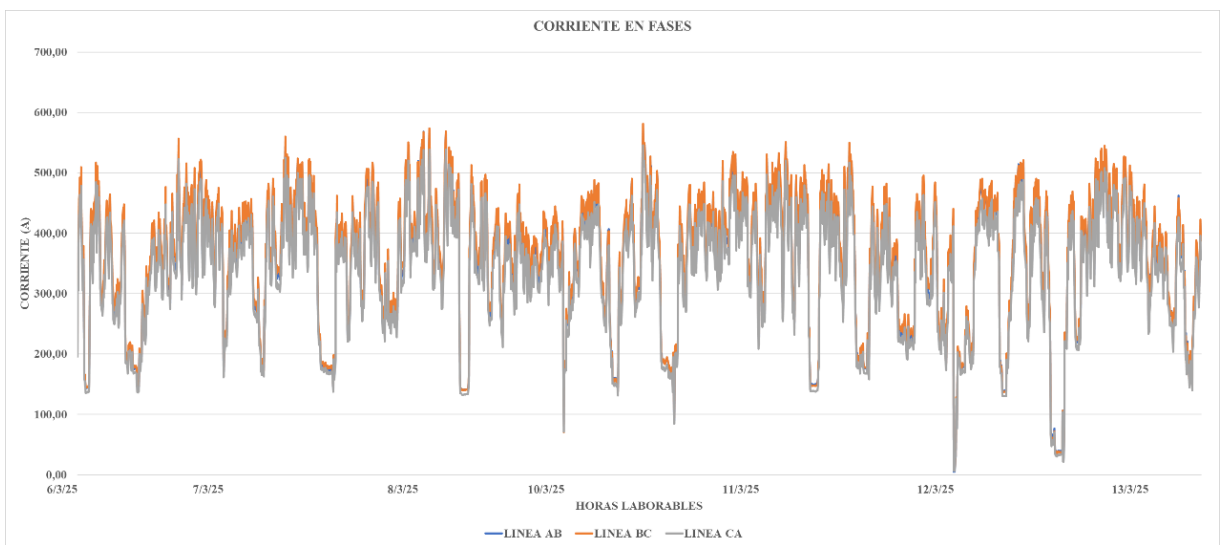


Figura 5.17 Corrientes de Línea por Fases en Horas Laborales.

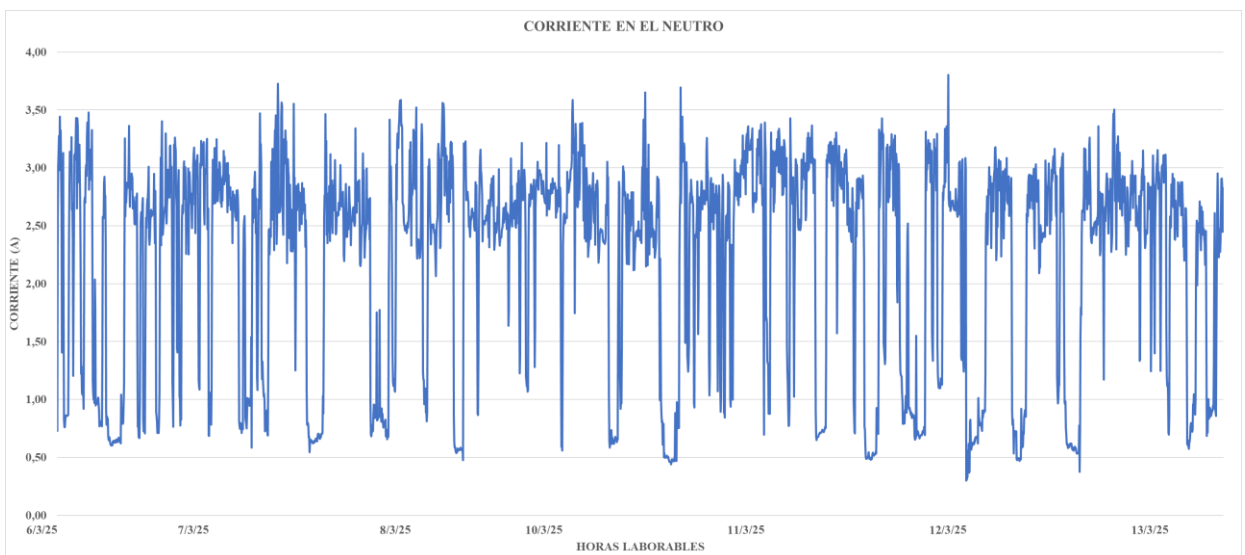


Figura 5.18 Corriente en el Neutro en Horas Laborales.

### 5.2.3. Desequilibrio de Corriente

En la Tabla 5.22 se muestran los resultados obtenidos para el desequilibrio de corriente, donde se evidencia un valor promedio de 4,77 %, el cual excede el umbral del 3% recomendado.

Tabla 5.22 Desequilibrio de Corriente en Horas Laborables.

Desequilibrio (%)	Límite (%)	Detalle
4.77	3	No Cumple

Este resultado indica la presencia de un desbalance significativo entre fases o, posiblemente, la influencia de armónicos de corriente dentro del sistema lo cual se puede apreciar de mejor manera en la Figura 5.19. Entre las causas más probables de este fenómeno se encuentran una distribución desigual de las cargas trifásicas, conexiones defectuosas o deterioradas, y fallas internas en los motores, tales como bobinados desbalanceados o envejecidos. Además, la utilización de equipos electrónicos de potencia, como variadores de frecuencia, puede contribuir a la generación de armónicos que intensifican el desbalance.

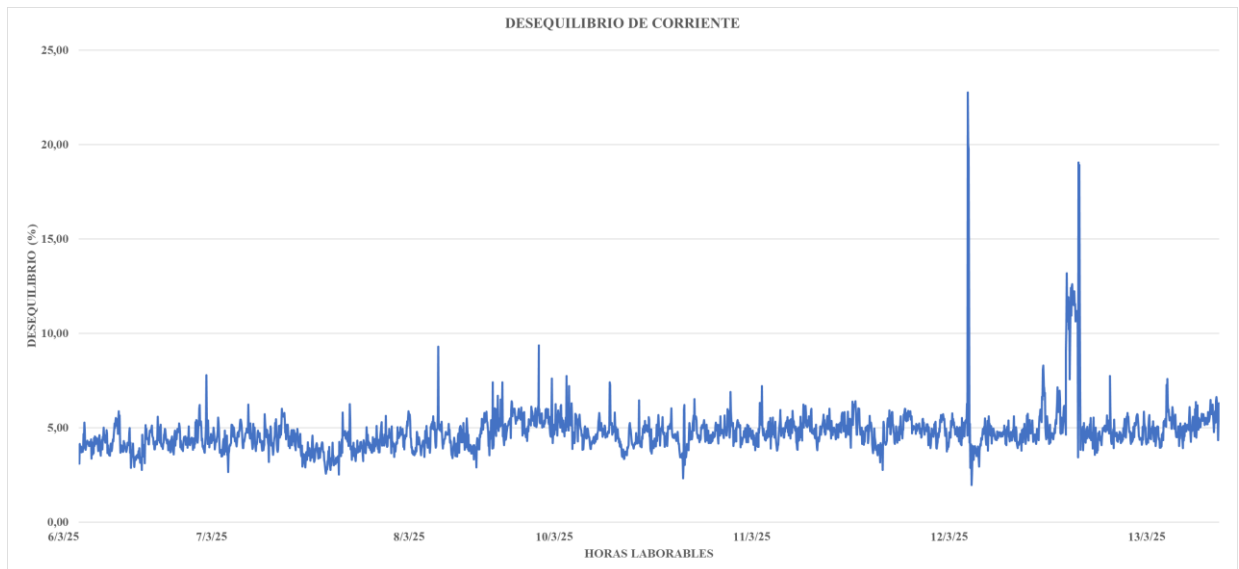


Figura 5.19 Desequilibrio de Corriente en Horas Laborales.

### 5.2.4. Potencia Activa

En la Tabla 5.23, se presentan los valores promedio de potencia activa registrados en cada una de las fases del transformador de 750 kVA durante las horas laborales. Donde se observa una potencia de 225.64kW en el sistema y una variación entre fases con diferencias que oscilan

entre 1,37 kW y 6,43 kW, siendo la fase A la que alcanza el valor más alto, con una potencia de 77,81 kW. Esta diferencia notable entre fases refleja un grado de desbalance en la distribución de cargas del sistema, lo cual puede tener diversas implicaciones técnicas. Un desbalance de potencias genera un incremento de corriente en el conductor de neutro, mayor calentamiento en el transformador y en los equipos conectados, además de provocar pérdidas adicionales en forma de calor.

Tabla 5.23 Potencia Activa en Horas Laborables.

Fase	(W)	(kW)	Total (kW)
A	77814,90	77,81	225,64
B	76440,72	76,44	
C	71386,39	71,39	

En la Figura 5.20, se muestra el comportamiento en horas laborales de la potencia activa máxima en cada fase del transformador, permitiendo observar visualmente la diferencia de carga entre las fases y respaldar el análisis de desbalance previamente expuesto.

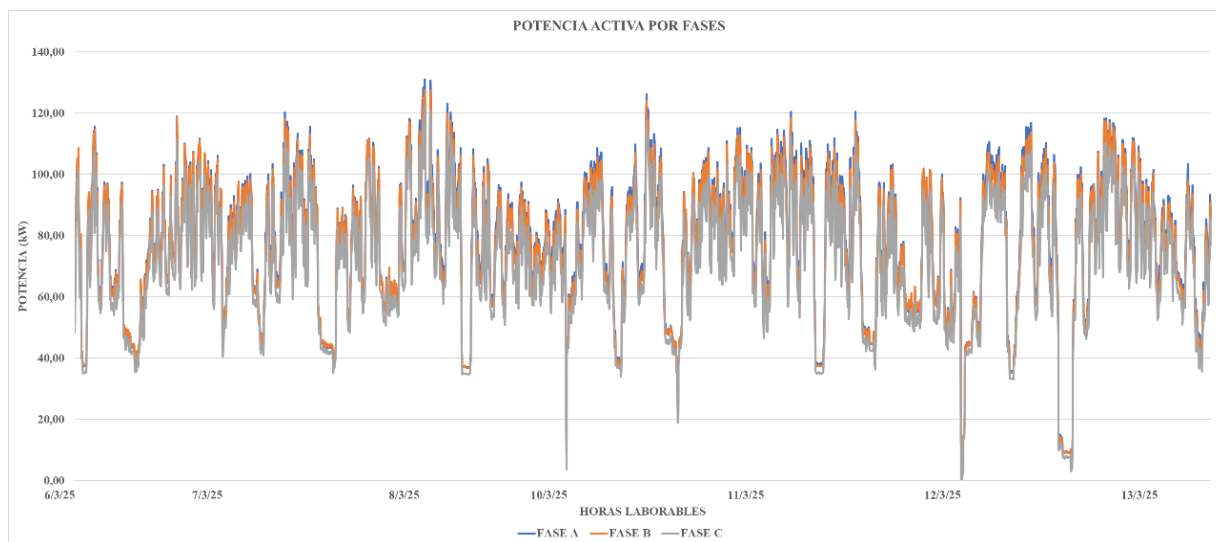


Figura 5.20 Potencia Activa por Fases en Horas Laborales.

### 5.2.5. Desbalance de Potencia Activa

De igual manera, en la Tabla 5.24 se presenta el valor promedio del desbalance entre fases, el cual supera el límite máximo del 5 % establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. Este desbalance se atribuye principalmente a una distribución inadecuada de las cargas, especialmente entre las fases BC y CA, donde se registran los mayores porcentajes de

desequilibrio en la potencia activa. En contraste, la fase AB se mantiene dentro del rango permitido, lo que evidencia una distribución más equilibrada en dicha línea.

Un desbalance elevado puede provocar pérdidas adicionales de energía, aumento en la temperatura de los equipos eléctricos, especialmente en transformadores y motores, y acelerar el desgaste de los mismos. Además, puede generar fluctuaciones en la tensión que afectan el rendimiento de la maquinaria conectada.

Tabla 5.24 Desbalance de Potencia Activa en Horas Laborales

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	2	5.71	5	No Cumple
B	7			
C	8			

### 5.2.6. Potencia Reactiva.

En la Tabla 5.25, se exponen los valores de potencia reactiva registrados en el transformador de 750 kVA, donde la potencia promedio en el sistema de 147.41kVAr y un valor máximo de 52.85kVAr en la fase B. Las variaciones entre fases se encuentran en un rango que va desde 0,95kVAr hasta 6.04kVAr, lo cual refleja un cierto grado de desequilibrio en el consumo de potencia reactiva del sistema.

Tabla 5.25 Potencia Reactiva en Horas Laborales.

Fase	(VAr)	(kVAr)	Total (kVAr)
A	46804,97	46,80	147,41
B	52845,79	52,85	
C	47756,03	47,76	

En la Figura 5.21, se muestra el comportamiento de la potencia reactiva en cada una de las fases durante el horario laboral, lo que permite visualizar cómo varía este parámetro bajo condiciones reales de operación de la planta.

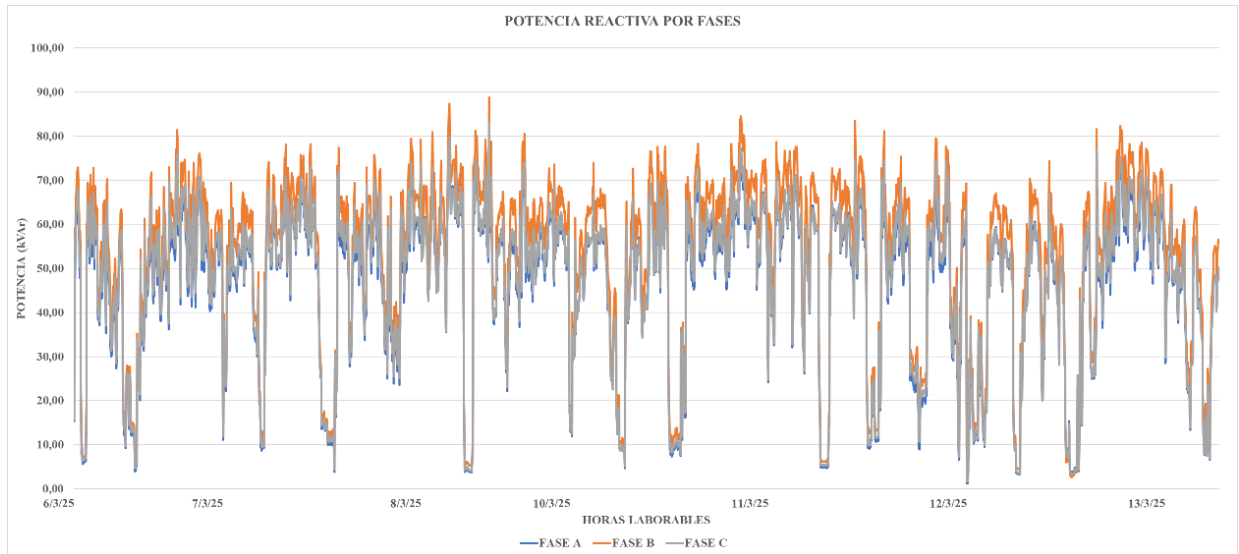


Figura 5.21 Potencia Reactiva por Fases en Horas Laborales.

### 5.2.7. Desbalance de Potencia Reactiva

De igual manera, en la Tabla 5.26 se da a conocer el desbalance de potencia entre fases, cuyos valores máximos superan el 5% establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. En la línea AB se observó un desbalance bajo en la potencia activa, pero un desbalance elevado en la potencia reactiva, mientras que en la línea C-A ocurre lo contrario. Esta condición sugiere una distribución desigual de las cargas inductivas en el sistema, donde los motores conectados muestran un consumo activo relativamente equilibrado, pero absorben potencia reactiva de forma no uniforme.

Esta diferencia se debe a variaciones en el estado de carga de los equipos, su eficiencia, o diferencias en el factor de potencia individual, lo cual contribuye al desbalance general observado. Esta situación puede acentuarse en sistemas donde no se ha realizado una compensación adecuada de reactiva por fase, o donde los motores presentan antigüedad, desgaste o tecnologías distintas, lo que afecta su comportamiento eléctrico.

Tabla 5.26 Desbalance de Potencia Reactiva en Horas Laborales.

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	11	8,04	5	No Cumple
B	11			
C	2			

### 5.2.8. Potencia Aparente

La potencia aparente del transformador de 750 kVA se presenta en la Tabla 5.27 donde se verifica que la fase B registra el valor máximo con 93,44 kVA. Las variaciones entre fases se encuentran en un rango que va desde 1,34 kVA hasta 6,42 kVA, lo que refleja cierto grado de desequilibrio en la demanda de potencia aparente. Asimismo, en la Figura 5.22 se muestra el perfil de la potencia aparente durante el horario laboral, lo que permite visualizar de forma más clara su comportamiento bajo condiciones reales de operación del sistema.

Tabla 5.27 Potencia Aparente en Horas Laborales.

Fase	(VA)	(kVA)	Total (kVA)
A	91286,59	91,29	271.14
B	93441,04	93,44	
C	86409,52	86,41	

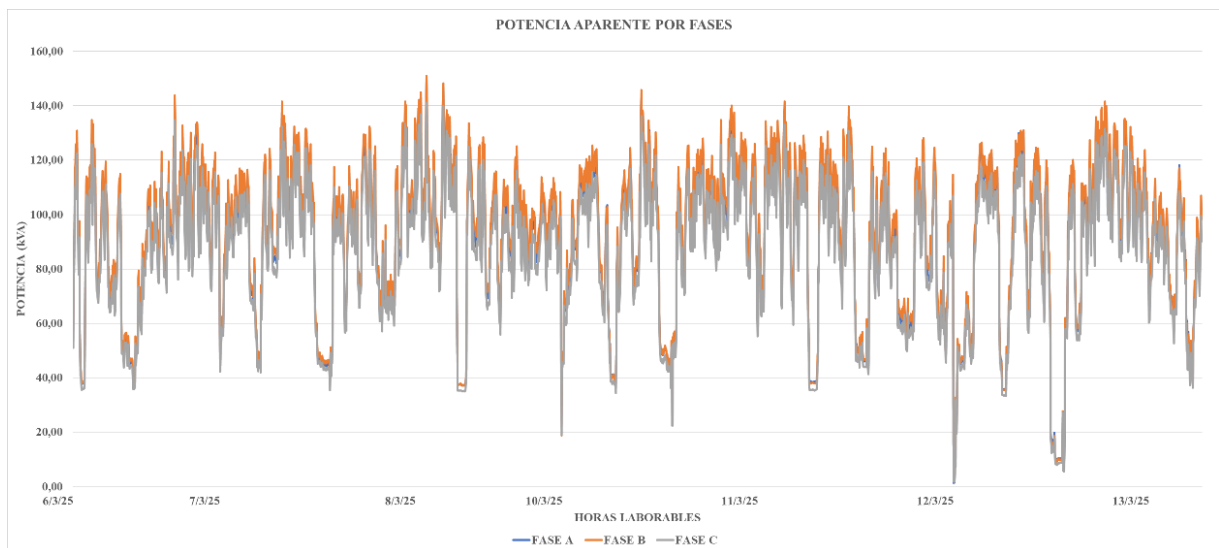


Figura 5.22 Potencia Aparente por Fases en Horas Laborales.

### 5.2.9. Desbalance de Potencia Aparente

De igual manera, en la Tabla 5.28 se muestran los valores de desbalance entre fases correspondientes a la potencia aparente, los cuales superan en sus valores máximos el 5 % establecido por la Regulación ARCONEL 009/24 [5]. Los resultados del análisis muestran que el desbalance de potencia aparente sigue un patrón similar al observado en la potencia activa, particularmente en la fase AB, donde ambos porcentajes se mantienen bajos. Esto se explica

porque la potencia aparente es el resultado de la combinación vectorial entre la potencia activa y reactiva; por tanto, cuando el desbalance en la potencia activa es bajo y la potencia reactiva no alcanza niveles significativos, el valor resultante de la potencia aparente se mantiene relativamente estable. En contraste, en fases como BC o CA, donde se registran mayores desequilibrios en la potencia activa y/o reactiva, la potencia aparente refleja directamente esta condición, evidenciando un desbalance más pronunciado en la demanda total del sistema.

Tabla 5.28 Desbalance de Potencia Aparente en Horas Laborales.

Fase	Desbalance (%)	Promedio Total (%)	Límite (%)	Detalle
A	2	5.26	5	No Cumple
B	8			
C	5			

### 5.2.10. Factor de Potencia

En la Tabla 5.29 se indican los valores promedio del factor de potencia (FP) registrados en el transformador de 750 kVA durante un periodo continuo de 7 días, considerando únicamente las horas laborales. Se observa que el FP promedio no alcanza el límite mínimo de 0,92 establecido en la Resolución 022/24 [23].

Este bajo factor de potencia se atribuye principalmente a la alta presencia de cargas inductivas en la planta, como motores eléctricos, que demandan potencia reactiva sin un sistema adecuado de compensación. Además, algunos motores pueden operar en condiciones ineficientes, ya sea por sobredimensionamiento, falta de mantenimiento o envejecimiento, lo cual incrementa el consumo de energía reactiva y reduce el FP global.

Tabla 5.29 Factor de Potencia en Horas Laborales.

