



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**Evaluación de la Calidad de Energía Eléctrica en la empresa
AVIPAZ**

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

AUTORES:

Jean Pierre Velez Tigasi

Joel Italo Portero Sailema

TUTOR ACADÉMICO:

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado M.Sc.

LATACUNGA – ECUADOR


2025

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Nosotros PORTERO SAILEMA ITALO JOEL con cédula de ciudadanía N° 1805620828 y VELEZ TIGASI JEAN PIERRE con cédula de ciudadanía N° 1754386199 declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: "EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA AVIPAZ", siendo el Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado M.Sc. el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, 29 de julio del 2025



Jean Pierre Velez Tigasi
CC. 1754386199



Joel Italo Portero Sailema
CC. 1805620828

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA AVIPAZ”, de PORTERO SAILEMA ITALO JOEL y VELEZ TIGASI JEAN PIERRE. De la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aporte científico-técnico suficiente para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 29 de julio del 2025

El Tutor



Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado MSc.

C.C. 0502656424

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la ingeniería y Aplicadas.; por cuanto, los postulantes Velez Tigasi Jean Pierre; Portero Sailema Italo Joel, con el título de Proyecto de titulación: "EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA AVIPAZ", ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

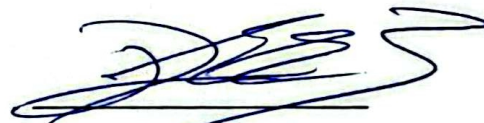
Latacunga, 29 de julio del 2025

Para constancia firman:



Ing. Ortiz Yadyra M.Sc.

CC. 1722464110



MBA Estupiñán Diego

CC. 0501656508



Ing. Quinatoa Carlos M.Sc.

C.C. 0503287864

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro sincero reconocimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la Carrera de Ingeniería en Electricidad, por ser pilares fundamentales en nuestra formación académica y personal. Agradecemos a los docentes que, con compromiso y vocación, nos guiaron durante este proceso, compartiendo sus conocimientos y experiencias. Extendemos también nuestra gratitud a la empresa AVIPAZ por brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestra tesis en sus instalaciones, permitiéndonos aplicar lo aprendido en un entorno profesional real.

Jean Velez, Italo Portero

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional y constante motivación han sido fundamentales en cada paso de este camino.

Jean Velez, Italo Joel

ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	Situación problemática.....	3
2.2.	Formulación del problema	3
2.3.	Objeto y campo de acción.....	4
2.3.1.	Objeto de Investigación	4
2.3.2.	Campo de Acción.....	4
2.4.	Beneficiarios	4
2.4.1.	Directo	4
2.4.2.	Indirecto.....	4
2.5.	Justificación	4
2.6.	Objetivos.....	5
2.6.1.	General.....	5
2.6.2.	Específicos.....	5
2.7.	Sistema de tareas.....	6
3.	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO	7
3.1.	Calidad del suministro eléctrico.....	7
3.2.	Deformación Armónica.....	7
3.3.	Tipos de cargas.....	8
3.3.1.	Cargas lineales	8
3.3.2.	Cargas no lineales	9
3.4.	Factor de distorsión armónica de Voltaje total.....	10
3.6.	Factor de distorsión individual de voltaje.....	11
3.8.	Perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia	12
3.9.	Armónicos.....	13
3.9.1.	Origen de los Armónicos	13
3.9.2.	Efectos de los Armónicos en la Red eléctrica.....	13
3.9.3.	Efectos de los Armónicos en una instalación eléctrica interna.....	14
3.10.	Factor de Potencia (FP).....	14
3.10.1.	Coseno de F_i	15
3.11.	Desequilibrio de Tensión.....	15
3.12.	Niveles de Tolerancia de armónicos.....	16

3.13.	Cumplimiento de los índices de armónicos en el punto de medición	16
3.14.	Reducción de armónicos	16
3.15.	MÉTODOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL PRODUCTO.....	17
3.15.1.	Sag y Swell	17
3.15.2.	Bajo factor de potencia	17
3.15.3.	Flicker	17
3.15.4.	Sobrevoltaje	18
3.15.5.	Filtros Activos.....	18
3.16.	Normativas Aplicadas	19
3.16.1.	Normativa Nacional.....	20
3.16.2.	Normativa Internacional	20
4.	METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS	22
4.1.	Especificaciones del área de estudio.....	24
4.1.1.	Antecedentes.....	24
4.1.2.	Localización Geográfica.....	25
4.1.3.	Caracterización del Sistema Eléctrico	25
4.2.	Recopilación de Información.....	26
4.2.1.	Fase A: Levantamiento de cargas	26
4.2.2.	Fase B: Diagrama unifilar y planta.....	28
4.2.3.	Fase C: Obtención de parámetros eléctricos mediante el Fluke 435-II....	29
4.2.3.1.	Ubicación del analizador de redes	30
4.2.3.2.	Programación de parámetros en el equipo	31
4.2.3.3.	Instalación del Fluke 435-II.....	32
4.2.3.4.	Descarga de Datos del Equipo	34
4.3.	Evaluación de Datos	34
4.4.	Modelado y Simulación en ETAP.....	35
4.4.1.	Proceso de configuración de modelado en ETAP.....	35
4.3.1.	Simulación de Sistema en ETAP	38
4.3.2.	Escenarios de Simulación.....	39
4.5.	Análisis de resultados para la determinación y cumplimiento de la normativa	39
4.6.	Evaluación de Filtro Activo	40
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
5.1.	Presentación del diagrama unifilar, diagrama de planta y metodología de elaboración	42
5.2.	Análisis de parámetros del Sistema	42

5.2.1.	Niveles de Voltaje	42
5.2.2.	Análisis de Corriente	43
5.2.3.	Análisis de Potencia Activa (P)	46
5.2.4.	Análisis de Factor de Potencia.....	48
5.3.	Identificación y Análisis de Perturbaciones Eléctricas	49
5.3.1.	Sag en la Red	49
5.3.2.	Swell en la Red	50
5.3.3.	Flicker en la red	51
5.3.4.	Armónicos de Voltaje	52
5.3.5.	Armónicos de Corriente.....	53
5.3.6.	Análisis con valor promedio.....	53
5.3.7.	Análisis en Jornada Laboral	55
a.	Demanda Máxima.....	55
b.	Demanda Mínima.....	56
5.3.8.	Análisis en Jornada de Descanso.....	57
Resultados de la Simulación del Sistema en ETAP		57
5.3.9.	Análisis con valor promedio.....	57
5.3.10.	Análisis en Jornada Laboral.....	59
a.	Demanda Máxima.....	59
b.	Demanda Mínima.....	61
5.3.11.	Análisis en Jornada de Descanso	63
5.4.	Análisis de Filtro Activo	65
5.4.1.	Filtro activo en valor promedio	65
5.4.2.	Filtro activo en jornada laboral	65
5.4.3.	Filtro activo en jornada de descanso	67
6.	CONCLUSIONES.....	72
7.	RECOMENDACIONES	74
8.	REFERENCIAS	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1	Impacto sobre la tensión originado por la conmutación de capacitores [5]... 8
Figura 3. 2	Formas de corriente producidas por una carga de carácter lineal [6]..... 8
Figura 3. 3	Gráfico que representa la respuesta característica de una carga lineal [6]..... 9
Figura 3. 4	Circuito de carga no lineal [6]..... 9
Figura 3. 5	Desempeño de una carga no lineal. [6]. 10

Figura 3. 6 Funcionamiento de un filtro activo en paralelo [19].....	19
Figura 4. 1 Metodología utilizada en el estudio	24
Figura 4. 2 Localización de la Industria Avipaz Cia. Ltda	25
Figura 4. 3 Proceso del levantamiento de cargas en la empresa AVIPAZ.	27
Figura 4. 4 Proceso de obtención de datos mediante el analizador de redes.	29
Figura 4. 6 Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico de industria (La parte encerrada de rojo es el lugar de instalación del equipo).....	31
Figura 4. 9 Conexión del Fluke 435-II para medición [24].....	32
Figura 4. 10 Instalación del analizador de red después del filtro de red en la Empresa.	33
Figura 4. 11 Instalación del analizador de red antes del filtro de red en la Empresa	34
Figura 4. 12 Placa técnica del transformador de potencia; Error! Marcador no definido.	
Figura 5. 1 Curva de voltaje en jornada laboral	42
Figura 5. 2 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada laboral máxima corriente	44
Figura 5. 3 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada laboral mínima corriente	45
Figura 5. 4 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada de descanso mínima corriente	45
Figura 5. 5 Curva de potencia Activa jornada laboral máxima potencia.....	46
Figura 5. 6 Curva de potencia Activa jornada laboral mínima potencia	47
Figura 5. 7 Curva de potencia Activa jornada de descanso mínima potencia	48
Figura 5. 8 THD individual de voltaje.....	53
Figura 5. 9 THD individual de corriente antes del filtro	54
Figura 5. 10 Orden de armónicos de corriente después del filtro activo	55
Figura 5. 11 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en máxima demanda sin filtro	55
Figura 5. 12 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en máxima demanda con filtro	56
Figura 5. 13 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en mínima demanda	57
Figura 5. 14 Orden de armónicos de corriente jornada de descanso en mínima demanda	57
Figura 5. 15 Curva resultante de armónicos de corriente en la red	58
Figura 5. 16 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro	58
Figura 5. 17 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro	58
Figura 5. 18 ETAP armónicos individuales de corriente después del filtro	59
Figura 5. 19 Curva resultante de armónicos de corriente en la red	59
Figura 5. 20 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral	60
Figura 5. 21 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral	60
Figura 5. 22 ETAP armónicos individuales de corriente después del filtro jornada laboral	61
Figura 5. 23 Curva resultante de armónicos de corriente en la red	61
Figura 5. 24 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral mínima demanda.....	62

Figura 5. 25 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral mínima	62
Figura 5. 26 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral en demanda mínima.	63
Figura 5. 27 Curva resultante de armónicos de corriente en la red antes del filtro jornada descanso.....	63
Figura 5. 28 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral máxima demanda.....	64
Figura 5. 29 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral máxima demanda.....	64
Figura 5. 30 ETAP armónicos individuales de corriente despues del filtro en jornada laboral máxima demanda.....	65
Figura 5. 31 Filtro Activo en escenario promedio de medición de 7 días	65
Figura 5. 32 Filtro Activo en escenario demanda máxima jornada laboral.....	66
Figura 5. 33 Filtro Activo en escenario demanda mínima jornada laboral.....	66
Figura 5. 34 Filtro Activo en escenario demanda mínima jornada de descanso	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 3. 2 Topes permitidos de armónicos de tensión (expresados como porcentaje del valor nominal de voltaje). [7].	16
Tabla 3. 3 Resumen de Parámetros de Calidad del Servicio Eléctrico [7].	20
Tabla 3. 4 Límites de distorsión de corriente para sistemas clasificados de 120 V / 69 kV [9].....	21
Tabla 4. 1 Coordenadas Geográficas de la industria Avipaz Cía. Ltda.....	25
Tabla 4. 2 Clasificación de Parámetros Eléctricos.....	40
Tabla 5. 1 Comparativa del nivel de voltaje fase-fase.....	43
Tabla 5. 2 Desbalance de Corriente	46
Tabla 5. 3 Valores de desbalance de potencia.....	48
Tabla 5. 4 Valores de factor de potencia	49
Tabla 5. 5 Eventos Sag en voltaje línea – línea	50
Tabla 5. 6 Eventos Swell en voltaje línea – línea	50
Tabla 5. 7 Eventos flickers en la red.....	51
Tabla 0. 1 Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos de los sistemas de potencia [11]......	78
Tabla 0. 2 Levantamiento de cargas de la empresa AVIPAZ.....	79
Tabla 0. 3 Parámetros estándar de una máquina asíncrona [25]......	79
Tabla 0. 4 Levantamiento de conductores de cada carga.....	80
Tabla 0. 5 Levantamiento de protecciones y variador de voltajes de los circuitos C1 a C5	80
Tabla 0. 6 Levantamiento de protecciones de los circuitos C6 a C10	80

Tabla 0. 7 Armónicos Individuales de voltaje y THD V promedio de los 7 días antes del filtro.	81
Tabla 0. 8 Armónicos Individuales de corriente y THD I promedio de los 7 días antes del filtro.	82
Tabla 0. 9 Armónicos Individuales de corriente y THD I promedio de los 7 días después del filtro.	83
Tabla 0. 10 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral antes del filtro máxima demanda.	84
Tabla 0. 11 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral después del filtro máxima demanda.	85
Tabla 0. 12 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral antes del filtro mínima demanda.	86
Tabla 0. 13 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada de descanso antes del filtro mínima demanda.	87
Tabla 0. 14 Máxima demanda 7 días antes del filtro	88
Tabla 0. 15 Máxima demanda 7 días después del filtro.	88
Tabla 0. 16 Máxima demanda jornada laboral sin filtro	88
Tabla 0. 17 Máxima demanda jornada laboral con filtro.	88
Tabla 0. 18 Mínima demanda jornada laboral.	88
Tabla 0. 19 Mínima demanda jornada de descanso.	88

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

TÍTULO: “EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA AVIPAZ”.

Autores:

Portero Sailema Italo Joel

Velez Tigasi Jean Pierre

RESUMEN

Este estudio se centró en la evaluación de la calidad de la energía en la industria AVIPAZ, con énfasis en la mitigación de armónicos mediante la implementación de un filtro activo shunt. Se realizó un análisis técnico detallado de motores, conductores y variadores de frecuencia, lo cual permitió elaborar diagramas unifilares y de planta para las simulaciones en el software ETAP.

Se analizaron diversos escenarios de operación, incluyendo jornadas laborales con demandas máximas y mínimas, así como fines de semana. Se registraron niveles elevados de distorsión armónica total de corriente (THD), principalmente debido a cargas no lineales asociadas a variadores de frecuencia. Tras la instalación del filtro activo shunt, se evidenció una reducción considerable de los armónicos, especialmente los de orden impar.

Se identificó que el filtro no operó en condiciones de baja demanda (corrientes inferiores a 2 A), a pesar de tener capacidad suficiente para compensar los armónicos presentes, indicando la necesidad de ajustar su configuración. No obstante, en jornadas con mayor carga, su desempeño fue eficaz.

Además, se llevó a cabo un análisis del desbalance de tensión, corriente y potencia, incluyendo fenómenos como sags, swells, flickers y el factor de potencia. Los resultados después del filtro mostraron que los índices se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa ARCONEL 009/24.

Aunque durante los fines de semana el THD fue relativamente alto, no fue significativo, permitiendo que el promedio semanal se mantuviera en niveles aceptables. En conjunto, el filtro activo shunt contribuyó a mejorar la calidad de energía del sistema.

Palabras Clave: Calidad de energía, filtro activo shunt, armónicos, desbalance eléctrico, simulación en ETAP.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED FACULTY

TITLE: “POWER QUALITY ASSESSMENT IN THE AVIPAZ COMPANY”.

Authors:

Portero Sailema Italo Joel
Velez Tigasi Jean Pierre

ABSTRAC

This study focused on the evaluation of power quality in the AVIPAZ industry, with emphasis on the mitigation of harmonics through the implementation of an active shunt filter. A detailed technical analysis of motors, conductors and frequency inverters was carried out, which allowed the development of single-line and plant diagrams for the simulations in ETAP software.

Various operating scenarios were analyzed, including working days with maximum and minimum demands, as well as weekends. High levels of total harmonic current distortion (THD) were recorded, mainly due to nonlinear loads associated with variable frequency drives. After the installation of the active shunt filter, a considerable reduction of harmonics, especially those of odd order, was evidenced.

It was identified that the filter did not operate in low demand conditions (currents below 10 A), despite having sufficient capacity to compensate the harmonics present, indicating the need to adjust its configuration. However, in days with higher load, its performance was effective.

In addition, an analysis of voltage, current and power unbalance was carried out, including phenomena such as sags, swells, flickers and power factor. The results after filtering showed that the indices remained within the limits set by ARCONEL 009/24.

Although during weekends the THD was relatively high, it was not significant, allowing the weekly average to remain at acceptable levels. Overall, the active shunt filter contributed to the improved power quality of the system.

Keywords: Power quality, shunt active filter, harmonics, electrical unbalance, ETAP simulation.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto:

Evaluación de la Calidad de Energía Eléctrica en la empresa AVIPAZ.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Carrera: Ingeniería en Electricidad.

Trabajo de titulación vinculado al proyecto: Desarrolló de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de trabajo del trabajo de titulación:

Estudiantes:

- Jean Pierre Velez Tigasi
- Italo Joel Portero Sailema

Docente:

- Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado M.Sc.

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

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

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

2. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento continuo y óptimo de los sistemas eléctricos se ve gravemente limitado debido al incremento permanente en la necesidad de energía., alimentada por la incorporación progresiva de soluciones tecnológicas emergentes, acompañada por el incremento constante de la automatización operaciones industriales. Si no se gestiona, esta presión sobre la infraestructura energética puede provocar interrupciones inoportunas del suministro. Aunque la erradicación absoluta de este tipo de incidentes es poco realista, su influencia puede reducirse con medidas exhaustivas de gestión y control. Las compañías responsables de la producción, transmisión y comercialización de energía están obligadas en este marco a mejorar sus operaciones para mantener un suministro fiable que satisfaga los criterios mundiales de calidad [1].

La calidad de la energía entregada depende directamente de la articulación entre los generadores, las redes de alta y baja tensión y los consumidores finales. Cualquier deficiencia en esta cadena puede provocar perturbaciones como armónicos, fluctuaciones de tensión, caídas transitorias de tensión o desfases del factor de potencia, que afectan a los equipos conectados y comprometen la prolongación de la actividad. Estos problemas suponen una importante carga financiera, además de técnica, sobre todo en las industrias industriales, donde el suministro eléctrico es esencial para la productividad y la rentabilidad [1].

El sistema encargado de distribuir la energía eléctrica utilizada por AVIPAZ, empresa especializada en el procesamiento de aves de corral y pavos, tiene un diseño muy complicado y, por tanto, es extremadamente vulnerable a las fluctuaciones del nivel de calidad del suministro eléctrico. Con este análisis si se presenta un factor de potencia deficiente, perturbaciones del nivel de tensión y armónicos, lo que podría deteriorar la maquinaria y tal vez reducir la rentabilidad de los procesos de fabricación. Siguiendo las directrices del Reglamento ARCONEL 009/24, en esta situación se precisa efectuar una evaluación pormenorizada de la calidad de la energía en sus infraestructuras [2].

Este estudio se plantea como finalidad caracterizar la calidad del suministro eléctrico de AVIPAZ, identificar las principales perturbaciones del sistema y presentar opciones de ingeniería para mejorar el rendimiento eléctrico de la planta. Se proporcionará una imagen completa del régimen eléctrico de la instalación mediante la instrumentación de equipos

de medida de primera línea en conjunción con la herramienta de modelado ETAP, así como una lectura normativa y de ingeniería.

2.1.Situación problemática

El uso intensivo de equipos electrónicos y sistemas de automatización industrial, sensibles a perturbaciones y asegurar la calidad de la energía constituye un factor determinante para la eficiencia de los procesos industriales. Estas perturbaciones provienen de diversas fuentes, como dispositivos electrónicos, deficiencias en la instalación eléctrica ante fenómenos atmosféricos y, principalmente, dispositivos de comportamiento no lineal, entre ellos variadores de velocidad, rectificadores y equipos de electrónica de potencia [1].

En el entorno industrial, estas alteraciones generan transitorios, armónicos, variaciones de frecuencia, inestabilidad de tensión y la elevada demanda de energía reactiva, circunstancia que podría causar daños en los equipos y pérdidas económicas por penalizaciones asociadas a un bajo factor de potencia [2] .

En este escenario, la investigación aquí expuesta presenta como objetivo examinar la calidad de la energía en AVIPAZ, firma que elabora y comercializa alimentos balanceados para el ganado de granja, incluyendo aves, cerdos y bovino. Se utilizarán técnicas de medición y análisis de redes, guiadas por la normativa ecuatoriana ARCONEL 009/24. AVIPAZ, que ya cuenta con más de 30 años en el sector, ha consolidado su presencia gracias a un enfoque riguroso en la calidad y la eficiencia de cada etapa productiva, aportando así al fortalecimiento del campo agropecuario del país.

2.2.Formulación del problema

En la empresa AVIPAZ no se ha realizado un estudio técnico de calidad de energía en los últimos diez años, lo que ha generado un desconocimiento del estado actual de su sistema eléctrico interno. Esta ausencia de información impide identificar y cuantificar los efectos negativos que generan las cargas no lineales y los dispositivos electrónicos, como variadores de frecuencia sobre la red eléctrica, especialmente en términos de distorsión armónica, desbalance de voltaje y posibles sobrecargas. Estas condiciones pueden reducir la eficiencia energética de los procesos industriales, acelerar el desgaste de la maquinaria y aumentar los costos operativos. Por tanto, se justifica la necesidad de un diagnóstico

técnico detallado que permita evaluar la calidad de energía y proponer acciones correctivas que optimicen el desempeño del sistema eléctrico de la empresa.

2.3. Objeto y campo de acción

2.3.1. Objeto de Investigación

Calidad y Eficiencia Energética

2.3.2. Campo de Acción

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

2.4. Beneficiarios

2.4.1. Directo

- Empresa AVIPAZ

2.4.2. Indirecto

- Estudiantes de la carrera de Ingeniería en Electricidad

2.5. Justificación

La ausencia de un estudio técnico de calidad de energía en la empresa AVIPAZ durante la última década ha dejado sin diagnóstico actualizado el comportamiento eléctrico de sus instalaciones. Este desconocimiento representa un riesgo operativo, ya que impide identificar y mitigar los efectos causados por cargas no lineales y dispositivos electrónicos, como los variadores de frecuencia, cuya presencia se ha incrementado con la automatización de procesos industriales.

Estos elementos pueden generar perturbaciones eléctricas como distorsión armónica, desbalance de voltaje y sobrecargas, las cuales afectan directamente la eficiencia energética de la planta, reducen la vida útil de los equipos y elevan los costos por mantenimientos correctivos o fallas inesperadas. Ante esta situación, se justifica plenamente la realización de un estudio de calidad de energía que permita caracterizar técnicamente estas problemáticas bajo la regulación ARCONEL 009/24 [3].

Este análisis permitirá validar si las condiciones eléctricas se mantienen dentro de los límites normativos y si el filtro cumple con su función de mitigar armónicos y mejorar el perfil de corriente. Los resultados del estudio servirán como base para tomar decisiones técnicas orientadas a optimizar la eficiencia energética si es necesario, garantizar la protección de los equipos industriales y asegurar la confiabilidad operativa de la planta.

2.6.Objetivos

2.6.1. General

Diagnosticar el estado de la calidad de energía en el sistema eléctrico de AVIPAZ mediante un estudio técnico, con la identificación de afectaciones y evaluación del filtro activo.

2.6.2. Específicos

- Realizar un levantamiento técnico de la red eléctrica interna de la planta, enfocado en las cargas críticas del área de producción, con el fin de desarrollar el diagrama unifilar del sistema eléctrico y su posterior modelado y simulación en el software especializado ETAP.
- Diagnosticar la calidad de energía en AVIPAZ mediante mediciones con analizadores de redes, evaluando armónicos de tensión y corriente, potencia activa, fenómenos transitorios y factor de potencia acorde a las medidas establecidos por la normativa ARCONEL 009/24.
- Evaluar el rendimiento del filtro activo dentro del sistema eléctrico de la industria AVIPAZ, a través de vías de medición de dos puntos antes y después del filtro usando un analizador de redes, en relación a su efecto en la reducción de armónicos en múltiples escenarios de operación.
- Simular la dinámica operativa del sistema eléctrico de AVIPAZ en escenarios de carga tanto reducida como plena, con el fin de determinar la calidad de energía del sistema.

2.7.Sistema de tareas

Tabla 2. 1 Estructura organizada de actividades

Objetivos específicos	Acciones a ejecutar	Logros previstos	metodologías, recursos y herramientas
Realizar un levantamiento técnico de la red eléctrica interna de la planta, enfocado en las cargas críticas del área de producción, con el fin de desarrollar el diagrama unifilar del sistema eléctrico y su posterior modelado y simulación en el software especializado ETAP.	Inspección de la red eléctrica y equipos.	Plano unifilar de la red eléctrica interna.	Técnicas de inspección técnica y relevamiento eléctrico.
	Recolección de datos técnicos de cargas críticas.	Base de datos técnica estructurada de las cargas.	Software de diseño y análisis de redes eléctricas.
Diagnosticar la calidad de energía en AVIPAZ mediante mediciones con analizadores de redes, evaluando armónicos de tensión y corriente, potencia activa, fenómenos transitorios y factor de potencia acorde a las medidas establecidos por la normativa ARCONEL 009/24.	Inspección preliminar del sistema eléctrico.	Identificación general del sistema eléctrico y sus áreas críticas.	Recorridos técnicos y entrevistas con el personal de mantenimiento.
	Registro de parámetros eléctricos durante periodos representativos de carga.	Base de datos con parámetros reales del sistema bajo condiciones operativas.	Analizador de redes (medidor portátil), software de captura de datos, normativa ARCONEL 009/24.
Evaluar el rendimiento del dispositivo de filtrado activo en el sistema eléctrico de la industria AVIPAZ, a través de vías de medición de dos puntos antes y después del filtro usando un analizador de redes, en relación a su efecto en la reducción de armónicos en múltiples escenarios de operación.	Realizar mediciones antes del filtro (punto aguas arriba).	Identificación de los armónicos predominantes (especialmente el 3°, 5° y 7°) antes del filtro en Excel.	Análisis comparativo de THD (Total Harmonic Distortion).
Simular la dinámica operativa del sistema eléctrico de AVIPAZ, considerada tanto en cargas reducidas como en máximas, se examina para establecer el nivel de calidad de la energía suministrada.	Modelar la red eléctrica en software especializado.	Análisis del flujo de potencia bajo diferentes cargas. Archivo OTI.	Simulación en ETAP.
	Ejecutar simulaciones con dos escenarios de carga.	Identificación de afectaciones por perturbaciones eléctricas.	Parámetros reales obtenidos del levantamiento técnico.

3. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICO

En este capítulo se exponen los fundamentos esenciales con el propósito de efectuar el análisis de la fiabilidad en el abastecimiento de energía eléctrica, respaldados por la revisión de fuentes bibliográficas, artículos científicos y publicaciones técnicas relevantes. Se tratarán temas asociados al nivel de calidad del suministro energético, los factores que inciden en ella y las posibles tácticas destinadas a perfeccionar el rendimiento de la red eléctrica.

3.1. Calidad del suministro eléctrico

Diversos fenómenos electromagnéticos que inciden sobre la tensión y la corriente en un punto concreto del sistema de potencia son los que definen la calidad de la energía. Este concepto involucra la responsabilidad conjunta de productores, usuarios y fabricantes de equipos. Su análisis es crucial en redes de distribución, ya que permite identificar fallos y proponer soluciones efectivas para mejorar el servicio eléctrico [4].

La calidad del suministro eléctrico resulta crucial para el desempeño eficiente de los sistemas, pues incide de manera directa en la durabilidad de los equipos, la planificación de mantenimientos y la protección de las inversiones. En contextos industriales, una falla o interrupción del suministro puede ocasionar pérdidas económicas significativas, ya sea por el deterioro de materia prima o por el tiempo improductivo durante la reprogramación de procesos. Por esta razón, ha crecido la percepción acerca de la necesidad de asegurar un abastecimiento eléctrico fiable, especialmente entre profesionales y técnicos del sector [5].

3.2. Deformación Armónica

La formación armónica se presenta cuando las formas de onda de tensión o corriente incorporan componentes cuya frecuencia corresponde a múltiplos enteros de la fundamental del sistema. Esta condición puede observarse, por ejemplo, dentro de una señal de tensión afectada por un tercer armónico, lo cual altera su forma sinusoidal original según puede apreciarse en la figura 3 [6].

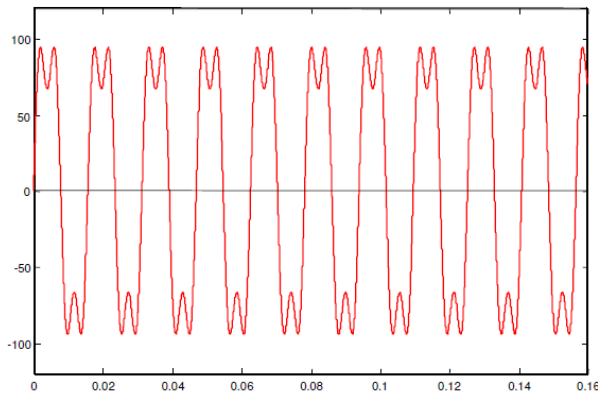


Figura 3. 1 Impacto sobre la tensión originado por la conmutación de capacitores [6].

3.3. Tipos de cargas

3.3.1. Cargas lineales

Estas se caracterizan por estar compuestas por componentes no activos como resistencias, inductancias y capacitores con valores constantes. En estas cargas, la tensión y la corriente conservan una proporcionalidad directa, lo que genera formas de onda senoidales, aunque suele existir un desfase entre ambas señales. Ejemplos típicos incluyen el sistemas de alumbrado con lámparas incandescentes y los dispositivos destinados a climatizar mediante aporte de calor, cuya impedancia permanece prácticamente inalterada frente a variaciones de tensión aplicada [7].

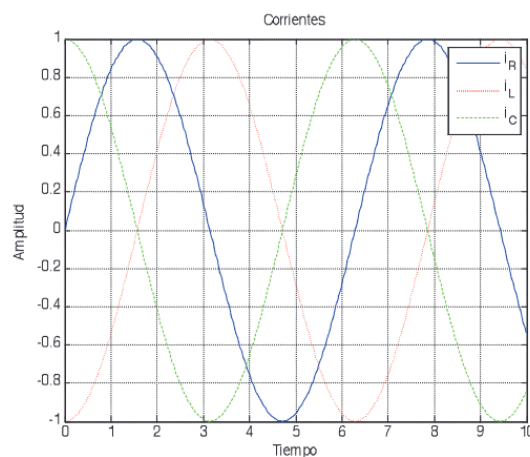


Figura 3. 2 Formas de corriente producidas por una carga de carácter lineal [7].

Las corrientes asociadas a cargas lineales pueden clasificarse según su naturaleza: la corriente resistiva I_R se genera en circuitos puramente resistivos, la corriente I_L es característica de circuitos con elementos inductivos, presentando un desfase hacia atrás, mientras que la corriente I_C es propia de sistemas con elementos capacitivos, anticipándose en fase.

Las resistencias ideales, al igual que los inductores y los capacitores, se clasifican como lineales: cuando se aplica una tensión sinusoidal, la corriente resultante conserva una proporcionalidad directa conforme a la ley de Ohm. En estas condiciones, la correspondencia entre la tensión y la corriente eléctrica describe una línea recta, indicando un comportamiento lineal que no introduce deformación armónica presente en la señal de onda [7].

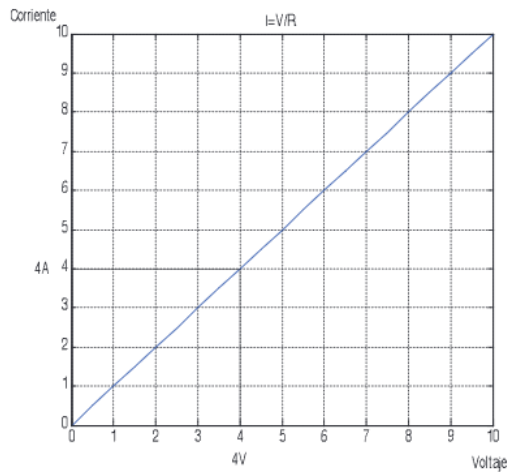


Figura 3. 3 Gráfico que representa la respuesta característica de una carga lineal [7].

3.3.2. Cargas no lineales

Se caracterizan por consumir corrientes cuya señal no adopta un perfil senoidal. Esta corriente, al circular por la oposición equivalente del sistema al flujo de corriente eléctrica, genera caídas de tensión igualmente distorsionadas, lo que produce una deformación de la señal de voltaje en los terminales de la carga. Este fenómeno puede afectar negativamente el estándar de calidad del suministro energético del sistema. Entre los ejemplos más representativos de cargas no lineales figuran los convertidores de electrónica de potencia, dispositivos con núcleos magnéticos en saturación y los hornos de arco eléctrico [7].

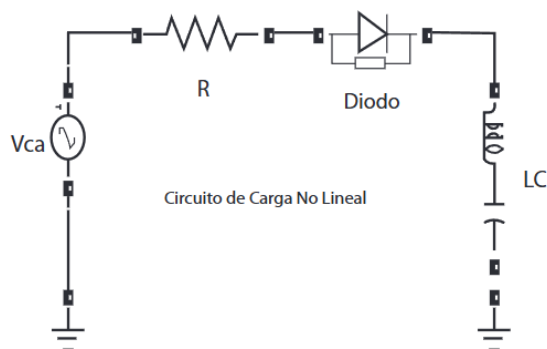


Figura 3. 4 Circuito de carga no lineal [7].

En los años recientes, se ha extendido la incorporación de cargas de comportamiento no lineal ha experimentado un notable incremento, especialmente en el ámbito industrial entre ellas, los convertidores estáticos destacan por su amplia aplicación en sistemas empleadas para alimentar procesos electroquímicos, accionamientos de velocidad variable y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS); no obstante, tales cargas introducen un alto nivel de distorsión en la corriente, lo que puede provocar sobrecalentamiento en transformadores y conductores, así como interferencias en dispositivos de comunicación.

A diferencia de las cargas lineales, en los sistemas no lineales la corriente no mantiene proporcionalidad directa con la tensión aplicada; adicionalmente, la distorsión del voltaje puede comprometer el desempeño adecuado de equipos sensibles —como computadoras y microcontroladores—, tal como se evidencia en la figura 5. [7].

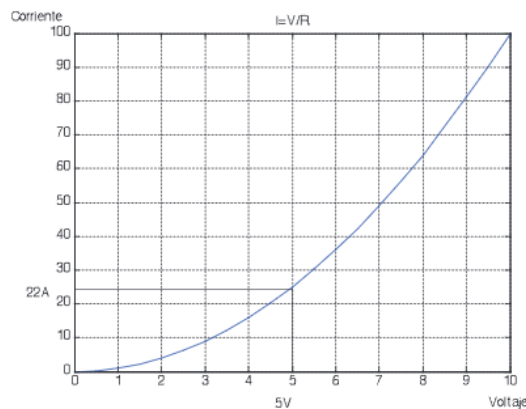


Figura 3. 5 Desempeño de una carga no lineal. [7].

3.4. Factor de distorsión armónica de Voltaje total

La THD_k (distorsión armónica total de tensión) se define como el porcentaje resultante de comparar la raíz cuadrática media de todos los armónicos de una señal de tensión con su componente fundamental; este indicador sirve para valorar la calidad del suministro eléctrico y los impactos que generan las cargas no lineales en los sistemas de potencia. [3].

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

Donde:

$V_{h,1}$:Corresponde al valor eficaz (rms) de la componente fundamental de tensión en el lugar donde se realiza la medición.

$V_{h,k}$: Componente armónica de tensión V_h registrada en el período k de 10 minutos, conforme a la IEEE Std 519-2014.

3.5. Armónica de voltaje h en el intervalo k de 10 minutos

Los componentes armónicos individuales se representan por su magnitud RMS, denotada como $V_{h,k}$ para el voltaje, y se utilizan para calcular la distorsión armónica total (THD) [3].

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

Donde:

$V_{h,i}$: Magnitud eficaz (rms) de la componente armónica de tensión de orden h (para $h = 2, 3, \dots, 50$), registrada cada 3 segundos ($i = 1, 2, \dots, 200$).

3.6. Factor de distorsión individual de voltaje

El $DV_{h,k}$ representa el porcentaje de distorsión que aporta un armónico específico de orden h al sistema de voltaje respecto a la componente fundamental. Es una medida individual, no acumulativa como el THD_k [3].

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} * 100[\%]$$

3.7. Armónicos de tensión individual

La definición del índice de distorsión armónica individual queda establecida por la siguiente expresión matemática. [8]:

$$D_i = \frac{I_i}{I_N} * 100\%$$

Donde:

I_i : Corriente armónica individual

I_N : Corriente nominal de alimentación

Según la IEEE 519-2014, los umbrales admitidos para las corrientes armónicas individuales se determinan a partir de la relación entre la corriente de cortocircuito disponible en el punto común de acoplamiento (PCC) y la corriente máxima de carga (IL) en el punto de suministro [9].

3.8. Perturbaciones en los sistemas eléctricos de potencia

Estos reconocidos y definidos por organismos como el IEEE, representan alteraciones que afectan la precisión de las mediciones y el desempeño del servicio. Las perturbaciones pueden manifestarse de distintas maneras: de forma aislada, simultánea, consecutiva o de manera continua y estable, como es el caso de los armónicos, el ruido eléctrico y otras interferencias [10].

Se entiende por perturbación eléctrica a cualquier alteración inesperada dentro del perfil de onda de la señal, la cual, en condiciones normales, presenta un comportamiento estable y continuo. Estas variaciones pueden afectar parámetros fundamentales entre otros parámetros, la amplitud, el perfil, la simetría y la frecuencia que caracterizan a la señal, generando desviaciones respecto al comportamiento eléctrico previsto y comprometiendo la calidad del suministro [11].

Uno de los principales motivos para establecer distintas categorías de fenómenos electromagnéticos es que las soluciones a las problemáticas vinculadas con la calidad de la energía varían según el tipo específico de alteración presente. En este sentido, se analizan las diferentes alternativas de solución disponibles para cada caso. Además, existen distintos requerimientos para caracterizar estos fenómenos mediante mediciones. La correcta clasificación de eventos y fenómenos electromagnéticos resulta fundamental para su análisis, por lo que también se abordan los criterios de medición específicos para cada categoría como se muestra en la tabla 7.1 del Anexo A [11].

Las perturbaciones eléctricas pueden categorizarse también de acuerdo con su origen. Algunas provienen del entorno externo al sistema eléctrico, siendo ocasionadas por fenómenos naturales como descargas atmosféricas, tormentas o movimientos sísmicos,

así como por interferencias electromagnéticas generadas por acciones humanas. Por otro lado, existen perturbaciones internas, que se originan dentro del propio sistema eléctrico.

3.9. Armónicos

Estos se caracterizan por ser alteraciones que modifican la forma original senoidal de una onda eléctrica. Se manifiestan como señales adicionales de naturaleza periódica que se superponen sobre la onda fundamental, generando deformación en las señales de corriente y tensión. Estas frecuencias múltiples de la fundamental surgen como resultado de eventos transitorios o cargas no lineales, y pueden interferir con el cruce por cero de la señal, así como con otros parámetros eléctricos, afectando el desempeño adecuado del sistema [12].

3.9.1. Origen de los Armónicos

Estos se originan como consecuencia de la incorporación de cargas de comportamiento no lineal dentro de los sistemas eléctricos. Estas cargas alteran la forma senoidal pura de la corriente o el voltaje, generando elementos espectrales cuya frecuencia corresponde a múltiplos de la fundamental. Este fenómeno es común en sistemas donde se emplean dispositivos electrónicos de potencia o cargas que no presentan una impedancia constante. A continuación, se enumeran las principales fuentes de distorsión armónica:

- Dispositivos de reactancia, tanto electromagnética como electrónica
- Máquinas de soldadura eléctrica
- Aparatos electrónicos alimentados por la red monofásica
- Reactancias electromagnéticas utilizadas en luminarias
- Encendedores electrónicos (starters)
- Accionamientos de velocidad variable (variadores) [12]

3.9.2. Efectos de los Armónicos en la Red eléctrica

La existencia de armónicos en los sistemas eléctricos ocasiona diversos inconvenientes técnicos y operativos que repercuten en la calidad del suministro como la integridad de los equipos conectados. Estas distorsiones pueden tener consecuencias graves si no se controlan adecuadamente, tanto a nivel industrial como residencial. A continuación, se detallan los principales efectos adversos asociados a los armónicos:

- Aumento de la potencia prevista para ser transferida;

- Disparos no programados de interruptores automáticos;
- Conductores sometidos a sobrecarga;
- Vibraciones y esfuerzos excesivos en la maquinaria;
- Surgimiento de inestabilidades en la red eléctrica;
- Relés de protección que permanecen inactivos;
- Disminución de la impedancia de los condensadores $X_C = 1/\omega \cdot C$, lo que provoca fallos en la batería autorregulada instalada para corregir la potencia cuando ocurre la resonancia $X_L = X_C$;
- Registros inexactos en los equipos de medición. Las empresas distribuidoras evalúan las sanciones aplicables a las instalaciones que introducen armónicos, del mismo modo que lo hacen con aquellas que generan energía reactiva [12].

3.9.3. Efectos de los Armónicos en una instalación eléctrica interna

Estos están presentes en una instalación eléctrica interna pueden ocasionar diversos efectos adversos que comprometen la integridad y la eficacia operativa del sistema. Entre los principales impactos se encuentra:

- Degradación del factor de potencia en la instalación, lo que acelera el envejecimiento y puede llegar a destruir el banco de condensadores destinado a su corrección.
- Disparos inesperados de interruptores automáticos y diferenciales.
- Deformación de las señales de tensión y corriente, con el consiguiente funcionamiento deficiente de los actuadores o aparatos eléctricos.
- Sobrecalentamiento y daño de aislantes, así como de los dispositivos de protección de las cargas eléctricas.
- Elevado calentamiento de los conductores, particularmente en el conductor neutro de las instalaciones [12].

3.10. Factor de Potencia (FP)

Se define como el vínculo existente entre la potencia activa y la aparente, calculada a partir de los valores eficaces de la componente fundamental de tensión y corriente. En

condiciones ideales, donde no existe distorsión armónica ($THD_i = THD_v = 0$), el valor del factor de potencia está dado por el coseno del ángulo de desfase existente entre la tensión y la corriente, es decir, $FP = \cos\varphi$.

Dentro de los sistemas eléctricos, el factor de potencia constituye un parámetro esencial, pues un valor reducido revela una elevada demanda de potencia reactiva, lo que se traduce en costos adicionales en la factura eléctrica. Para mitigar estos costos, es necesario emplear dispositivos que generen potencia reactiva capacitiva y contrarresten la potencia reactiva inductiva exigida por las cargas del sistema [13].

3.10.1. Coseno de Φ

En contraposición al FP, el $\cos \varphi$ representa la razón entre la potencia activa y la aparente, calculada a partir de los valores eficaces de tensión y corriente que integran componentes de diversas frecuencias presentes en la instalación eléctrica. [13].

Bajo condiciones de distorsión armónica, el factor de potencia difiere del coseno del ángulo de desfase asociado a la componente fundamental, es decir:

$$FP \neq \cos \varphi$$

3.11. Desequilibrio de Tensión

Se denomina desequilibrio de tensión al cociente entre la componente de secuencia negativa (o cero) y la componente de secuencia positiva. Habitualmente, este desequilibrio se origina en cargas desbalanceadas, responsables de producir corrientes de secuencia negativa o cero dentro del sistema eléctrico. Una forma común de estimar este fenómeno consiste en determinar la mayor desviación en relación con el valor medio de las tensiones o corrientes trifásicas, y dividirla por dicho promedio, expresando el resultado como un porcentaje [11].

$$\text{Desbalance de voltaje (\%)} = 100 \times \frac{\max|V_i - \bar{V}|}{\bar{V}}$$

- V_i : voltajes fase-fase individuales
- \bar{V} : voltaje promedio de las tres fases

3.12. Niveles de Tolerancia de armónicos.

En el contexto ecuatoriano, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), como entidad responsable de la administración del sistema único de información estadística del sector eléctrico, ha establecido una normativa técnica que define los límites aceptables de calidad del servicio eléctrico. La normativa impone a las empresas distribuidoras del servicio el respeto de topes máximos para la distorsión armónica total (THDv) y la distorsión armónica individual (IHDv); dichos parámetros, expresados como porcentaje del voltaje nominal en el punto de medición, no pueden rebasar los valores consignados en la Tabla 1.

Tabla 3. 1 Topes permitidos de armónicos de tensión (expresados como porcentaje del valor nominal de voltaje). [3].

Nivel de Voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

3.13. Cumplimiento de los índices de armónicos en el punto de medición

Se acredita que la empresa distribuidora cumple con los límites de distorsión armónica individual y total de tensión en un punto de medición cuando, a lo largo de un período continuo de evaluación de al menos siete (7) días, el 95 % o más de los registros de cada fase se mantienen por debajo de los topes máximos establecidos por la normativa [3].

3.14. Reducción de armónicos

Una de las estrategias para mitigar las corrientes y voltajes armónicos generadas por fuentes como lámparas consiste en emplear transformadores con conexión delta-estrella para eliminar las corrientes de secuencia cero. Además, se recomienda disminuir la carga del transformador para evitar su saturación o reemplazarlo por uno con mayor capacidad. En sistemas con variadores de velocidad, es común instalar reactores que atenúen los picos transitorios y reduzcan las armónicas producidas. Para rectificadores, la sustitución de configuraciones de 6 pulsos por otras de 12 pulsos, alimentadas a través de transformadores delta-estrella, ayuda a disminuir significativamente las armónicas [14].

Otra técnica ampliamente utilizada es la implementación de filtros sintonizados pasivos, recomendados especialmente cuando la distorsión armónica total de tensión (THDv) rebasa el intervalo del 2,5 % al 3 %. Estos filtros evitan la amplificación de armónicos y minimizan los efectos de resonancia entre bancos de capacitores y transformadores. También existen filtros activos basados en electrónica de potencia, cuyo propósito es cancelar los diferentes niveles armónicos presentes, mejorando la calidad del suministro eléctrico [14].

3.15. MÉTODOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL PRODUCTO

3.15.1. Sag y Swell

De acuerdo con Asanza [15], es posible llevar a cabo el diseño y la elaboración del modelo de un Dispositivo de Restauración Dinámica de Tensión (DVR) destinado a resguardar una carga crítica en una red de distribución. Este dispositivo tiene como finalidad mantener estable el voltaje en dicha carga, proporcionando una solución efectiva frente a perturbaciones como caídas (sag) y elevaciones (swell) de voltaje, las cuales pueden afectar significativamente su funcionamiento.

3.15.2. Bajo factor de potencia

En la literatura técnica se han identificado distintos métodos para la compensación de potencia reactiva, cuya implementación está condicionado por variables tales como la tecnología utilizada, los costos involucrados y el tiempo de respuesta del sistema. Entre las alternativas más representativas se encuentran los inversores con capacidad de inyectar reactivos, los bancos de capacitores, los condensadores síncronos, De acuerdo con el análisis comparativo de la investigación, el esquema que ofrece mayor eficacia, confiabilidad y capacidad de adaptación es el banco automático de compensación provisto de filtro desintonizado, superando a los arreglos de condensadores fijos, a los compensadores estáticos de VAR (SVC) y a los bancos automáticos de condensadores con filtros convencionales, por lo que se erige como la alternativa más conveniente en escenarios de operación exigentes y cambiantes. [16]

3.15.3. Flicker

Para mitigar o eliminar el efecto del flicker en un sistema eléctrico, se pueden implementar diversas estrategias que varían en complejidad, según la naturaleza de las cargas y la escala de la instalación. Una de las primeras acciones recomendadas es

seleccionar adecuadamente las fuentes de iluminación, ya que algunas presentan mayor sensibilidad a las variaciones de tensión. Por ejemplo, las lámparas fluorescentes son considerablemente más susceptibles al flicker que las incandescentes, sin embargo, el uso de balastos electrónicos en lámparas fluorescentes (alimentados a frecuencias superiores a 20 kHz) puede reducir la percepción del parpadeo, aunque podrían introducir armónicos en la red [17].

Otra alternativa es la instalación de reguladores de voltaje, especialmente cuando el problema se localiza en un grupo específico de usuarios. Estos equipos permiten estabilizar la tensión de alimentación de manera puntual. Adicionalmente, se pueden realizar modificaciones en los equipos que generan el flicker. Esto puede implicar el ajuste de ciclos de operación, como disminuir la velocidad de llenado en hornos eléctricos, cambiar la secuencia de soldadura o utilizar métodos de arranque de motores que limiten la corriente de arranque, contribuyendo así a una menor perturbación en la red [17].

3.15.4. Sobrevoltaje

La protección contra sobrevoltajes tiene como objetivo salvaguardar equipos e instalaciones eléctricas frente a elevaciones bruscas de tensión, las cuales pueden ser originadas por maniobras de conmutación o descargas atmosféricas. En el ámbito de la protección contra rayos, se suele distinguir entre medidas externas (como pararrayos) e internas (como dispositivos instalados dentro del sistema eléctrico) [18].

Uno de los elementos clave para esta protección son los Dispositivos de Protección contra Sobretensiones (DPS), también conocidos por diversas denominaciones como descargadores de sobretensión, limitadores de sobretensiones transitorias o descargadores atmosféricos. Estos equipos, conocidos internacionalmente como SPD (Surge Protection Device), están diseñados para limitar o desviar sobrevoltajes transitorios o impulsos eléctricos, protegiendo no solo redes eléctricas, sino también infraestructuras de telecomunicaciones, voz y datos [18].

3.15.5. Filtros Activos

Estos sirven como una respuesta eficaz para la compensación de armónicos en sistemas eléctricos. Estos dispositivos emplean un inversor con modulación por ancho de pulso (PWM) y un esquema de control que permite identificar la distorsión presente en corriente

y voltaje. Con el diagnóstico obtenido, se generan señales correctivas que se inyectan en la red para suprimir o atenuar los armónicos; su vigilancia permanente en tiempo real los convierte en herramientas especialmente valiosas allí donde la calidad del suministro eléctrico es crucial [19].

Los filtros activos en configuración serie presentan limitaciones técnicas, especialmente en condiciones de falla, lo que dificulta su dimensionamiento y aplicación práctica. Además, esta configuración solo permite corregir los armónicos de voltaje, dejando sin compensación los armónicos de corriente, lo cual restringe su efectividad en instalaciones con altas cargas no lineales [19].

Los filtros activos en configuración paralela funcionan como generadores de corriente, corrigiendo las distorsiones en la forma de onda causadas por cargas no lineales. Su controlador monitorea de manera continua la corriente de carga y, mediante algoritmos específicos, calcula la corriente de compensación instantánea. Esta corriente es luego inyectada al punto de conexión mediante un convertidor, con el objetivo de eliminar las componentes armónicas presentes en el sistema [19].

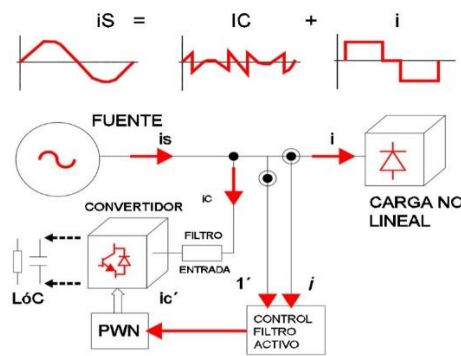


Figura 3. 6 Funcionamiento de un filtro activo en paralelo [19].