Fase	FP	FP Total	Límite	Detalle
A	0,86	0,84	0,92	No Cumple
B	0,83			
C	0,83			

En la Figura 5.23, se muestra el comportamiento del factor de potencia por fases durante el periodo de análisis, evidenciando que, aunque en general se mantiene dentro de rangos aceptables, existen fluctuaciones significativas, especialmente en la fase C, donde se presentan caídas pronunciadas por debajo de 0,7. Las fases A y B muestran mayor estabilidad, aunque la

fase B presenta valores más dispersos. Este comportamiento sugiere la presencia de desequilibrios y cargas inductivas que afectan la eficiencia del sistema, resaltando la importancia de aplicar medidas de corrección del factor de potencia de forma específica por fase.

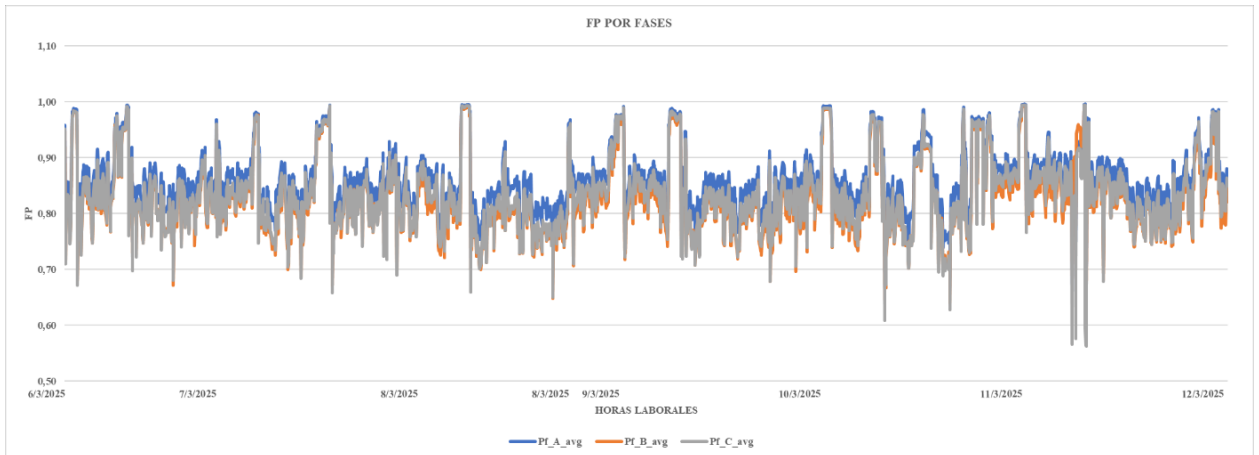


Figura 5.23 Comportamiento del factor de potencia por fases durante las horas laborales.

### 5.2.11. Distorsión Armónica Total de Voltaje

Tal como se explicó en el análisis previo del voltaje, la normativa ARCONEL 009/24 [5], establece que el porcentaje de distorsión armónica total (THD) no debe superar el 8 %. En este nuevo análisis, se consideraron únicamente las horas laborales del sistema, es decir, los periodos en los que la carga eléctrica está en operación activa. Aun bajo estas condiciones más representativas del funcionamiento real, el valor del THD promedio de las 3 fases registrado fue de 6,47 %, como se muestra en la Tabla 5.30. Este resultado se mantiene dentro del límite permitido por la normativa, lo que indica que el sistema cumple con los parámetros de calidad de energía establecidos para la distorsión armónica de voltaje durante las horas de operación.

Tabla 5.30 Distorsión armónica de Voltaje Horas Laborables.

Fase	THD (%)	THD Promedio (%)	Límite ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
A	6,34	6,47	8	Cumple
B	6,43			
C	6,63			

### 5.2.12. Armónico Individual de Voltaje Línea Neutro

Los resultados obtenidos en la Tabla 5.31 muestran que, durante las horas de operación, la mayoría de los armónicos de voltaje individuales se mantienen dentro de los rangos permitidos. No obstante, se observa que el armónico de quinto orden presenta un valor de 4,95%, siendo el más cercano al límite normativo establecido. Cabe destacar que el quinto armónico suele ser uno de los más comunes en instalaciones industriales y, aunque en este caso no supera el umbral permitido, su presencia puede ocasionar efectos adversos en el funcionamiento de transformadores, motores y otros equipos sensibles.

Tabla 5.31 Voltaje Línea Neutro Horas Laborables.

Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
A	0,31	Vharm_3	0,30	5	Cumple
B	0,32				
C	0,28				
A	4,92	Vharm_5	4,95		Cumple
B	4,96				
C	4,98				
A	2,02	Vharm_7	2,07		Cumple
B	2,11				
C	2,07				
A	0,42	Vharm_9	0,43		Cumple
B	0,43				
C	0,45				
A	1,00	Vharm_11	1,00		Cumple
B	1,05				
C	1,05				
A	0,27	Vharm_13	0,30	Cumple	
B	0,34				
C	0,30				

En la Figura 5.24, donde se muestra de manera más clara el comportamiento del sistema respecto al cumplimiento de los límites establecidos por la normativa vigente ARCONEL 009/24 [6], lo que permite evidenciar en términos generales, los niveles de distorsión armónica

de voltaje que se mantienen dentro de los márgenes aceptables, validando así que la calidad de la energía en el sistema es adecuada durante las horas efectivas de operación, salvo por la excepción ya mencionada del armónico de quinto orden.

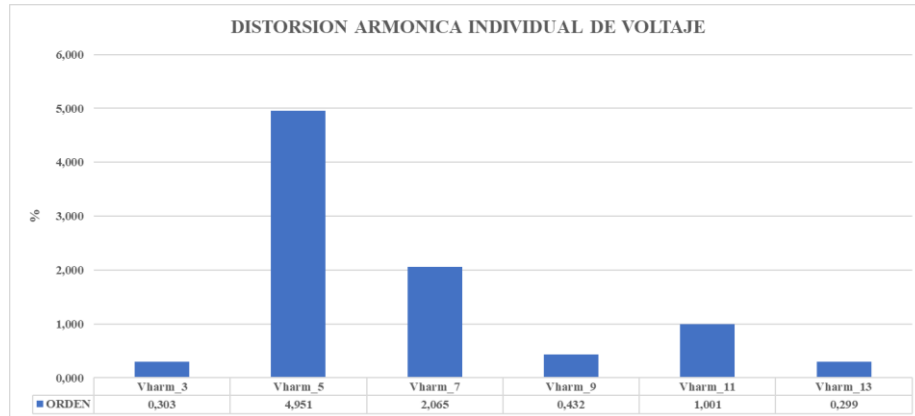


Figura 5.24 Distorsión armónica individual de voltaje horas laborables.

### 5.2.13. Armónico Individual de Corriente Línea Neutro

Para evaluar la aceptabilidad de los niveles de armónicos registrados por el analizador de red durante las horas laborables, y compararlos con los límites establecidos en la normativa IEEE 519-2014, es fundamental calcular la relación entre la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) siendo esta de 20,044kA y la corriente en plena carga ( $I_L$ ) de 350,62A.

Con estos datos, se determinó una relación  $I_{cc}/I_L$  igual a 57,17. Según la IEEE 519-2014 [6], este valor se encuentra dentro del rango  $50 < I_{cc}/I_L \leq 100$ , lo que implica que los armónicos de orden impar en el rango  $3 \leq h < 11$  deben cumplir con un límite máximo del 10 %, mientras que para el armónico de orden 13, el valor límite permitido es del 4,5 %, tal como se resume en la Tabla 3.4.

En la Tabla 5.32 se presenta el detalle del cumplimiento o incumplimiento de cada armónico evaluado, mientras que en la Figura 5.25, se muestra gráficamente su comportamiento. Los resultados indican que los armónicos de orden 5 y 11 exceden los límites permitidos. Específicamente, el armónico 5 registra un 10,08 % y el armónico 11 presenta un 8,14 %, ambos por encima de los valores normativos.

Estas distorsiones pueden estar relacionadas, en gran medida, con la presencia de variadores de frecuencia utilizados para el control de velocidad de los motores (particularmente en equipos tipo sierra), los cuales son reconocidos generadores de armónicos de bajo orden. Asimismo, el

desbalance de cargas en el sistema puede intensificar la presencia de armónicos como los de orden 5, situación que ya se había señalado en análisis previos. Este comportamiento evidencia la necesidad de considerar medidas correctivas o estrategias de mitigación para garantizar el cumplimiento de los límites normativos y preservar la calidad de la energía eléctrica en condiciones reales de operación.

Tabla 5.32 Armónicos impares de corriente.

Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)	Límite IEEE 519-2014 (%)	Detalle
A	1,75	Iharm_3	2,07	10	Cumple
B	2,25				
C	2,20				
A	9,90	Iharm_5	10,08		No Cumple
B	10,17				
C	10,17				
A	7,12	Iharm_7	7,24		Cumple
B	7,35				
C	7,25				
A	2,54	Iharm_9	2,48		Cumple
B	2,41				
C	2,48				
A	7,56	Iharm_11	8,14	4,5	No Cumple
B	8,34				
C	8,51				
A	2,69	Iharm_13	2,92		Cumple
B	3,20				
C	2,87				

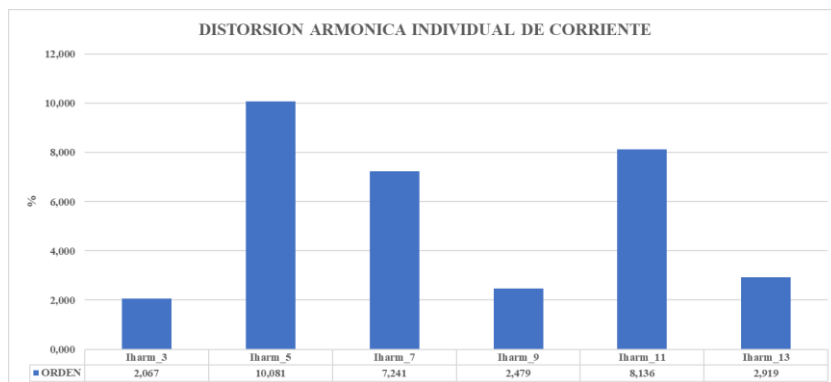


Figura 5.25 Comportamiento de los armónicos impares de corriente horario laboral.

#### 5.2.14. Distorsión de Demanda Total de Corriente

Conforme al cálculo del cociente  $I_{cc}/I_L$ , realizado según lo establecido en la norma IEEE 519-2014 [6], se obtuvo un valor de 57,17 A. Este resultado se encuentra dentro del rango de  $50 < I_{cc}/I_L < 100$ , lo que corresponde a un límite máximo permitido del 12 % para la distorsión de demanda total de corriente (TDD). Al igual que en el análisis realizado durante los siete días continuos, a partir de la ecuación 9 empleada para el cálculo del TDD y según lo presentado en la Tabla 5.33, se obtuvo un valor que supera el umbral normativo establecido. Este resultado evidencia la presencia de problemas relacionados con armónicos de corriente, indicando un incumplimiento en los niveles de distorsión permitidos.

Tabla 5.33 Distorsión de Demanda Total de Corriente.

<b>TDD (%)</b>	<b>Límite IEEE 519-2014 (%)</b>	<b>Detalle</b>
15,69	12	No Cumple

#### 5.2.15. Flickers

Según lo establecido en la Regulación ARCONEL 009/24 [5], el valor de parpadeo en cada fase no debe superar la unidad en el punto de medición definido. En la Tabla 5.34, se presentan los valores promedio de parpadeo registrados por el analizador en el transformador TRAFO\_750kVA, tomando en consideración las mediciones registradas durante las horas laborales, donde se observa un valor máximo de 0,78 % en la fase B. Al analizar estos valores promedio durante el periodo evaluado, se confirma que todos se encuentran dentro de los límites permitidos por la normativa vigente.

Tabla 5.34 Presencia de Flickers en Horas Laborales.

<b>Fase</b>	<b>Flicker</b>	<b>Límite</b>	<b>Detalle</b>
A	0,76	1,00	Cumple
B	0,78		Cumple
C	0,76		Cumple

La Figura 5.26 presenta el perfil temporal del parpadeo (flicker) en cada fase, evidenciando cómo fluctúa este parámetro a lo largo del periodo de medición y facilitando la identificación de posibles eventos o patrones relacionados con la operación de las cargas.

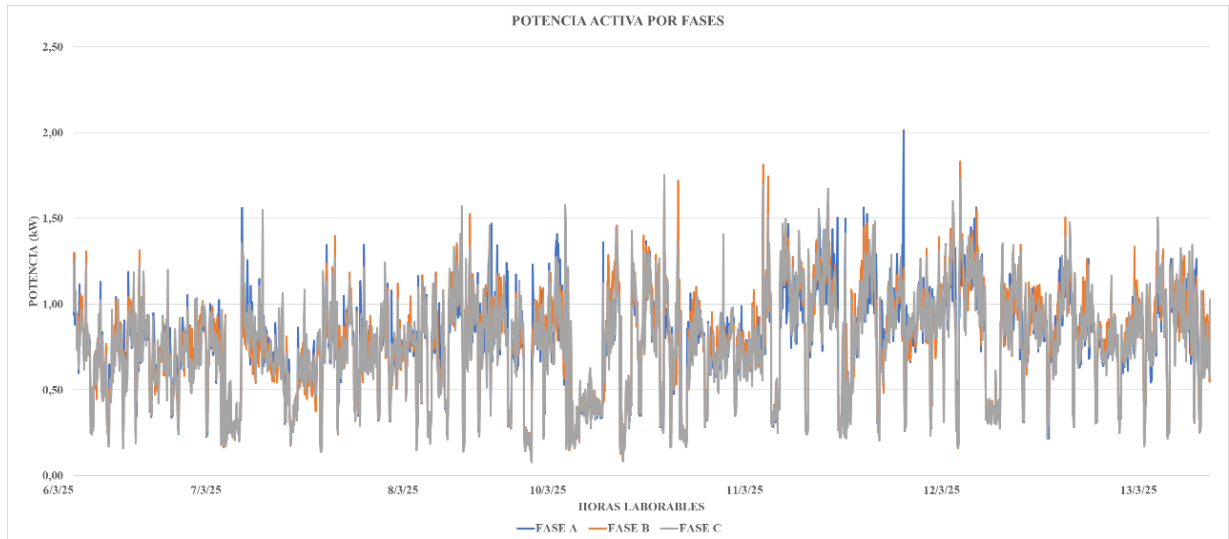


Figura 5.26 Presencia de Flickers por Fases en Horas Laborales.

### 5.3. PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA

#### 5.3.1. Propuesta 1 - Filtro Activo

El sistema eléctrico fue modelado en el entorno Simulink de MATLAB procurando una representación lo más precisa posible respecto a las condiciones reales de operación, tomando como referencia los datos registrados mediante el analizador de red. En la Figura 5.27 (voltaje) y la Figura 5.28 (corriente), se ilustran tres escenarios representativos durante la simulación. Inicialmente, el sistema opera bajo condiciones puramente sinusoidales, simulando un estado ideal sin perturbaciones.

Posteriormente, en el instante  $t = 0,05$  s, se incorpora al sistema una carga no lineal, la cual genera una distorsión considerable en la forma de onda de la corriente. Esta distorsión es característica del armónico de quinto orden, identificado previamente en el apartado 5.2 como el de mayor impacto dentro del sistema eléctrico. Por este motivo, el análisis se enfoca específicamente en dicho armónico. En contraste, la señal de voltaje experimenta únicamente ligeras alteraciones, lo que demuestra que la corriente es el parámetro más susceptible a la distorsión armónica, justificando así la decisión de centrar el estudio en los armónicos de corriente. Finalmente, a partir de  $t = 0,08$  s, se incorpora la carga real del sistema a partir de los datos obtenidos con el instrumento de medición, lo que ocasiona un incremento en la magnitud de la corriente debido al aumento de la demanda de carga.

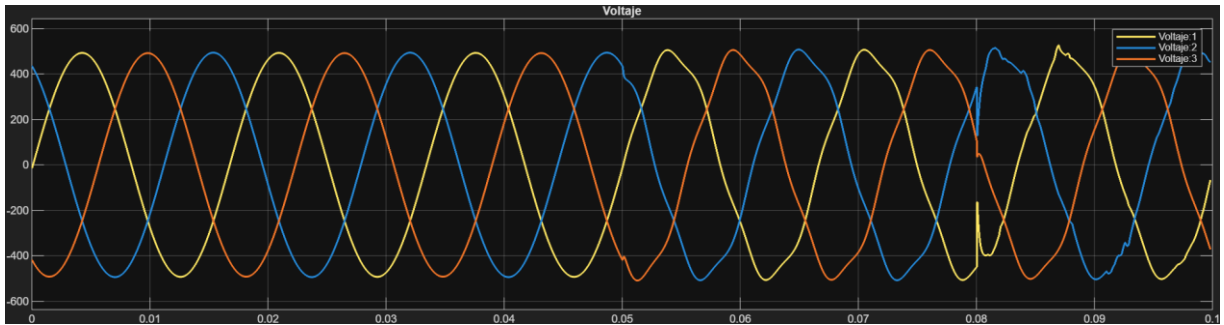


Figura 5.27 Señal de voltaje del sistema [Simulink].

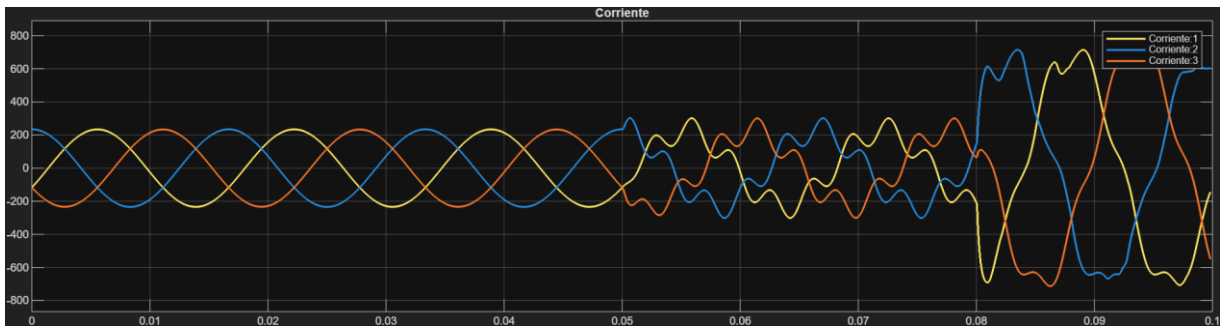


Figura 5.28 Señal de corriente del sistema [Simulink].

A partir de los escenarios iniciales de simulación, se obtuvieron los valores correspondientes a los armónicos presentes en el sistema. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.35, con el fin de ofrecer una visión inicial del comportamiento eléctrico bajo distintas condiciones operativas, permitiendo identificar la influencia de las cargas no lineales y el grado de distorsión armónica que estas generan en las señales del sistema.

Tabla 5.35 Armónicos correspondientes a los escenarios iniciales.

Escenarios	Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)
Inicial	A	0,50	Iharm_5	0,32
	B	0		
	C	0,46		
Carga no lineal	A	32,13	Iharm_5	31,82
	B	31,75		
	C	31,58		
Carga del sistema	A	10,79	Iharm_5	10,16
	B	9,81		
	C	9,87		

Como se indicó previamente, el presente estudio se enfoca en el análisis del quinto armónico de corriente, identificado como el de mayor incidencia sobre la calidad de energía del sistema. En la Tabla 5.36, se muestra una comparación entre los valores obtenidos durante toda la simulación a partir de la incorporación completa de los datos registrados por el analizador de red y los valores medidos en campo, evidenciando el margen de error existente entre ambos escenarios.

Cabe señalar que, para los datos presentados, fue necesario ajustar la escala de representación, considerando que un valor de 70 unidades corresponde al 100 % de la magnitud base, con el fin de normalizar la comparación entre lo simulado y lo medido.

Tabla 5.36 Error porcentual entre lo medido y lo simulado.

Fase	Armónico (%)	Orden	Promedio (%)		Error (%)
			Simulado	Medido	
A	8,8	Iharm_5	10,07	10,08	0,07%
B	11,69				
C	9,73				

En la Figura 5.29, se representa gráficamente el espectro armónico del sistema, donde es posible observar la presencia de múltiples componentes armónicas. Tal como se anticipó en el análisis anterior, el armónico de orden 5 destaca por su mayor magnitud, lo que confirma su relevancia en la distorsión de la señal y justifica el enfoque del modelado orientado a su mitigación.