3.16. Normativas Aplicadas

Con el propósito de respaldar el análisis de calidad de energía desarrollado en este estudio, se tomaron como referencia las normativas nacionales e internacionales vigentes en el año 2025 en Ecuador. Estas normativas establecen los criterios técnicos necesarios para evaluar el desempeño del sistema eléctrico y asegurar que se cumplan los estándares requeridos.

3.16.1. Normativa Nacional

3.16.1.1. Regulación No. ARCONEL 009/24

Esta normativa contempla la evaluación de cuatro parámetros clave: el nivel de voltaje, el flicker, la distorsión armónica del voltaje y el desequilibrio de voltaje, los cuales se describen en detalle en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 2 Resumen de Parámetros de Calidad del Servicio Eléctrico [3].

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALORES ADMISIBLES
Nivel de voltaje	Se refiere a la amplitud del voltaje suministrado por el sistema eléctrico.	Alto Voltaje (Grupo 1 y 2): $\pm 5\%$ Medio Voltaje: $\pm 6\%$ Bajo Voltaje: $\pm 8\%$
Perturbaciones rápidas de voltaje (Flicker)	Cambios rápidos en el nivel de voltaje que puede causar parpadeos en las luces.	Índice de severidad ≤ 1 (95% de los valores deben cumplir durante 7 días).
Distorsión Armónica de Voltaje	Distorsión en la forma de onda de voltaje debido a armónicos generados por cargas no lineales.	Bajo Voltaje: THD $\leq 8\%$ Medio Voltaje: THD $\leq 5\%$ Alto Voltaje (grupo 1): THD $\leq 2.5\%$ Alto Voltaje (grupo 2): THD $\leq 1.5\%$.

3.16.2. Normativa Internacional

3.16.2.1. IEEE std 519 – 2014

La norma IEEE 519 está orientada principalmente al análisis y control de los armónicos producidos por cargas no lineales, con el fin de prevenir problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica. Esta normativa establece límites tanto para la distorsión armónica total (THD) como para la distorsión armónica individual, permitiendo así un control más preciso del contenido armónico en los sistemas eléctricos. De manera similar, la Regulación No. ARCONEL 009/24 incorpora varios lineamientos provenientes de la IEEE 519, adoptando sus criterios para establecer límites permisibles de distorsión en el voltaje. Estos valores de referencia pueden visualizarse en la Tabla 3.3, donde se detallan los niveles máximos aceptables de armónicos según la categoría del sistema.

Además, en la tabla 3.5 se observa los límites de corriente recomendados para sistemas con tensión nominal de 120 V a 69 kV.

Tabla 3. 3 Límites de distorsión de corriente para sistemas clasificados de 120 V / 69 kV [9].

Distorsión máxima de la corriente armónica en porcentaje de I_L.						
Orden armónico individual (armónicos impares) ^{a,b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20 ^c	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

3.16.2.2. IEEE std 1159 – 1995

La norma IEEE 1159 establece una práctica recomendada para la monitorización de la calidad de energía en sistemas de baja tensión, ante la dificultad de comparar resultados obtenidos mediante distintos equipos de medición. Su objetivo principal es unificar criterios entre fabricantes e investigadores, a través de definiciones comunes y lineamientos que orienten tanto el uso como la interpretación de los instrumentos de monitoreo. Aunque no se logró una estandarización completa de los algoritmos de procesamiento de datos, debido a la diversidad del mercado, la norma ofrece una guía valiosa para la caracterización de fenómenos asociados a la calidad de energía, permitiendo una evaluación más coherente y comparable entre diferentes sistemas eléctricos [11].

La norma IEEE 1159 proporciona una clasificación detallada de los principales fenómenos asociados a la calidad de energía, los cuales se presentan en la Tabla 7.1 del Anexo A. En esta tabla se incluyen parámetros característicos como el contenido espectral típico, la duración típica y la magnitud de voltaje esperada para cada tipo de perturbación, lo que permite una mejor identificación y análisis de eventos como caídas de tensión, sobretensiones, transitorios, distorsiones armónicas, entre otros [11].

4. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

El presente estudio tiene como propósito evaluar la calidad de la energía eléctrica suministrada a la empresa AVIPAZ. La Figura 4.1 ilustra la metodología aplicada, la cual se desarrolla en diversas etapas siguiendo una secuencia lógica que permite verificar el cumplimiento de la normativa vigente.

La evaluación de la calidad de energía se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa AVIPAZ, cuya red eléctrica opera a una tensión nominal de 13.8 kV. Para el desarrollo del estudio, se consideraron aspectos fundamentales como el alimentador de suministro, el tipo de aforo contratado y la configuración de las cargas.

En primer lugar, se procedió a la identificación y clasificación de las cargas, considerando tanto cargas lineales como no lineales distribuidas a lo largo de la planta. Se llevó a cabo una recolección minuciosa de información técnica, que incluyó los diagramas unifilares, las especificaciones de carga y características eléctricas de los equipos instalados, así como un levantamiento detallado de motores, conductores, protecciones y variadores de frecuencia. Este levantamiento de datos permitió conocer la ubicación de cargas críticas y los puntos de mayor demanda, sirviendo como base para las siguientes fases del análisis.

Posteriormente, se realizaron mediciones con un analizador de calidad de energía Fluke 435-II durante un periodo de siete días, instalando el equipo antes y después del filtro activo para el análisis de armónicos de corriente y voltaje. Esta decisión se tomó con el fin de evaluar específicamente la efectividad del filtro activo en la mitigación de distorsiones armónicas.

Para los restantes parámetros evaluados de desbalance de corriente y voltaje, factor de potencia, flicker, sags y swells, se realizaron únicamente mediciones posteriores a la implementación del filtro, con el objetivo de caracterizar el comportamiento actual de la red eléctrica tras la corrección armónica. De este modo, no se pretende establecer comparaciones directas antes y después del filtro para estos parámetros, sino describir su estado bajo condiciones operativas normales. Este enfoque se adoptó con base en las recomendaciones establecidas en las normas IEEE 519-2014 [9], IEEE 1159 [11] y ARCONEL 009/24 [7].

Paralelamente, se desarrolló una simulación del sistema eléctrico interno de la empresa mediante el software especializado ETAP, utilizando como base la información recolectada durante el levantamiento en campo. Este modelo permitió analizar el comportamiento de la red bajo distintas condiciones operativas, incluyendo escenarios de máxima y mínima demanda, considerando el funcionamiento de los 40 motores instalados en la planta.

En particular, la simulación permitió evidenciar el comportamiento del filtro activo frente al porcentaje de distorsión armónica total (THD) de corriente en tres escenarios clave. El primero correspondió al análisis del THD de corriente antes y después del filtro durante los siete días de monitoreo continuo. El segundo escenario se centró en la jornada laboral de lunes a viernes, evaluando el comportamiento del filtro tanto en condiciones de máxima demanda (cuando la mayoría de motores se encuentran en operación) como en condiciones de mínima demanda. Finalmente, el tercer escenario analizó la jornada de descanso de fin de semana, en la cual no existe producción, por lo que la demanda es mínima. En este último caso, se observaron valores bajos de corriente armónica, aunque con niveles de THD relativamente elevados, debido a la escasa magnitud de la corriente fundamental. Todos estos escenarios fueron modelados y validados en ETAP, permitiendo visualizar la respuesta del sistema ante las distintas cargas y la efectividad del filtro implementado.

Los datos obtenidos del monitoreo fueron organizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, donde se elaboraron gráficos comparativos y tablas resumen para facilitar el análisis. Se evaluaron parámetros como el THD de corriente y tensión, los armónicos individuales (3°, 5°, 7°, etc.), el factor de potencia total y el nivel de desequilibrio de tensión entre fases. Estos resultados fueron contrastados con los límites establecidos por la normativa ARCONEL 009/24, a fin de verificar su cumplimiento.

Con base en los resultados obtenidos, se verificó si los valores medidos cumplían con los límites establecidos por la normativa. En los casos en los que no se alcanzaban los valores requeridos, se procedió a una evaluación adicional del filtro activo, utilizando simulaciones en ETAP para analizar su comportamiento frente a condiciones específicas de carga. Si los resultados mostraban cumplimiento, se dio por finalizado el análisis.

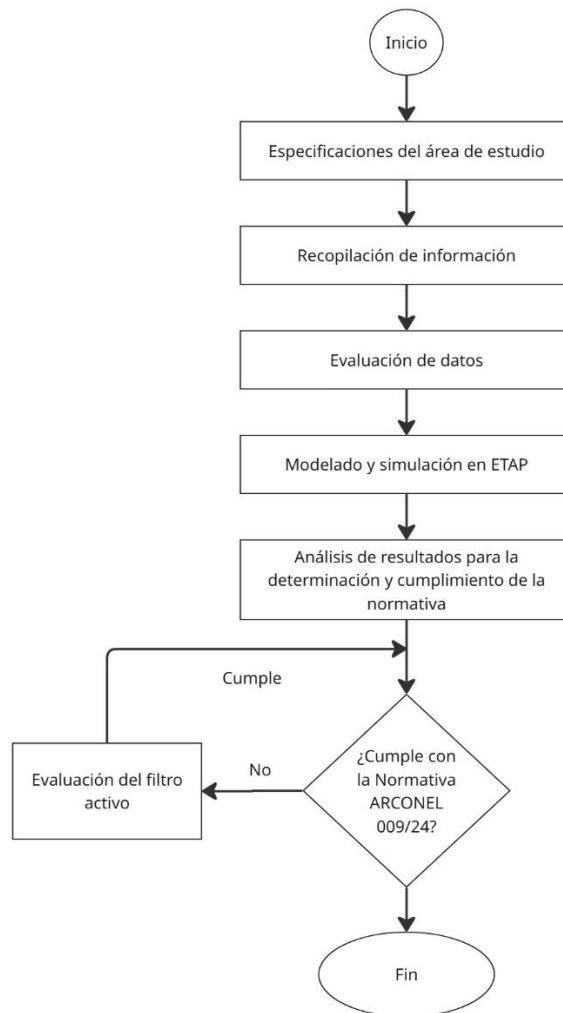


Figura 4. 1 Metodología utilizada en el estudio

4.1. Especificaciones del área de estudio

4.1.1. Antecedentes

La empresa AVIPAZ Cía. Ltda. es una compañía de responsabilidad limitada fundada por emprendedores ambateños, cuya actividad principal se centra en la fabricación de productos alimenticios de alta calidad, dirigidos tanto al consumo humano como animal. Su compromiso con la excelencia y el desarrollo sostenible le ha permitido consolidar una amplia red de socios estratégicos, que incluye productores, distribuidores y puntos de venta a nivel nacional. Actualmente, sus productos tienen presencia en todo el territorio ecuatoriano [20].

En su trayectoria, AVIPAZ ha mostrado una evolución constante, adaptándose a las demandas de un mercado competitivo mediante la incorporación de tecnologías modernas y el fortalecimiento de su capital humano. Esta visión ha permitido a la empresa mantener

un crecimiento sostenido, impulsado por la innovación en sus procesos y la mejora continua de sus productos [20].

Uno de sus principales sellos de identidad es su eslogan institucional “el mejor alimento”, el cual refleja el compromiso de la empresa con la calidad y la nutrición. Este mensaje se complementa con la línea de productos para mascotas bajo la marca Mascottpaz, cuya filosofía se resume en la frase “un amor de alimento”, destacando el enfoque humano y afectivo con el que se desarrollan sus productos [20].

4.1.2. Localización Geográfica

En el barrio Santa Fe, sector Cuatro Esquinas, de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, se llevará a cabo la presente investigación de titulación en la empresa Avipaz Cía. Ltda..

Tabla 4. 1 Coordenadas Geográficas de la industria Avipaz Cía. Ltda

Longitud	78° 36' 16.26
Latitud	1° 12' 8.18''
Rango Altitudinal	2689 m.s.n.m

Fuente: (Google Maps, 2025)



Figura 4. 2 Localización de la Industria Avipaz Cía. Ltda

4.1.3. Caracterización del Sistema Eléctrico

La empresa AVIPAZ dispone de un sistema eléctrico trifásico que se alimenta desde la subestación Samanga, mediante un alimentador identificado como “C.T. – E.F.C.B. – 2016”. Este alimentador está conformado por un conductor tipo ACSR 1/0 operando a una tensión de 13,8 kV. Desde este punto, se deriva una línea que conecta directamente con el transformador de la empresa, denominada “AVIPAZ”, la cual mantiene las mismas características de conductor (ACSR 1/0) y tensión nominal. Esta línea tiene una longitud aproximada de 38 metros.

Dado que se trata de un transformador de propiedad privada, el alimentador adquiere el nombre de la empresa y su operación se encuentra bajo la supervisión de la Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA). El transformador utilizado es de tipo PadMounted, trifásico, instalado en cabina, con una capacidad nominal de 500 kVA. Su relación de transformación es de 13,8 kV a 440 V y presenta una configuración de conexión delta-estrella, adecuada para suministrar energía a cargas balanceadas y no balanceadas dentro de la instalación industrial.

4.2. Recopilación de Información

Se estructuró diferentes fases para obtener información de la empresa AVIPAZ, la cual es la siguiente:

4.2.1. Fase A: Levantamiento de cargas

Durante la fase inicial del estudio, se llevó a cabo una inspección exhaustiva de las instalaciones industriales, la cual contó con la participación activa y el acompañamiento del personal encargado de la operación y supervisión del área de mantenimiento. Esta colaboración fue clave para asegurar un conocimiento profundo y detallado de los procesos productivos y de los equipos electromecánicos en funcionamiento dentro de la planta.

El objetivo principal de esta actividad fue identificar y caracterizar los principales equipos electromecánicos que se encuentran en operación, haciendo especial énfasis en los motores eléctricos, dado que estos constituyen una porción significativa de la carga instalada en la planta y representan un factor determinante en el consumo energético y la calidad de la energía eléctrica. Durante la inspección, además de la observación directa de los procesos productivos asociados a dichos equipos, se llevó a cabo la recopilación de información técnica detallada y específica de cada motor, con el fin de contar con datos precisos que permitan realizar análisis posteriores con mayor confiabilidad.

Entre los parámetros técnicos recopilados se incluyen: la marca y modelo del motor, la potencia nominal expresada en caballos de fuerza (HP), el nivel de voltaje al cual opera cada motor (expresado en kilovoltios, kV), la configuración de conexión (ya sea estrella, triángulo u otra), la potencia activa consumida en kilovatios (kW), y el factor de potencia ($\cos \phi$), el cual indica la eficiencia con la que el motor utiliza la energía eléctrica. Asimismo, se consideraron parámetros más específicos como el ángulo de disparo, la

velocidad nominal del motor en revoluciones por minuto (RPM), y el rendimiento o eficiencia del motor, lo que permite evaluar el desempeño energético del equipo.

Otros parámetros fundamentales para el análisis dinámico del sistema fueron la relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal (I_a/I_r), la reactancia subtransitoria X_d'' , que influye en la respuesta del motor ante variaciones rápidas de carga, la corriente nominal (I_n), y el tipo de carga mecánica asociada (QL), que puede variar dependiendo del proceso productivo. Estos datos son esenciales para evaluar el comportamiento eléctrico y mecánico del sistema frente a condiciones variables como el arranque de motores, la operación en carga parcial o la presencia de perturbaciones externas que puedan afectar la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico.

Para garantizar una adecuada gestión de la información recolectada, todos los datos fueron organizados y sistematizados utilizando herramientas informáticas, específicamente Microsoft Excel, lo que facilitó su ordenamiento, almacenamiento y posterior procesamiento. Esta sistematización permitió, además, realizar análisis comparativos, identificar posibles inconsistencias y preparar la información para su integración en modelos de simulación y análisis energético.

La Figura 4.3 ilustra de manera esquemática el procedimiento seguido durante esta etapa de levantamiento de información técnica, mostrando la estructura lógica del proceso y cómo se interrelacionan las distintas actividades realizadas para asegurar una recopilación de datos precisa y confiable.

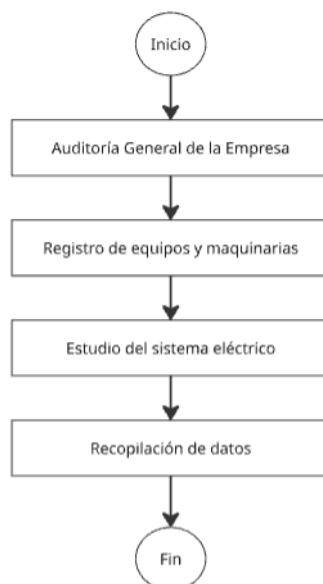


Figura 4. 3 Proceso del levantamiento de cargas en la empresa AVIPAZ.

4.2.2. Fase B: Diagrama unifilar y planta

Una vez concluida la Fase A, que radicó en la recopilación y análisis minucioso de la indagación técnica conexas con la instalación industrial de la empresa AVIPAZ, se dio inicio a la siguiente etapa del estudio, enfocada en el diseño del modelo eléctrico de la planta. Para esta fase se empleó el software AutoCAD, una herramienta reconocida por su precisión y flexibilidad en el diseño y representación gráfica de sistemas eléctricos complejos.

El proceso de modelado comenzó con la producción del esquema unifilar general del sistema eléctrico, el cual ofrece una visión integral y estructurada de toda la arquitectura eléctrica de la instalación. Este diagrama refleja la disposición completa de los componentes principales, partiendo desde la fuente de alimentación hasta la distribución hacia las cargas finales. En este sentido, se consideró un transformador tipo pad-mounted con una capacidad nominal de 500 kVA, propiedad de la empresa, que cumple la función crítica de reducir la tensión de alimentación desde media tensión a baja tensión. Este transformador cuenta con una relación de transformación de 13,8 kV a 220 V, y una conexión delta-estrella, configuraciones que son esenciales para la adecuada operación y estabilidad del sistema eléctrico.

El diagrama unifilar modela el circuito único de alimentación que inicia en el punto de conexión con el alimentador de media tensión, continúa atravesando el transformador y llega hasta la barra principal de distribución. Desde esta barra principal, la energía eléctrica se distribuye a un total de 40 motores eléctricos trifásicos, los cuales están distribuidos en cuatro niveles diferentes dentro de la planta, lo que representa una carga considerable y diversa para el sistema. En el modelo también se incorporaron elementos fundamentales para la operación segura y eficiente del sistema, tales como las protecciones eléctricas, interruptores principales, canalizaciones y las rutas de alimentación que conectan a cada una de las cargas eléctricas. La especificación detallada de los conductores utilizados en esta red se encuentra documentada en la tabla 0.4 del Anexo A.

De manera paralela a la creación del diagrama unifilar, se desarrolló el plano de planta eléctrico, que permite una representación espacial precisa de la ubicación física de los equipos y componentes eléctricos dentro de las instalaciones industriales. Este plano no solo complementa el diagrama unifilar, sino que también se constituye en una herramienta

fundamental para facilitar futuras tareas de mantenimiento, inspección y posibles expansiones del sistema eléctrico. La integración de ambos documentos aporta una comprensión completa tanto funcional como física del sistema eléctrico de la planta.

Todo el proceso de modelado se llevó a cabo bajo estrictos lineamientos establecidos por la normativa ANSI, con la finalidad de garantizar que el diseño cumpla con los parámetros internacionales de seguridad, calidad y eficiencia eléctrica. Este cumplimiento normativo es clave para minimizar riesgos, asegurar la confiabilidad del sistema y facilitar la entrega de permisos y certificaciones necesarias para la operación legal y segura de la instalación.

4.2.3. Fase C: Obtención de parámetros eléctricos mediante el Fluke 435-II

Para evaluar la calidad de la energía, los datos eléctricos que suministra el analizador de redes Fluke 435-II se obtienen mediante el procedimiento expuesto en la Figura 4.4.

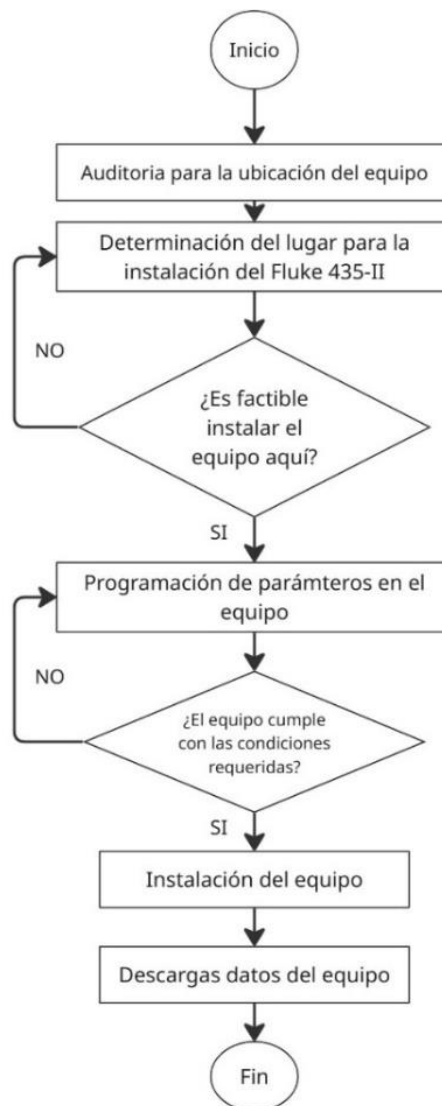


Figura 4. 4 Proceso de obtención de datos mediante el analizador de redes.

4.2.3.1.Ubicación del analizador de redes

A partir de la información obtenida en la fase inicial y conforme a lo indicado en la normativa IEEE-1159-1995 [11], se determinó el punto más adecuado para ubicar el analizador de redes. Dicha normativa sugiere que, cuando la finalidad del monitoreo es evaluar la calidad eléctrica general de una instalación, el equipo de medición debe instalarse en el lado secundario del transformador de ingreso al sistema, típicamente en una barra de 600 V.

En esta ubicación, el monitor puede registrar tanto la calidad de la energía suministrada como los impactos generados por las cargas principales internas. En caso de requerir una evaluación más específica, se recomienda desplazar el equipo hacia puntos más alejados dentro del sistema de distribución, permitiendo así un análisis detallado por alimentador individual. Esta disposición se ejemplifica en la Figura 4.5.

Considerando los aspectos previamente mencionados y las características particulares del sistema eléctrico, se decidió instalar el analizador de redes en el tablero principal de distribución. Esta ubicación es estratégica y fundamental, ya que permite monitorear de manera integral el funcionamiento del sistema eléctrico, facilitando la detección oportuna de posibles fallas, desviaciones o anomalías en la calidad de la energía suministrada.

Además, la instalación en este punto clave permite obtener datos representativos que pueden ser comparados con los estándares establecidos en normativas nacionales e internacionales, garantizando así que el sistema opere dentro de los parámetros aceptables y contribuyendo a la mejora continua de la gestión energética.

Como parte del procedimiento de medición, se realizaron dos registros de datos: uno previo a la instalación del filtro activo y otro posterior a su puesta en marcha. Esta metodología permite evaluar con precisión el impacto del filtro activo en la reducción de armónicos y en la mejora general de la calidad de energía del sistema, proporcionando una base objetiva para el análisis comparativo y la toma de decisiones técnicas fundamentadas.

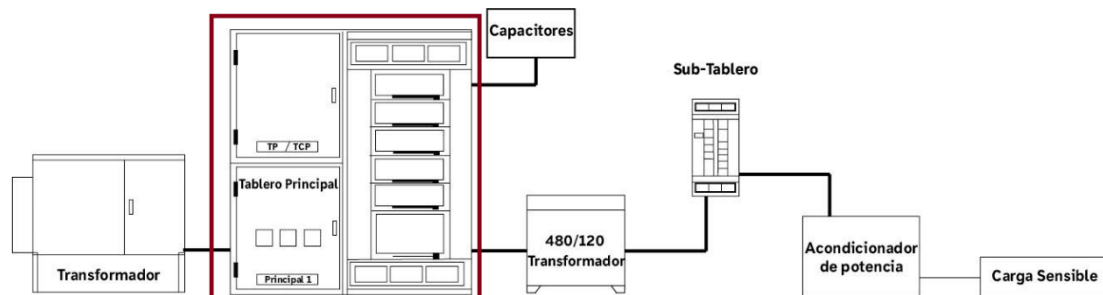


Figura 4. 5 Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico de industria (La parte encerrada de rojo es el lugar de instalación del equipo)

4.2.3.2. Programación de parámetros en el equipo

En este apartado se establecen los parámetros que serán utilizados, con el fin de evaluar la calidad del suministro eléctrico en la compañía AVIPAZ. Entre las variables consideradas se incluyen niveles de voltaje, corrientes, potencias (activa, reactiva y aparente), armónicos, entre otros indicadores eléctricos relevantes.

Según la regulación ARCONEL 009/18 [3] cada mes, en los puntos seleccionados se medirán, anotarán y resguardarán los valores durante un mínimo de siete días consecutivos, con muestreos cada 10 minutos. Tomando en cuenta la regulación mencionada nos permitirá que la medida de datos sea confiable y los resultados igualmente.

En la Figura 4.7 se presenta el analizador de calidad de energía Fluke 435-II, un equipo diseñado para diagnosticar fallas y optimizar el rendimiento de sistemas eléctricos mediante la medición simultánea de múltiples parámetros. Este dispositivo permite la visualización de resultados a través de lecturas numéricas, representaciones digitales, gráficos de tendencia que evidencian variaciones a lo largo del tiempo, formas de onda y diagramas fasoriales. Asimismo, tiene la capacidad de registrar eventos específicos del sistema, facilitando la identificación y corrección de incidencias asociadas a la calidad del suministro de energía eléctrica [21].

El analizador de calidad de energía Fluke 435-II, clasificado como equipo de Clase A, permite una evaluación precisa de sistemas eléctricos complejos. Incorpora la función PowerWave, que captura datos RMS, formas de onda y promedios por medio ciclo, facilitando el análisis de eventos transitorios como arranques de generadores o conmutaciones de UPS. Además, integra una calculadora de pérdidas energéticas, que cuantifica el impacto económico de armónicos, desequilibrios y potencia no útil [22].

El equipo puede monitorear hasta diez parámetros de calidad eléctrica simultáneamente, conforme a la norma EN50160, y permite la medición en sistemas trifásicos más neutro mediante sondas flexibles. Su diseño compacto facilita su uso en espacios reducidos, y su capacidad de registro automático asegura que todas las mediciones sean almacenadas sin necesidad de configuración previa [22].

Entre sus especificaciones destacan: una velocidad de muestreo de 200 kS/s, detección de transitorios hasta 6 kV, precisión básica de 0.1 % en tensión, 0.5 % en corriente, 1 % en potencia, y una autonomía de hasta 7 horas por carga [22].

4.2.3.3. Instalación del Fluke 435-II

El analizador de redes se instaló sobre el devanado secundario del transformador, el cual presenta una configuración de conexión delta-estrella, específicamente en el tablero principal de distribución. Previo al inicio del registro de datos, se verificaron parámetros clave en el equipo de medición, tales como el diagrama fasorial, los niveles de tensión, corriente y potencia en las tres fases, adicionalmente, se inspeccionó que tanto los cables de tensión como las sondas amperimétricas estuvieran correctamente instalados y conectados, asegurando la integridad de las mediciones.

La configuración de conexión utilizada, representada en la Figura 4.8, corresponde a un esquema de medición trifásico, el cual, en este caso particular, no incluye línea de neutro. Cabe destacar que el transformador donde se realizó la conexión no dispone de neutro ni tierra accesible, debido a que el suministro de cargas monofásicas a 120 V se encuentra a cargo de un segundo transformador, el cual fue instalado exclusivamente para ese propósito por la empresa AVIPAZ.

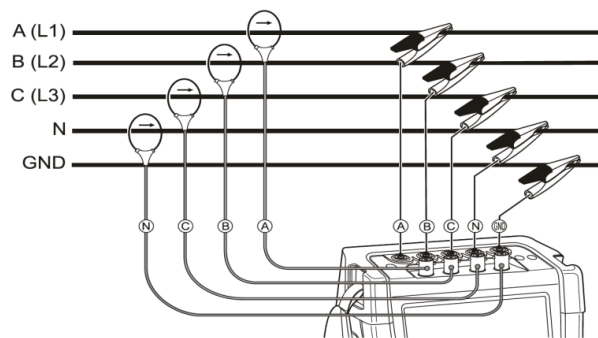


Figura 4. 6 Conexión del Fluke 435-II para medición [23].

Se configuró que el periodo de registro de datos sea de 7 días, por lo tanto, el analizador de redes empezó a medir desde el día lunes 23 de junio de 2025 a las 16:00:09 y finalizó

el martes 30 de junio de 2025 a la misma hora. El registro de datos se realizó cada 10 minutos tal como dicta la regulación Arconel 009/24.

En la Figura 4.9 se muestra la instalación del analizador de redes en el tablero de distribución principal, ubicado, tal como se indicó previamente, en el lado secundario del transformador, conforme a lo establecido para realizar las mediciones correspondientes.



Figura 4. 7 Instalación del analizador de red después del filtro de red en la Empresa

Adicionalmente, se realizó una segunda medición con el instrumento Fluke 435-II destinado a evaluar la calidad de la energía eléctrica, esta vez colocándolo antes del filtro activo, con el objetivo de registrar las condiciones eléctricas previas a la actuación del mismo. Esta configuración permite contrastar los datos registrados antes y después de aplicar la compensación, lo cual resulta fundamental para verificar si el filtro está cumpliendo con su función de mitigación de armónicos. En la Figura 4.10 se muestra la ubicación del analizador en este segundo punto de medición, correspondiente a la entrada del filtro activo.



Figura 4. 8 Instalación del analizador de red antes del filtro de red en la Empresa

4.2.3.4. Descarga de Datos del Equipo

Con el objetivo de visualizar, procesar y analizar la información registrada por el analizador de redes, los datos fueron transferidos directamente desde el equipo a un computador mediante un adaptador de conexión. Una vez en la computadora, la información fue gestionada a través del software PowerLog, el cual permite la visualización y descarga eficiente de los resultados obtenidos. Para un análisis más detallado, se exportaron a Excel los registros de tensión, corriente, armónicos, potencias, factor de potencia y diversas perturbaciones eléctricas.

4.3. Evaluación de Datos

Concluida la recopilación de datos expuesta en la Sección 4.3, la información recabada durante el intervalo de monitoreo fue organizada y sistematizada. Las mediciones se registraron de manera continua con un analizador de calidad de energía Fluke 435-II durante siete días, con intervalos de 10 minutos entre cada lectura, abarcando los principales parámetros eléctricos del sistema. Posteriormente, los datos fueron procesados mediante el cálculo de promedios diarios, ajustados según el tipo de variable analizada.

Con el propósito de evaluar los armónicos presentes en la corriente y la tensión, el analizador Fluke 435-II se instaló antes y después del filtro activo, permitiendo evaluar específicamente la efectividad del filtro en la mitigación de distorsiones armónicas.

En cuanto a los parámetros restantes, tales como desbalance de corriente y voltaje, factor de potencia, flicker, sags y swells, las mediciones se realizaron únicamente después de la implementación del filtro activo. Este enfoque buscó caracterizar el comportamiento actual de la red eléctrica bajo condiciones operativas normales, sin pretender establecer comparaciones directas entre los estados antes y después de la corrección armónica. La metodología adoptada se fundamenta en las recomendaciones establecidas en las normas IEEE 519-2014 [9], IEEE 1159 [11] y ARCONEL 009/24 [7].

4.4. Modelado y Simulación en ETAP

4.4.1. Proceso de configuración de modelado en ETAP

Luego de realizado el levantamiento de información correspondiente a las cargas y al transformador principal (encargado de la transformación de tensión desde el conductor hacia los receptores, en este caso motores), se procedió con el modelado y la simulación del sistema eléctrico de la planta industrial de la empresa AVIPAZ, utilizando el software ETAP. Esta herramienta permitió representar gráficamente la estructura del sistema eléctrico, así como la distribución de las cargas conectadas. Además, facilitó el análisis de diversos fenómenos eléctricos que pueden incidir en la calidad de la energía suministrada.

Durante la construcción del diagrama unifilar en ETAP se integraron la totalidad de los componentes que constituyen el sistema eléctrico, tales como la fuente de alimentación, el transformador, las cargas, los motores, los conductores y los dispositivos de protección. Cada componente fue configurado con sus respectivos parámetros eléctricos, incluyendo niveles de tensión, capacidad nominal y características específicas según su función dentro del sistema.

Las especificaciones técnicas de las cargas se detallan en la Tabla 7.1 del Anexo A, mientras que la información relacionada con la red eléctrica fue obtenida a través del geoportal de la empresa EEASA. Por otro lado, las características del transformador principal fueron tomadas directamente de la placa de características del equipo, tal como se muestra en la Figura 4.12.

Tabla 4. 2 Placa técnica del transformador de potencia

Campo	Valor
SERIE	315042016
ESP.	T-500-M239C
KVA	500
NORMA	IEEE C.57.12
CLASE	ONAN
OPERACION m.s.n.m	3000
ACEITE	MINERAL
CALENTAMIENTO	65 °C
NUMERO DE FASES	3
FRECUENCIA	60 Hz
NIVEL AISL. PRIM/SEC KV	95 / 30
GRUPO CONEXION	Dyn5
IMPEDANCIA (%)	2.3
PESO TOTAL (Kg)	1921
PESO ACEITE (Kg)	671
PESO A DECANT (Kg)	1236
VOLUMEN ACEITE (L)	745
MERMADO	11/16
MATERIAL AT/BT	Cu / Cu

Como se detalla en la Tabla 0.2 del Anexo A, el sistema eléctrico de la planta está conformado por diez circuitos identificados como C1 al C10, los cuales agrupan y distribuyen las cargas principales de la instalación. Estas cargas corresponden, en su mayoría, a motores eléctricos que forman parte de los distintos procesos industriales llevados a cabo por la empresa. La clasificación de los motores en diferentes circuitos responde a criterios técnicos como la potencia nominal, la demanda de corriente y la ubicación física de los equipos, lo que permitió una adecuada selección de conductores, protecciones y rutas de cableado.

Esta distribución en múltiples circuitos permitió una organización más precisa de las cargas en el diagrama unifilar desarrollado con el software ETAP, facilitando su representación gráfica, el análisis de flujo de carga, la evaluación de la calidad de energía, y la detección de posibles problemas operativos o violaciones normativas en el sistema eléctrico.

Para asignarle un valor al X_d'' de los motores, según Kundur [24] se tomará un valor medio para unidades hidráulicas en la tabla 0.3 del Anexo A.

Además, se tomó en cuenta el factor de utilización de cada motor, lo cual nos permitirá simular con mayor precisión el comportamiento real de la planta. Esto es fundamental para evaluar cómo las cargas operativas afectan el perfil armónico del sistema eléctrico. Incorporar este factor contribuye a obtener resultados más representativos en el análisis de calidad de energía, facilitando la identificación de posibles distorsiones armónicas y su impacto en el rendimiento general del sistema.

Para las protecciones, tenemos acceso al registro de cada protección asociada a las cargas, lo que nos ayudará a configurar correctamente los parámetros en ETAP. Sin embargo, dado que las protecciones son de diferentes marcas y líneas, no es posible realizar una coordinación integral entre ellas. Esta diversidad limita la capacidad de asegurar una selectividad óptima en la respuesta ante fallas, por lo que en el análisis se considerará esta limitación para evaluar el impacto en la confiabilidad y seguridad del sistema.

En la Tabla 0.4 del Anexo A se detallan los tipos de conductores utilizados para la alimentación de los 40 motores presentes en el sistema. Debido a la diversidad de potencias en las cargas, se ha seleccionado un calibre de conductor adecuado para cada caso, garantizando la capacidad de conducción de corriente y la seguridad operativa. Por ejemplo, para el motor de 200 kW se ha empleado un conductor tipo $3 \times 150 \text{ mm}^2 + 35 \text{ mm}^2$ THWN-2, mientras que para el motor de 160 kW se utiliza un $3 \times 120 \text{ mm}^2 + 35 \text{ mm}^2$ THWN-2. Asimismo, el motor de 18,5 kW cuenta con un conductor $4 \times 10 \text{ mm}^2 + 6 \text{ mm}^2$ THWN-2, y el de 42,6 kW utiliza un $3 \times 8 \text{ mm}^2 + 5,5 \text{ mm}^2$ THWN-2. Por su parte, el motor de 55 kW está alimentado mediante un conductor $3 \times 25 \text{ mm}^2 + 10 \text{ mm}^2$ THWN-2. Como se indica en la tabla, estos corresponden a circuitos individuales, específicamente del C1 al C5, debido a la magnitud de sus cargas.

En cambio, las cargas restantes, correspondientes a los circuitos C6 al C10, presentan potencias menores, por lo que han sido agrupadas en una distribución más compacta utilizando conductores $4 \times 1,5 \text{ mm}^2$ THWN-2, ya que la corriente demandada se encuentra dentro del rango permisible para este calibre, cumpliendo con los criterios técnicos de capacidad de conducción, caída de tensión y normativas vigentes.

Además, se llevó a cabo el levantamiento de las protecciones eléctricas y del tipo de sistema de arranque utilizado por cada una de las cargas, información que se detalla en la Tabla 0.4 del Anexo A. Esta tabla corresponde a los circuitos C1 a C5, los cuales

alimentan cargas de alta potencia mediante circuitos individuales, es decir, cada uno posee una única carga asociada. Debido a la magnitud de las potencias involucradas, estas cargas requieren el uso de variadores de frecuencia (VFD) para su arranque y control operativo. En la tabla se especifica la marca comercial del variador, así como los dispositivos de protección instalados, indicando su tipo (guardamotores, disyuntores, interruptores automáticos), el valor de corriente nominal o de ajuste, y el fabricante correspondiente.

Por otro lado, la Tabla 0.5 del Anexo A presenta el detalle de las protecciones eléctricas asociadas a los circuitos C6 a C10, los cuales alimentan múltiples cargas de menor potencia. A diferencia de los circuitos anteriores, en estos se emplean diversos métodos de arranque, tales como arranque directo (DOL) en la mayoría de los casos, y arranque suave (soft starter) en otros. En función de la corriente nominal de cada motor, se han seleccionado guardamotores como dispositivos de protección, registrándose su corriente de ajuste, tipo, y la marca del fabricante.

Cabe destacar que las protecciones levantadas en campo no corresponden a una misma línea o familia de fabricación, es decir, se encontraron dispositivos de distintas marcas y características técnicas. Esta falta de homogeneidad en los dispositivos impide realizar una coordinación de protecciones válida y precisa en el modelado del sistema dentro del software ETAP. Por tanto, se considera que este aspecto representa una limitación en el análisis, siendo necesario plantear en futuras etapas del estudio un rediseño que considere protecciones coordinadas desde el punto de vista eléctrico y normativo.

4.3.1. Simulación de Sistema en ETAP

El software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) es un instrumento especializado para la estimación, diseño y análisis integral de sistemas eléctricos de potencia. Dentro de sus múltiples funcionalidades se incluyen estudios de flujo de carga, análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones, estudios transitorios, análisis dinámico, entre otros. Para estudios relacionados con la calidad de energía, particularmente en el análisis de distorsión armónica, ETAP ofrece un módulo específico que permite simular perturbaciones provocadas por múltiples categorías de cargas con comportamiento no lineal.

La configuración de estas fuentes armónicas en ETAP requiere la definición de parámetros como la frecuencia base, el número de impulsos del convertidor, y el orden de los armónicos presentes en la señal distorsionada. Gracias a la caracterización detallada de los motores, fue posible alimentar el modelo con datos técnicos reales y evaluar la propagación de presencia de componentes armónicos en la red eléctrica de la planta. Esto proporcionó una base sólida a efectos de examinar la calidad de la energía eléctrica y del filtro activo que tiene la industria. Para la configuración del sistema tenemos que 244 kW son potencia de consumo máximo y 592 kW de carga instalada.

Para la inyección de armónicos de corriente en ETAP, se realizó una investigación exhaustiva en la cual se identificó que, en diversos estudios, los armónicos de corriente suelen ser introducidos a través de los variadores de frecuencia conectados a las cargas que contengan variadores ya que son estos los que generan los armónicos en la red. En particular, Carrión[25] procede a colocar el mismo valor de armónicos de corriente a todos los variadores de su sistema. Al igual que Camac y Castro [14] en uno de sus escenarios la colocación de los armónicos de corriente es en los variadores de frecuencia manteniendo el mismo valor de armónicos para cada uno de los variadores.

4.3.2. Escenarios de Simulación

Con el levantamiento de datos de potencia, corriente y comportamiento operativo de la industria AVIPAZ, se ha identificado que la empresa presenta dos regímenes de operación claramente diferenciados: jornada laboral con demanda máxima y mínima y fin de semana (jornada de descanso) con demanda mínima por sus valores bajos a partir de este análisis y con la finalidad de valorar la calidad del suministro eléctrico y el desempeño del filtro activo instalado.

Como se observa en la tabla 0.12 a 0.17 del Anexo tenemos la contraste entre los datos registrados por el analizador de redes con los datos obtenidos en simulación, teniendo el porcentaje de error máximo de 5% para validar la simulación y sus resultados a comparación del obtenido por medición.

4.5. Análisis de resultados para la determinación y cumplimiento de la normativa

A partir de los registros obtenidos mediante el analizador de calidad de energía Fluke 435-II, se realiza la aplicación de la normativa ARCONEL 009/24 [3], la cual está orientada al entorno industrial. Esta regulación establece los lineamientos necesarios para asegurar

un suministro eléctrico de calidad, definiendo límites aceptables para la distorsión armónica, las variaciones de voltaje tipo Flicker, entre otros aspectos relevantes que deben ser monitoreados de forma continua para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico. Si las mediciones de los distintos parámetros se desvían de los rangos fijados, deben adoptarse acciones correctivas que permitan mejorar la calidad del servicio eléctrico. La Tabla 4.4 resume los principales parámetros considerados, agrupados en tres categorías: parámetros de voltaje, parámetros de corriente y límites relacionados con la distorsión.

Tabla 4. 3 Clasificación de Parámetros Eléctricos

Parámetros	FLUKE 435-II
Parámetros de Voltaje	Variaciones en el nivel de voltaje
	Contenido armónico en la tensión
	Valor eficaz de la tensión (RMS)
	Evaluación del factor de potencia
Parámetros de Corriente	Valor eficaz de la corriente (RMS)
	Contenido Armónico en la Corriente
Límites de Distorsión	Distorsión armónica de voltaje
	Distorsión armónica de corriente

Aunque las mediciones con el analizador de redes se realizaron únicamente en la barra principal (antes y después del filtro activo), la simulación realizada en ETAP permite extender el análisis al resto del sistema. Gracias a esta herramienta, es posible observar el comportamiento del contenido armónico total (THD) en las demás barras, verificando si el efecto de mitigación del filtro se mantiene aguas abajo o si persisten niveles significativos de distorsión armónica en otras partes de la red.

4.6.Evaluación de Filtro Activo

Mediante la comparación de parámetros de calidad de energía, se determinó el rendimiento del filtro activo incorporado al sistema eléctrico de AVIPAZ registrados en dos puntos estratégicos: antes y después del filtro. Este análisis se enfocó en la medición y comparación directa de variables relacionadas con la distorsión armónica y otros indicadores de calidad eléctrica.

Las mediciones se efectuaron durante un período continuo de siete días, con un intervalo de registro de datos cada diez minutos, en conformidad con los requisitos establecidos en la Regulación ARCONEL 009/24, normativa ecuatoriana vigente que regula la evaluación

de la calidad de energía eléctrica. Esta metodología permitió obtener una muestra estadísticamente representativa de las condiciones operativas del sistema, incluyendo tanto situaciones normales como posibles perturbaciones.

Para capturar el comportamiento del filtro activo bajo diferentes cargas, las mediciones cubrieron condiciones operativas variadas, tales como períodos de máxima demanda, cuando la mayoría de los 40 motores distribuidos en los cuatro niveles de la planta se encontraban en funcionamiento, y períodos de mínima carga. Esta diversidad de condiciones permitió analizar la respuesta del filtro ante cambios dinámicos en el perfil de carga.

Es importante considerar que el comportamiento operativo de la empresa presenta un cambio drástico durante los fines de semana, específicamente los días sábado y domingo. En estos días, la planta entra en un periodo de inactividad debido al descanso del personal, por lo que no se realiza actividad productiva. Adicionalmente, la empresa ha establecido una política de mantenimiento programado cada siete días, coincidiendo con estos días de inactividad. Como resultado, el consumo energético y las condiciones operativas del sistema eléctrico durante los fines de semana difieren significativamente respecto a los días laborables, lo cual debe ser tomado en cuenta al analizar el comportamiento de los parámetros eléctricos, sobre todo en relación con la aparición de componentes armónicos y el desempeño del filtro activo.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Presentación del diagrama unifilar, diagrama de planta y metodología de elaboración

La información técnica recopilada en AVIPAZ fue clave para elaborar una representación precisa del sistema eléctrico interno, incluyendo la ubicación y características eléctricas de los equipos. Se identificaron componentes esenciales como el transformador principal, alimentadores y cargas críticas, destacando el uso de variadores de frecuencia en cargas sensibles.

En el Anexo A, la Tabla 0.2 detalla datos relevantes de los equipos (tipo, potencia, tensión, eficiencia, etc.), mientras que las Tablas 0.4, 0.5 y 0.6 contienen información sobre conductores eléctricos y protecciones instaladas (tipo, marca, valores nominales), vital para análisis de caídas de tensión, cortocircuitos y coordinación de protecciones. Con esta información se elaboraron el diagrama unifilar (Anexo C) y el diagrama de planta (Anexo D), que muestran la conexión funcional y la ubicación física de los equipos respectivamente. Todo fue integrado en ETAP 21 para simular y analizar el sistema respetando sus características reales.

Finalmente, el Anexo E presenta el diagrama de instalación del analizador de red antes y después del filtro activo para mediciones correspondientes.

5.2. Análisis de parámetros del Sistema

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de calidad de la energía eléctrica y se confrontan con los límites normativos establecidos en la Resolución ARCONEL Nro. 009/2024 y la norma IEEE 519-2014, considerando parámetros como magnitudes de voltaje y corriente, además de las potencias y del factor de potencia.

5.2.1. Niveles de Voltaje

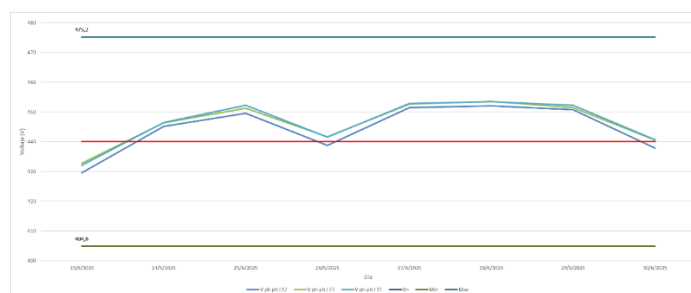


Figura 5. 1 Curva de voltaje en jornada laboral

En la Figura 5.1 se presentan las curvas de voltaje línea a línea registradas durante el día lunes 24 de junio de 2025. Se observa un comportamiento similar entre las tres líneas, lo que se evidencia un equilibrio en el sistema en términos de tensión. Durante este día se registraron valores máximos y mínimos de voltaje de 447 V y 416.2 V, respectivamente. Este comportamiento preliminar sugiere una operación estable del sistema eléctrico. No obstante, para complementar la revisión de la calidad del servicio eléctrico, en secciones posteriores se evaluarán fenómenos como flickers, sags y swells, con el fin de determinar la presencia de eventuales sobretensiones o caídas de tensión a lo largo del período de medición de siete días.

En la Tabla 5.1, se presentan los valores de tensión registrados para cada una de las fases (L1, L2 y L3) durante el periodo de medición. Estos valores fueron evaluados conforme al criterio de la normativa ARCONEL 009/2024, la cual establece que el desbalance de voltaje en sistemas trifásicos no debe superar el 5%.

Tabla 5.1 Comparativa del nivel de voltaje fase-fase

DÍA DE MEDICIÓN	L1-L2	L2-L3	L3-L1	VARIACIÓN L1-L2	ARCONEL 009/24 5%	VARIACIÓN L2-L3	ARCONEL 009/24 5%	VARIACIÓN L3-L1	ARCONEL 009/24 5%
DIA 1	449,68	450,68	451,04	0,17%	Si	0,05%	Si	0,13%	Si
DIA 2	456,58	457,1	458,88	0,21%	Si	0,09%	Si	0,30%	Si
DIA 3	446,04	448,48	447,26	0,27%	Si	0,27%	Si	0,00%	Si
DIA 4	455,34	457,02	456,84	0,23%	Si	0,14%	Si	0,10%	Si
DIA 5	457,36	458,62	458,24	0,16%	Si	0,12%	Si	0,04%	Si
DIA 6	453,04	454,12	454,54	0,19%	Si	0,05%	Si	0,14%	Si
DIA 7	444,72	445,8	446,06	0,18%	Si	0,06%	Si	0,12%	Si

Como se observa en los resultados obtenidos (ver figura adjunta), se realizó el cálculo del desbalance de voltaje fase-fase utilizando la fórmula:

$$\% \text{Desbalance} = \left(\frac{V_{\text{Máximo}} - V_{\text{Promedio}}}{V_{\text{Promedio}}} \right) * 100$$

Dicha fórmula fue aplicada diariamente a los valores medidos entre las líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1.

Los porcentajes de desbalance obtenidos se mantienen dentro del límite permitido del 5%, lo cual indica que, durante el periodo evaluado, el sistema cumple con los niveles aceptables de calidad de energía en cuanto al equilibrio de tensiones. Esto es fundamental con el propósito de que los equipos eléctricos asociados operen de manera adecuada y evitar sobrecalentamientos o pérdidas adicionales.

5.2.2. Análisis de Corriente

La Figura 5.2 presenta la curva de corriente de las tres fases durante el período de análisis. Se observa un comportamiento similar entre las fases, lo que indica una buena condición

de balance de corriente. El valor más alto registrado entre los días lunes a viernes se produjo el miércoles 25 de junio de 2025 a las 09:40:10 a.m., alcanzando una magnitud de 311.90 A. Este dato representa la condición de mayor demanda de corriente en la empresa AVIPAZ, atribuida al pico de operación de maquinaria industrial y al incremento de la producción correspondiente a ese día.

Este valor se adopta como referencia para el estudio de demanda máxima, sirviendo de punto de partida para la simulación del sistema bajo condiciones de distorsión armónica, con el objetivo de examinar el desempeño eléctrico del sistema y sus posibles afectaciones en la calidad de energía. Cabe recalcar que esta condición de máxima demanda refleja la carga operativa real más exigente del sistema eléctrico de la empresa durante el período analizado, por lo que resulta fundamental para los estudios posteriores de calidad.