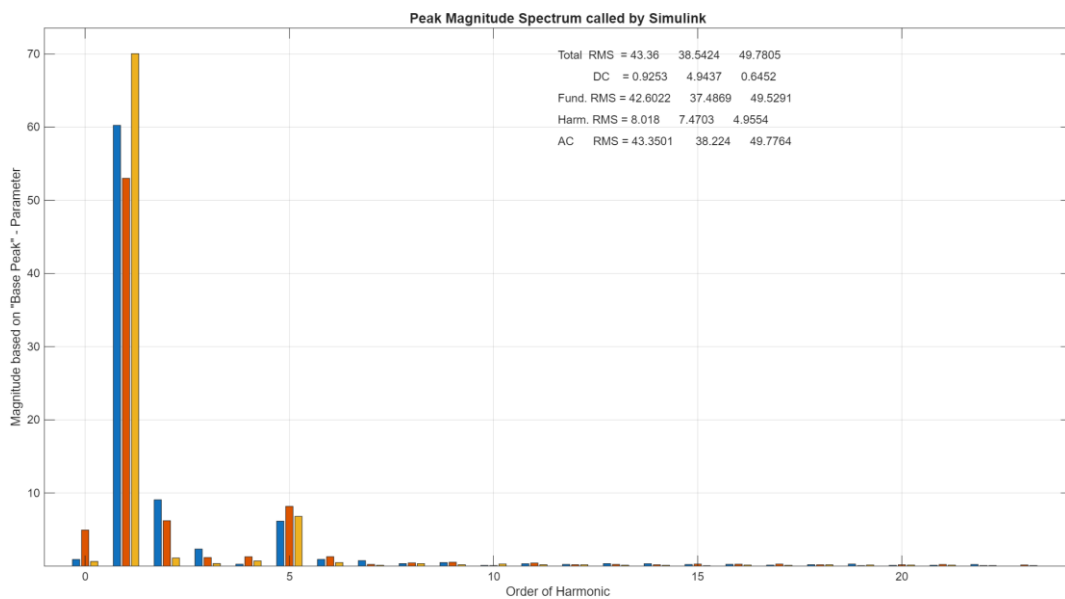


Figura 5.29 Espectro armónico del sistema [Simulink].

Complementariamente, en la Figura 5.30 se presenta la forma de onda de la corriente en las tres fases, donde se evidencia claramente el efecto de los armónicos sobre la señal, apreciándose deformaciones respecto a una señal senoidal ideal. Esta representación permite validar visualmente el impacto de las distorsiones armónicas sobre la calidad de la energía del sistema

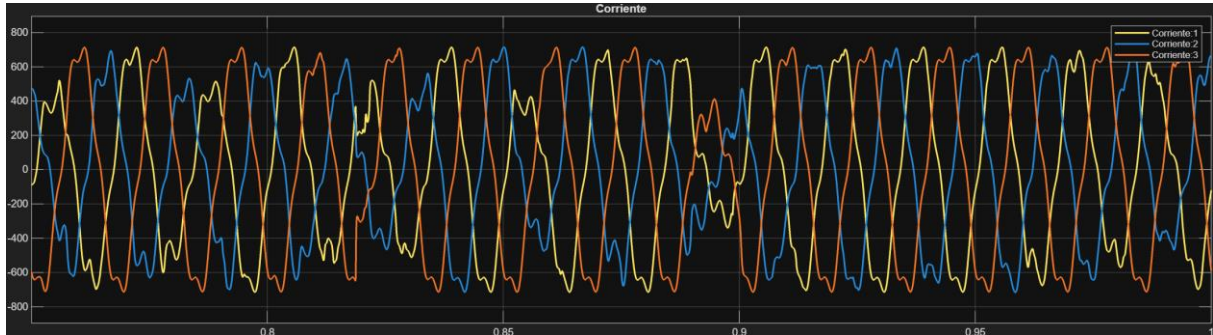


Figura 5.30 Perfil de corriente del sistema [Simulink].

### 5.3.2. Implementación del Filtro Activo

Con el propósito de verificar la efectividad del filtro activo implementado como estrategia de mitigación de armónicos, con énfasis en el armónico de quinto orden, en la Tabla 5.37, se presenta la comparación de los valores obtenidos antes y después de su incorporación en el sistema. Los resultados muestran una disminución notable en los niveles de distorsión armónica por fase: en la fase A se reduce de 8,8 % a 5,24 %, en la fase B de 11,69 % a 7,41 % y en la fase C de 9,73 % a 5,91 %. El promedio total pasó de 10,07 % a 6,19 %, lo que representa una reducción del 3,89 %, atenuando los efectos del quinto armónico de corriente, mejorando así la calidad de la energía en el sistema eléctrico y cumpliendo el límite establecido por Regulación ARCONEL 009/24 [5] y la norma IEEE 519-2014 [6].

Tabla 5.37 Resultados obtenidos a partir de la introducción del filtro al sistema.

		ANTES		DESPUES	
Fase	Orden	Armónico (%)	Promedio (%)	Armónico (%)	Promedio (%)
A	Iharm_5	8,8	10,07	5,24	6,19
B		11,69		7,41	
C		9,73		5,91	

En la Figura 5.31, se presenta el espectro de magnitudes de los armónicos de corriente tras la implementación del filtro, donde se observa una atenuación significativa en los niveles correspondientes al armónico de quinto orden, así como en el contenido armónico total.

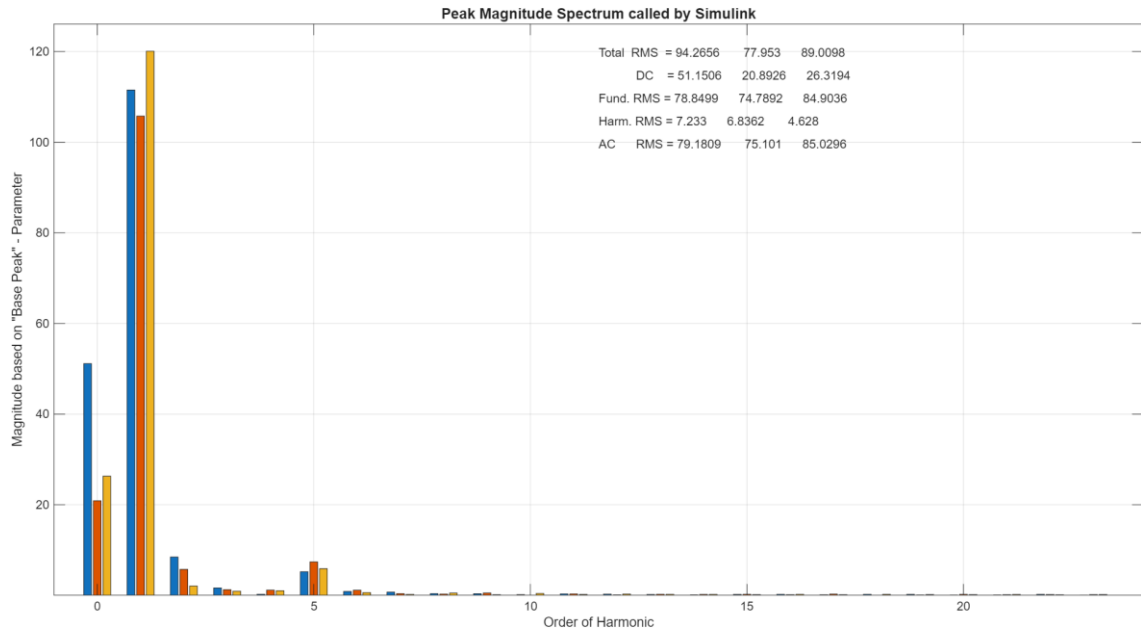


Figura 5.31 Espectro armónico del sistema después de la implementación del filtro activo [Simulink].

En la Figura 5.32, se presentan las formas de onda de voltaje y corriente del sistema eléctrico tras la implementación del filtro. En la parte superior se observa la señal de voltaje trifásico, que mantiene un comportamiento predominantemente sinusoidal, evidenciando estabilidad en la tensión del sistema pese a la presencia de armónicos. En la parte inferior se muestra la forma de onda de la corriente, donde se aprecia una disminución notable en la distorsión armónica respecto a escenarios anteriores. No obstante, la onda de corriente no se presenta completamente sinusoidal debido a que en esta simulación no se ha considerado el uso de inversores de corriente capaces de generar una compensación total y continua. Aun así, se evidencia una mejora sustancial en la calidad de energía, especialmente en lo que respecta a la atenuación del armónico de quinto orden, que era el de mayor impacto antes de la aplicación del filtro.

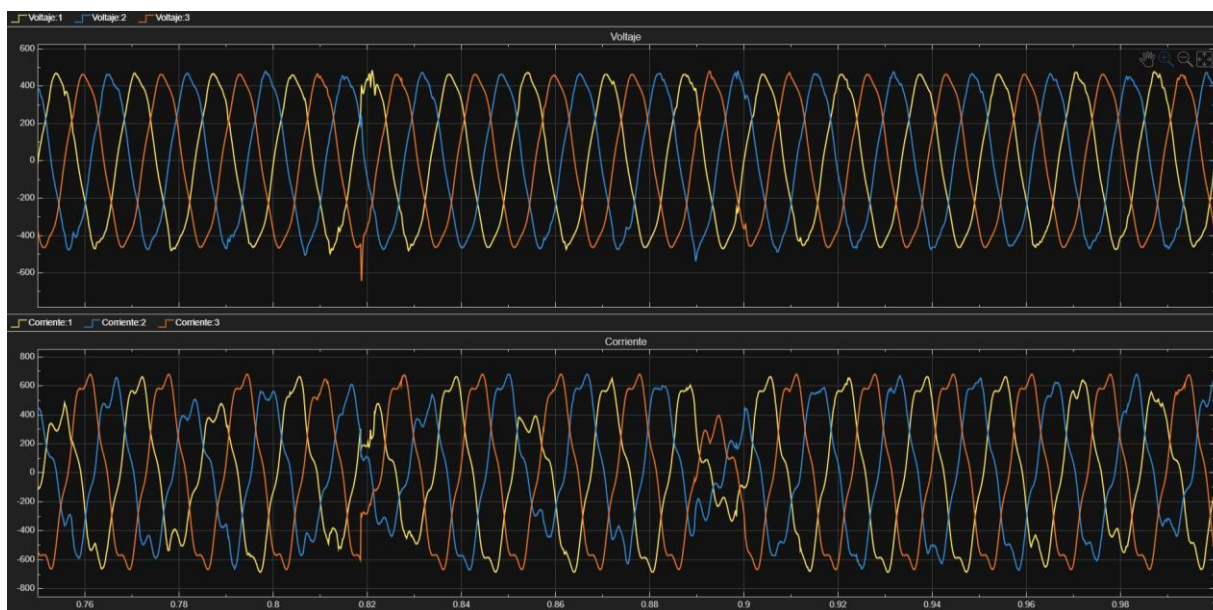


Figura 5.32 Resultado de voltaje y corriente después de la implementación del filtro activo [Simulink].

### 5.3.3. Propuesta 2 – Filtro Pasivo

Para implementar esta segunda propuesta, se empleó el software ETAP 21.0.1, el cual permite realizar simulaciones con filtros en ubicaciones específicas dentro del sistema eléctrico. En este caso, se seleccionó la barra principal. Al ejecutar la simulación, se obtuvieron los valores del armónico de quinto orden antes de la implementación del filtro. Los resultados se detallan en la Tabla 5.38, donde se evidencia un valor simulado de 10,06 % mientras que el valor medido en la barra principal con ayuda del analizador de red fue de 10,08 %, lo cual valida el modelo empleado.

Tabla 5.38 Valor del quinto armónico obtenido a partir de la simulación.

Barra	Orden	Promedio (%)		Error
		Simulado	Medido	(%)
Principal	Iharm_5	10,06	10,08	0,2%

En la Figura 5.33, se representa el comportamiento de la corriente en el cable 151, correspondiente a la barra principal del sistema. En el gráfico de la derecha, que muestra el espectro armónico, se identifica que el armónico de quinto orden (300 Hz) es el componente predominante, con una magnitud superior al 10 %, seguido por los armónicos de séptimo, undécimo y decimotercer orden. Esta distribución indica una clara distorsión armónica en la señal. El gráfico de la izquierda presenta la forma de onda de corriente, en la cual se evidencia

una deformación significativa respecto a la señal senoidal ideal, producto de la presencia de estos armónicos múltiples de la fundamental.

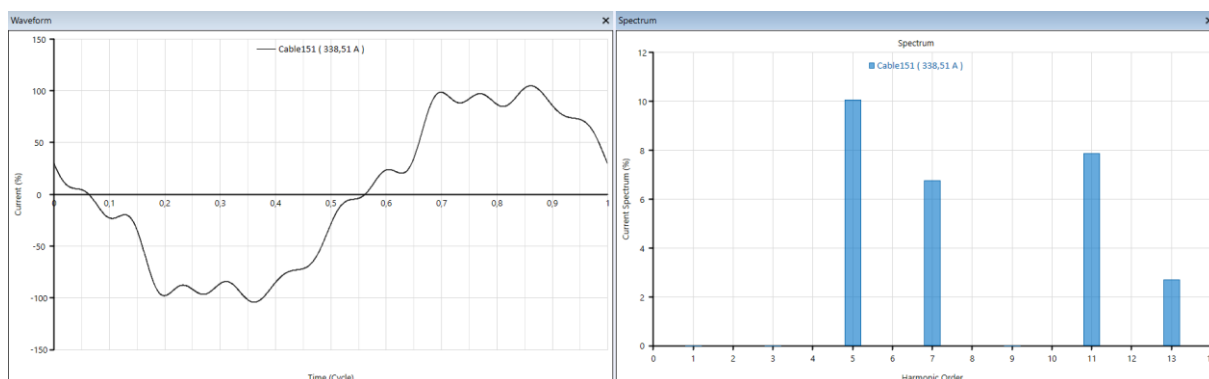


Figura 5.33 Presencia de armónicos en la barra principal y en la carga [ETAP].

### 5.3.4. Implementación del Filtro Pasivo

Con base en los resultados obtenidos previamente sin la presencia del filtro, se procede a la activación del filtro diseñado, conforme a lo establecido en la fase 4.6.2 de la sección 4.6. Esta etapa tuvo como finalidad evaluar el comportamiento del sistema ante su inserción. Los valores obtenidos tras su implementación se presentan en la Tabla 5.39, evidenciando los cambios generados en el contenido armónico del sistema.

Tabla 5.39 Resultados a partir de la introducción del filtro.

Barra	ANTES		DESPUES
	Orden	Promedio (%)	Promedio (%)
Principal	Iharm_5	10,06	6,32

Los resultados obtenidos tras la implementación del filtro pasivo muestran una disminución significativa en los niveles del quinto armónico de corriente en la barra principal del sistema, donde el contenido armónico promedio del quinto orden se redujo de 10,06 % a 6,32 %, lo que representa una atenuación del 37,18 %. Esta mejora evidencia la efectividad del filtro pasivo sintonizado, con un impacto directo en el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa ARCONEL 009/24 [5] y el estándar IEEE 519-2014 [6]. En la Figura 5.34 se presenta la evolución de la forma de onda de corriente y su correspondiente espectro armónico, donde se aprecia una disminución considerable en el armónico dominante tras la implementación del filtro.

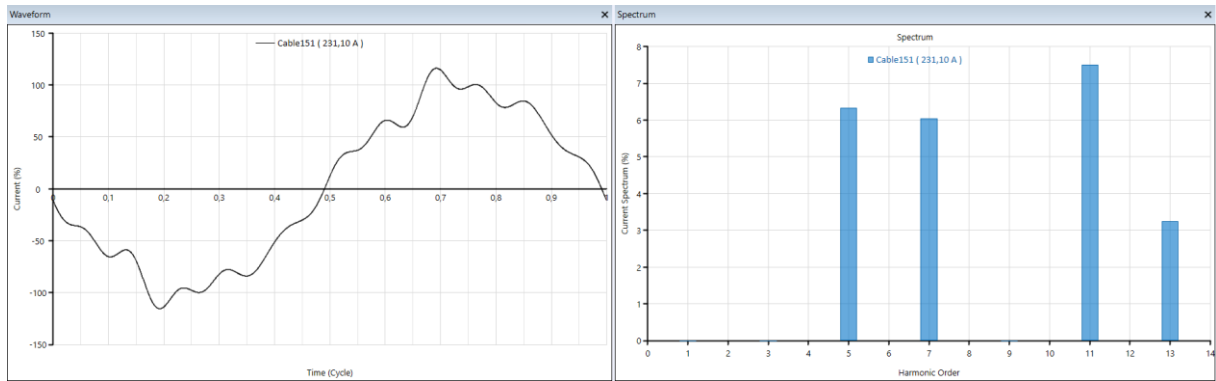


Figura 5.34 Reducción de armónicos la implementación del filtro pasivo [ETAP].

## 5.4. COMPARACIÓN ENTRE EL FILTRO ACTIVO Y PASIVO

### 5.4.1. Efectividad

Como se observa en la Tabla 5.40, el filtro activo implementado para la mitigación del armónico de corriente de quinto orden demostró una mayor efectividad en comparación con el filtro pasivo. Específicamente, el valor promedio del armónico disminuyó de 10,07 % a 6,19 % con el uso del filtro activo, lo que representa una reducción de 3,88 puntos porcentuales. En contraste, con el filtro pasivo se obtuvo una disminución más limitada, pasando de 10,08 % a 6,32 %, es decir, una reducción de 3,74 puntos porcentuales

Tabla 5.40 Efectividad entre el Filtro Activo y Pasivo.

Filtro	Orden	Promedio (%)		Reducción
		Sin Filtro	Con Filtro	
Activo	Iharm_5	10,07	6,19	3,88
Pasivo		10,06	6,32	3,74

Este comportamiento confirma que la estrategia basada en la teoría de potencia instantánea P-Q utilizada en el filtro activo posee un mayor grado de selectividad y capacidad de adaptación ante las distorsiones armónicas generadas por cargas no lineales, especialmente en entornos industriales donde la dinámica de operación es variable. La diferencia de desempeño también puede atribuirse a que el filtro activo actúa de manera más precisa en tiempo real sobre los armónicos específicos, mientras que el filtro pasivo opera sobre un rango fijo y puede verse afectado por resonancias no deseadas o por cambios en la impedancia del sistema.

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia no solo el cumplimiento funcional de ambas soluciones, sino también su contribución al logro de los niveles armónicos exigidos por las normativas ARCONEL 009/24 [5] e IEEE 519-2014 [6]. Sin embargo, el filtro activo presenta una ventaja técnica clara para escenarios donde se requiere una respuesta dinámica y eficiente, recomendándose su implementación en zonas críticas con presencia significativa de cargas electrónicas.

#### 5.4.2. Costo de Implementación

En términos económicos, la diferencia de inversión entre el filtro pasivo y el filtro activo tipo PQ resulta considerable, tal como se muestra en la Tabla 5.41. Mientras que ambos sistemas fueron dimensionados para una potencia de 121 kVAr, el filtro activo presenta un costo mayor respecto al filtro pasivo. A pesar de que el filtro activo ofrece una ligera mejora en la reducción de armónicos (38,54 % frente al 37,18 %), este incremento no compensa la diferencia económica. Tal como señalan [24] y [25], los filtros pasivos representan una solución eficiente y económicamente viable en aplicaciones industriales, gracias a su bajo costo de implementación y aceptable desempeño técnico. Por lo tanto, considerando la relación costo-beneficio, el filtro pasivo constituye la alternativa más adecuada para el sistema en análisis.

Tabla 5.41 Comparación de costos entre el filtro pasivo y activo.

Concepto	Filtro Pasivo	Filtro Activo PQ
Costo por kVAr estimado	15 – 25 USD/kVAr	100 – 150 USD/kVAr
Potencia base en estudio	121 kVAr	121 kVAr
Costo estimado total (USD)	1.815 – 3.025 USD	12.100 – 18.150 USD

#### 5.4.3. Beneficio por kWh

Con base en los datos presentados en la Tabla 5.42, se evidencia que el filtro activo reduce con mayor eficacia las pérdidas eléctricas, disminuyendo la potencia de 563 W a 160,63 W, lo que representa una recuperación energética anual de 3524,76 kWh, frente a los 2636,76 kWh logrados con el filtro pasivo. Esta diferencia refleja un incremento del 33,7 % en el ahorro energético por parte del filtro activo. En términos económicos, considerando una tarifa de USD 0,097 por cada kWh determinada en la Regulación ARCONEL 014/2024 [26], el ahorro anual alcanza los 341,90 USD con el filtro activo y 255,77 USD con el filtro pasivo. A pesar de esta diferencia a favor del filtro activo, el filtro pasivo continúa siendo la opción más rentable,

ya que logra una mitigación significativa con una inversión inicial considerablemente menor, lo cual refuerza su mejor relación costo-beneficio en aplicaciones industriales.

Tabla 5.42 Beneficio económico en \$.

Filtro	Potencia de Perdidas (W)		Diferencia (W)	Energía Anual (kWh)	Ahorro Anual (\$)
	Sin filtro	Con filtro			
Pasivo	563	262,00	301,00	2636,76	255,77
Activo	563	160,63	402,37	3524,76	341,90

#### 5.4.4. Comparación Técnica

En la Tabla 5.43, se presenta una comparación general entre las características técnicas del filtro pasivo y del filtro activo tipo PQ (shunt). Se observa que el filtro pasivo destaca por su simplicidad, menor requerimiento de mantenimiento y mayor vida útil, siendo ideal para sistemas con armónicos fijos. En cambio, el filtro activo ofrece una respuesta dinámica y mayor precisión en la mitigación de armónicos, adaptándose mejor a entornos con variabilidad y cargas no lineales, aunque requiere mayor inversión, espacio y mantenimiento [24].

Tabla 5.43 Características de cada uno de los filtros.