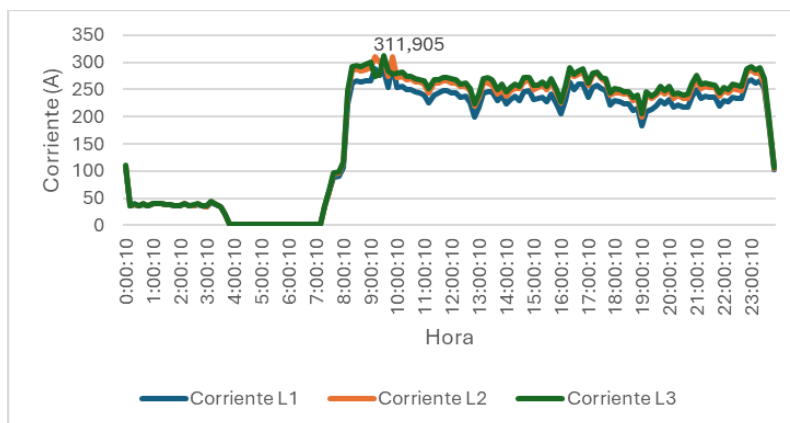


Figura 5. 2 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada laboral máxima corriente

En la Figura 5.3 se presenta la curva de corriente correspondiente al día 24 de junio de 2025 a las 06:40:10 a.m., momento en el cual se registra el valor más bajo de corriente, con una magnitud de 1.2 A. Este comportamiento está asociado a que, durante ese horario, la empresa AVIPAZ aún no ha iniciado sus actividades operativas, las cuales comienzan formalmente a partir de las 07:00:00 a.m. En este intervalo previo, únicamente permanecen energizadas cargas de baja demanda, tales como iluminación de seguridad, sistemas de monitoreo, equipos de control en modo de espera (standby) u otros servicios auxiliares con bajo consumo eléctrico. Este valor es relevante, ya que establece una condición de mínima demanda, útil para contrastar la respuesta del sistema eléctrico ante variados niveles de carga a lo largo de la jornada.

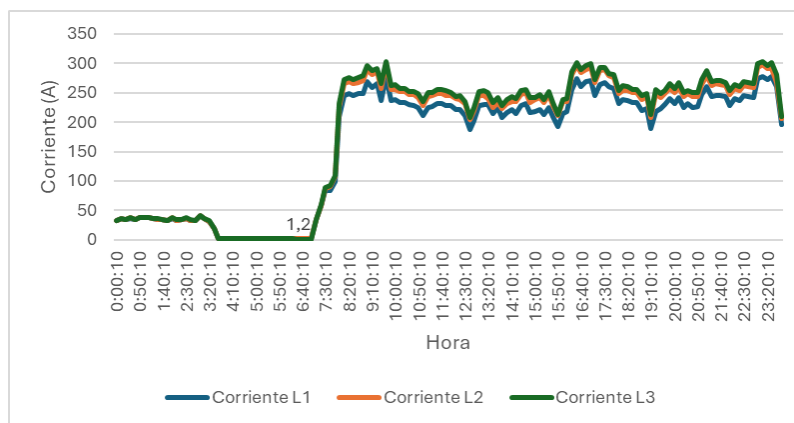


Figura 5. 3 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada laboral mínima corriente

La Figura 5.4 ilustra la evolución de la corriente durante el sábado 29 de junio de 2025, día en que AVIPAZ no realiza producción habitual; cabe señalar que los fines de semana se destinan a labores de mantenimiento preventivo y correctivo, por lo que no existe continuidad en la operación industrial.

Durante este día, se observa un valor máximo de corriente de 1.66 A y un valor mínimo de 1.15 A, lo cual refleja un consumo muy bajo, asociado probablemente a cargas auxiliares como iluminación, sistemas de control, equipos de refrigeración en operación continua o herramientas eléctricas empleadas en las labores de mantenimiento. Esta condición representa una carga mínima operativa, útil para establecer una línea base de consumo en estado no productivo.

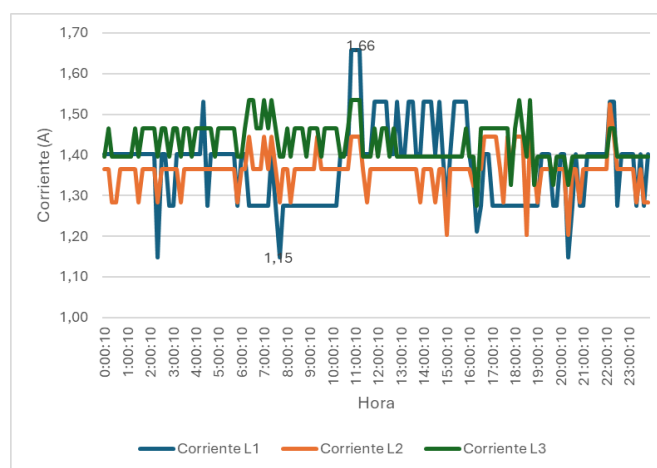


Figura 5. 4 Curva de corriente L12, L23 y L31 jornada de descanso mínima corriente

En la Tabla 5.2 se presenta el análisis del desbalance de corriente para el periodo comprendido entre el 23 y el 29 de junio de 2025, calculado de acuerdo con la metodología establecida por la normativa ARCONEL 009/24, la cual establece un límite máximo permisible de 3% para el desequilibrio entre fases.

Tabla 5. 2 Desbalance de Corriente

Fecha	Desequilibrio de corriente analizador Fluke 435-II								Desequilibrio	Observación
	Corriente [A]									
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	Desviación 1	Desviación 2	Desviación 3	Desviación Máxima	Promedio		
23/6/2025	134,27	138,55	141,79	3,93	0,35	3,58	3,93	138,20	2,85%	CUMPLE
24/6/2025	143,57	148,15	151,61	4,21	0,37	3,83	4,21	147,78	2,85%	CUMPLE
25/6/2025	138,19	142,53	145,85	4,00	0,34	3,66	4,00	142,19	2,81%	CUMPLE
26/6/2025	137,64	141,92	145,16	3,93	0,35	3,59	3,93	141,57	2,78%	CUMPLE
27/6/2025	71,52	73,55	75,18	1,90	0,13	1,77	1,90	73,41	2,59%	CUMPLE
28/6/2025	1,83	1,82	1,90	0,02	0,03	0,05	0,05	1,85	2,94%	CUMPLE
29/6/2025	70,24	72,56	74,30	2,13	0,20	1,93	2,13	72,37	2,94%	CUMPLE

El cálculo se realizó mediante la fórmula:

$$\% \text{Desbalance} = \left(\frac{\text{Desviación Máxima}}{\text{Corriente Promedio}} \right) * 100$$

Los resultados obtenidos muestran que en todos los días evaluados el porcentaje de desbalance se mantuvo por debajo del umbral permitido. Por ejemplo, el 23/06/2025 se registró un desbalance del 2.85%, mientras que los días 24 y 25 de junio presentaron valores de 2.85% y 2.81%, respectivamente. Incluso en condiciones de baja carga, como los días 26 y 27 de junio, el desbalance fue de apenas 2.78% y 2.59%, respectivamente, lo que indica una distribución de corriente proporcional entre las fases.

5.2.3. Análisis de Potencia Activa (P)

La Figura 5.5 presenta la evolución de la potencia activa registrada el día miércoles 25 de junio de 2025, fecha en la que se alcanzó el valor máximo de potencia activa durante el período de análisis, con un pico de 250.56 kW. Este comportamiento guarda coherencia con el perfil de corriente previamente analizado (Figura 5.2), evidenciando que ambos parámetros siguen una tendencia similar, correspondiente a un alto nivel de actividad operativa en la empresa AVIPAZ.

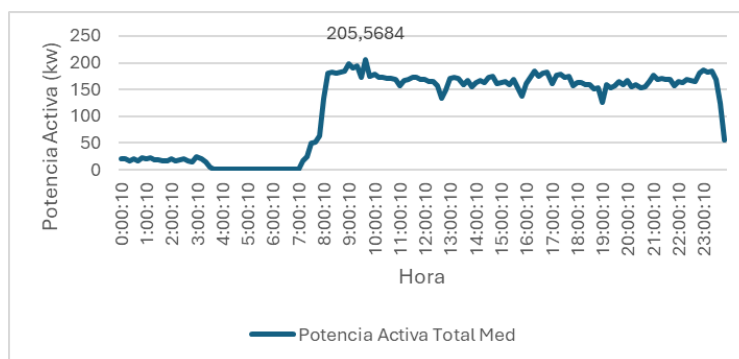


Figura 5. 5 Curva de potencia Activa jornada laboral máxima potencia

La Figura 5.6 muestra el valor más bajo de potencia activa registrado durante el período de análisis de siete días. Este valor se presentó el martes 24 de junio de 2025, con una potencia mínima de 0.66 kW. Al igual que en el caso de la corriente (Figura 5.3), este

comportamiento refleja la condición de baja demanda energética en horas previas al inicio de la jornada laboral en la empresa AVIPAZ, donde solo se encuentran operativas cargas auxiliares de bajo consumo.

La tendencia de la potencia activa en este periodo es coherente con la curva de corriente, lo que valida la correspondencia entre ambos parámetros. Este valor mínimo será considerado como referencia para la simulación del sistema bajo condiciones de carga mínima, permitiendo analizar el comportamiento eléctrico en escenarios de baja exigencia operativa y evaluar aspectos como distorsión armónica en condiciones de baja carga.

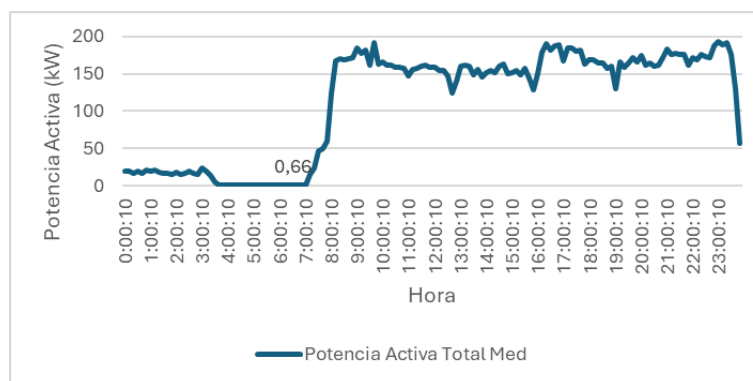


Figura 5. 6 Curva de potencia Activa jornada laboral mínima potencia

La Figura 5.7 muestra la curva de potencia activa correspondiente a un día no laborable, en el cual se observa una reducción significativa del consumo eléctrico en comparación con los días operativos. Durante esta jornada, la potencia activa máxima registrada fue de 0.78 kW, mientras que la mínima fue de 0.72 kW, reflejando una variación muy leve y un comportamiento estable asociado a cargas constantes de baja demanda.

Este comportamiento es consistente con la curva de corriente presentada anteriormente (Figura 5.4), y responde a la ausencia de producción industrial, ya que la maquinaria principal permanece fuera de operación. En este contexto, únicamente se encuentran activos equipos auxiliares, como iluminación de seguridad, sistemas de monitoreo, ventilación básica o equipos de soporte para mantenimiento.

Este escenario será considerado como una condición de mínima demanda, útil para simular el comportamiento del sistema eléctrico cuando no se presentan cargas industriales pesadas, permitiendo analizar fenómenos como la distorsión armónica o la eficiencia operativa en situaciones de baja carga.

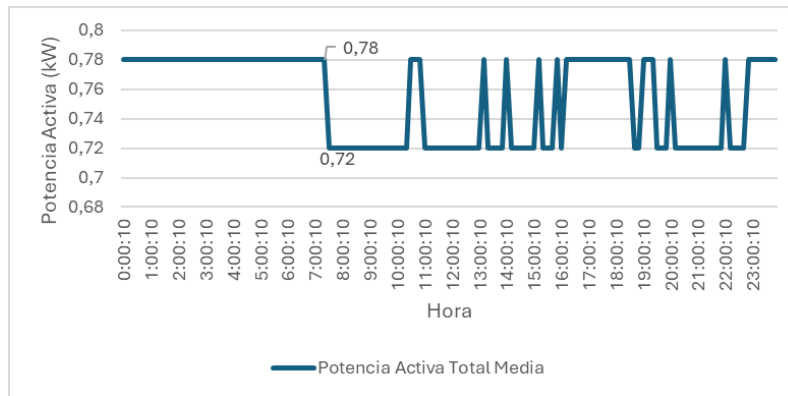


Figura 5. 7 Curva de potencia Activa jornada de descanso mínima potencia

El día domingo, 29 de junio, caracterizado por la inactividad productiva o la realización de tareas de mantenimiento, presenta un comportamiento particular. Las potencias activas medias aumentan ligeramente respecto a los días anteriores (0,27% a 0,28%), probablemente debido al funcionamiento de equipos auxiliares o pruebas técnicas. En este día, el desbalance L1-L2 desciende notablemente a 0,52 %, mostrando una distribución muy equilibrada entre esas fases. No obstante, el desbalance L2-L3 se eleva a 3,32 %, lo que podría estar asociado al uso puntual de cargas específicas conectadas a la fase L3 tal como se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3 Valores de desbalance de potencia

FECHA	Porcentaje de desbalance de potencia activa en las fases analizador Fluke 350-II								
	Medio Potencia Activa [%]			Desbalance L1-L2 (%)	ARCONEL 009/24 (5%)	Desbalance L2-L3 (%)	ARCONEL 009/24 (5%)	Desbalance L3-L1 (%)	ARCONEL 009/24 (5%)
	L1	L2	L3						
23/6/2025	0,33	0,32	0,32	3,20%	CUMPLE	0,93%	CUMPLE	4,13%	CUMPLE
24/6/2025	0,33	0,32	0,32	2,99%	CUMPLE	0,95%	CUMPLE	3,94%	CUMPLE
25/6/2025	0,33	0,32	0,32	3,00%	CUMPLE	0,95%	CUMPLE	3,94%	CUMPLE
26/6/2025	0,33	0,32	0,32	3,40%	CUMPLE	0,94%	CUMPLE	4,34%	CUMPLE
27/6/2025	0,26	0,25	0,26	2,89%	CUMPLE	1,15%	CUMPLE	1,74%	CUMPLE
28/6/2025	0,23	0,22	0,22	2,80%	CUMPLE	0,77%	CUMPLE	3,57%	CUMPLE
29/6/2025	0,27	0,27	0,28	0,52%	CUMPLE	3,32%	CUMPLE	2,80%	CUMPLE

$$\% \text{ Desbalance} = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{prom}} * 100$$

5.2.4. Análisis de Factor de Potencia

La normativa ecuatoriana ARCONEL 009/24 fija como umbral mínimo de eficiencia energética un factor de potencia igual o superior a 0,92 en sistemas de media y baja tensión. En la Tabla 5.4 se presentan los valores de FP registrados en las tres fases (L1N, L2N, L3N) y el promedio diario global durante el periodo del 23 al 29 de junio de 2025, mostrando los resultados obtenidos.:

Tabla 5. 4 Valores de factor de potencia antes del filtro

Fecha	FP L1N	FP L2N	FPL3N	FP Total	Cumple con la normativa
23/6/2025	0,84	0,83	0,85	0,84	NO CUMPLE
24/6/2025	0,85	0,82	0,83	0,83	NO CUMPLE
25/6/2025	0,85	0,8	0,8	0,82	NO CUMPLE
26/6/2025	0,84	0,84	0,82	0,83	NO CUMPLE
27/6/2025	0,84	0,83	0,83	0,83	NO CUMPLE
28/6/2025	0,84	0,85	0,84	0,84	NO CUMPLE
29/6/2025	0,83	0,84	0,83	0,83	NO CUMPLE
Promedio General				0,83	NO CUMPLE

Durante los siete días evaluados, todas las mediciones de factor de potencia total diario cumplieron con el valor mínimo exigido por la normativa vigente.

Tabla 5. 5 Valores de factor de potencia después del filtro

Fecha	FP L1N	FP L2N	FPL3N	FP Total	Cumple con la normativa
23/6/2025	0,92	0,92	0,92	0,92	NO CUMPLE
24/6/2025	0,93	0,95	0,94	0,94	CUMPLE
25/6/2025	0,94	0,95	0,94	0,94	CUMPLE
26/6/2025	0,94	0,94	0,94	0,94	CUMPLE
27/6/2025	0,94	0,94	0,94	0,94	CUMPLE
28/6/2025	0,94	0,94	0,94	0,94	CUMPLE
29/6/2025	0,94	0,93	0,93	0,93	NO CUMPLE
Promedio General				0,94	NO CUMPLE

Se observó que en los días 23 y 29 de junio el FP total fue de 0,92. Esto puede indicar una ligera tendencia hacia la reducción del FP, por lo que sería recomendable realizar una vigilancia periódica.

El valor promedio del FP total fue de 0,94, lo cual refleja un comportamiento aceptable en términos de eficiencia del uso de energía reactiva en la instalación analizada esto en base después del filtro activo.

5.3. Identificación y Análisis de Perturbaciones Eléctricas

5.3.1. Sag en la Red

El hundimiento de tensión o SAG es una disminución temporal del voltaje RMS entre el 90% (0,9 pu) y el 10% (0,1 pu) del valor nominal, durante un período entre medio ciclo y un minuto, según la norma IEEE Std 1159. La tabla 5.10 presenta los valores mínimos de tensión por fase (L12, L23 y L31) durante el periodo del 23 al 29 de junio de 2025:

Tabla 5. 6 Eventos Sag en voltaje línea – línea

Nivel de SAGs Voltajes de Línea						
Fecha	Std IEEE 1159		0,1-0,9 pu			
	Fase L12	Criterio	Fase L23	Criterio	Fase L31	Criterio
23/6/2025	0,91	CUMPLE	0,92	CUMPLE	0,92	CUMPLE
24/6/2025	0,92	CUMPLE	0,93	CUMPLE	0,93	CUMPLE
25/6/2025	0,93	CUMPLE	0,94	CUMPLE	0,94	CUMPLE
26/6/2025	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE
27/6/2025	0,97	CUMPLE	0,97	CUMPLE	0,97	CUMPLE
28/6/2025	0,91	CUMPLE	0,92	CUMPLE	0,92	CUMPLE
29/6/2025	0,91	CUMPLE	0,91	CUMPLE	0,91	CUMPLE

En todas las fechas y fases evaluadas, los valores de voltaje se mantuvieron por encima de 0,90 pu, lo cual indica que no se han registrado eventos de SAGs dentro del rango definido por la norma (0,1 – 0,9 pu).

Los valores más bajos observados fueron de 0,91 pu en la fase L12 (23, 28 y 29 de junio). Aunque cercanos al límite inferior de cumplimiento, no representan eventos anómalos ni afectaciones significativas a la operación de cargas sensibles.

El resto de los días presentó voltajes mínimos incluso mayores a 0,93 pu, lo cual evidencia una buena estabilidad del suministro eléctrico y ausencia de perturbaciones transitorias que comprometan la continuidad operativa.

5.3.2. Swell en la Red

La IEEE Std 1159 describe el fenómeno “swell” como un incremento transitorio del voltaje RMS que supera el 110 % (1,1 p.u.) y puede alcanzar hasta el 180 % (1,8 p.u.) del valor nominal, con una duración comprendida entre medio ciclo y un minuto. Los swells pueden afectar el desempeño de equipos sensibles, y su presencia debe ser monitoreada y controlada para asegurar una operación segura y estable del sistema eléctrico.

La Tabla 5.6 presenta el análisis de los picos de tensión en las fases L12, L23 y L31 durante el intervalo del 23 al 29 de junio de 2025, mostrando los resultados obtenidos:

Tabla 5. 7 Eventos Swell en voltaje línea – línea

Nivel de Swells Voltajes de Línea						
Fecha	Std IEEE 1159		1,1-1,2 pu			
	Fase L12	Criterio	Fase L23	Criterio	Fase L31	Criterio
23/6/2025	0,95	CUMPLE	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE
24/6/2025	0,96	CUMPLE	0,97	CUMPLE	0,97	CUMPLE
25/6/2025	0,97	CUMPLE	0,98	CUMPLE	0,98	CUMPLE
26/6/2025	1,00	CUMPLE	1,00	CUMPLE	1,00	CUMPLE
27/6/2025	1,01	CUMPLE	1,01	CUMPLE	1,01	CUMPLE
28/6/2025	0,95	CUMPLE	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE
29/6/2025	0,95	CUMPLE	0,95	CUMPLE	0,95	CUMPLE

En ninguno de los días evaluados se han registrado valores que superen los 1,1 pu, límite inferior para ser considerado un evento de swell según IEEE 1159.

El valor máximo observado fue de 1,01 pu el 27 de junio, el cual no representa un swell. Por tanto, no se reportan perturbaciones que puedan afectar la integridad de cargas sensibles por sobrevoltajes momentáneos.

Los registros obtenidos se mantienen por debajo del límite crítico, evidenciando una adecuada regulación de la tensión por parte del sistema de distribución.

5.3.3. Flicker en la red

El flicker, medido a través del índice Pst (short-term flicker severity), representa la fluctuación perceptible de la luminancia o parpadeo en las lámparas causado por variaciones rápidas en el voltaje. Según la norma IEEE 519, el límite máximo recomendado para el índice Pst es 1,0 (100%) para evitar molestias visuales y daños en equipos sensibles.

Los valores registrados en la tabla 5.7 durante siete días consecutivos son:

Tabla 5. 8 Eventos flickers en la red.

Nivel de Swells Voltajes de Linea						
Fecha	Std IEEE 1159		1,1-1,2 pu			
	Fase L12	Criterio	Fase L23	Criterio	Fase L31	Criterio
23/6/2025	0,95	CUMPLE	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE
24/6/2025	0,96	CUMPLE	0,97	CUMPLE	0,97	CUMPLE
25/6/2025	0,97	CUMPLE	0,98	CUMPLE	0,98	CUMPLE
26/6/2025	1,00	CUMPLE	1,00	CUMPLE	1,00	CUMPLE
27/6/2025	1,01	CUMPLE	1,01	CUMPLE	1,01	CUMPLE
28/6/2025	0,95	CUMPLE	0,96	CUMPLE	0,96	CUMPLE
29/6/2025	0,95	CUMPLE	0,95	CUMPLE	0,95	CUMPLE

Todos los valores diarios de flicker se mantienen significativamente por debajo del límite máximo de 1,0 (100%) establecido en la norma IEEE 519, indicando que la fluctuación de voltaje no genera parpadeos perceptibles ni molestos para los usuarios.

El valor promedio más alto registrado fue de 0,56% en el día 2, un valor bajo que confirma un sistema eléctrico estable en términos de variaciones rápidas de voltaje.

En las mediciones realizadas después de la instalación del filtro activo tipo shunt, no se detectaron fenómenos de flicker, sag ni swell, lo cual indica que el sistema ya presentaba un comportamiento estable en cuanto a tensión. Por tanto, no fue necesario realizar un análisis antes del filtro sobre estos parámetros, ya que el filtro activo no tiene un impacto directo sobre ellos, y no se esperaba observar cambios significativos. Esta decisión se sustenta en el principio de que estos eventos están más relacionados con condiciones de

red externas o transitorias, y no con las funciones principales del filtro activo, que actúa sobre la calidad de corriente.

5.3.4. Armónicos de Voltaje

Previo a la incorporación del filtro activo, se cuantificaron los armónicos de tensión del sistema eléctrico de AVIPAZ. Las mediciones, consignadas en la Tabla 0.7 del Anexo A, incluyen los porcentajes de cada componente armónica desde el orden 3 hasta el 50. Al contrastarlos con los límites de la norma IEEE 519, se verifica que todos los armónicos individuales permanecen por debajo del 5 %, cumpliendo así con los requisitos establecidos.

Como se observa en la Figura 5.8, los armónicos más relevantes corresponden a los de orden impar, siendo el quinto armónico el de mayor magnitud con un valor de 2.66 %. Este valor se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos por la norma IEEE 519. De manera similar, el séptimo armónico presenta un valor de 0.92 % y el undécimo de 0.88 %, ambos también dentro de los rangos aceptables. Estos resultados evidencian un adecuado comportamiento del sistema en cuanto a distorsión armónica, sin comprometer la calidad del suministro eléctrico.

Adicionalmente, se calculó el Total Harmonic Distortion (THD) de voltaje, obteniéndose un valor de 3.79 %, el cual se encuentra por debajo del límite permitido del 8 % establecido por la misma norma. Este resultado indica que, incluso antes de la implementación del filtro activo, el sistema opera dentro de los rangos aceptables de calidad de energía, evitando así efectos adversos como fallos en dispositivos electrónicos, reducción de la vida útil de los equipos o deterioro en el desempeño de la instalación eléctrica.

Al medir armónicos de voltaje en el sistema antes del filtro, se obtuvo resultados representados en la tabla 5.9 con el orden del armónico y su valor en porcentaje del armónico individual del orden 3 al 50, en el cual al comparar con la normativa IEEE 519 que debe cumplir el límite del 5% cumple en cada armónico, además, al calcular el THD de voltaje tenemos que nos da un THD del 3.79 % siendo bajo y cumpliendo con la norma ya que el límite según la norma IEEE 519 es de 8% esta medición fue hecha antes del filtro activo por ende el sistema está operando bien evitando fallas en dispositivos

electrónicos, no provoca la reducción de vida útil de ningún equipo y por ende una calidad de energía buena.

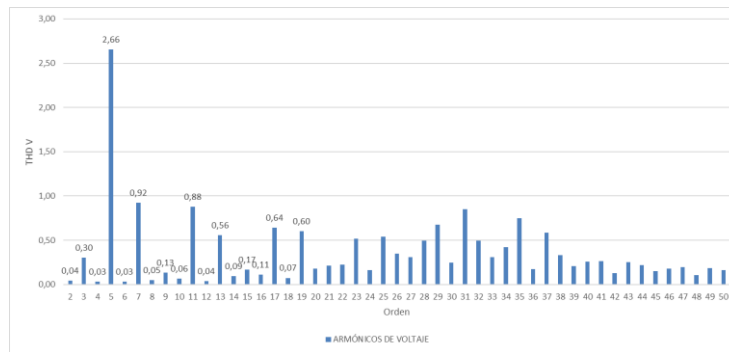


Figura 5. 8 THD individual de voltaje

5.3.5. Armónicos de Corriente

Con el fin de evaluar la calidad de energía en la empresa AVIPAZ, se ha desarrollado un análisis detallado del Total Harmonic Distortion (THD) de corriente bajo distintos escenarios operativos. Este análisis contempla tres condiciones principales:

- Promedio del THD de corriente durante los siete días de medición, proporcionando una visión general del comportamiento armónico en el sistema;
- Los escenarios de jornada laboral, diferenciando entre condiciones de máxima y mínima demanda, que reflejan los momentos de mayor y menor actividad productiva.
- Los periodos de descanso o inactividad operativa, en los cuales se analiza el THD bajo condiciones de mínima demanda, cuando únicamente permanecen en funcionamiento cargas auxiliares.

Este enfoque permite identificar cómo varía la variación del contenido armónico según el grado de carga y el régimen operativo del sistema eléctrico y el porcentaje de error entre los valores obtenidos en Excel y ETAP se presentan de la tabla 0.8 a 0.12 del anexo A.

5.3.6. Análisis con valor promedio

Debido a la dinámica operativa de la empresa AVIPAZ, que alterna periodos de producción y descanso, se presentan distintos escenarios de carga a lo largo de la semana. En este apartado se realiza el análisis del Total Harmonic Distortion (THD) de corriente considerando los siete días del período de medición, sin distinguir entre condiciones de demanda máxima o mínima.

Este enfoque permite evaluar el comportamiento armónico del sistema eléctrico bajo diversas condiciones operativas, con el objetivo de identificar posibles problemas de calidad de energía relacionados con la distorsión de corriente, independientemente del nivel de carga.

Antes del filtro Activo

En la Figura 5.9 se presenta el espectro de armónicos de corriente del orden 3 al 17, considerando tanto armónicos impares como pares. Dado que el sistema cuenta con cargas no lineales, específicamente variadores de frecuencia, se pone especial énfasis en el análisis de los armónicos de orden impar, ya que estos son los más relevantes y con mayor impacto en la distorsión de la red eléctrica.

El componente armónico de quinto orden es el de mayor magnitud, alcanzando 11,87 % y excediendo el límite de 7 % fijado por la norma IEEE 519 para este orden. De igual manera, el armónico de orden 7 alcanza un 9.87%, también excediendo su límite normativo.

Por otro lado, el armónico de orden 15, con un valor de 1.56%, sí se encuentra dentro del rango permitido, cumpliendo con el límite de 3.5% y con un THD de 19.45 % representado en la tabla 0.8 del anexo A.

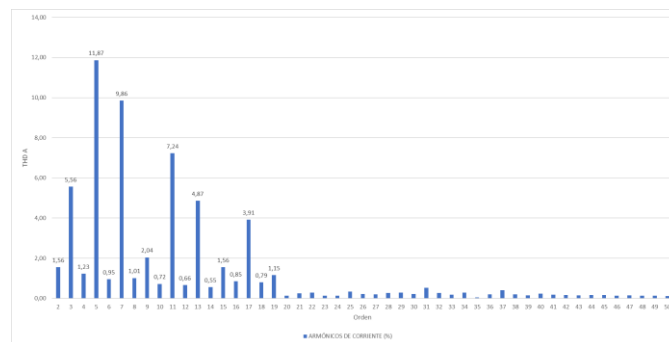


Figura 5. 9 THD individual de corriente antes del filtro

Después del filtro Activo

Como se observa en la figura 5.10, los valores de los armónicos individuales de corriente disminuyeron notablemente tras la implementación del sistema de filtrado. Esta reducción también se refleja en el Total Harmonic Distortion (THD) de corriente, cuyo valor se muestra en la Tabla 0.9 del Anexo A. En dicha tabla se evidencia que el THD se redujo a

un 6.99 %, ubicándose dentro del límite permitido por la regulación ARCONEL 009/24, que establece un valor máximo admisible del 8 % para instalaciones de este tipo.

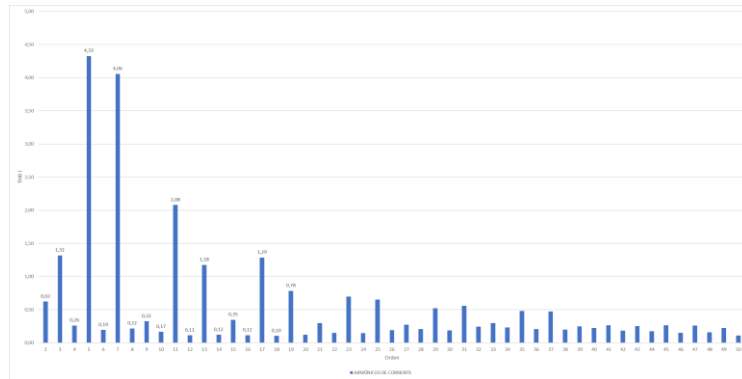


Figura 5. 10 Orden de armónicos de corriente después del filtro activo

5.3.7. Análisis en Jornada Laboral

a. Demanda Máxima

Sin Filtro

La Figura 5.11 evidencia los armónicos individuales registrados durante la semana laboral (lunes a viernes). En ese lapso, el valor máximo alcanza 19,10 %, y se observa el predominio de los armónicos de orden impar, asociado al uso de variadores de frecuencia en las cargas de mayor potencia. Además, en la Tabla 0.10 del Anexo A se evidencia un valor de THD de corriente del 30.91 %, correspondiente a una medición realizada antes de la implementación del filtro activo.

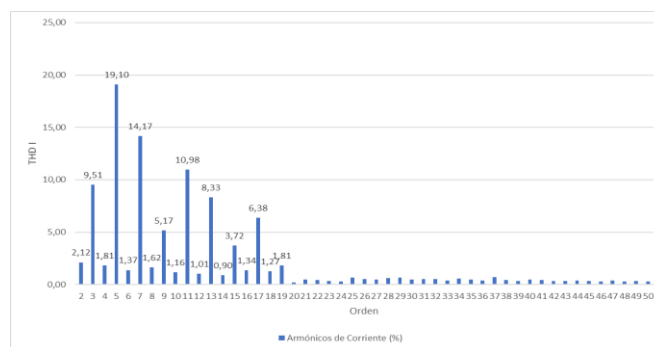


Figura 5. 11 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en máxima demanda sin filtro

Con Filtro

Tal como se aprecia en la Figura 5.12, la tabla de armónicos individuales de corriente evidencia que el componente armónico de mayor amplitud que corresponde al séptimo orden, con un valor de 5.56 %. A pesar de ser el más alto dentro del espectro, este se

mantiene dentro del límite permitido del 7 %, según lo establecido por la normativa ARCONEL 009/24.

Adicionalmente, el THD de corriente registrado en este escenario, según la Tabla 0.11 del Anexo A, es de 4.15 %, lo cual también se encuentra por debajo del umbral máximo permitido del 8 %. Estos resultados confirman que el sistema cumple con los requisitos de calidad de energía, garantizando una operación segura y eficiente sin riesgo de penalizaciones o afectaciones a los equipos conectados.

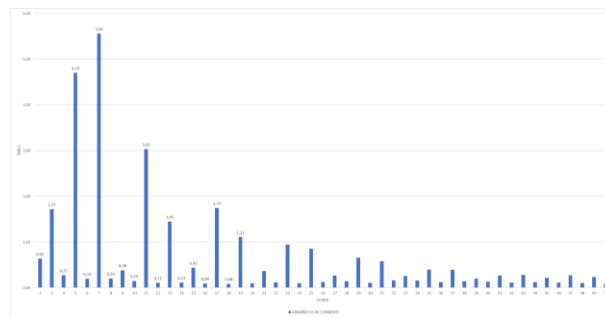


Figura 5. 12 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en máxima demanda con filtro

b. Demanda Mínima

La Figura 5.13 ilustra el espectro de armónicos individuales de corriente; en él se identifica que el componente de mayor amplitud que corresponde al orden 5, con un 26.16 %. Este comportamiento se atribuye principalmente a la presencia de variadores de frecuencia, los cuales son una fuente común de generación de armónicos impares, especialmente de orden 5 y 7. Dichos dispositivos inyectan corrientes armónicas al sistema, afectando directamente la calidad de la energía.

Adicionalmente, la Tabla 0.11 del Anexo A muestra que, durante el periodo de demanda mínima, se registró un THD de corriente (THD-I) del 42.56 %, superando el límite establecido por la regulación ARCONEL 009/24, lo cual representa un incumplimiento normativo.

Al analizar las mediciones de los siete días y calcular el THD-I promedio, se obtuvo un valor de 6.99 %, que se encuentra muy próximo al límite del 8 % permitido. Es probable que los altos niveles de distorsión registrados durante los periodos de demanda mínima estén elevando el valor promedio de distorsión, mientras que, en las jornadas laborales, cuando la empresa opera a plena capacidad, el filtro activo sí entra en funcionamiento y reduce considerablemente los armónicos. Este comportamiento pone en evidencia la

necesidad de una adecuada configuración del umbral de activación del filtro activo, para que también sea efectivo durante periodos de baja demanda.

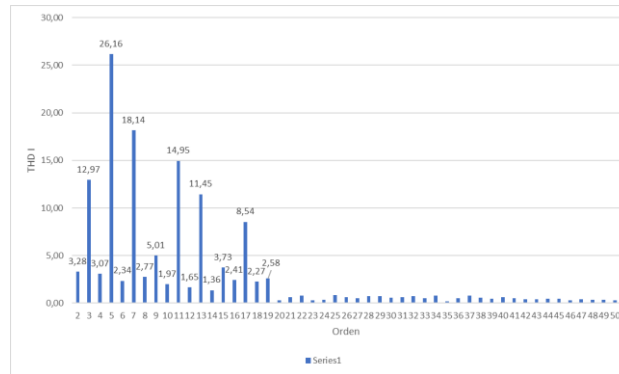


Figura 5. 13 Orden de armónicos de corriente jornada laboral en mínima demanda

5.3.8. Análisis en Jornada de Descanso

En la Figura 5.14 se presenta el análisis de los armónicos individuales correspondientes a la jornada de descanso (sábado y domingo), caracterizada por bajos niveles de corriente y potencia. Las mediciones realizadas con el analizador de redes Fluke 435-II muestran que las corrientes reales se mantienen por debajo de 1 A, como se detalla en la Tabla 0.12 del Anexo A. Aunque se registra un THD de corriente elevado, del 59.90 %, este no representa una afectación significativa debido a la baja magnitud de la corriente medida.

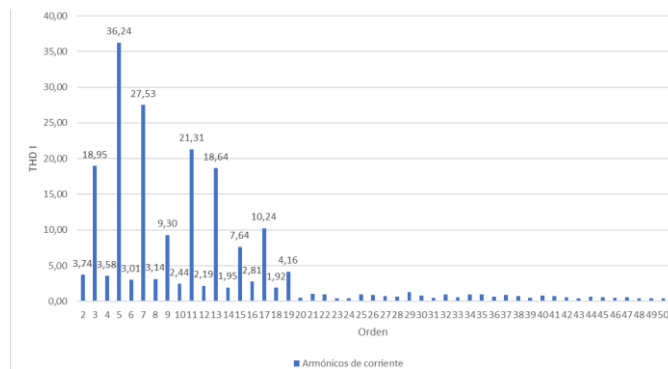


Figura 5. 14 Orden de armónicos de corriente jornada de descanso en mínima demanda

Resultados de la Simulación del Sistema en ETAP

5.3.9. Análisis con valor promedio

Antes del filtro

Según la Figura 5.15, el espectro de corriente muestra una senoidal distorsionada por componentes armónicas, generadas en su mayoría por los variadores de frecuencia de las cargas de mayor potencia.

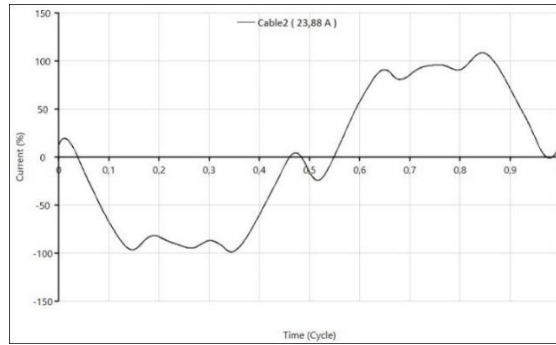


Figura 5. 15 Curva resultante de armónicos de corriente en la red

La Figura 5.16 recopila los armónicos individuales calculados e incorporados en ETAP para modelar el comportamiento eléctrico de la industria AVIPAZ, empleando los datos registrados por el analizador de redes Fluke 435-II.

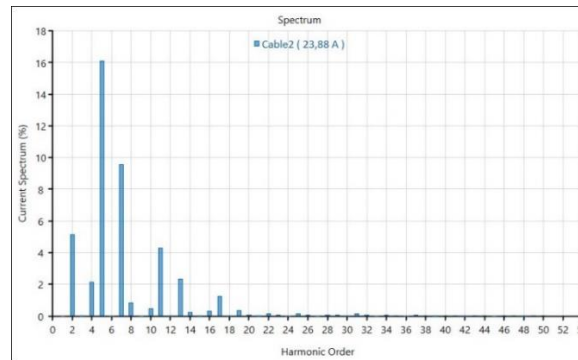


Figura 5. 16 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro

Después del filtro Activo

Luego de incorporar el filtro activo en la simulación, la Figura 5.17 muestra la forma de onda de la corriente con una clara tendencia a la sinusoidalidad, lo que evidencia una efectiva mitigación de los armónicos de corriente. Asimismo, como se detalla en la Tabla 7.13, se obtuvo un valor de THD de corriente de 6.95 %, el cual se encuentra muy cercano al valor medido experimentalmente mediante el analizador de redes, lo que valida la precisión del modelo de simulación utilizado.

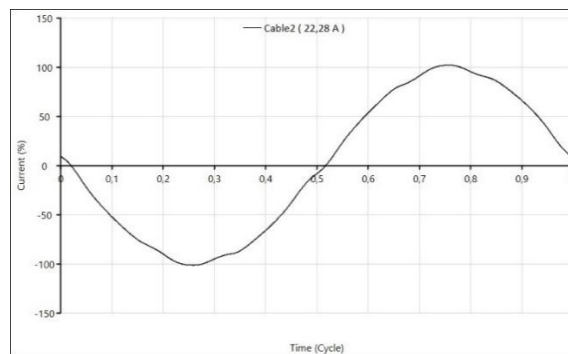


Figura 5. 17 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro

En la Figura 5.18 se presenta el espectro de armónicos individuales de corriente medido después del filtro activo. Se observa que el armónico de orden 5 mantiene un valor relativamente elevado; sin embargo, se encuentra dentro del límite del 7 % establecido por la regulación ARCONEL 009/24, cumpliendo así con los requisitos normativos en cuanto a calidad de energía.

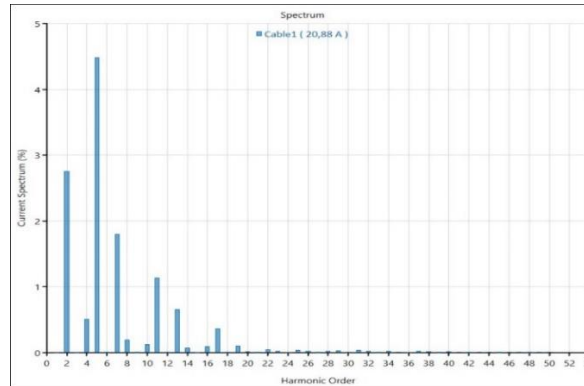


Figura 5. 18 ETAP armónicos individuales de corriente después del filtro

5.3.10. Análisis en Jornada Laboral

a. Demanda Máxima

Antes del filtro

Tal como se aprecia en la Figura 5.19, el espectro de corriente muestra una senoidal distorsionada por componentes armónicas, originadas principalmente en los variadores de frecuencia instalados en las cargas de mayor potencia durante la jornada laboral.

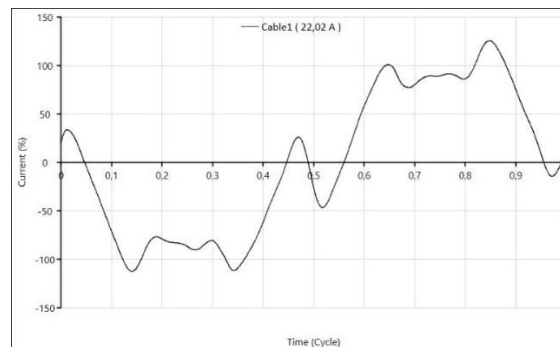


Figura 5. 19 Curva resultante de armónicos de corriente en la red

En la Figura 5.20 se consignan los armónicos individuales previamente calculados e ingresados en el software ETAP para representar el comportamiento eléctrico de la planta AVIPAZ, utilizando la información suministrada por el analizador de redes Fluke 435-II.

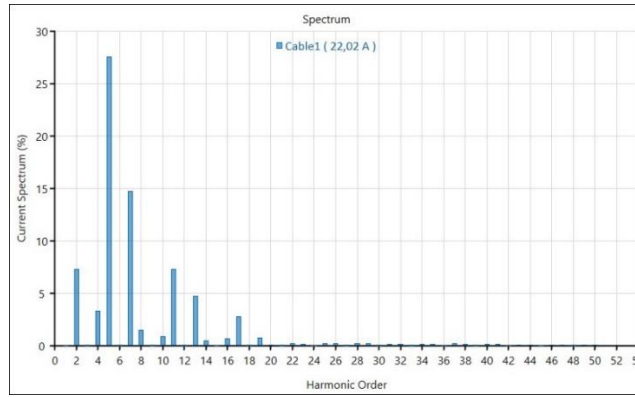


Figura 5. 20 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral

Después del filtro

Como se observa en la Figura 5.19, la forma de onda de la corriente correspondiente a la jornada laboral presenta una curva prácticamente sinusoidal, lo que evidencia una efectiva mitigación de los armónicos gracias al funcionamiento del filtro activo. La reducción de distorsiones armónicas es notable, ya que no se aprecian componentes armónicas claramente visibles en la señal, lo que indica que el contenido armónico ha sido suprimido de forma eficiente.

Este resultado confirma el adecuado desempeño del filtro activo durante los periodos de mayor carga, contribuyendo significativamente a mejorar la calidad de la energía suministrada, reduciendo el esfuerzo térmico sobre los equipos y minimizando posibles interferencias en dispositivos sensibles.

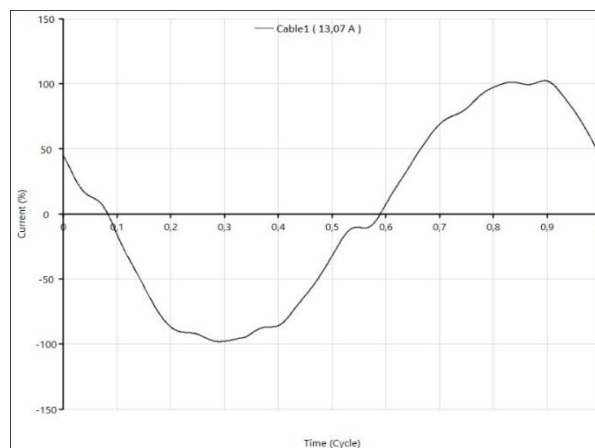


Figura 5. 21 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral

La Figura 5.21 evidencia una disminución marcada de los valores de los armónicos individuales de corriente, en comparación con los registrados en la Figura 5.11, la cual corresponde a la jornada laboral antes de la implementación del filtro activo. Esta

disminución evidencia la efectividad del sistema de filtrado en la mitigación de distorsiones armónicas.

El armónico de mayor magnitud alcanza un valor de apenas 4 %, lo cual se encuentra significativamente por debajo del límite del 7 % establecido por la normativa ARCONEL 009/24, cumpliendo así con los requerimientos de calidad de energía. Más allá de asegurar la observancia normativa, esta mejora favorece la protección de los equipos, la reducción de pérdidas y una operación más eficiente del sistema eléctrico.

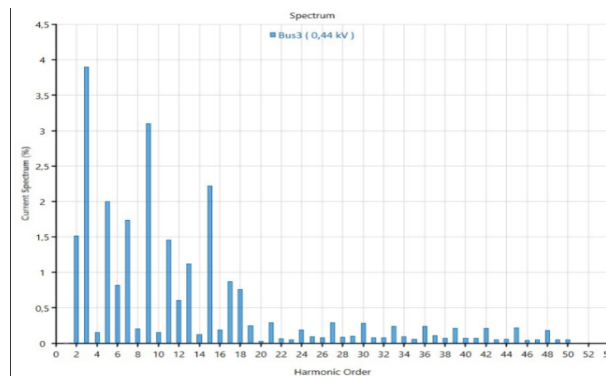


Figura 5. 22 ETAP armónicos individuales de corriente después del filtro jornada laboral

b. Demanda Mínima

Antes del Filtro

En la Figura 5.2 se aprecia que la corriente deja de ser una senoidal pura debido a la presencia de armónicos, originados principalmente en los variadores de frecuencia de las cargas de mayor potencia que operan durante la jornada laboral.

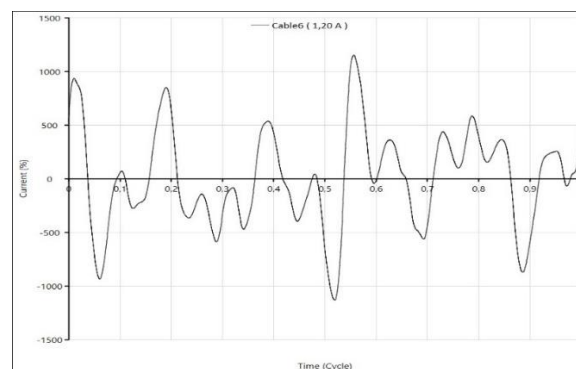


Figura 5. 23 Curva resultante de armónicos de corriente en la red

En la Figura 5.24 se detallan los armónicos individuales, previamente determinados e ingresados en ETAP para emular el comportamiento eléctrico de la industria AVIPAZ, utilizando la información registrada por el analizador de redes Fluke 435-II.

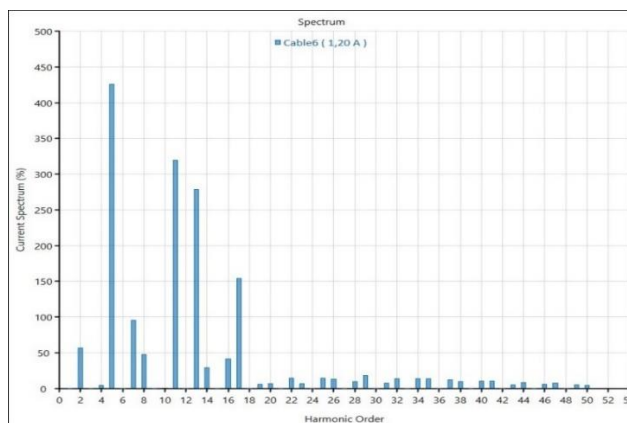


Figura 5. 24 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral mínima demanda

Después del Filtro

Como se observa en la Figura 5.25, la forma de onda de la corriente correspondiente a la jornada laboral presenta una curva prácticamente sinusoidal, lo que evidencia una efectiva mitigación de los armónicos gracias al funcionamiento del filtro activo. La reducción de distorsiones armónicas es notable.

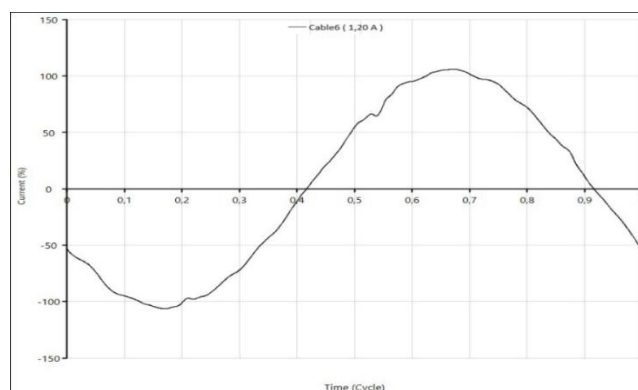


Figura 5. 25 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral mínima

En la figura 5.26 el armónico de mayor magnitud alcanza un valor de apenas 1.4 %, lo cual se encuentra significativamente por debajo del límite del 7 % establecido por la normativa ARCONEL 009/24, cumpliendo así con los requerimientos de calidad de energía. Esta mejora no solo garantiza el cumplimiento normativo, sino que también contribuye a la protección de los equipos, la reducción de pérdidas y una operación más eficiente del sistema eléctrico teniendo un THD de 2.22%.

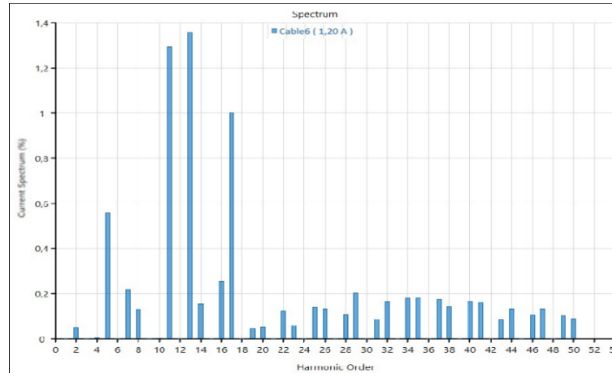


Figura 5. 26 Curva resultante de armónicos de corriente en la red corregidos por el filtro en jornada laboral en demanda mínima.

5.3.11. Análisis en Jornada de Descanso

Antes del Filtro

La Figura 5.27 evidencia que el espectro de corriente deja de ser una senoide pura, al hallarse distorsionada por armónicos generados principalmente por los variadores de frecuencia vinculados a las cargas de mayor potencia en horas de operación.