Característica	Filtro Pasivo	Filtro Activo tipo P-Q (Shunt)
Espacio físico	Mediano, instalación en panel	Mayor, requiere ventilación y espacio adicional
Mantenimiento	Bajo (revisión periódica de capacitores e inductores)	Alto (monitoreización electrónica, controladores)
Tiempo de respuesta	Fijo, sintonizado a una frecuencia	Dinámico, en tiempo real
Precisión del filtrado	Parcial, solo el orden diseñado	Alta, adaptativo a todos los armónicos
Vida útil	8 – 12 años	5 – 10 años (más mantenimiento)
Ideal para	Sistemas con armónicos fijos y constantes	Sistemas con variaciones, cargas no lineales complejas

#### 5.5. PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA EL FP

El sistema eléctrico bajo análisis presenta un factor de potencia promedio de 0,84, inferior al mínimo exigido por la Regulación ARCONEL 022/24 [23], que establece un valor mínimo de 0,92. Esta condición se mantiene a pesar de la presencia de dos bancos de capacitores, debido a que su operación es manual, es decir, requiere intervención directa de los operarios, lo que impide una compensación reactiva eficiente y oportuna ante las variaciones de carga.

En la Figura 5.35 se presentan los resultados obtenidos mediante simulación del factor de potencia en la barra principal asociada al conductor 151 sin la activación de los bancos de condensadores. Se observa un valor de 0,86, el cual se encuentra muy próximo a los datos

registrados por el analizador de redes, validando así la consistencia del modelo simulado con las condiciones reales del sistema.

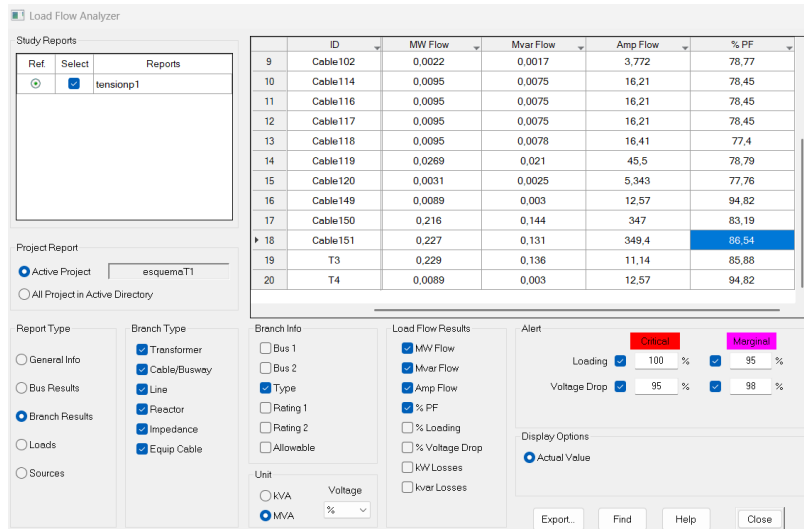


Figura 5.35 Factor de potencia sin activación del banco de condensadores [ETAP].

### 5.5.1. Activación del Banco de Condensadores

En esta simulación se representa la activación manual del banco de condensadores, observándose una mejora significativa en el factor de potencia. Este pasa de un valor inicial de 0,86 a aproximadamente 0,99, como se muestra en la Figura 5.36, lo que evidencia no solo la efectividad del banco en la compensación de potencia reactiva y la estabilización del sistema eléctrico, sino también que su dimensionamiento es adecuado para las condiciones de operación analizadas.

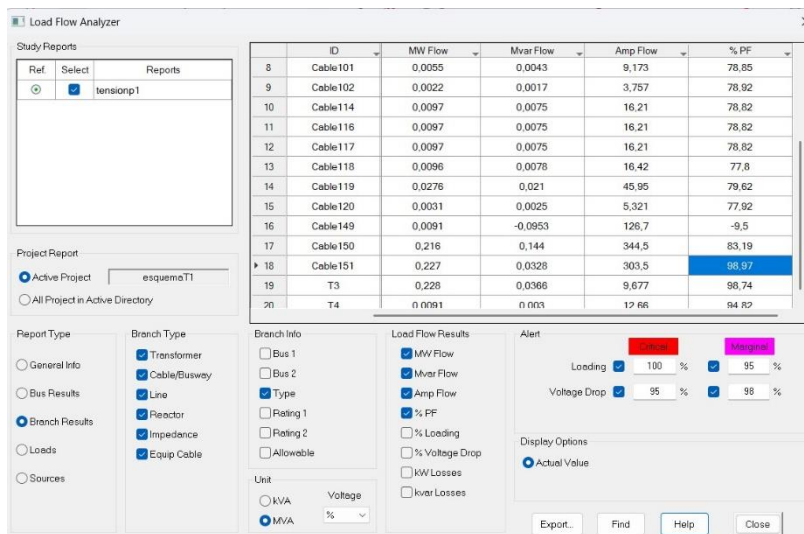


Figura 5.36 Factor de potencia después de la activación del banco de condensadores [ETAP].

Habiendo comprobado que el banco de condensadores está bien dimensionado, se propone Como solución, se propone la implementación de un banco automático de capacitores, el cual permite la conmutación dinámica de escalones en función de la demanda real del sistema. Esta tecnología es capaz de activar o desactivar escalones de capacitores de forma automática, utilizando como referencia parámetros eléctricos como la tensión del bus o el factor de potencia, y de esta manera mantener el sistema dentro de los márgenes normativos.

Diversos estudios técnicos reportan que la implementación de bancos de capacitores automáticos permite elevar el factor de potencia entre 5 y 15 puntos porcentuales, dependiendo del perfil de carga y la correcta configuración de los escalones de compensación. En sistemas similares al analizado, donde el factor de potencia promedio es de 0,84, se espera que con la automatización del sistema de compensación se pueda alcanzar un valor igual o superior a 0,95, cumpliendo ampliamente con la normativa vigente.

Según casos documentados, la implementación de bancos automáticos ha permitido elevar el factor de potencia de 0,79 a 0,95 en sistemas industriales similares [27], logrando una mejora significativa del rendimiento operativo. De igual forma, se ha registrado que este tipo de equipos puede alcanzar valores estables entre 0,95 y 0,99, dependiendo del perfil de carga y el dimensionamiento adecuado del sistema [28]. Además, estos dispositivos aportan beneficios adicionales, como la mejora en la regulación de tensión, la reducción de pérdidas por efecto Joule, y la liberación de capacidad en transformadores y líneas eléctricas.

### **5.5.2. Costo de Automatización del Banco de Condensadores**

Cabe destacar que los bancos de capacitores ya se encuentran físicamente instalados en la planta, por lo que la intervención requerida se limita exclusivamente a su automatización. Este proceso contempla la incorporación de un controlador automático de pasos, sensores de medición y, en caso necesario, la adecuación del tablero de control existente.

Según información técnica proporcionada por fabricantes como [29] y [30], el costo estimado para automatizar un banco de 80 kVAr se encuentra en un rango de 300 a 800 USD, mientras que para un banco de 200 kVAr puede oscilar entre 700 y 1.800 USD, valores que dependen del número de pasos, el tipo de conmutación utilizado y las modificaciones requeridas en el tablero eléctrico.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realizó una revisión del estado del arte sobre calidad de energía, destacando la importancia de controlar armónicos, flickers y desbalances para prevenir daños en equipos. En Ecuador, la normativa ARCONEL 009/24 establece límites clave que guían el análisis y cumplimiento en sistemas eléctricos industriales.
- Las mediciones de voltaje durante siete días mostraron un desvío promedio del 3,39 %, dentro del límite  $\pm 5$  % establecido por ARCONEL 009/24. Durante horas laborales, el desvío se redujo a 1,60 %, y el desequilibrio de voltaje se mantuvo por debajo del 2 %, reflejando una buena estabilidad operativa
- El desequilibrio de corriente superó el límite normativo del 3 %, alcanzando un promedio de 10,78 % en general y 4,77 % en horas laborales. Este fenómeno se atribuye a la influencia de cargas no lineales y a la alta presencia de armónicos de corriente, especialmente el de quinto orden (300 Hz).
- El análisis armónico mostró que el quinto armónico es el más significativo en corriente, con niveles que superan las normativas ARCONEL 009/24 e IEEE 519-2014. La concentración fue mayor en horarios laborales, lo que indica la necesidad de aplicar soluciones en esos periodos críticos.
- La implementación del filtro activo tipo shunt redujo el armónico de quinto orden en un 38,54 %, mejorando la calidad de la corriente. El filtro pasivo también fue efectivo, logrando una atenuación del 37,18% en la barra evaluada, confirmando su utilidad como estrategia de mitigación.
- El filtro pasivo representa la opción más rentable y adecuada para el sistema analizado, ya que, a pesar de su menor precisión frente al filtro activo, ofrece una mitigación armónica aceptable con baja inversión, menor mantenimiento y un ahorro energético proporcionalmente eficiente.
- Se recomienda revisar periódicamente la normativa ARCONEL 009/24 y los estándares internacionales como IEEE 519-2014. Esto permitirá asegurar que el sistema eléctrico se mantenga dentro de los límites técnicos permitidos, fortaleciendo la eficiencia, seguridad y continuidad de la operación industrial.
- Es aconsejable instalar un sistema de monitoreo continuo para registrar armónicos y otros parámetros eléctricos en tiempo real. Este sistema debe enfocar su seguimiento en

el armónico de quinto orden (300 Hz), permitiendo detectar incrementos en la THD y TDD para actuar oportunamente ante cualquier anomalía.

- Debido al desequilibrio de corriente detectado, se sugiere realizar un análisis fasorial completo de la planta. Esto ayudará a identificar si hay concentración de cargas monofásicas en una sola línea, y facilitará una redistribución estratégica que reduzca el desbalance y mejore la simetría del sistema.
- Como propuesta para mejorar el bajo factor de potencia del sistema (0,84), se plantea la implementación de un banco automático de capacitores, que permitiría alcanzar valores superiores a 0,95, adaptándose a la demanda real y aportando beneficios adicionales como mejor regulación de tensión y reducción de pérdidas eléctricas.

## 7. REFERENCIAS

- [1] C. M. Jaigua, “CALIDAD DE ENERGÍA EN LA INDUSTRIA,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, 2003.
- [2] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed.
- [3] H. Rodriguez, P. Sanchez, F. Jurado, and D. Granados, “MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE ENERGÍA REGULABLE,” *Revista Iberoamericana de Ciencias*, vol. 6, Dec. 2019, [Online]. Available: [www.reibci.org](http://www.reibci.org)
- [4] J. M. Camacho, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA INDUSTRIAL INDUCUERDAS,” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, 2015.
- [5] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Regulación Nro. ARCONEL-009/24 ‘Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica,’” Quito, Nov. 2024.
- [6] IEEE Power and Energy Society - Transmission and Distribution Committee, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems - IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014,” New York, Jun. 2014.
- [7] Aglomerados Cotopaxi S.A., “AGLOMERADOS COTOPAXI SEMBRANDO FUTURO - HISTORIA,” Latacunga, May 2015.
- [8] IEEE Power & Energy Society - Transmission and Distribution Committee, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Power & Energy Society - IEEE Std 1159<sup>TM</sup>-2009,” New York, Mar. 2009.
- [9] T. Horsley and J. Seymour, “LOS SIETE TIPOS DE PROBLEMAS EN EL SUMINISTRO ELÉCTRICO,” 2005. [Online]. Available: [www.apc.com](http://www.apc.com)
- [10] M. A. Toledo and C. G. Jiménez, “ANÁLISIS Y PROPUESTAS PARA LA MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ARMÓNICA EN LAS

- SUBESTACIONES DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTROSUR C.A.,” Cuenca, Nov. 2021.
- [11] D. Chapman, “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica - Armónicos Causas y Efectos,” Reino Unido. [Online]. Available: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)
- [12] J. M. Astorga, R. A. Aróstica, and Y. A. Iriarte, “ESTIMACIÓN DEL FACTOR K EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN USANDO MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL,” *Tecnura*, Feb. 2016.
- [13] F. Miyara, *FILTROS ACTIVOS*, 2nd ed. Argentina, 2004. [Online]. Available: <http://www.fceia.unr.edu.ar/>
- [14] A. Gavilanez, “Estudio De La Calidad De Energía En La Línea De Producción De MDF De La Empresa Aglomerados Cotopaxi S.A.,” Latacunga, Aug. 2024.
- [15] P. J. Collaguazo, “ANÁLISIS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN BAJA TENSIÓN (BT) DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CAMPUS SUR USANDO LA CAPTURA DE DATOS EN CAMPO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA,” Quito, Sep. 2020.
- [16] A. Jiménez, J. Cortés, and C. Camargo, “TEORÍA DE CONTROL P-Q PARA UN COMPENSADOR ACTIVO DE ARMÓNICOS IMPLEMENTADA EN UNA FPGA,” *INGENIUM*, Feb. 2012.
- [17] J. Afonso, C. Couto, and J. Martins, “Active Filters with Control Based on the p-q Theory,” *CORE*.
- [18] G. M. Martínez, B. de J. Cruz, J. Garrido, and J. Jiménez, “Análisis de la calidad de energía eléctrica en una subestación de 300 kVA,” *Revista de Operaciones Tecnológicas*, vol. 3, Sep. 2019, doi: 10.35429/jto.2019.11.3.12.20.
- [19] IEEE Industry Applications Society - Power Systems Engineering Committee, “Powering and Grounding Electronic Equipment - IEEE Std 1100™-2005,” New York, Dec. 2005.
- [20] andyka bangun, “Shunt active power filter.” Accessed: Jul. 28, 2025. [Online]. Available: [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44818-shunt-active-power-filter?s\\_tid=srchtitle\\_support\\_results\\_2\\_SHUNT+ACTIVE+FILTER](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44818-shunt-active-power-filter?s_tid=srchtitle_support_results_2_SHUNT+ACTIVE+FILTER)

- [21] L. Casa, “ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE COORDINACIÓN DE PROTECCIONES PARA MEJORAR LA CONTINUIDAD DE SERVICIO EN LA EMPRESA AGLOMERADOS COTOPAXI S.A.,” Latacunga, Aug. 2024.
- [22] M. D. Gallo and J. G. Roto, “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA EMPRESA ‘EMBUTIDOS LA MADRILEÑA,’” Latacunga, Mar. 2022.
- [23] AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD (DIRECCIÓN TÉCNICA DE REGULACIÓN ECONÓMICA Y TARIFAS), “PLIEGO TARIFARIO DEL SERVICIO PÚBLICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA AÑO 2025 RESOLUCIÓN NRO. ARCONEL-022/2024,” Nov. 2024.
- [24] A. Alatrística, “Análisis técnico y económico de alternativas de mitigación de distorsión armónica en la Planta Tintorería y Acabados de Michell S.A.,” Arequipa, 2021.
- [25] S. A. Ladino Serrano, J. L. Paternina Durán, J. Vitola Oyaga, and C. A. Torres Pinzón, “Evaluación de filtros pasivos para la gestión de armónicos en redes industriales de distribución eléctrica,” *TecnoLógicas*, vol. 26, no. 58, p. e2839, Dec. 2023, doi: 10.22430/22565337.2839.
- [26] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “RESOLUCION Nro.ARCONEL-014-2024,” Quito, Oct. 2024.
- [27] powerside, “Reshaping Capacitor Bank Function to Correct Low Power Factor,” 2021.
- [28] Artek Surfin Chemicals Ltd, “A Case Study on Power Factor Improvement at Artek Surfin Chemicals Ltd by Installing Automatic Power Factor Correction Panel.” Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.netlabindia.com/resources/case-studies/energy-and-power-cases/a-case-study-on-power-factor-improvement-at-artek-surfin-chemicals-ltd-by-installing-automatic-power-factor-correction-panel/>
- [29] LOVATO electric, “ROTARY CAM SWITCHES AND SWITCH DISCONNECTORS THE CUSTOMIZED SOLUTION FOR EVERY APPLICATION.” Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: [https://www.lovatoelectric.com/gl\\_en/](https://www.lovatoelectric.com/gl_en/)

- [30] Schneider Electric, “Schneider Electric.” Accessed: Aug. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.se.com/ww/en/>
- [31] Comité Europeo de Normalización Electrotécnica, “Norma Europea EN 61000-4-15,” Apr. 1999.
- [32] R. P. Moreno, “APLICACION DE LA REGULACIÓN NRO. ARCERNNR - 002/20 PARA LA CALIDAD DEL SERVICIO TÉCNICO EN CNEL SANTA ELENA,” La Libertad, Feb. 2022.
- [33] L. Visarrea, “Análisis de calidad de energía eléctrica en la Empresa textil Etiquetex S.A. ubicada en el cantón Quito, mediante la REGULACIÓN ARCERNNR 002/20.,” Latacunga, Feb. 2022.
- [34] D. Ramírez and C. Tumbaco, “ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LOS EDIFICIOS UTILIZADOS POR EL HOSPITAL LEÓN BECERRA,” Oct. 2010.

## 8. ANEXOS

### ANEXO A

Clasificación y Características de las perturbaciones según la IEEE 1159-2009 [8].

Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud De Voltaje Típica	
<b>Transitorios</b>	Impulsivo			
	Nanosegundo	5 ns de subida	< 50 ns	
	Microsegundo	1 us de subida	50 ns - 1 ms	
	Milisegundo	0,1 ms de subida	> 1 ms	
	Oscilatorio			
	Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0-4 p.u.
	Mediana frecuencia	5-500 kHz	20 us	o.a p.u.
	Alta frecuencia	0.5-S MHz	5 us	0-4 p.u.
<b>Variaciones de corta duración</b>	Instantáneas			
	Sag		0,5-30 ciclos	0,1-0,9 p.u.
	Swell		0,5-30 ciclos	1,1-1,8 p.u.
	Momentarias			
	Interrupción		0.5 ciclos 3 s	<0,1p.u.
	Sag		0.5 ciclos 3 s	0,1-0,9 p.u.
	Swell		0.5 ciclos 3 s	1,1-1,4 p.u.
	Temporales			
	Interrupción		3 s - 1 min	< 0,1p.u.
	Sag		3 s - 1 min	0,1-0,9 p.u.
	Swell		3 s - 1 min	1,1-1,2 p.u.
<b>Variaciones de larga duración</b>	Interrupción sostenida		> 1 min	0,0 p.u.
	Subvoltajes		> 1 min	0,8-0,9 p.u.
	Sobrevoltajes		> 1 min	1,1-1,2 p.u.
<b>Desbalance</b>	Voltaje		Estado estable	0,5-2%
	Corriente		Estado estable	1,0-30%
<b>Distorsión de forma de onda</b>	DC Offset		Estado estable	0-0,1%
	Armónicos	0-100 <sup>avo</sup> H	Estado estable	0-20%
	Inter-armónicos	0 6 kHz	Estado estable	0-2%
	Muecas (notching)		Estado estable	
	Ruido	Ancho de banda	Estado estable	0-1%
<b>Fluctuaciones de voltaje</b>		< 25Hz	Intermitente	0,1-7%
<b>Variaciones de frecuencia</b>			< 10 s	

## ANEXO B

Cuadro comparativo de normas internacionales.

Referencia	Normativa	Ventajas	Características
[8]	IEEE 1159-2009	<p>Ofrece una guía de como tener una buena distribución de cargas, evitando sobrecargas. Sugiere como y donde ubicar instrumentos de medida para el análisis del sistema eléctrico. Pone a disposición una serie de ejemplos basado en casos reales ya sea por aumentos de cargas o fallas en los equipos.</p> <p>Presenta formulas bajo las cuales se puede determinar la incidencia de los distintos tipos de variación de onda.</p> <p>Brinda una serie de técnicas de aplicación que reducen los riesgos de seguridad y permiten una mejor recopilación de fenómenos electromagnéticos.</p>	<p>Presenta una guía de cómo monitorear los sistemas de energía, destacando qué fenómenos pueden alterar su funcionamiento y cómo identificarlos, así como las variaciones que pueden surgir debido a fallas o interacción entre los equipos conectados al sistema.</p> <p>También describe las herramientas y técnicas para medir la calidad de la energía y cómo entender los datos obtenidos.</p>
[6]	IEEE 519-2014	<p>Presenta una guía completa de armónicos y límites de distorsión recomendados. Recomienda intervalos de evaluación y medición bajo los cuales se contempla la situación del sistema eléctrico.</p> <p>Ofrece una serie de recomendaciones para aumentar los límites de corriente armónica. Su base de estudio se extiende a los interarmónicos y muescas que también son parte del estudio de perturbaciones eléctricas.</p>	<p>Establece lineamientos para diseñar sistemas eléctricos con cargas lineales y no lineales, describiendo las formas de onda de voltaje y corriente, así como sus posibles distorsiones. Se destaca la interacción de las fuentes y las cargas, y cómo cumplir con los objetivos de diseño para minimizar la interferencia entre los equipos eléctricos.</p>
[31]	EN 61000-4-15	<p>Establece estándares de respuesta normalizados para fluctuaciones de tensión (Flickers).</p> <p>Explica mediante un diagrama funcional el proceso de respuesta del medidor de flicker.</p> <p>Ofrece una serie de técnicas para la mejora de la precisión de medición de flickers.</p> <p>Cita un conjunto de normas relacionadas con ensayos para el estudio más a fondo de perturbaciones en sistemas eléctricos.</p>	<p>Esta sección de la norma CEI 61000-4 proporciona directrices para el diseño de equipos de medición de flicker, que permiten evaluar de forma precisa las fluctuaciones de tensión que ocurren en la práctica.</p> <p>Su propósito es ofrecer las bases necesarias para construir medidores de flicker, tanto analógicos como digitales, pero no establece límites de tolerancia.</p>

## ANEXO C

Empresas donde existen estudios de calidad.