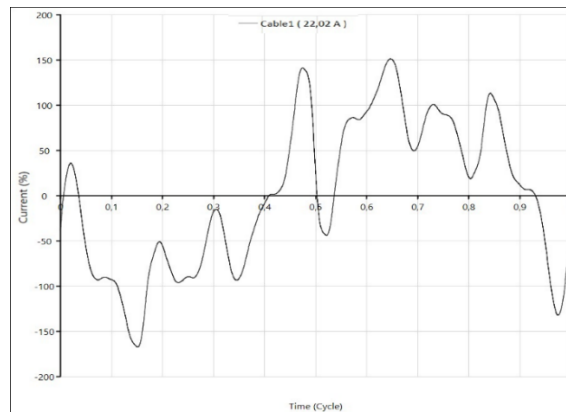


Figura 5. 27 Curva resultante de armónicos de corriente en la red antes del filtro jornada descanso

En la Figura 5.28 aparecen listados los armónicos individuales, calculados con anterioridad y cargados en ETAP para recrear el desempeño eléctrico de la planta AVIPAZ, a partir de los registros del analizador de redes Fluke 435-II.

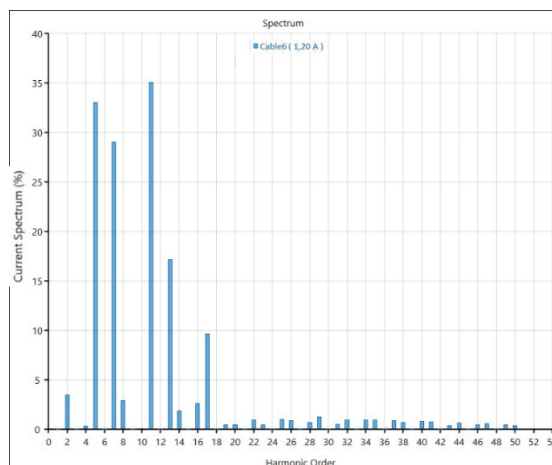


Figura 5. 28 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral máxima demanda

Después del Filtro

Como se observa en la Figura 5.29, la forma de onda de la corriente correspondiente a la jornada laboral presenta una curva prácticamente sinusoidal, lo que evidencia una efectiva mitigación de los armónicos gracias al funcionamiento del filtro activo. La reducción de distorsiones armónicas es notable.

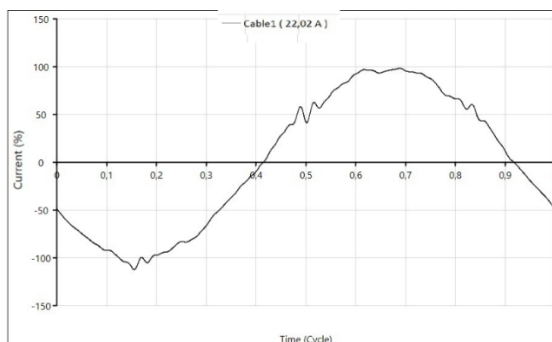


Figura 5. 29 ETAP armónicos individuales de corriente antes del filtro en jornada laboral máxima demanda

En la figura 5.26 el armónico de mayor magnitud alcanza un valor de apenas 3.4 %, lo cual se encuentra significativamente por debajo del límite del 7 % establecido por la normativa ARCONEL 009/24, cumpliendo así con los requerimientos de calidad de energía. Además de asegurar la observancia reglamentaria, coadyuva igualmente a la protección de los equipos, la reducción de pérdidas y una operación más eficiente del sistema eléctrico teniendo un THD de 5.42%.

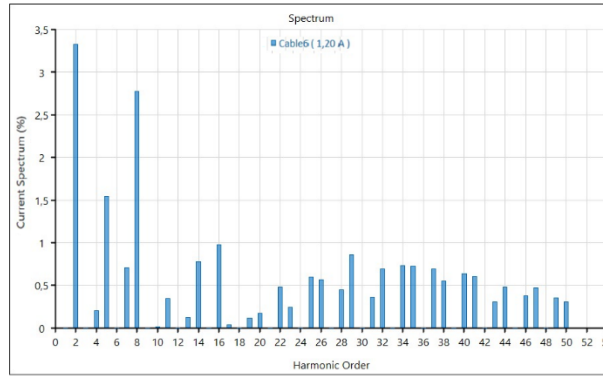


Figura 5. 30 ETAP armónicos individuales de corriente despues del filtro en jornada laboral máxima demanda

5.4.Análisis de Filtro Activo

5.4.1. Filtro activo en valor promedio

Como se muestra en la Figura 5.31, se configuró un filtro específico para la mitigación de armónicos individuales, enfocándose en los armónicos de orden 2, 3, 4 y 5. Entre estos, los de mayor magnitud correspondieron a los armónicos de tercer y quinto orden. Posterior a la implementación del filtrado, se observa una reducción del THD de corriente a un valor de 6.95 %, el cual se encuentra dentro del límite permitido del 8 %, según lo establecido por la regulación ARCONEL 009/24.

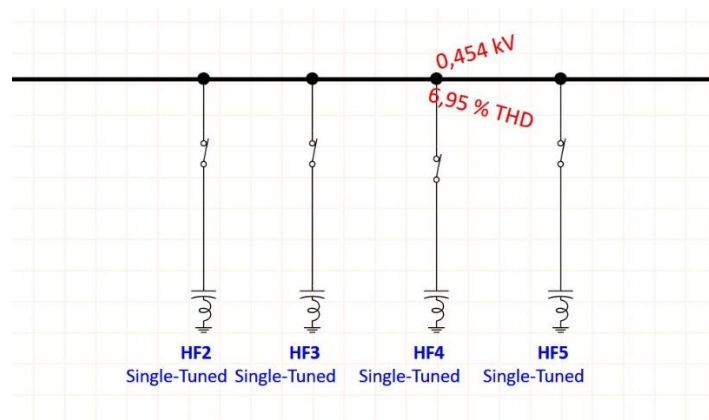


Figura 5. 31 Filtro Activo en escenario promedio de medición de 7 días

5.4.2. Filtro activo en jornada laboral

Máxima demanda

Como se observa en la Figura 5.32, durante el escenario de demanda máxima correspondiente a la jornada laboral, el sistema opera con la incorporación de un filtro activo, el cual permite reducir eficazmente la distorsión armónica. En este caso, se obtiene un THD de corriente de 4.12 %, valor que se encuentra dentro de los límites permisibles

establecidos por la regulación ARCONEL 009/24, garantizando así una adecuada calidad de energía.

Además, se han configurado filtros activos independientes dirigidos a los armónicos de orden 3, 5, 7 y 9, los cuales son los más representativos en el espectro armónico generado por las cargas no lineales de la industria, especialmente los variadores de frecuencia. Esta estrategia de mitigación selectiva permite una compensación más precisa y eficiente, enfocándose en los armónicos con mayor impacto en la distorsión total, mejorando el desempeño del sistema eléctrico durante los periodos de mayor carga operativa.

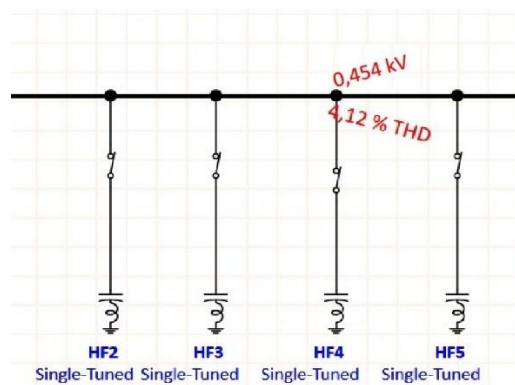


Figura 5. 32 Filtro Activo en escenario demanda máxima jornada laboral

Mínima demanda

Como se observa en la figura 5.33, durante el escenario de demanda mínima correspondiente a la jornada laboral, el sistema opera con la incorporación de un filtro activo, el cual permite reducir eficazmente la distorsión armónica. En este caso, se obtiene un THD de corriente del 2,22 %, valor que se encuentra dentro de los límites establecidos por la regulación ARCONEL 009/24. Además, se realizó una corrección del quinto armónico para lograr una mitigación parcial del mismo y, con ello, una reducción adicional del THD.

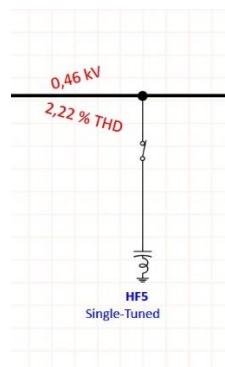


Figura 5. 33 Filtro Activo en escenario demanda mínima jornada laboral

5.4.3. Filtro activo en jornada de descanso

Como se observa en la figura 5.34, durante el escenario de demanda mínima correspondiente a la jornada laboral, el sistema opera con la incorporación de un filtro activo, el cual permite reducir eficazmente la distorsión armónica. En este caso, se obtiene un THD de corriente del 5,42 %, valor que permanece enmarcado dentro de los rangos que fija la regulación ARCONEL 009/24. Además, se realizó la corrección de los armónico tercero, quinto, onceavo, treceavo y diecisieteavo para lograr una mitigación parcial del mismo y, con ello, una reducción adicional del THD.

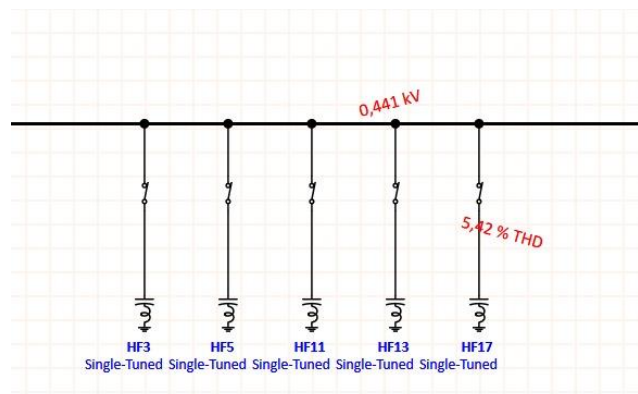


Figura 5. 34 Filtro Activo en escenario demanda mínima jornada de descanso

5.5. Corrección de configuración Filtro Activo AFQm para FP

Como parte del análisis integral de la calidad de energía, se identificó que el sistema presentaba un factor de potencia general de 0.93, valor que se encuentra por debajo del umbral recomendado por las normativas nacionales e internacionales. Para resolver este problema sin necesidad de incorporar elementos adicionales al sistema, se optó por aprovechar la funcionalidad de compensación de potencia reactiva que ofrece el filtro activo AFQm previamente instalado para la mitigación de armónicos.

Para lograr esta meta, el equipo realiza un monitoreo continuo de las variables eléctricas del sistema, tales como tensión, corriente, potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y potencia aparente (S). A partir de estas mediciones, el filtro calcula en tiempo real el factor de potencia instantáneo, comparándolo constantemente con el valor objetivo previamente configurado.

Una vez detectada la desviación del factor de potencia respecto al valor deseado, el filtro activa un algoritmo de compensación que determina la cantidad exacta de potencia reactiva que debe ser inyectada o absorbida para alcanzar el equilibrio.

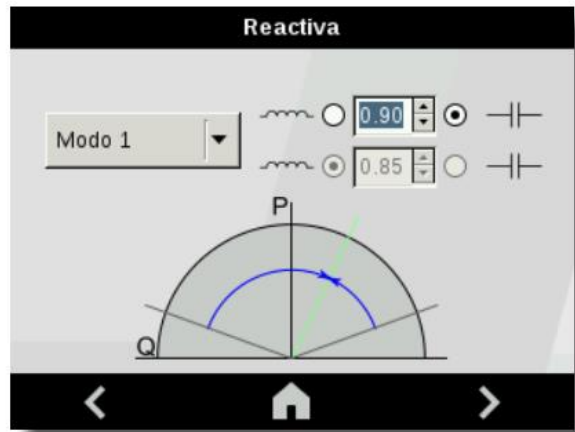


Figura 5. 35 Configuración para FP deseado

5.6. Corriente mínima para operación en Filtro Acto AFQm

En este parámetro se configura la corriente mínima de la carga para arrancar el filtro. La corriente mínima se utiliza para incrementar la eficiencia del sistema, manteniendo en standby el filtro cuando se requiera. El AFQm se parará cuando la corriente de carga sea inferior al valor introducido y arrancará cuando sea mayor.

Rango de valores:

- Valor mínimo: 0 A
- Valor máximo: 5000 A

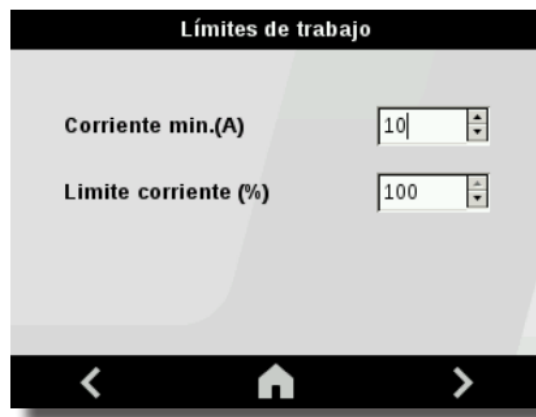


Figura 5. 36 Configuración de corriente mínima para operación del filtro activo

5.7. Análisis económico en la vida útil de los equipos

Con respecto a la vida útil de la maquinaria industrial instalada en la empresa AVIPAZ, se ha determinado que la presencia de altos niveles de distorsión armónica de corriente (THD-I) durante los periodos de descanso y jornada laboral con carga mínima representa

un factor crítico que acelera el deterioro de equipos sensibles como variadores de frecuencia, motores eléctricos, controladores electrónicos y fuentes conmutadas.

En escenarios donde no se implementa una corrección o mitigación del THD de corriente, la maquinaria opera bajo condiciones eléctricas adversas que generan:

- Aumento en las pérdidas por calor (efecto Joule) debido a las corrientes armónicas.
- Activación prematura de protecciones electrónicas.
- Reducción de la eficiencia operativa.
- Disminución significativa de la vida útil estimada del equipo.

A continuación, se evalúa el costo asociado a este deterioro prematuro comparando dos escenarios:

Por tanto, desde el punto de vista técnico-económico, se justifica la inversión en estrategias de corrección del THD, especialmente en condiciones de baja carga donde las corrientes armónicas tienen mayor impacto relativo.

Tabla 5. 9 Comparativa económica entre escenarios con corrección de THD de corriente en baja carga

Concepto	Escenario A (Sin corrección del THD)	Escenario B (Con corrección del THD)
Vida útil estimada del equipo	8 años	8 años
Vida útil real bajo condiciones actuales	4 años	8 años
Costo de los equipos	USD \$12,000	USD \$12,000
Número de reposiciones en 8 años	2	1
Costo total de reposición en 8 años	USD \$24,000	USD \$12,000
Costo de mantenimiento del filtro (8 años)	—	USD \$4,000 (USD \$500/año × 8)
Costo total acumulado	USD \$24,000	USD \$16,000
Ahorro estimado	—	USD \$8,000
Riesgo de paradas no programadas	Alto	Bajo
Eficiencia energética	Disminuida por armónicos	Optimizada
Impacto sobre otros equipos	Riesgo de fallos cruzados	Reducción de interferencia

En el caso de optar por una implementación con filtros pasivos, se identificó que las condiciones de carga mínima del sistema (corrientes de aproximadamente 1.5 A y potencias cercanas a 1.5 kW) se encuentran por debajo de las capacidades nominales estándar de la mayoría de los filtros pasivos comerciales, los cuales suelen comenzar

desde 5 A. Por lo tanto, sería necesario solicitar un diseño y fabricación a medida para cumplir con las especificaciones de operación en condiciones de baja carga.

Tabla 5. 10 Comparativa entre filtro pasivo estándar y personalizado

Características	Filtro Pasivo Estándar	Filtro Pasivo Personalizado
Corriente nominal mínima	Desde 5 A	1.5 A (ajustado a medida)
Potencia nominal	> 5 kW (aprox. según corriente)	1.5 kW (baja potencia específica)
Disponibilidad comercial	Alta: modelos estándar en stock	Baja: fabricación bajo pedido
Costo estimado	5 filtros × 300 USD = 1500 USD	Valor estimado USD 2250
Tiempo de fabricación	Inmediato o corto (disponible en stock)	Largo (se debe diseñar y fabricar a medida)
Adaptación a carga mínima	No óptimo, sobredimensionado	Óptimo, ajustado a carga real
Flexibilidad para ajustes futuros	Limitada (modelo fijo)	Alta (se puede ajustar diseño según requerimientos)
Complejidad de instalación	Estándar	Puede requerir ajustes específicos

5.8. Barrido de frecuencia para filtro pasivo

Las caídas observadas en la curva de impedancia corresponden a las frecuencias de sintonización de los filtros pasivos, donde el filtro actúa eliminando armónicos específicos presentes en la red eléctrica. Estas caídas se presentan alrededor de las siguientes frecuencias: 150 Hz (3er armónico), 250 Hz (5to armónico), 550 Hz (11vo armónico), 650 Hz (13vo armónico) y 850 Hz (17vo armónico).

En dichas frecuencias, la impedancia disminuye considerablemente, lo que indica que el filtro ofrece un camino de baja impedancia para derivar los armónicos hacia el sistema de puesta a tierra. Esta característica protege la red al evitar la propagación de armónicos que pueden afectar la calidad de energía y el funcionamiento de los equipos conectados.

A partir de los 1000 Hz, se observa un aumento progresivo de la impedancia, comportamiento típico en filtros pasivos que no están diseñados ni sintonizados para frecuencias armónicas más altas. Esto limita la capacidad del filtro para mitigar armónicos en rangos de frecuencia elevados.

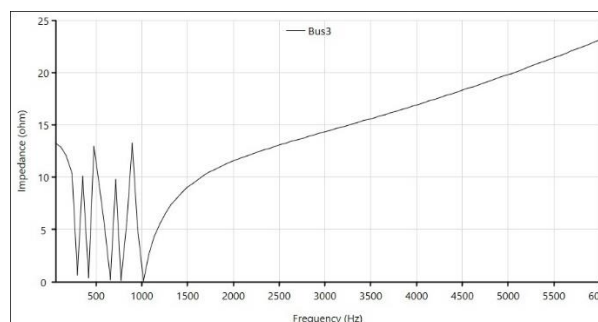


Figura 5. 37 Impedancia vs Frecuencia (ohmios)

El ángulo de fase de la impedancia presenta variaciones significativas, oscilando entre -1.5 y +1.5 radianes en las mismas regiones donde se detectan resonancias, coincidiendo

con las zonas de caída de impedancia. Estos picos en el ángulo de fase reflejan efectos resonantes, lo que confirma la acción del filtro en dichas frecuencias.

Durante el análisis, se observan valores negativos del ángulo, correspondientes a una componente inductiva, así como valores positivos, asociados a una componente capacitiva, dependiendo de la frecuencia considerada. Esta variación indica la naturaleza reactiva variable de la impedancia en función de la frecuencia.

A partir de los 1000 Hz, el ángulo de fase se estabiliza en valores positivos, lo que implica que la impedancia se vuelve predominantemente inductiva a frecuencias altas, comportamiento típico en filtros pasivos y sistemas eléctricos.

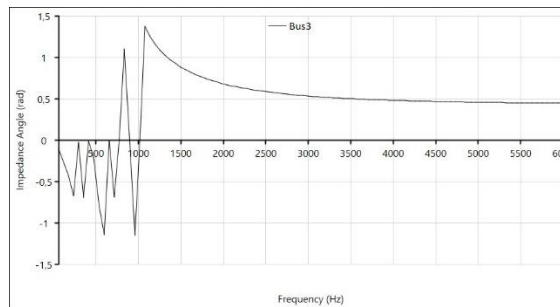


Figura 5. 38 Ángulo de Impedancia vs Frecuencia (radianes)

En el caso de la red de AVIPAZ, se ha verificado que el sistema está correctamente filtrando los armónicos de orden 3, 5, 11, 13 y 17, los cuales son comúnmente generados por cargas no lineales presentes en entornos industriales. El análisis de las curvas de impedancia y ángulo de fase muestra que la resonancia observada en estas frecuencias es controlada y beneficiosa, resultado del diseño sintonizado del filtro pasivo. Esta condición permite que los armónicos objetivo encuentren un camino de baja impedancia, siendo eficientemente desviados hacia el filtro sin afectar el resto de la red. Además, la forma de las gráficas obtenidas en el barrido de frecuencia indica que no existen acoplamientos destructivos entre los filtros, es decir, no se observan resonancias fuera de las frecuencias deseadas que pudieran generar sobrecorrientes o inestabilidad. Este tipo de diseño pasivo es ideal cuando se requiere mitigar armónicos en presencia de cargas no lineales, cumplir con normativas como la IEEE 519, y prevenir resonancias paralelas no deseadas.

6. CONCLUSIONES

- Se realizó el levantamiento técnico de la red eléctrica interna de la planta AVIPAZ, a partir del cual se elaboró el diagrama unifilar y el diagrama de planta. Con esta información, se modeló el sistema en el software ETAP, permitiendo simular su comportamiento antes y después de la instalación del filtro activo. Las simulaciones respaldaron los resultados de las mediciones en campo, evidenciando la efectividad del filtro en condiciones de alta demanda y sus limitaciones en escenarios de baja carga.
- El análisis del THD de corriente durante siete días evidencia una notable reducción de armónicos tras la instalación del filtro activo. En todos los días evaluados, el THD de corriente posterior al filtro se mantuvo por debajo del 8%, cumpliendo con los criterios establecidos por la regulación ARCONEL 009/24, lo cual valida la efectividad del filtro en condiciones generales de operación.
- Durante la jornada laboral (lunes a viernes) de máxima carga, el filtro activo demostró una alta eficiencia en la mitigación armónica bajo condiciones de máxima demanda. Sin embargo, en situaciones de mínima carga, tanto en jornadas laborales como de descanso, el filtro mostró una capacidad limitada de compensación, observándose niveles de THD relativamente altos.
- En los días de descanso, donde la planta no produce, se identificaron niveles elevados de THD, aunque sus corrientes armónicas sean menores a 1.5 A esto representa un riesgo operativo significativo para los equipos y para la red. Se realizaron estudios posteriores a la instalación del filtro activo para evaluar el estado del sistema en cuanto a desbalance de corriente, desbalance de voltaje, desbalance de potencia, factor de potencia, sags, swells y flicker, cuyos resultados evidencian que todos estos parámetros se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la regulación ARCONEL 009/24, lo que indica un adecuado desempeño del sistema eléctrico tras la mitigación armónica.
- La simulación del comportamiento del sistema eléctrico de AVIPAZ se consolidó como una herramienta fundamental para el análisis técnico de la calidad de energía, permitiendo replicar con precisión las condiciones reales de operación bajo escenarios de carga mínima, tanto en horarios de jornada laboral como en periodos de descanso. A través de esta herramienta, se evidenció que, a pesar de manejarse corrientes de baja

magnitud (≤ 1.5 A), persisten niveles significativos de distorsión armónica que comprometen la calidad del suministro eléctrico, especialmente en lo referente al desempeño de equipos electrónicos sensibles. Los resultados obtenidos mediante la simulación facilitaron la identificación de esta limitante operativa del filtro activo, el cual no entra en funcionamiento por encontrarse por debajo de su umbral mínimo de activación.

- Debido a que el modelo del filtro activo no está disponible en ETAP, se simuló un comportamiento equivalente a través de filtros pasivos sintonizados en los armónicos 5, 7, 11 y 13, que son los de mayor presencia en la distorsión armónica medida. Esto permitió evaluar el efecto potencial de mitigación sobre el THD de corriente, obteniendo una estimación realista del comportamiento del sistema ante la presencia de un filtro activo correctamente configurado.
- El filtro pasivo evaluado cumple adecuadamente con su función de mitigación de armónicos específicos (3° , 5° , 11° , 13° y 17°), presentando una respuesta resonante clara en las frecuencias objetivo. Sin embargo, su eficacia disminuye a frecuencias superiores a 1000 Hz, por lo que no es recomendable para eliminar armónicos de orden muy alto.
- Aunque durante ciertos días con baja carga se registró un factor de potencia de 0.92, este valor no influye de forma significativa en el promedio mensual reflejado en la planilla eléctrica (0.9675), ya que el factor de potencia facturado se basa en un promedio energético mensual, donde el aporte de estos días con baja carga es mínimo debido al reducido consumo de energía activa y reactiva. Además, los periodos de mayor demanda, en los cuales el factor de potencia supera 0.94, representan la mayor proporción del consumo total, lo que permite compensar los valores más bajos. A esto se suma la acción del filtro activo tipo shunt, que opera con mayor eficacia en condiciones de alta carga, contribuyendo a mantener un factor de potencia mensual elevado.

7. RECOMENDACIONES

- Dado que el filtro no compensa eficazmente en condiciones de baja carga, se recomienda revisar su configuración técnica y verificar si existe un umbral mínimo de corriente para su funcionamiento. De ser posible, ajustar estos parámetros o considerar un redimensionamiento para mejorar su respuesta en cargas reducidas.
- Instalar un sistema de monitoreo permanente que permita registrar el estado operativo del filtro, su nivel de compensación en tiempo real y su comportamiento ante variaciones de carga. Esto facilitará la detección de eventos en los que el filtro no opera correctamente y permitirá evaluar su desempeño a lo largo del tiempo.
- Se sugiere incorporar en el modelo simulado condiciones dinámicas adicionales, como arranques de motores o variaciones de carga súbitas, para prever el comportamiento del sistema ante disturbios. Esto contribuirá a validar la respuesta del filtro en condiciones reales más exigentes y optimizar su aplicación.
- Con base en los resultados obtenidos, se recomienda la implementación de un sistema de corrección de distorsión armónica, ya que se evidencia una reducción significativa del THD en condiciones de operación con filtro. Esta mejora no solo contribuye a la calidad del suministro eléctrico, sino que también protege los equipos sensibles y reduce el riesgo de sobrecalentamientos, pérdidas energéticas y fallos prematuros. En contraste, en el escenario sin corrección, los niveles de THD superan los límites establecidos por normas como la IEEE 519, comprometiendo la eficiencia y la confiabilidad del sistema eléctrico. Por lo tanto, es técnica y económicamente justificable optar por la solución de mitigación de armónicos, especialmente en horarios de carga mínima donde la distorsión es más crítica.