Item	Nombre	Referencia	Observaciones
1	CNEL Santa Elena	[32]	CNEL Santa Elena presenta sanciones por el incumplimiento de las regulaciones establecida por la normativa ARCERNNR 002/20, para lo cual los autores del trabajo sugieren realizar un informe de las condiciones técnicas y operativas actuales de la empresa mediante encuestas dirigidas a los usuarios de la institución.
2	Empresa Textil Etiquetex S.A.	[33]	En esta empresa se identificaron problemas generales en el suministro de energía eléctrica, lo que ha conducido a paradas forzadas e inesperadas de los equipos que son empleados en el área textil, lo que genera pérdidas significantes tanto técnicas como económicas. Conforme a este hecho, los autores plantean un diagnóstico y rediseño de las instalaciones eléctricas mediante softwares especializados.
3	Hospital León Becerra	[34]	El hospital en estudio presenta un bajo factor de potencia, a más de que existe la influencia de la corriente del neutro entre los transformadores de la institución que provoca perturbaciones en el sistema eléctrico. Dado el caso los autores proponen un balance de cargas, así como la implementación de capacitores en paralelo a cada una de las impedancias de carga, es decir un banco de capacitores.

## ANEXO D

Cargas conectadas al transformador 1200 kVA.

N°	Maquina	Proceso	Potencia (kW)	FP	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)
1	Sierra 1	Mebor	75	0,89	440	112	3570
2	Sierra 2	Mebor	75	0,89	440	112	3570
3	Sierra 3	Mebor	75	0,89	440	112	3570
4	Sierra 4	Mebor	75	0,89	440	112	3570
5	Rodillos de salida 1	Mebor	1,119	0,76	440	2,1	1760
6	Rodillos de salida 2	Mebor	1,119	0,76	440	2,1	1760
7	Rodillos de salida 3	Mebor	1,119	0,76	440	2,1	1760
8	Rodillos de salida 4	Mebor	1,119	0,76	440	2,1	1760
9	Cadena	Mebor	7,5	0,81	440	12,7	1770
	<b>CARGA TOTAL</b>		311,98				

## ANEXO E

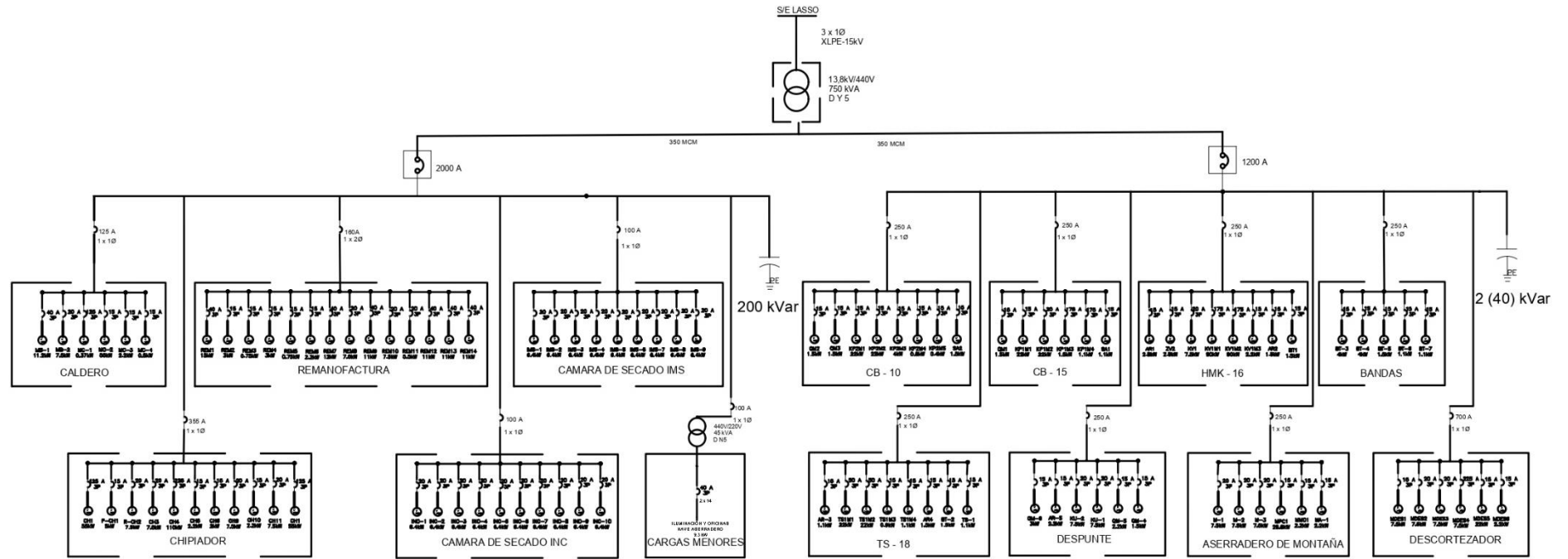
Cargas conectadas al transformador 750 kVA.

Nº	Maquina	Proceso	Potencia (kW)	FP	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (RPM)
1	Cadena Sur	Cb-10	1,5	0,79	440	2,3	1720
2	Cadena Norte	Cb-10	1,5	0,79	440	2,3	1720
3	Sierra norte Izquierda	Cb-10	22	0,91	440	34	3490
4	Sierra Sur Derecha	Cb-10	22	0,91	440	34	3490
5	Accionamiento de Rodillos	Cb-10	4	0,81	440	6,2	1780
6	Apertura de Sierras	Cb-10	0,8	0,75	440	1,2	1680
7	Regulación de Rodillos	Cb-10	0,4	0,75	440	0,6	1680
8	Banda Pequeña de Salida	Cb-10	1,5	0,79	440	2,3	1720
9	Cadena de Avance	Cb-15	1,5	0,79	440	2,3	1720
10	Sierra Izquierda	Cb-15	22	0,91	440	34	3520
11	Sierra Derecha	Cb-15	22	0,91	440	34	3520
12	Cadena Transportadora interna	Cb-15	1,5	0,79	440	2,3	1720
13	Apertura de Sierras	Cb-15	1,1	0,77	440	1,7	1700
14	Banda Pequeña de salida	Cb-15	1,1	0,77	440	1,7	1700
15	Rodillo Entrada	Hmk-16	2,8	0,79	440	4,3	1730
16	Rodillo de Presión	Hmk-16	2,8	0,79	440	4,3	1730
17	Bomba Hidráulica	Hmk-16	7,5	0,82	440	11,6	1760
18	Cierra Superior	Hmk-16	90	0,92	440	139,1	3560
19	Cierra Inferior	Hmk-16	90	0,92	440	139,1	3560
20	Rodillo de Salida	Hmk-16	2,2	0,84	440	3,4	870
21	Rodillos Accionados	Hmk-16	1,5	0,79	440	2,3	1720
22	Banda hacia cadena despuntadora	Hmk-16	1,5	0,79	440	2,3	1720
23	Banda Principal	Bandas	4	0,82	440	27,5	1720
24	Banda Principal	Bandas	4	0,86	440	27,5	1720
25	Banda Despuntadora	Bandas	1,5	0,79	440	2,3	1720
26	Banda Pequeña CB-10	Bandas	1,1	0,77	440	1,7	1700
27	Banda Despuntadora	Bandas	1,1	0,77	440	1,7	1700
28	Rodillo entrada	Ts-18	1,1	0,86	440	1,7	1700
29	Sierra Superior	Ts-18	22	0,89	440	34	3540
30	Sierra Inferior	Ts-18	22	0,89	440	34	3490
31	Rodillo de entrada	Ts-18	0,9	0,8	440	1,4	1730
32	Rodillo de salida	Ts-18	1,1	0,86	440	1,7	1730
33	Rodillo Salida	Ts-18	1,5	0,79	440	2,3	1720
34	Banda de Salida	Ts-18	1,5	0,79	440	2,3	1720
35	Rodillo de entrada	Ts-18	1,1	0,86	440	1,7	1700
36	Motor bomba de agua 1	Caldero	11,2	0,82	440	21,6	1755
37	Motor bomba de agua 2	Caldero	7,5	0,87	440	13,5	1750
38	Motor esclusa	Caldero	0,37	0,72	440	1,09	1380
39	Motor ventilador principal	Caldero	55	0,8	440	100	1770
40	Motor banda	Caldero	2,2	0,84	440	3,4	1700
41	Motor bomba químicos	Caldero	0,5	0,84	110	0,79	1700
42	Motor mesa principal	Chipiador	5	0,79	440	9,8	1720
43	Motor rodillo adelante	Chipiador	7,5	0,79	440	9,8	1720
44	Motor rodillo atrás	Chipiador	7,5	0,79	440	9,8	1720
45	Motor principal chipeador	Chipiador	110	0,86	440	180	1785
46	Motor banda pequeña	Chipiador	2,2	0,79	440	9,8	1760
47	Motor criba(2)	Chipiador	2	0,79	440	9,8	1760
48	Motor aspiración chip	Chipiador	55	0,84	440	91,8	1780
49	Motor aspiración aserrín	Chipiador	55	0,83	440	93	1781

50	Motor banda chips	Chipiador	7,5	0,83	440	9,8	1781
51	Motor banda silo abierto	Chipiador	2,2	0,83	440	9,8	1781
52	Motor banda larga	Chipiador	7,5	0,83	440	9,8	1781
53	Motor horquilladora	Remanufactura	15	0,84	440	28,4	1750
54	Motor biseladora 1	Remanufactura	3	0,87	440	6,38	1750
55	Motor cadena biseladora 1	Remanufactura	0,75	0,79	440	1,51	68
56	Motor biseladora 2	Remanufactura	3	0,87	440	6,38	1750
57	Motor cadena biseladora 2	Remanufactura	0,75	0,79	440	1,51	68
58	Motor biseladora 3	Remanufactura	2,2	0,84	440	3,4	1700
59	Motor cierra de bancos	Remanufactura	12	0,83	440	19,7	1755
60	Motor cepilladora cierra	Remanufactura	7,5	0,88	440	12,8	3495
61	Motor cepilladora rodillos	Remanufactura	11	0,83	440	19	1760
62	Motor cepilladora cuchilla	Remanufactura	7,5	0,87	440	12,8	3495
63	Motor cortador tacos	Remanufactura	5,5	0,86	440	8,5	1750
64	Motor astilladora cierra inferior	Remanufactura	11	0,85	440	18,7	1760
65	Motor astilladora cierra superior	Remanufactura	11	0,85	440	18,7	1760
66	Motor shengong cierra	Remanufactura	11	0,89	440	17,8	3534
67	Motor mesa 1	Descortesador	7,5	0,82	440	13,4	1755
68	Motor cadena inclinada	Descortesador	7,5	0,82	440	7,5	1755
69	Motor mesa2	Descortesador	7,5	0,85	440	13	1730
70	Motor rodillos de coche	Descortesador	7,5	0,86	440	10,1	1745
71	Motor principal	Descortesador	22	0,84	440	26	1760
72	Motor banda	Descortesador	2,2	0,86	440	3,6	1746
73	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
74	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
75	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
76	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
77	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
78	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
79	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
80	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
81	Motor IMS	Camara de secado IMS	6,4	0,93	440	11,287	1750
82	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
83	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
84	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
85	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
86	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
87	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
88	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
89	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750

90	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
91	Motor INC	Camara de secado INC	6,4	0,93	440	11,287	1750
92	Motor orquilladora	Despunte	3	0,84	440	5,858	1750
93	Motor viceladora 1	Despunte	2,2	0,87	440	4,148	1750
94	Motor cadena viceladora 1	Despunte	7,5	0,79	440	15,572	68
95	Motor viceladora 2	Despunte	7,5	0,87	440	14,140	1750
96	Motor cadena viceladora 2	Despunte	1,5	0,79	440	3,114	68
97	Motor viceladora 3	Despunte	2,2	0,84	440	4,296	1700
98	Cadena sur	Aserradero de Montaña	7,5	0,79	440	15,572	1720
99	Cadena norte	Aserradero de Montaña	7,5	0,79	440	15,572	1720
100	Sierra norte izquierda	Aserradero de Montaña	7,5	0,91	440	13,518	3490
101	Sierra sur derecha	Aserradero de Montaña	29,6	0,91	440	53,352	3490
102	Accionamineto de rodillos	Aserradero de Montaña	2,2	0,81	440	4,455	1780
103	Apertura de sierras	Aserradero de Montaña	2,2	0,75	440	4,811	1680
	<b>CARGA TOTAL</b>		<b>1059,67</b>				

# ANEXO F

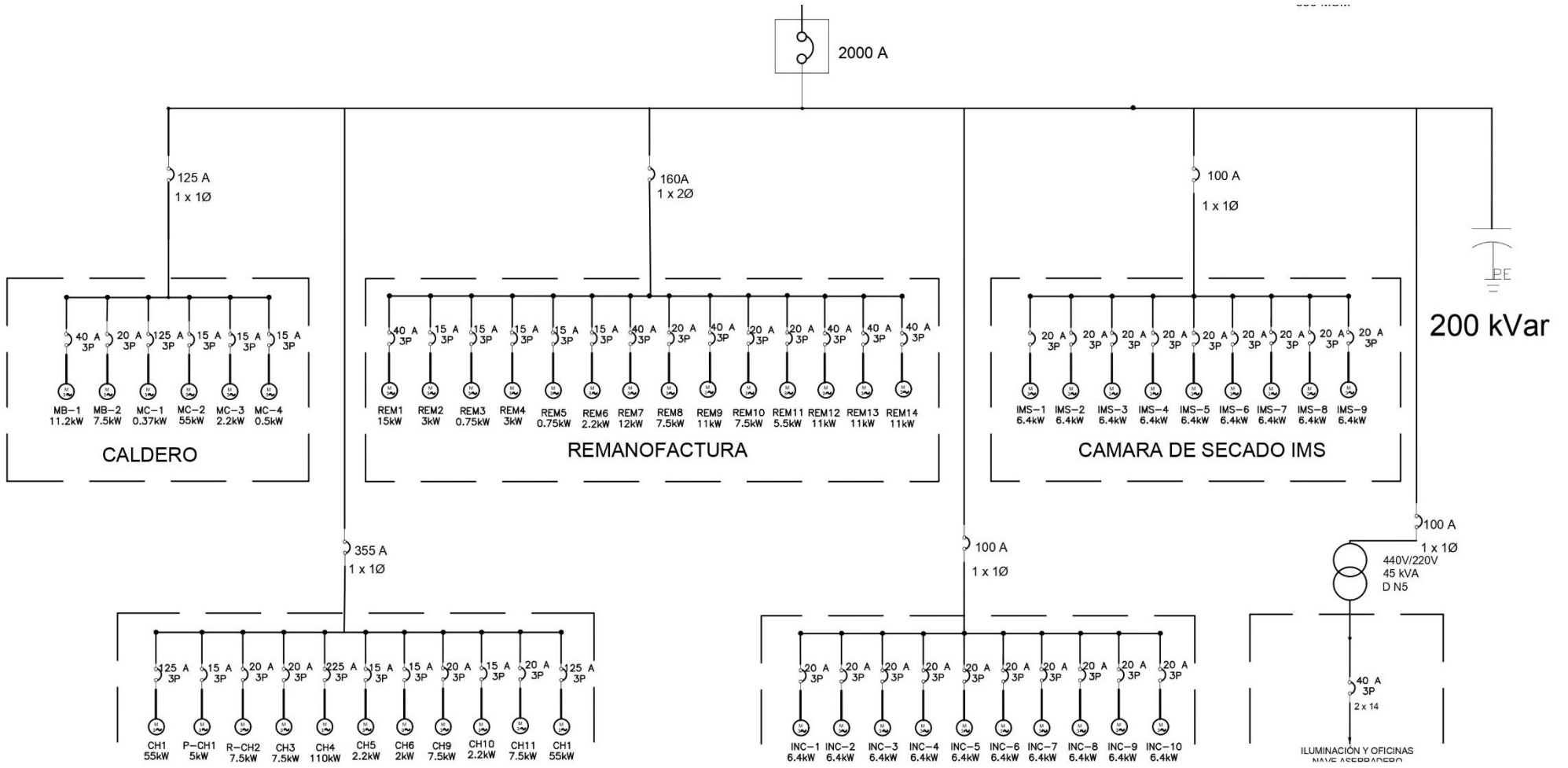


CUADRO DE DETALLE

	PORTAFUSIBLES
	TRANSFORMADOR
	CONDENSADORES
	MOTOR TRIFASICO

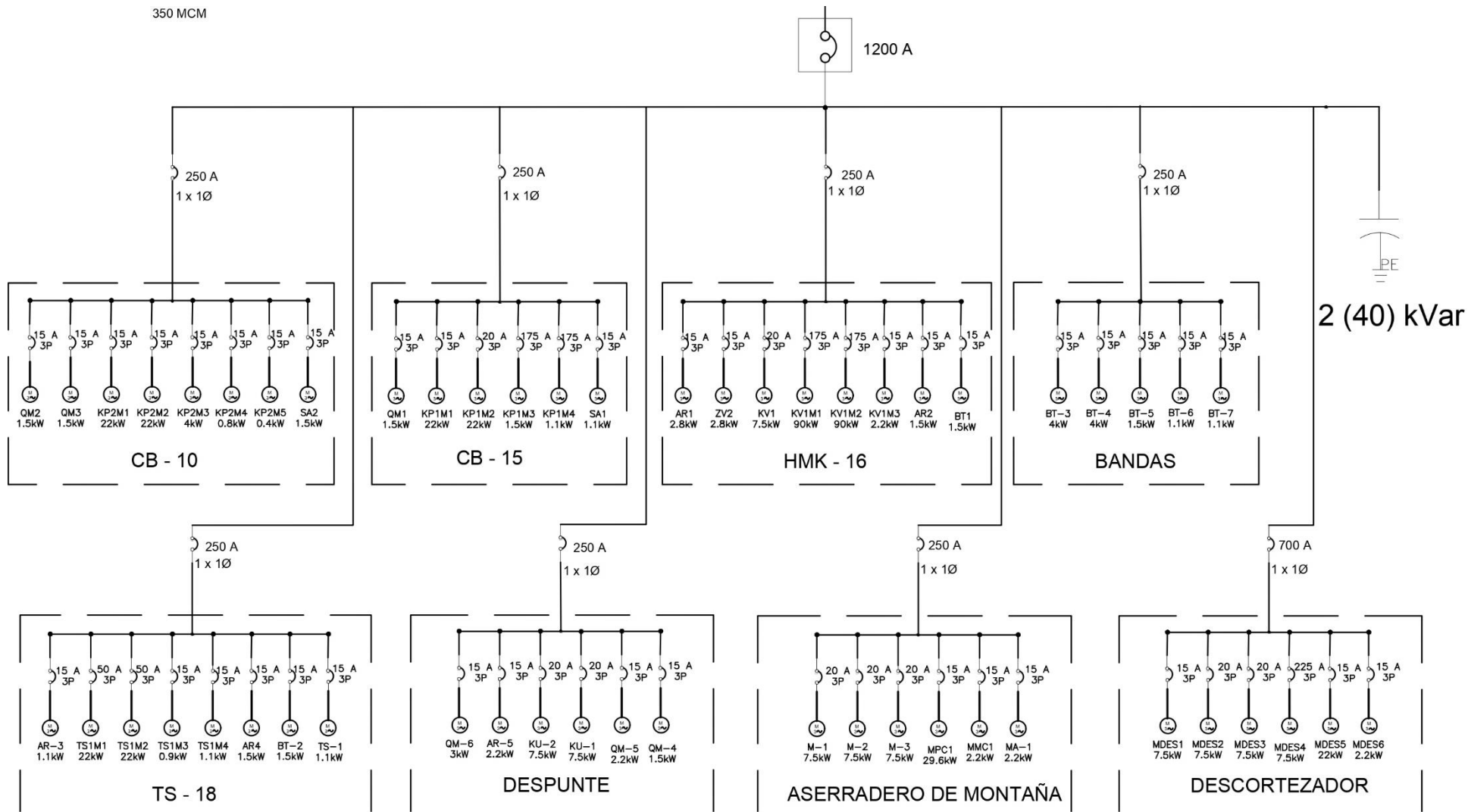
Esquema Unifilar Área de Aserradero.

- Primera Parte

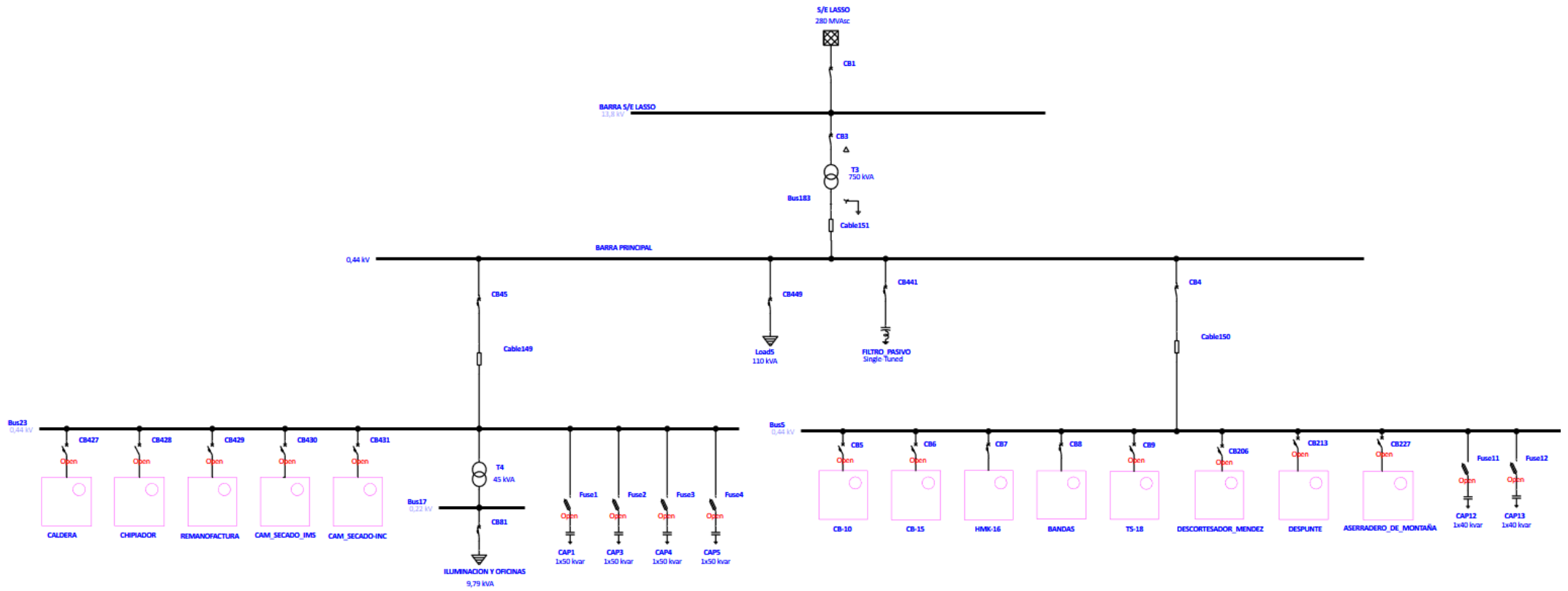


• Segunda Parte

350 MCM

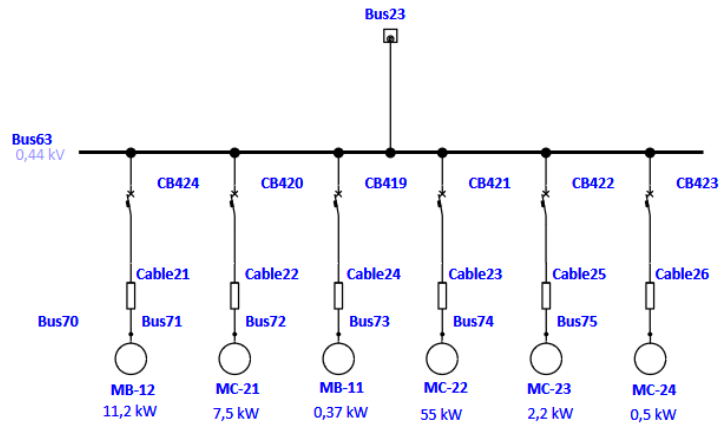


# ANEXO G

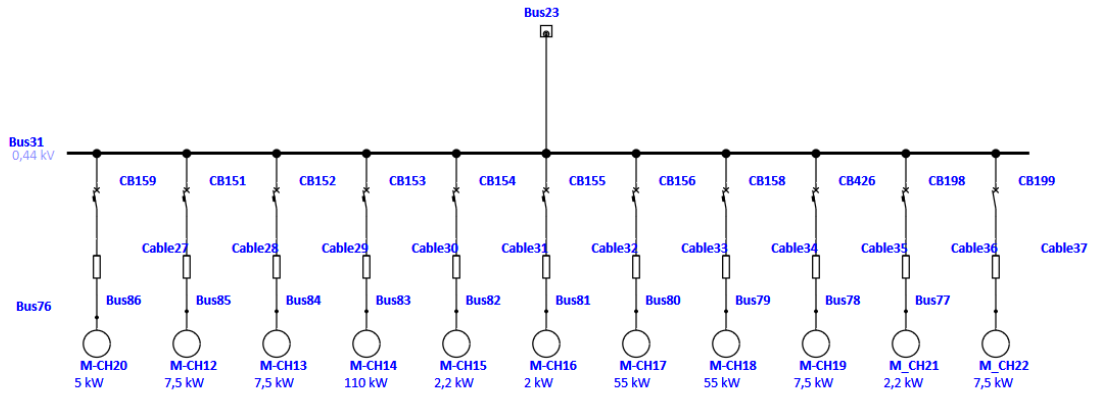


Simulación Diagrama Unifilar del Área de Aserradero en ETAP.

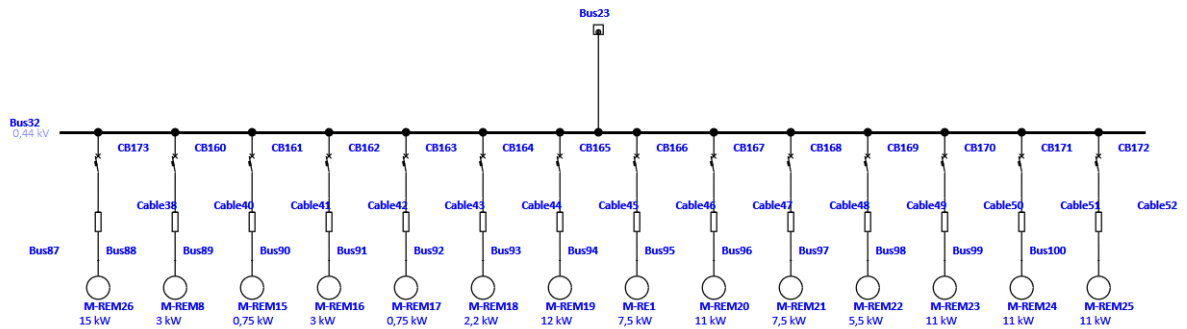
- Caldera



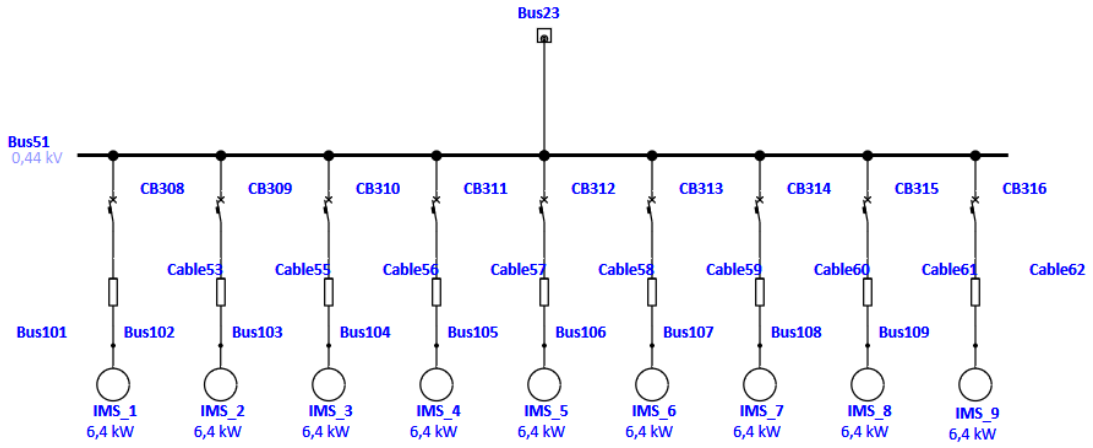
- Chipiador



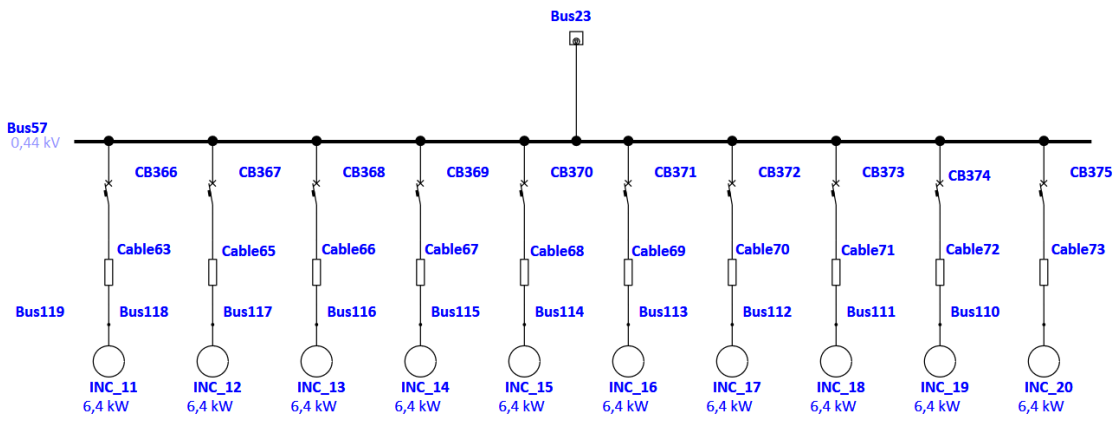
- Remanufacturra



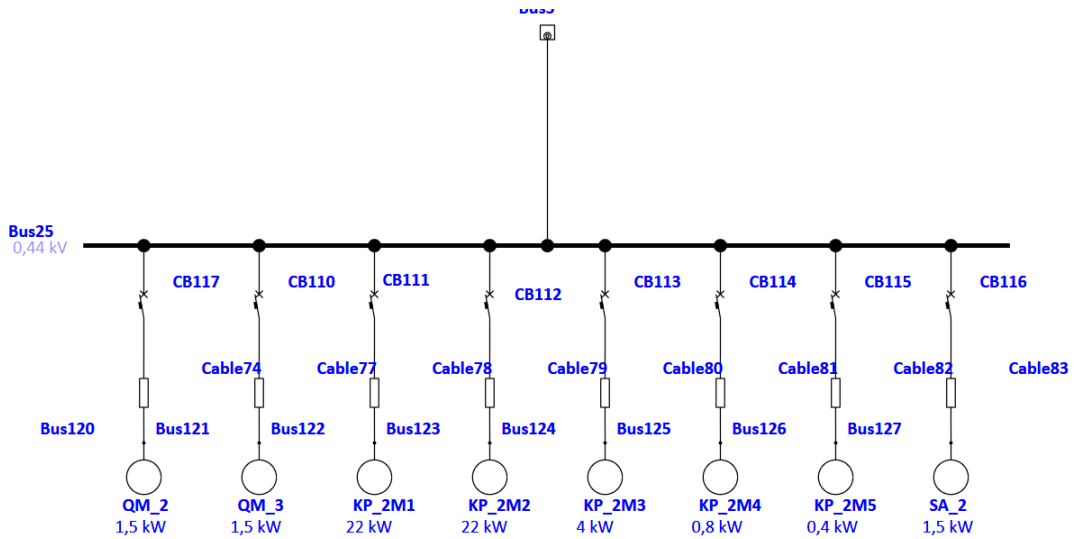
- Cámara de secado IMS



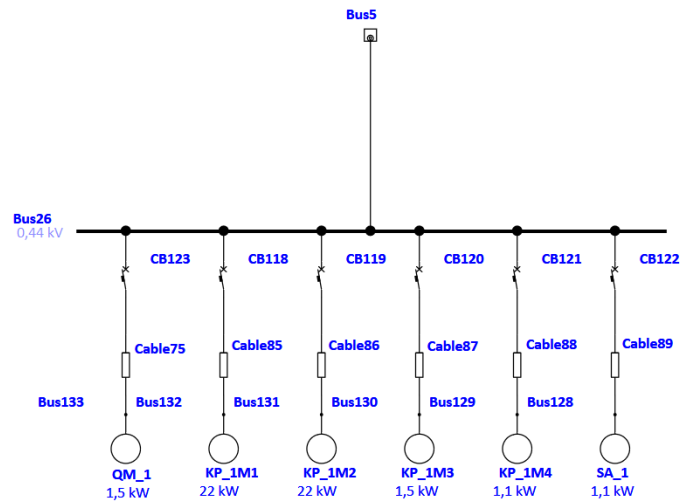
- Cámara de secado INC



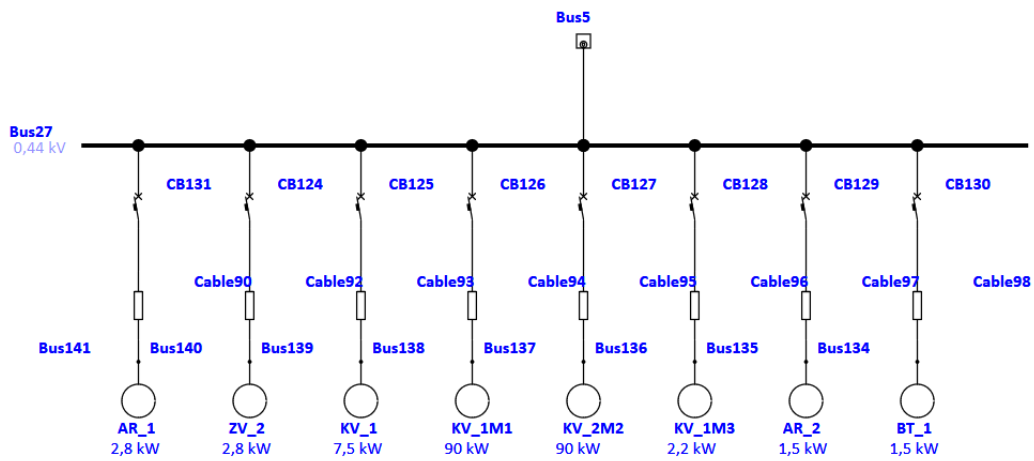
- CB-10



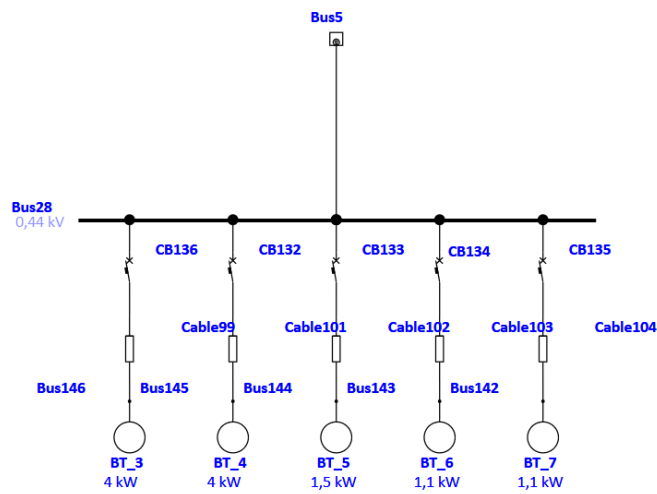
- CB-15



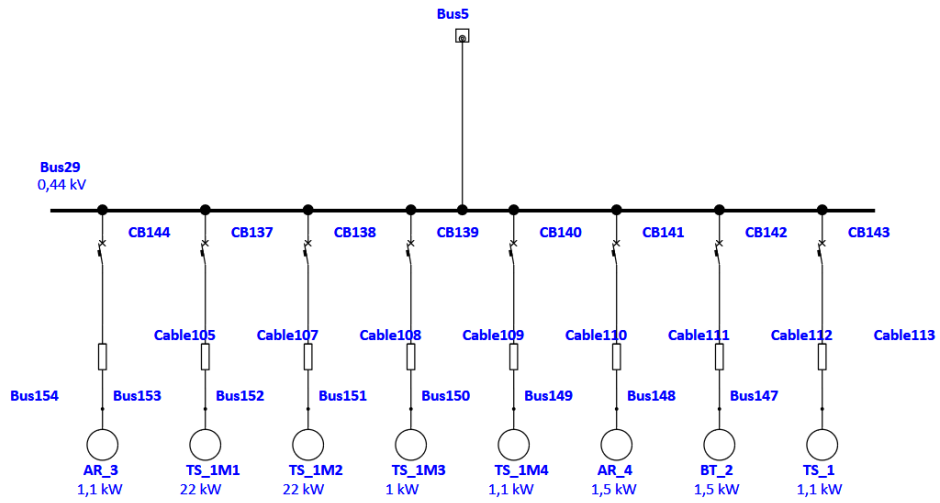
- HMK-16



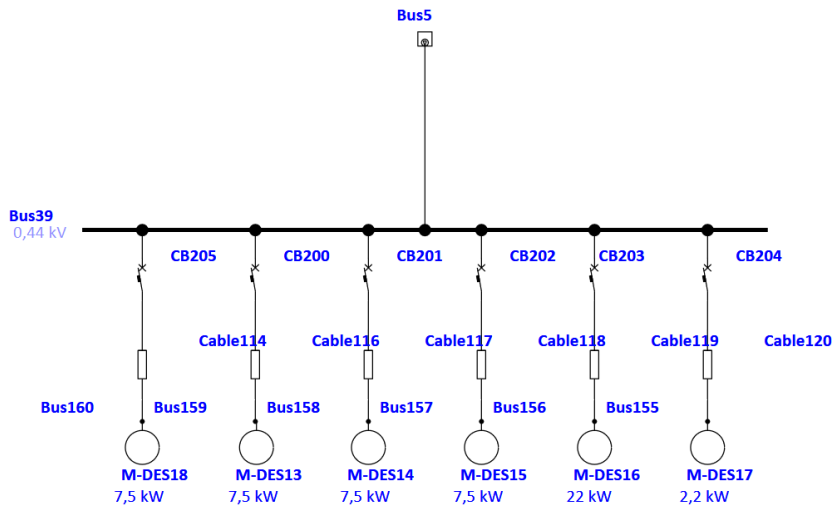
- Bandas



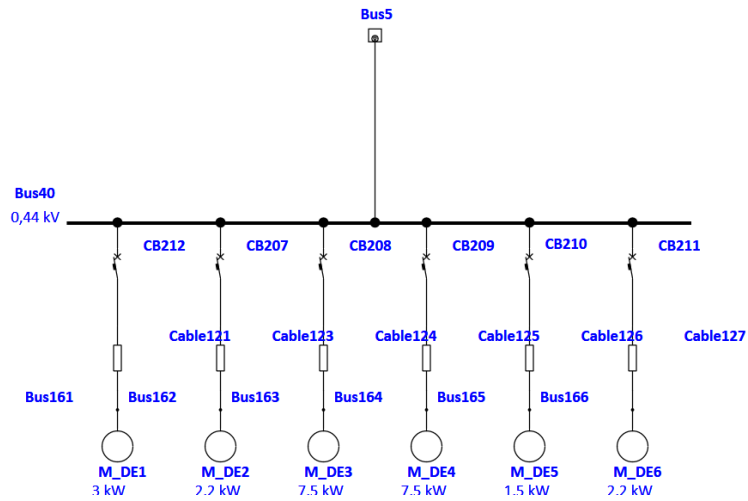
- TS-18



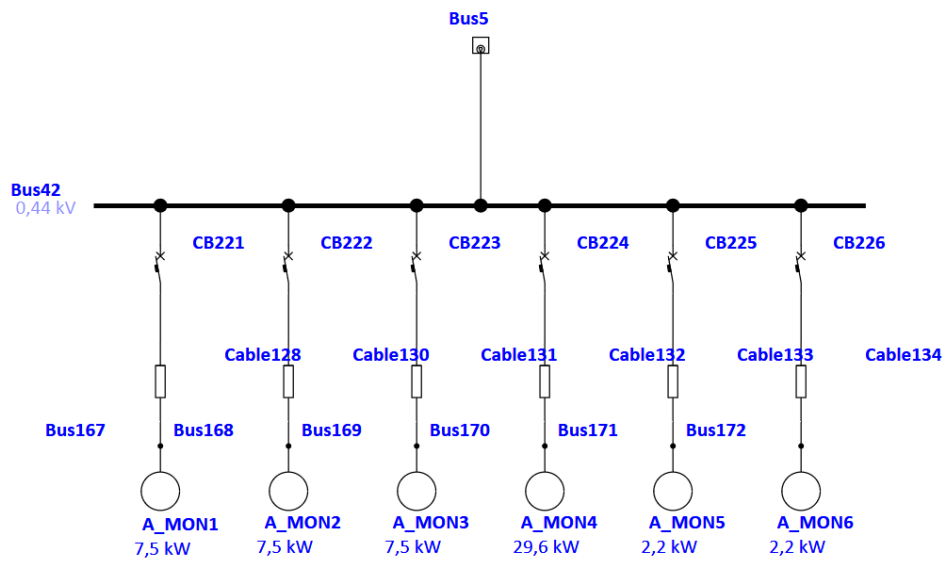
- Descortezador Mendez



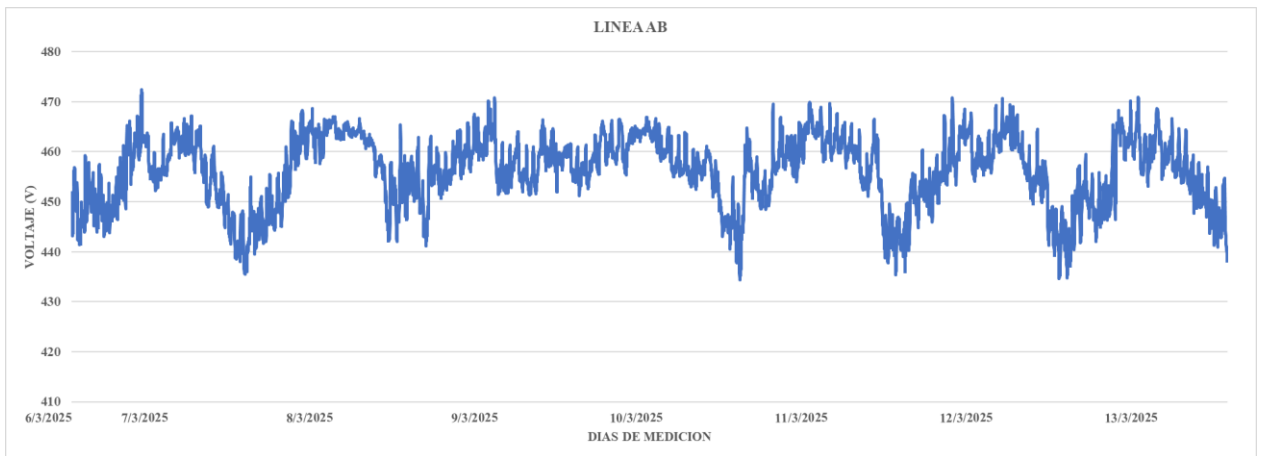
- Despunte



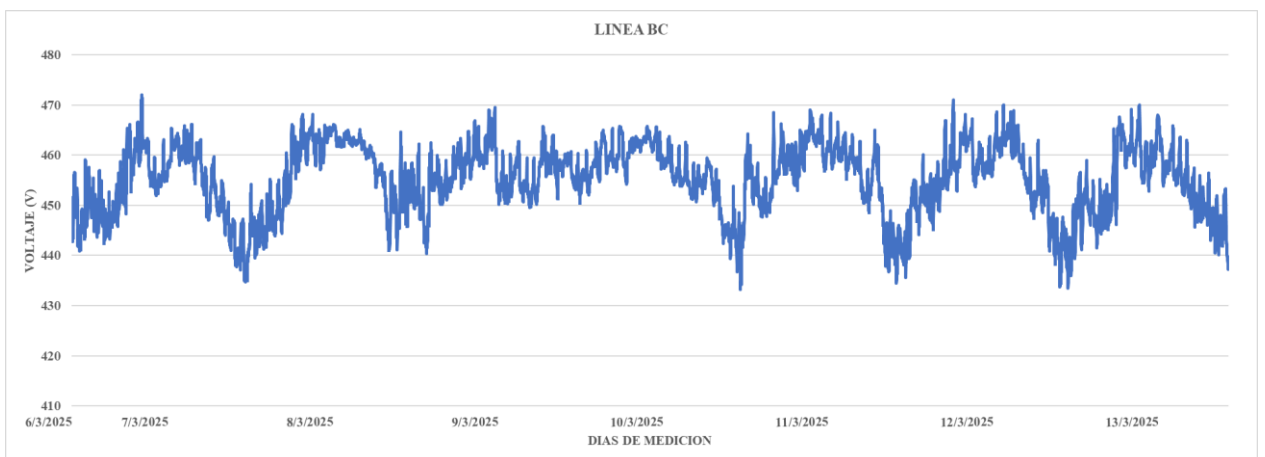
- Aserradero de Montaña



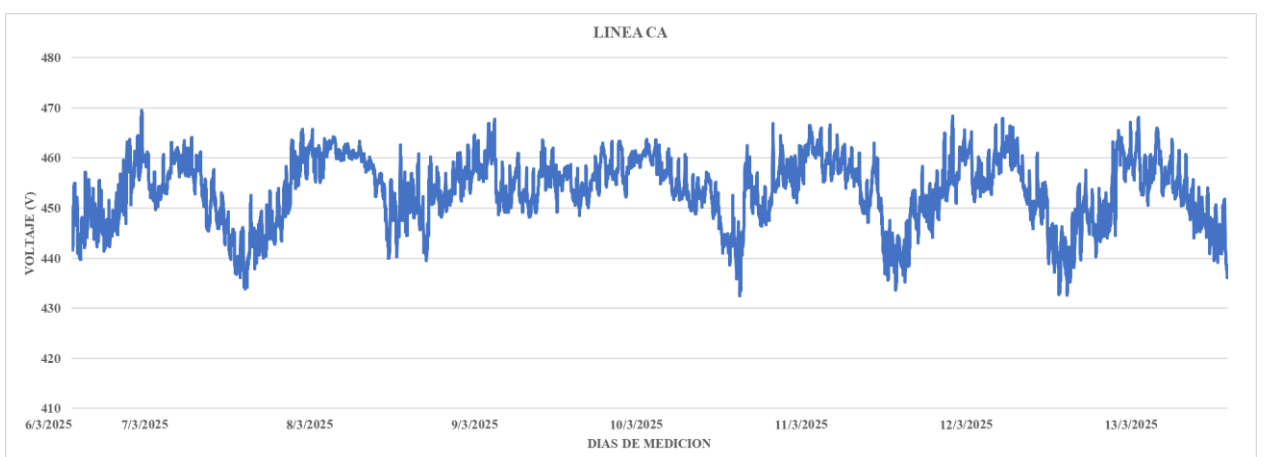
## ANEXO H



Voltaje RMS Línea AB.

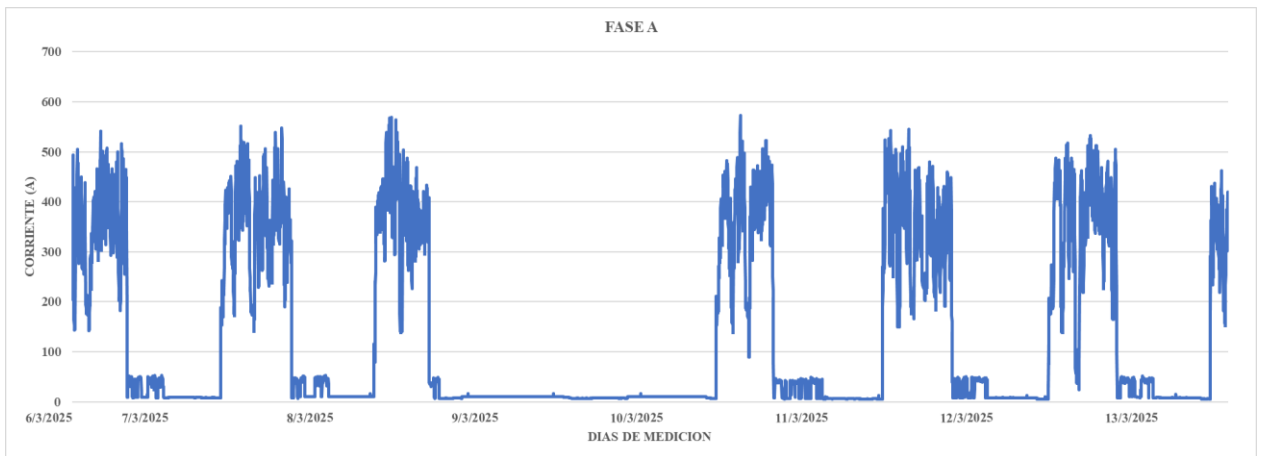


Voltaje RMS Línea BC

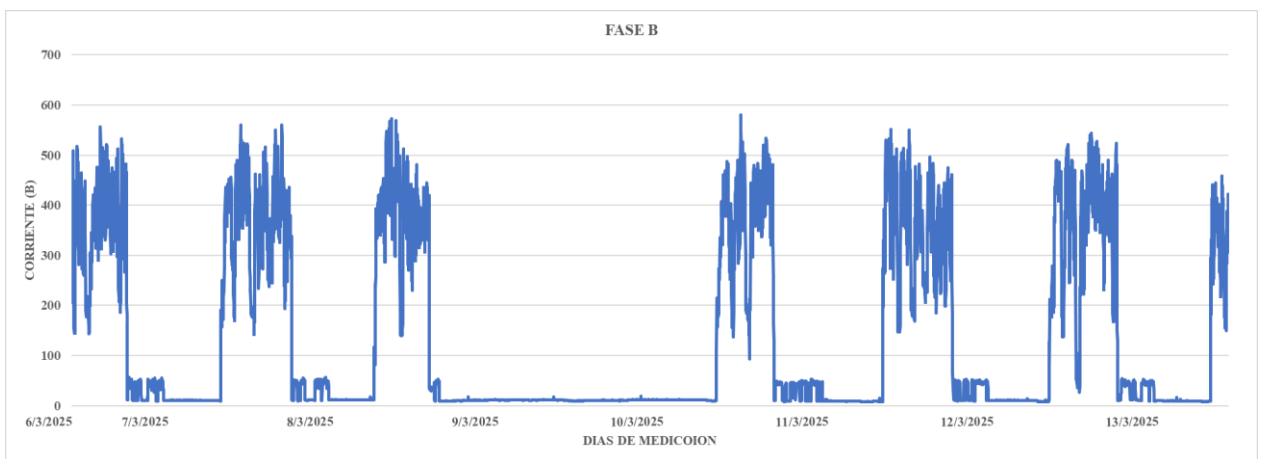


Voltaje RMS Línea CA

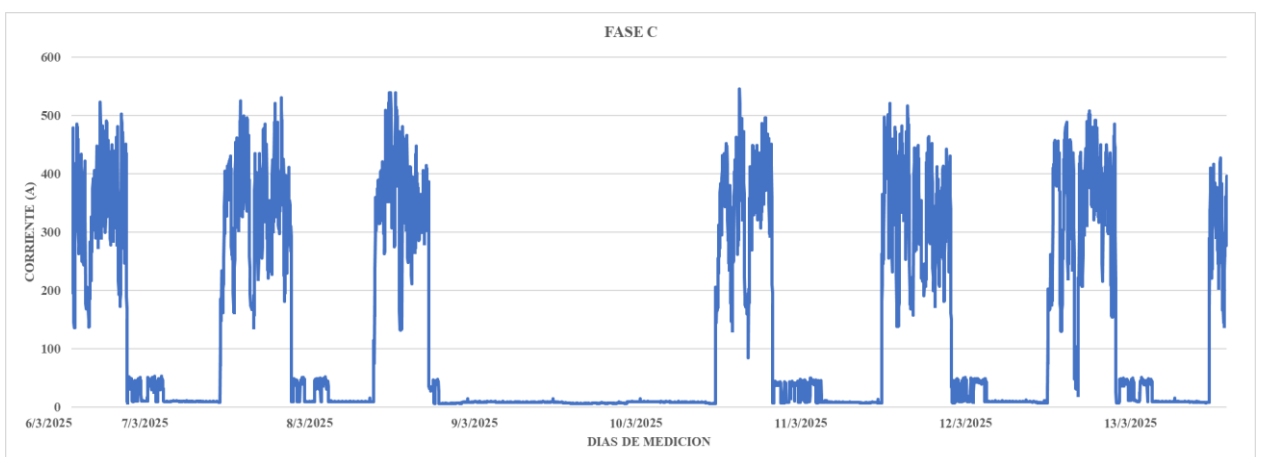
# ANEXO I



Corriente RMS Línea A.

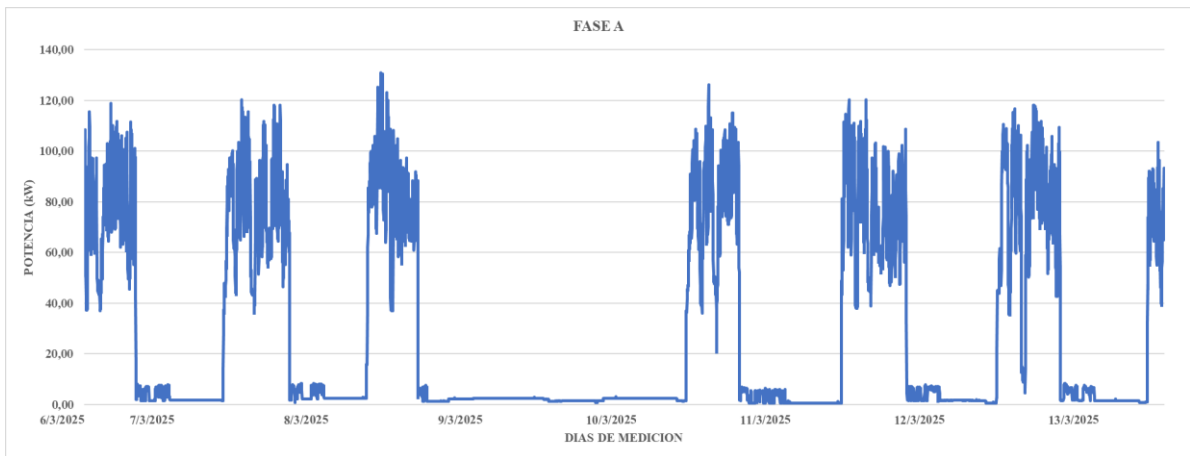


Corriente RMS Línea B.

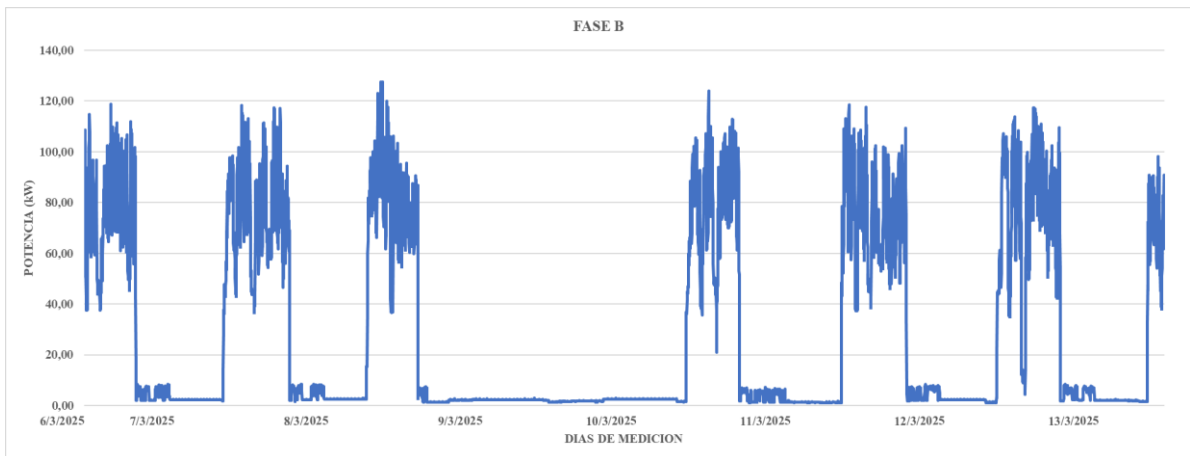


Corriente RMS Línea C.

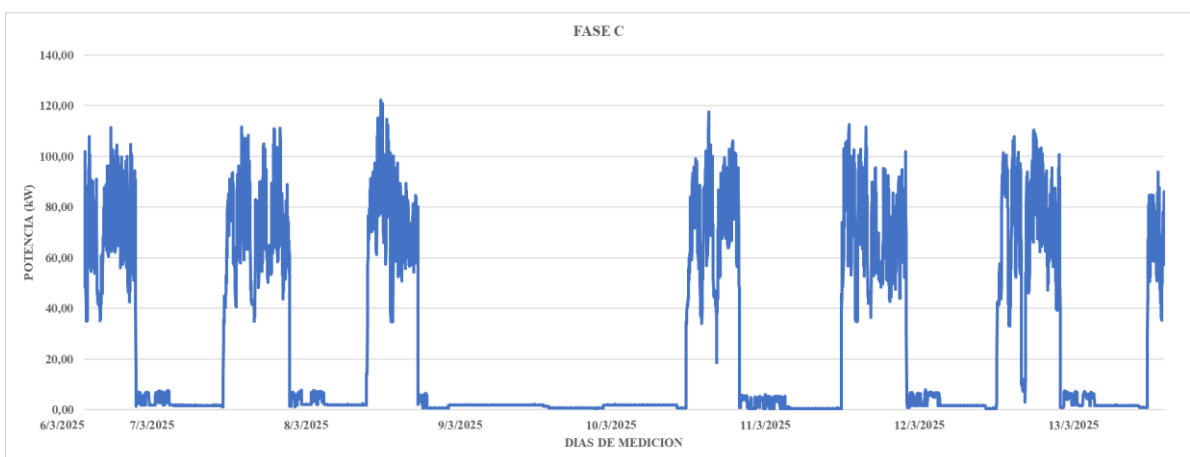
## ANEXO J



Potencia Activa Línea A.

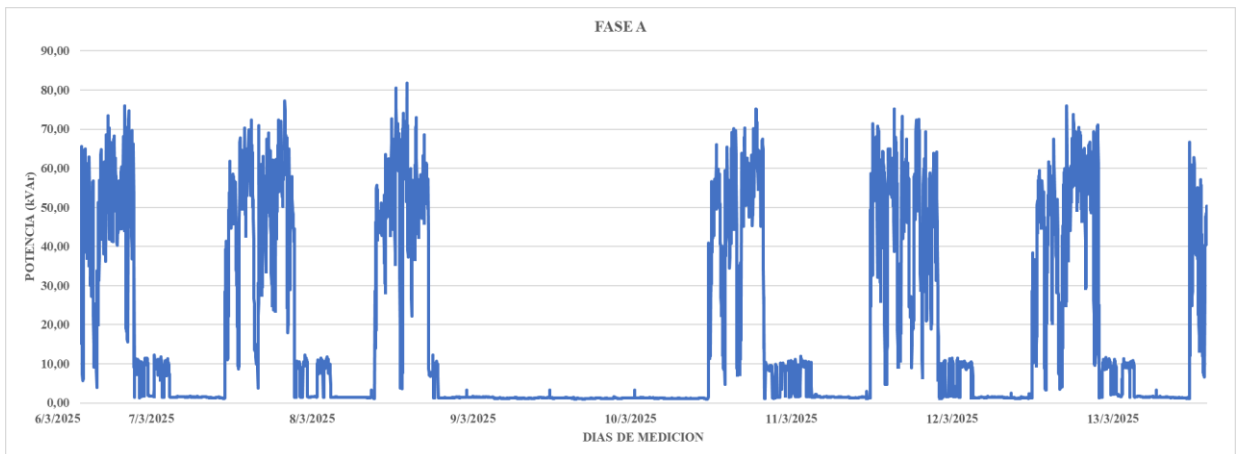


Potencia Activa Línea B.

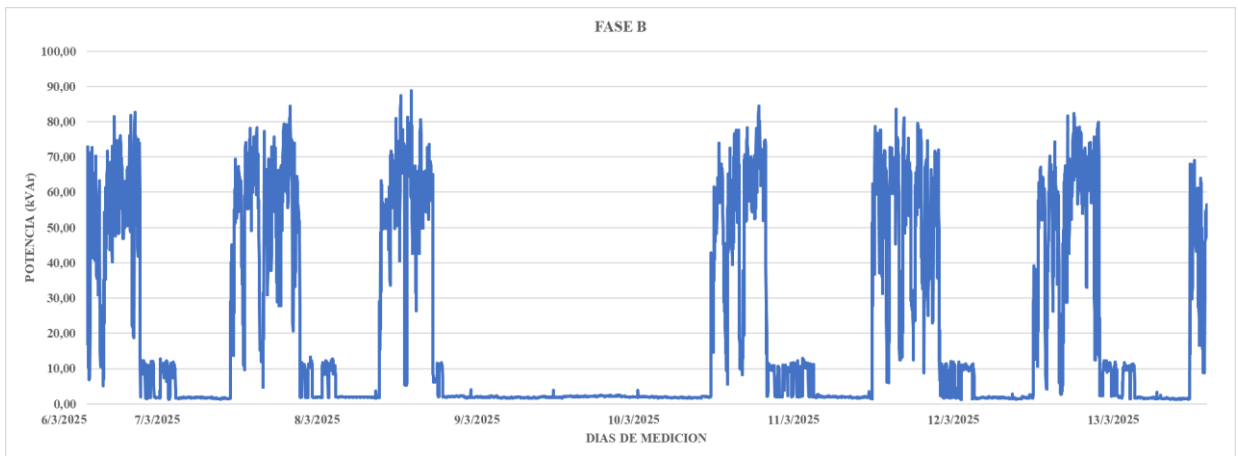


Potencia Activa Línea C.

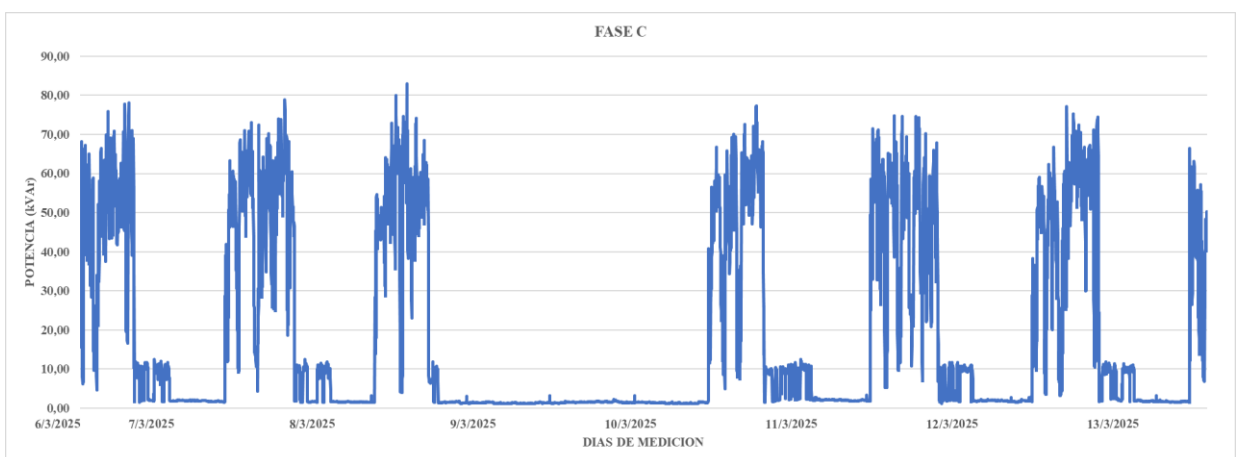
## ANEXO K



Potencia Reactiva Línea A.

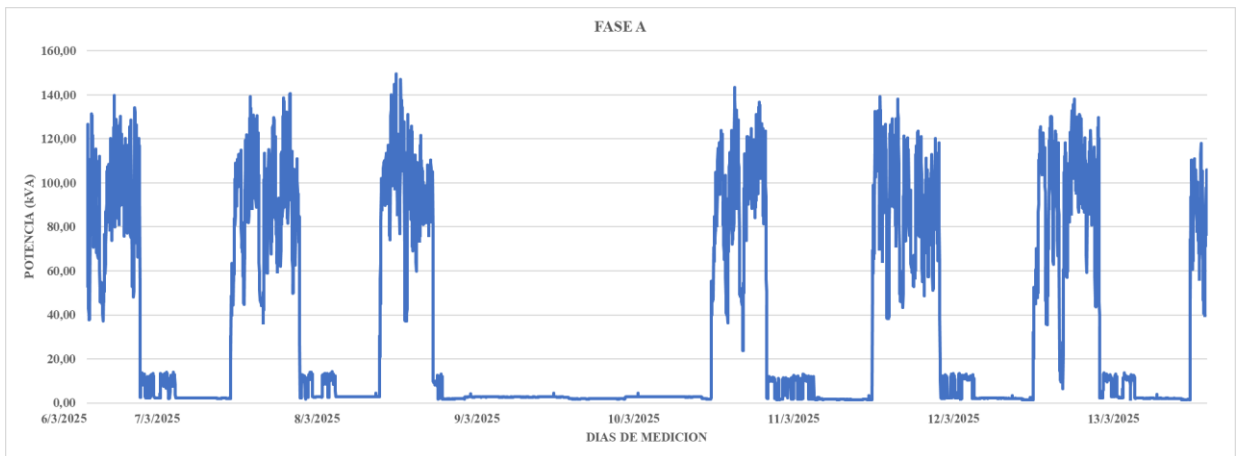


Potencia Reactiva Línea B.

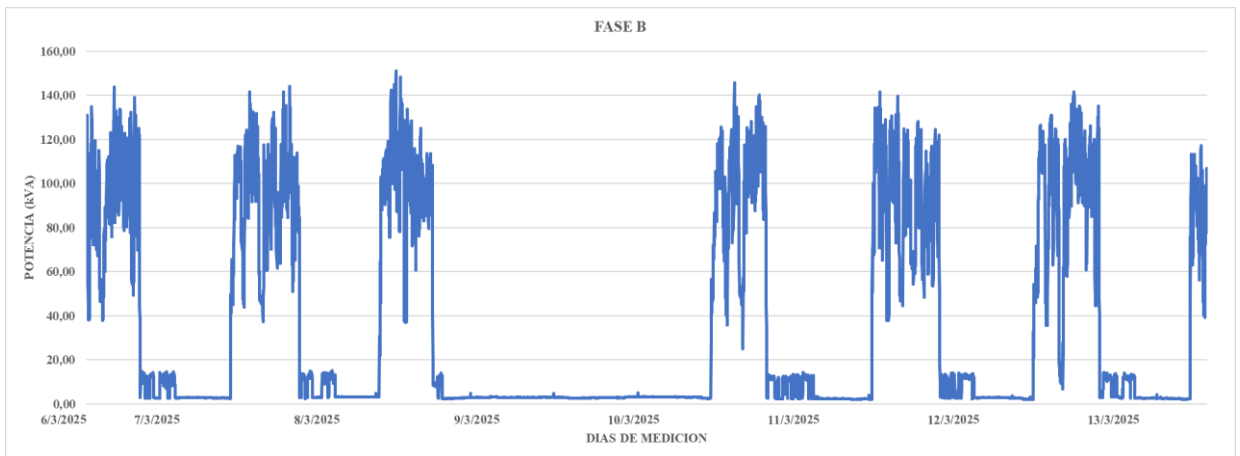


Potencia Reactiva Línea C.

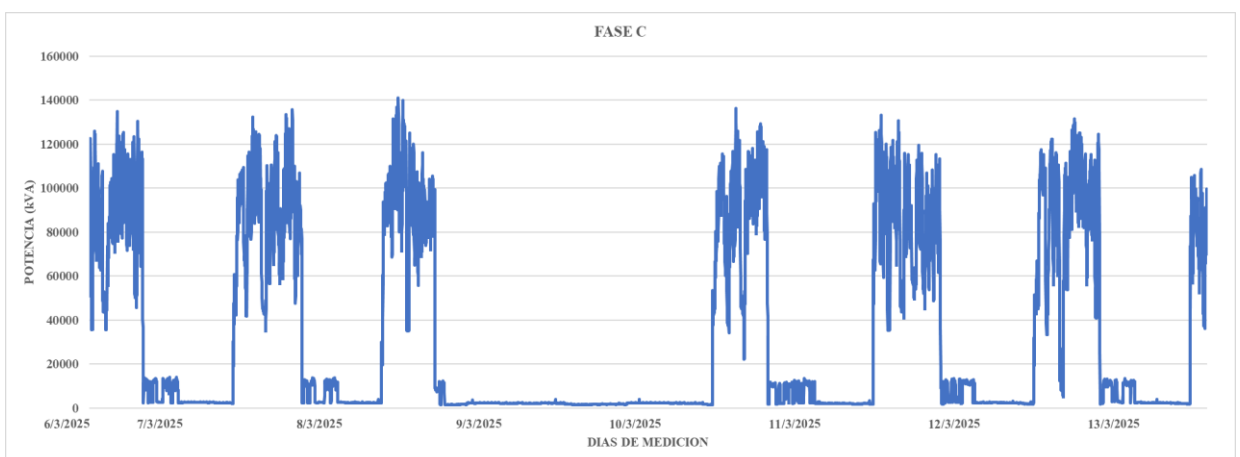
## ANEXO L



Potencia Aparente Línea A.

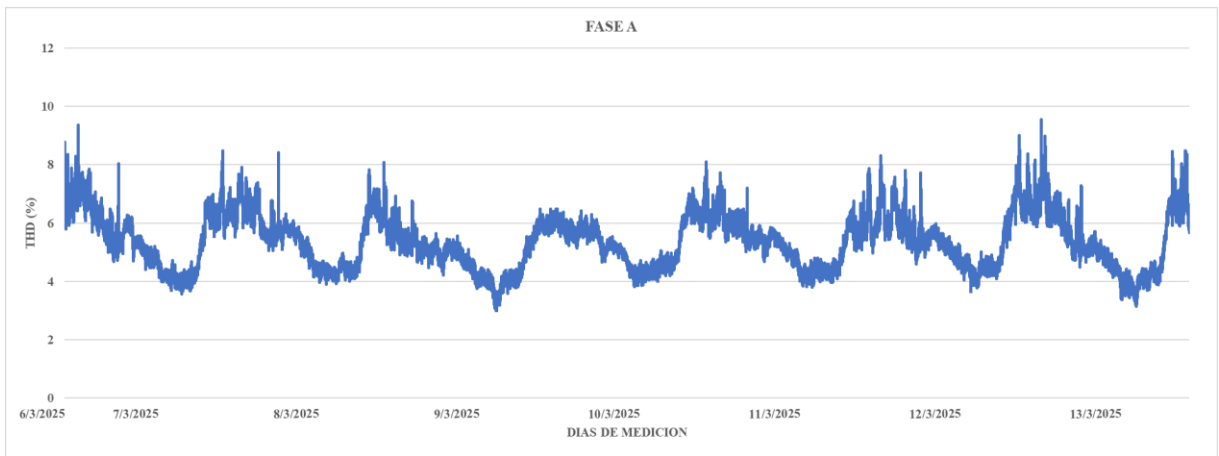


Potencia Aparente Línea B.

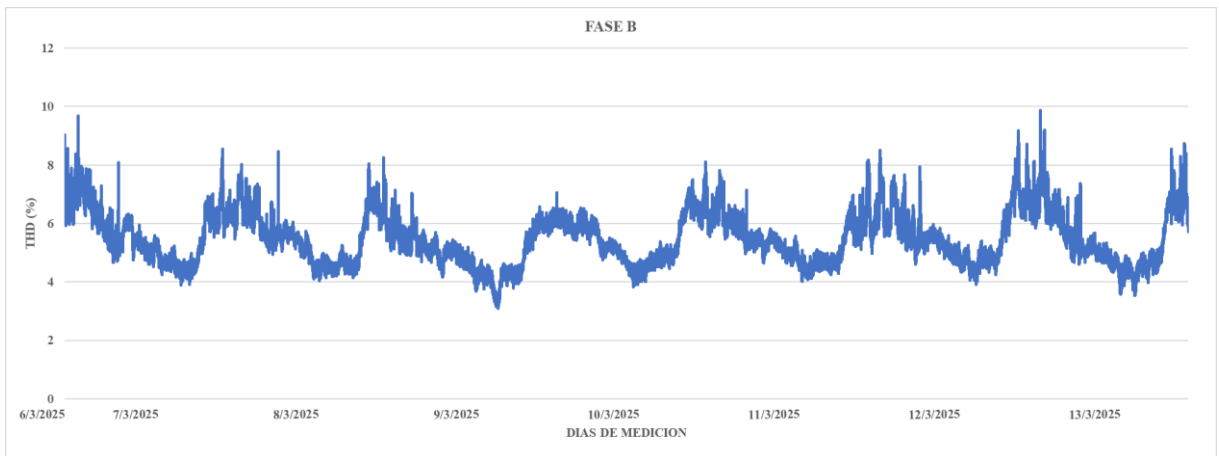


Potencia Aparente Línea C.

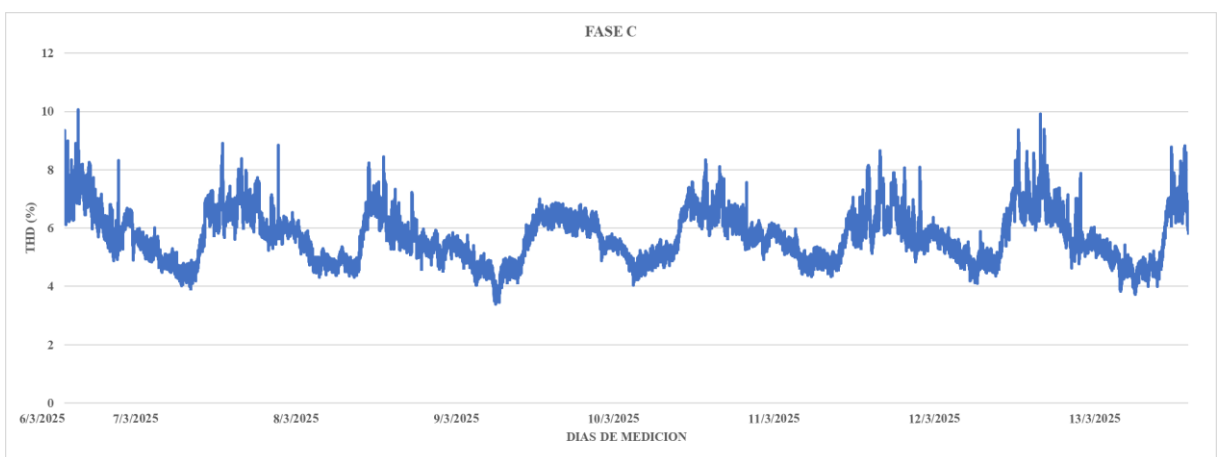
## ANEXO M



THD de Voltaje Línea A.



THD de Voltaje Línea B.



THD de Voltaje Línea C.

## ANEXO N

Armónicos impares de voltaje por fase.

Fase	%	Orden	Promedio %	Límite de ARCONEL 009/24 (%)	Detalle
Vharm_H03_AN_avg	0,20495	Vharm_3	0,262	5	Cumple
Vharm_H03_BN_avg	0,33643				
Vharm_H03_CN_avg	0,24551				
Vharm_H05_AN_avg	5,04066	Vharm_5	5,194		No Cumple
Vharm_H05_BN_avg	5,12505				
Vharm_H05_CN_avg	5,41568				
Vharm_H07_AN_avg	1,66179	Vharm_7	1,675		Cumple
Vharm_H07_BN_avg	1,71197				
Vharm_H07_CN_avg	1,65167				
Vharm_H09_AN_avg	0,19296	Vharm_9	0,188		Cumple
Vharm_H09_BN_avg	0,16798				
Vharm_H09_CN_avg	0,20272				
Vharm_H11_AN_avg	0,46623	Vharm_11	0,510		Cumple
Vharm_H11_BN_avg	0,52013				
Vharm_H11_CN_avg	0,54398				
Vharm_H13_AN_avg	0,23289	Vharm_13	0,246		Cumple
Vharm_H13_BN_avg	0,26480				
Vharm_H13_CN_avg	0,23924				
Vharm_H15_AN_avg	0,03567	Vharm_15	0,035		Cumple
Vharm_H15_BN_avg	0,03849				
Vharm_H15_CN_avg	0,03207				
Vharm_H17_AN_avg	0,11970	Vharm_17	0,122		Cumple
Vharm_H17_BN_avg	0,10757				
Vharm_H17_CN_avg	0,13814				
Vharm_H19_AN_avg	0,08151	Vharm_19	0,090		Cumple
Vharm_H19_BN_avg	0,10063				
Vharm_H19_CN_avg	0,08646				
Vharm_H21_AN_avg	0,01167	Vharm_21	0,013	Cumple	
Vharm_H21_BN_avg	0,01250				
Vharm_H21_CN_avg	0,01369				
Vharm_H23_AN_avg	0,03328	Vharm_23	0,031	Cumple	
Vharm_H23_BN_avg	0,02769				
Vharm_H23_CN_avg	0,03133				
Vharm_H25_AN_avg	0,03442	Vharm_25	0,036	Cumple	
Vharm_H25_BN_avg	0,03649				
Vharm_H25_CN_avg	0,03623				

Vharm_H27_AN_avg	0,01215	Vharm_27	0,012		Cumple										
Vharm_H27_BN_avg	0,01027														
Vharm_H27_CN_avg	0,01244														
Vharm_H29_AN_avg	0,04122	Vharm_29	0,038			Cumple									
Vharm_H29_BN_avg	0,03297														
Vharm_H29_CN_avg	0,03882														
Vharm_H31_AN_avg	0,02427	Vharm_31	0,025				Cumple								
Vharm_H31_BN_avg	0,02384														
Vharm_H31_CN_avg	0,02710														
Vharm_H33_AN_avg	0,00967	Vharm_33	0,010					Cumple							
Vharm_H33_BN_avg	0,01080														
Vharm_H33_CN_avg	0,01081														
Vharm_H35_AN_avg	0,01893	Vharm_35	0,018						Cumple						
Vharm_H35_BN_avg	0,01926														
Vharm_H35_CN_avg	0,01510														
Vharm_H37_AN_avg	0,00886	Vharm_37	0,011							Cumple					
Vharm_H37_BN_avg	0,01089														
Vharm_H37_CN_avg	0,01212														
Vharm_H39_AN_avg	0,00558	Vharm_39	0,006								Cumple				
Vharm_H39_BN_avg	0,00716														
Vharm_H39_CN_avg	0,00573														
Vharm_H41_AN_avg	0,01113	Vharm_41	0,009									Cumple			
Vharm_H41_BN_avg	0,00771														
Vharm_H41_CN_avg	0,00835														
Vharm_H43_AN_avg	0,00852	Vharm_43	0,010										Cumple		
Vharm_H43_BN_avg	0,01104														
Vharm_H43_CN_avg	0,00942														
Vharm_H45_AN_avg	0,00534	Vharm_45	0,006											Cumple	
Vharm_H45_BN_avg	0,00689														
Vharm_H45_CN_avg	0,00491														
Vharm_H47_AN_avg	0,00722	Vharm_47	0,006												Cumple
Vharm_H47_BN_avg	0,00508														
Vharm_H47_CN_avg	0,00699														
Vharm_H49_AN_avg	0,00593	Vharm_49	0,007												Cumple
Vharm_H49_BN_avg	0,00819														
Vharm_H49_CN_avg	0,00656														

## ANEXO O

Armónicos impares de corriente por fase.

ORDEN	%	ORDEN	PROMEDIO %	Límite IEEE 519-2014 (%)	Detalle		
Iharm_H03_A_avg	0,70759	Iharm_3	0,946	10	Cumple		
Iharm_H03_B_avg	0,95841						
Iharm_H03_C_avg	1,17217						
Iharm_H05_A_avg	3,70231	Iharm_5	3,824		10	Cumple	
Iharm_H05_B_avg	3,95284						
Iharm_H05_C_avg	3,81788						
Iharm_H07_A_avg	2,33644	Iharm_7	2,455			10	Cumple
Iharm_H07_B_avg	2,55966						
Iharm_H07_C_avg	2,46897						
Iharm_H09_A_avg	0,71329	Iharm_9	0,712	10			Cumple
Iharm_H09_B_avg	0,69951						
Iharm_H09_C_avg	0,72212						
Iharm_H11_A_avg	2,51549	Iharm_11	2,693		4,5		Cumple
Iharm_H11_B_avg	2,74625						
Iharm_H11_C_avg	2,81596						
Iharm_H13_A_avg	0,87860	Iharm_13	0,913			4,5	Cumple
Iharm_H13_B_avg	0,99569						
Iharm_H13_C_avg	0,86331						
Iharm_H15_A_avg	0,14485	Iharm_15	0,143	4,5			Cumple
Iharm_H15_B_avg	0,13181						
Iharm_H15_C_avg	0,15187						
Iharm_H17_A_avg	0,34988	Iharm_17	0,356		1,5		Cumple
Iharm_H17_B_avg	0,34980						
Iharm_H17_C_avg	0,36745						
Iharm_H19_A_avg	0,20632	Iharm_19	0,231			1,5	Cumple
Iharm_H19_B_avg	0,25050						
Iharm_H19_C_avg	0,23525						
Iharm_H21_A_avg	0,03866	Iharm_21	0,044	0,6			Cumple
Iharm_H21_B_avg	0,04669						
Iharm_H21_C_avg	0,04611						
Iharm_H23_A_avg	0,09896	Iharm_23	0,093		0,6		Cumple
Iharm_H23_B_avg	0,08099						
Iharm_H23_C_avg	0,09785						
Iharm_H25_A_avg	0,07711	Iharm_25	0,084			0,6	Cumple
Iharm_H25_B_avg	0,08864						
Iharm_H25_C_avg	0,08747						

Iharm_H27_A_avg	0,03692	Iharm_27	0,036	0,3	Cumple
Iharm_H27_B_avg	0,03519				
Iharm_H27_C_avg	0,03710				
Iharm_H29_A_avg	0,08028	Iharm_29	0,076		Cumple
Iharm_H29_B_avg	0,07443				
Iharm_H29_C_avg	0,07471				
Iharm_H31_A_avg	0,06774	Iharm_31	0,076		Cumple
Iharm_H31_B_avg	0,07623				
Iharm_H31_C_avg	0,08490				
Iharm_H33_A_avg	0,02644	Iharm_33	0,029		Cumple
Iharm_H33_B_avg	0,02787				
Iharm_H33_C_avg	0,03130				
Iharm_H35_A_avg	0,04855	Iharm_35	0,045	Cumple	
Iharm_H35_B_avg	0,04628				
Iharm_H35_C_avg	0,04111				
Iharm_H37_A_avg	0,03266	Iharm_37	0,036	Cumple	
Iharm_H37_B_avg	0,03580				
Iharm_H37_C_avg	0,03924				
Iharm_H39_A_avg	0,01545	Iharm_39	0,017	Cumple	
Iharm_H39_B_avg	0,01983				
Iharm_H39_C_avg	0,01677				
Iharm_H41_A_avg	0,02732	Iharm_41	0,023	Cumple	
Iharm_H41_B_avg	0,01951				
Iharm_H41_C_avg	0,02204				
Iharm_H43_A_avg	0,02196	Iharm_43	0,024	Cumple	
Iharm_H43_B_avg	0,02566				
Iharm_H43_C_avg	0,02311				
Iharm_H45_A_avg	0,01341	Iharm_45	0,014	Cumple	
Iharm_H45_B_avg	0,01568				
Iharm_H45_C_avg	0,01339				
Iharm_H47_A_avg	0,01694	Iharm_47	0,015	Cumple	
Iharm_H47_B_avg	0,01247				
Iharm_H47_C_avg	0,01652				
Iharm_H49_A_avg	0,01392	Iharm_49	0,016	Cumple	
Iharm_H49_B_avg	0,01775				
Iharm_H49_C_avg	0,01546				