8. REFERENCIAS

- [1] H. Fuerez, «Desarrollo de un aplicativo Web para el proceso de cálculo de los índices de calidad de producto de acuerdo con la regulación ARCONEL 009/18 de calidad de energía para la empresa eléctrica regional norte EMELNORTE.», pp. 1-119, 2021, Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11309>
- [2] B. Castañeda, «Implementación de un sistema de compensación reactiva y filtrado de armónicos en las s.e. n°1 y2 de la planta de producción de “clorox” para mitigar los problemas de calidad de energía», Callao, abr. 2017. Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3512>
- [3] Agencia de Regulación y Control de Eléctrici, «Regulación No. ARCONEL 009/24», Quito, 2024.
- [4] V. Mercado, J. Peña, y L. Pacheco, «Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra», pp. 1-17, 2017, Accedido: 13 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007009>
- [5] N. Crespo, «Sistema para la mitigacion de las perturbaciones que afectan la calidad de la energía», Accedido: 13 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/3188>
- [6] J. Arizpe, J. Neira, y A. López, «Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia», oct. 2013.
- [7] O. Castañeda y W. Castañeda, «Análisis de Calidad de Energía acerca de la Calidad del Producto e Influencia de Armónicos de corriente dentro del área de concesión de CNEL-Milagro», pp. 1-10, 2010, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v6.n1.2010.231>.
- [8] J. Arcila, «Armónicos en sistemas eléctricos», Bogota, 2015. Accedido: 13 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf
- [9] D. Committee of the IEEE Power y E. Society, «IEEE Std 519TM-2014», mar. 2014. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [10] D. Andrade, «Implementación de la transformada Wavelet para la medición de los diferentes tipos de perturbaciones en el laboratorio de máquinas eléctricas», Quito, feb. 2014. Accedido: 13 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7177>
- [11] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, «IEEE std 1159-1195», nov. 1995, doi: 10.1109/IEEESTD.1995.79050.
- [12] H. Barzola y C. Ventura, «Sistema de filtros para mejorar la calidad de la energía eléctrica en la planta de producción de la Cooperativa Agropia - 2021», Huancayo,

2022. Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/12280>
- [13] I. Bautista, M. Aybar, y M. Blanco, «Vista de Compensación de reactivos en instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos penalizadas por bajo factor de potencia», doi: <https://doi.org/10.22206/cyap.2020.v3i2.pp39-63>.
- [14] D. Camac y J. Castro, «Metodología de diseño para implementar un sistema de compensación de energía reactiva desintonizada y mejorar la eficiencia energética del área de producción de una fábrica de alimentos en el distrito de ATE – Lima», pp. 1-1006, 2023, Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7275?show=full>
- [15] J. Asanza, «Diseño del Control y Simulación de un Restaurador Dinámico de Voltaje Trifásico», Guayaquil, 2012. Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/45857>
- [16] I. Bautista, M. Aybar, M. Blanco, y R. A, «Compensación de reactivos en instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos penalizadas por bajo factor de potencia», pp. 1-25, dic. 2020, doi: <https://doi.org/10.22206/cyap.2020.v3i2.pp39-63>.
- [17] H. Pila y M. Zambrano, «Estudio del flicker en una instalación eléctrica», Guayaquil, 2010. Accedido: 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2142>
- [18] G. Rojas, «Todo lo que debemos saber sobre DPS. Protección contra sobrevoltajes», Caracas, mar. 2018. Accedido: 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gedisa.com.ve/boletin/pdf/Proteccion%20contra%20sobrevoltajes,%20todo%20sobre%20DPS%20PARTE%202.pdf>
- [19] A. Carrión y A. Jiménez, «Análisis de fallas armónicas y su mejoramiento por medio de filtros activos y pasivos en un sistema de 14 barras de la ieee», Guayaquil, 2024. Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27294>
- [20] AVIPAZ, «Sobre Nosotros - AVIPAZ». Accedido: 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://avipaz.com.ec/nosotros/>
- [21] FLUKE, «Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435>
- [22] «Fluke 435-II - Analizador de calidad de la energía eléctrica Clase A». Accedido: 29 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cedesa.com.mx/fluke/analizadores/calidad-energia/435-II/?srsltid=AfmBOoqouGIajO2R1ACpwcRszsftXP4MffSBYi1QKEQQFOqXNbtYUJ>

- [23] M. Gallo y J. Roto, «Estudio de la calidad de energía del sistema eléctrico de la empresa “Embutidos la Madrileña”», Latacunga, mar. 2022. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9343>
- [24] K. Prabha, «Power System Stability and Control», 1994.
- [25] A. Carrión y A. Jiménez, «Análisis de fallas armónicas y su mejoramiento por medio de filtros activos y pasivos en un sistema de 14 barras de la IEEE», Guayaquil, 2024. Accedido: 20 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27294>

ANEXOS A

Tabla 0. 1 Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos de los sistemas de potencia [11].

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μ s rise	50 ns-1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Medium frequency	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu
1.2.3 High frequency	0.5-5 MHz	5 μ s	0-4 pu
2.0 Short duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles-3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s-1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Long duration variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Voltage imbalance		steady state	0.5-2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0-0.1%
5.2 Harmonics	0-100th H	steady state	0-20%
5.3 Interharmonics	0-6 kHz	steady state	0-2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broad-band	steady state	0-1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1-7%
7.0 Power frequency variations		< 10 s	

Tabla 0. 2 Levantamiento de cargas de la empresa AVIPAZ.

NOMENCLATURA	CIRCUITOS	MOTORES	MARCA	HP	VOLTAJE (kV)	CONFIGURACION	POTENCIA (kW)	COSPHI	ÁNGULO DE DISPARO	RPM	EFICIENCIA	Ia/Ir (A)	Xd''	In (A)
M_HAM_MO	C1	M#1	ABB	268,4563758	0,44	DELTA	200	0,86	45	3584	0,95	6,1	0,25	309
M_PUL_MO	C2	M#2	WEG	214,7651007	0,44	DELTA	160	0,85	45	1785	0,958	7,7	0,25	259
M_PUL1_MO	C3	M#3	WEG	24,83221477	0,44	DELTA	18,5	0,82	45	1175	0,95	7,7	0,25	32,1
M_MIX_MO	C4	M#4	WEG	57,18120805	0,44	DELTA	42,6	0,865	45	1735	0,945	6,2	0,25	35,4
M_FAM_MO	C5	M#5	BEIDE	73,82550336	0,44	DELTA	55	0,88	45	3565	0,93	6,4	0,25	88
M_HAM1_MO	C6	M#6	WNN	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	0,74	45	1160	0,895	4,2	0,25	4,4
M_HAM2_MO	C6	M#7	ROSSI	1,543624161	0,44	ESTRELLA	1,15	0,78	45	1735	0,841	4,2	0,25	2,1
M_ZAR_MO	C6	M#8	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	0,79	45	1720	0,875	6,4	0,25	4,2
M_ZAR1_MO	C6	M#9	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	0,825	45	3461	0,77	4,2	0,25	1,7
M_ZAR2_MO	C6	M#10	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	0,825	45	3461	0,77	4,2	0,25	1,7
M_ELEV_MO	C6	M#11	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	0,79	45	1720	0,875	6,4	0,25	4,2
M_MAN_MO	C6	M#12	NORD	10,06711409	0,44	DELTA	7,5	0,79	45	1765	0,87	6,6	0,25	13,7
M_CLEAN_MO	C6	M#13	MARATHON	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,82	45	1745	0,895	6,2	0,25	5,5
M_TR1_MO	C7	M#14	WEG	2,013422819	0,44	DELTA	1,5	0,78	45	1750	0,958	7,2	0,25	3
M_TR2_MO	C7	M#15	SEW	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	0,79	45	1735	0,883	6,2	0,25	4,2
M_TR3_MO	C7	M#16	LAI	2,013422819	0,44	ESTRELLA	1,5	0,79	45	1668	0,78	6,4	0,25	3,2
M_TR4_MO	C7	M#17	WEG	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,8	45	1450	0,96	6,1	0,25	8,77
M_TR6_MO	C7	M#18	SNMA	10,06711409	0,44	ESTRELLA	7,5	0,8	45	1750	0,88	6,1	0,25	15,1
M_TR5_MO	C7	M#19	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	0,825	45	3461	0,77	4,2	0,25	1,7
M_TR7_MO	C7	M#20	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	0,825	45	3461	0,77	4,2	0,25	1,7
M_TR8_MO	C7	M#21	THOMPSOM	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	0,82	45	1800	0,855	6,4	0,25	5,6
M_FIL1_MO	C8	M#22	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	0,79	45	1720	0,875	6,4	0,25	4,2
M_FIL2_MO	C8	M#23	WEG	2,013422819	0,44	DELTA	1,5	0,78	45	1750	0,958	7,2	0,25	3
M_FIL_MO	C8	M#24	THOMPSOM	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	0,82	45	1800	0,855	6,4	0,25	5,6
M_AL1_MO	C8	M#25	ROSSI	1,543624161	0,44	ESTRELLA	1,15	0,78	45	1735	0,841	4,2	0,25	2,1
M_DOX_1	C9	M#26	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_2	C9	M#27	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_3	C9	M#28	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_4	C9	M#29	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_5	C9	M#30	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_6	C9	M#31	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_DOX_7	C9	M#32	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	0,825	45	1745	0,895	6,2	0,25	8
M_TR1_ELV	C9	M#33	WESTINGHOUSE	7,382550336	0,44	DELTA	5,5	0,875	45	1755	0,917	6,1	0,25	8,85
M_TR2_ELV	C9	M#34	SIEMENS	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	0,79	45	1750	0,763	6,3	0,25	6,5
M_TR3_ELV	C9	M#35	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	0,8	45	1750	0,895	6,1	0,25	6,49
M_TR4_ELV	C9	M#36	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	0,8	45	1750	0,895	6,1	0,25	6,49
M_DOX1_DOX	C10	M#37	ABB	10,000000000	0,44	DELTA	7,45	0,84	45	1745	0,864	6	0,25	13,3
M_DOX2_DOX	C10	M#38	ABB	10,000000000	0,44	DELTA	7,45	0,84	45	1745	0,864	6	0,25	13,3
M_TR_DOX	C10	M#39	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	0,8	45	1750	0,895	6,1	0,25	6,49
M_FED_DOX	C10	M#40	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	0,8	45	1750	0,895	6,1	0,25	6,49

Tabla 0. 3 Parámetros estándar de una máquina asíncrona [25].

Parameter		Hydraulic Units	Thermal Units
Synchronous Reactance	X_d	0.6 - 1.5	1.0 - 2.3
	X_q	0.4 - 1.0	1.0 - 2.3
Transient Reactance	X'_d	0.2 - 0.5	0.15 - 0.4
	X'_q	-	0.3 - 1.0
Subtransient Reactance	X''_d	0.15 - 0.35	0.12 - 0.25
	X''_q	0.2 - 0.45	0.12 - 0.25
Transient OC Time Constant	T'_{d0}	1.5 - 9.0 s	3.0 - 10.0 s
	T'_{q0}	-	0.5 - 2.0 s
Subtransient OC Time Constant	T''_{d0}	0.01 - 0.05 s	0.02 - 0.05 s
	T''_{q0}	0.01 - 0.09 s	0.02 - 0.05 s
Stator Leakage Inductance	X_l	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2
Stator Resistance	R_a	0.002 - 0.02	0.0015 - 0.005

Tabla 0. 4 Levantamiento de conductores de cada carga

NOMENCLATURA	CIRCUITOS	MOTORES	MARCA	HP	VOLTAJE (KV)	CONFIGURACION	POTENCIA (kW)	In (A)	CONDUCTOR	LONGITUD (m)
M_HAM_MO	C1	M#1	ABB	268,4563758	0,44	DELTA	200	309	3x150+35 mm2 THWN-2	25
M_PUL_MO	C2	M#2	WEG	214,7651007	0,44	DELTA	160	259	3x120+35 mm2 THWN-2	24
M_PUL1_MO	C3	M#3	WEG	24,83221477	0,44	DELTA	18,5	32,1	4x10+6 mm2 THWN-2	26
M_MIX_MO	C4	M#4	WEG	57,18120805	0,44	DELTA	42,6	35,4	3x8+5,5 mm2 THWN-2	34,98
M_FAM_MO	C5	M#5	BEIDE	73,82550336	0,44	DELTA	55	88	3x25+10 mm2 THWN-2	51,86
M_HAM1_MO	C6	M#6	WNM	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	4,4	4x1,5 mm2 THWN-2	25,16
M_HAM2_MO	C6	M#7	ROSSI	1,543624161	0,44	ESTRELLA	1,15	2,1	4x1,5 mm2 THWN-2	25,57
M_ZAR_MO	C6	M#8	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	4,2	4x1,5 mm2 THWN-2	33,23
M_ZAR1_MO	C6	M#9	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	1,7	4x1,5 mm2 THWN-2	21,9
M_ZAR2_MO	C6	M#10	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	1,7	4x1,5 mm2 THWN-2	34,62
M_ELEV_MO	C6	M#11	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	4,2	4x1,5 mm2 THWN-2	39,43
M_MAN_MO	C6	M#12	NORD	10,06711409	0,44	DELTA	7,5	13,7	4x1,5 mm2 THWN-2	57,55
M_CLEAN_MO	C6	M#13	MARATHON	5,369127517	0,44	DELTA	4	5,5	4x1,5 mm2 THWN-2	58,16
M_TR1_MO	C7	M#14	WEG	2,013422819	0,44	DELTA	1,5	3	4x1,5 mm2 THWN-2	21,93
M_TR2_MO	C7	M#15	SEW	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	4,2	4x1,5 mm2 THWN-2	23,05
M_TR3_MO	C7	M#16	LAI	2,013422819	0,44	ESTRELLA	1,5	3,2	4x1,5 mm2 THWN-2	35,65
M_TR4_MO	C7	M#17	WEG	5,369127517	0,44	DELTA	4	8,77	4x1,5 mm2 THWN-2	38,6
M_TR6_MO	C7	M#18	SNMA	10,06711409	0,44	ESTRELLA	7,5	15,1	4x1,5 mm2 THWN-2	43,52
M_TR5_MO	C7	M#19	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	1,7	4x1,5 mm2 THWN-2	38,35
M_TR7_MO	C7	M#20	WAMGROUP	1,154362416	0,44	ESTRELLA	0,86	1,7	4x1,5 mm2 THWN-2	43,37
M_TR8_MO	C7	M#21	THOMPSON	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	5,6	4x1,5 mm2 THWN-2	43,44
M_FIL1_MO	C8	M#22	BEIDE	2,953020134	0,44	ESTRELLA	2,2	4,2	4x1,5 mm2 THWN-2	34,63
M_FIL2_MO	C8	M#23	WEG	2,013422819	0,44	DELTA	1,5	3	4x1,5 mm2 THWN-2	31,59
M_FIL_MO	C8	M#24	THOMPSON	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	5,6	4x1,5 mm2 THWN-2	39,84
M_AL1_MO	C8	M#25	ROSSI	1,543624161	0,44	ESTRELLA	1,15	2,1	4x1,5 mm2 THWN-2	45,34
M_DOX_1	C9	M#26	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	13,7
M_DOX_2	C9	M#27	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	31,62
M_DOX_3	C9	M#28	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	29,71
M_DOX_4	C9	M#29	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	27,25
M_DOX_5	C9	M#30	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	21,21
M_DOX_6	C9	M#31	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	19,15
M_DOX_7	C9	M#32	WAMGROUP	5,369127517	0,44	DELTA	4	8	4x1,5 mm2 THWN-2	16,77
M_TR1_ELV	C9	M#33	WESTINGHOUSE	7,382550336	0,44	DELTA	5,5	8,85	4x1,5 mm2 THWN-2	18,22
M_TR2_ELV	C9	M#34	SIEMENS	4,026845638	0,44	ESTRELLA	3	6,5	4x1,5 mm2 THWN-2	20,16
M_TR3_ELV	C9	M#35	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	6,49	4x1,5 mm2 THWN-2	22,7
M_TR4_ELV	C9	M#36	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	6,49	4x1,5 mm2 THWN-2	18,49
M_DOX1_DOX	C10	M#37	ABB	10	0,44	DELTA	7,45	13,3	3x25 mm2 THWN-2	23,23
M_DOX2_DOX	C10	M#38	ABB	10	0,44	DELTA	7,45	13,3	3x25 mm2 THWN-2	24,62
M_TR_DOX	C10	M#39	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	6,49	4x1,5 mm2 THWN-2	14,98
M_FED_DOX	C10	M#40	WEG	4,966442953	0,44	DELTA	3,7	6,49	4x1,5 mm2 THWN-2	17,56

Tabla 0. 5 Levantamiento de protecciones y variador de voltajes de los circuitos C1 a C5

NOMENCLATURA	CIRCUITOS	MOTORES	MARCA	HP	VOLTAJE (KV)	CONFIGURACION	CODIGO VARIADOR	MARCA2	ARRANQUE	CODIGO PROTECCION	MARCA3	AMPERIOS (A)
M_HAM_MO	C1	M#1	ABB	268,456376	0,44	DELTA	VFD_HAM_MO	SIEMENS	VARIADOR DE FRECUENCIA	CB_HAM_MO	SIEMENS	630
M_PUL_MO	C2	M#2	WEG	214,765101	0,44	DELTA	VFD_PUL_MO	ABB	VARIADOR DE FRECUENCIA	CB_PUL_MO	SCHENIDER	400
M_PUL1_MO	C3	M#3	WEG	24,8322148	0,44	DELTA	VFD_PUL1_MO	DANFOSS	VARIADOR DE FRECUENCIA	CB_PUL1_MO	SCHENIDER	50
M_MIX_MO	C4	M#4	WEG	57,1812081	0,44	DELTA	VFD_MIX_MO	WEG	VARIADOR DE FRECUENCIA	CB_MIX_MO	SIEMENS	80
M_FAM_MO	C5	M#5	BEIDE	73,8255034	0,44	DELTA	DOL_FAM_MO	SIEMENS	ARRANCADOR SUAVE	CB_FAM_MO	SIEMENS	125

Tabla 0. 6 Levantamiento de protecciones de los circuitos C6 a C10

NOMENCLATURA	CIRCUITOS	MOTORES	MARCA	HP	VOLTAJE (KV)	CONFIGURACION	CODIGO PROTECCION	MARCA2	ARRANQUE	AMPERIOS(A)
M_HAM1_MO	C6	M#6	WNM	2,95302013	0,44	ESTRELLA	GM_HAM1_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,1
M_HAM2_MO	C6	M#7	ROSSI	1,54362416	0,44	ESTRELLA	GM_HAM2_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_ZAR_MO	C6	M#8	BEIDE	2,95302013	0,44	ESTRELLA	GM_ZAR_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,3
M_ZAR1_MO	C6	M#9	WAMGROUP	1,15436242	0,44	ESTRELLA	GM_ZAR1_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_ZAR2_MO	C6	M#10	WAMGROUP	1,15436242	0,44	ESTRELLA	GM_ZAR2_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_ELEV_MO	C6	M#11	BEIDE	2,95302013	0,44	ESTRELLA	GM_ELEV_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,3
M_MAN_MO	C6	M#12	NORD	10,0671141	0,44	DELTA	GM_MAN_MO	SCHENIDER	ARRANQUE SUAVE	16
M_CLEAN_MO	C6	M#13	MARATHON	5,36912752	0,44	DELTA	GM_CLEAN_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,3
M_TR1_MO	C7	M#14	WEG	2,01342282	0,44	DELTA	GM_TR1_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	4,5
M_TR2_MO	C7	M#15	SEW	2,95302013	0,44	ESTRELLA	GM_TR2_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	5,5
M_TR3_MO	C7	M#16	LAI	2,01342282	0,44	ESTRELLA	GM_TR3_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	4,5
M_TR4_MO	C7	M#17	WEG	5,36912752	0,44	DELTA	GM_TR4_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_TR6_MO	C7	M#18	SNMA	10,0671141	0,44	ESTRELLA	GM_TR6_MO	SIEMENS	ARRANQUE SUAVE	20
M_TR5_MO	C7	M#19	WAMGROUP	1,15436242	0,44	ESTRELLA	GM_TR5_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_TR7_MO	C7	M#20	WAMGROUP	1,15436242	0,44	ESTRELLA	GM_TR7_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_TR8_MO	C7	M#21	THOMPSON	4,02684564	0,44	ESTRELLA	GM_TR8_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8
M_FIL1_MO	C8	M#22	BEIDE	2,95302013	0,44	ESTRELLA	GM_FIL1_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,3
M_FIL2_MO	C8	M#23	WEG	2,01342282	0,44	DELTA	GM_FIL2_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_FIL_MO	C8	M#24	THOMPSON	4,02684564	0,44	ESTRELLA	GM_FIL_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	6,3
M_AL1_MO	C8	M#25	ROSSI	1,54362416	0,44	ESTRELLA	GM_AL1_MO	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	3,2
M_DOX_1	C9	M#26	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_1	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_2	C9	M#27	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_2	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_3	C9	M#28	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_3	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_4	C9	M#29	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_4	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_5	C9	M#30	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_5	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_6	C9	M#31	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_6	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_DOX_7	C9	M#32	WAMGROUP	5,36912752	0,44	DELTA	GM_DOX_7	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_TR1_ELV	C9	M#33	WESTINGHOUSE	7,38255034	0,44	DELTA	GM_TR1_ELV	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	10
M_TR2_ELV	C9	M#34	SIEMENS	4,02684564	0,44	ESTRELLA	GM_TR2_ELV	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8
M_TR3_ELV	C9	M#35	WEG	4,96644295	0,44	DELTA	GM_TR3_ELV	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8
M_TR4_ELV	C9	M#36	WEG	4,96644295	0,44	DELTA	GM_TR4_ELV	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8
M_DOX1_DOX	C10	M#37	ABB	10	0,44	DELTA	CB_DOX1_DOX	SIEMENS	ARRANQUE SUAVE	16
M_DOX2_DOX	C10	M#38	ABB	10	0,44	DELTA	CB_DOX2_DOX	SIEMENS	ARRANQUE SUAVE	16
M_TR_DOX	C10	M#39	WEG	4,96644295	0,44	DELTA	GM_TR_DOX	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8
M_FED_DOX	C10	M#40	WEG	4,96644295	0,44	DELTA	GM_FED_DOX	SIEMENS	ARRANQUE DIRECTO	8

Tabla 0. 7 Armónicos Individuales de voltaje y THD V promedio de los 7 días antes del filtro.

ARMÓNICOS DE VOLTAJE INDIVIDUAL (%)					THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (V≤1 kV)	OBSERVACIÓN	THD total (%)	
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA			Voltaje (V)	THD (%)
0	0,03	0,07	0,03	0,03		CUMPLE	14,57	
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	440,00	
2	0,05	0,04	0,04	0,04		CUMPLE	0,19	
3	0,35	0,35	0,21	0,30		CUMPLE	1,34	
4	0,05	0,03	0,03	0,03		CUMPLE	0,15	
5	2,77	2,57	2,63	2,66		CUMPLE	11,69	
6	0,03	0,03	0,03	0,03		CUMPLE	0,13	
7	0,95	0,86	0,96	0,92		CUMPLE	4,06	
8	0,06	0,05	0,05	0,05		CUMPLE	0,22	
9	0,14	0,16	0,09	0,13		CUMPLE	0,58	
10	0,07	0,06	0,06	0,06		CUMPLE	0,28	
11	0,92	0,87	0,86	0,88		CUMPLE	3,87	
12	0,04	0,04	0,03	0,04		CUMPLE	0,17	
13	0,57	0,48	0,62	0,56		CUMPLE	2,46	
14	0,11	0,06	0,11	0,09		CUMPLE	0,41	
15	0,20	0,21	0,08	0,17		CUMPLE	0,73	
16	0,13	0,10	0,11	0,11		CUMPLE	0,49	
17	0,69	0,62	0,61	0,64		CUMPLE	2,82	
18	0,08	0,09	0,05	0,07		CUMPLE	0,33	
19	0,64	0,51	0,66	0,60		CUMPLE	2,64	
20	0,22	0,11	0,22	0,18		CUMPLE	0,80	
21	0,25	0,27	0,13	0,21		CUMPLE	0,94	
22	0,27	0,21	0,19	0,23		CUMPLE	0,99	
23	0,59	0,43	0,52	0,52		CUMPLE	2,27	
24	0,19	0,17	0,12	0,16		CUMPLE	0,71	
25	0,61	0,40	0,61	0,54	Limite del 5%	CUMPLE	2,37	3,791
26	0,54	0,25	0,25	0,35		CUMPLE	1,53	
27	0,37	0,39	0,18	0,31		CUMPLE	1,37	
28	0,59	0,35	0,54	0,49		CUMPLE	2,17	
29	0,67	0,67	0,68	0,67		CUMPLE	2,96	
30	0,25	0,31	0,19	0,25		CUMPLE	1,10	
31	0,72	0,89	0,94	0,85		CUMPLE	3,74	
32	0,56	0,35	0,57	0,50		CUMPLE	2,18	
33	0,38	0,32	0,22	0,31		CUMPLE	1,35	
34	0,45	0,38	0,43	0,42		CUMPLE	1,85	
35	0,71	0,75	0,78	0,75		CUMPLE	3,30	
36	0,17	0,20	0,15	0,17		CUMPLE	0,76	
37	0,53	0,60	0,61	0,58		CUMPLE	2,57	
38	0,34	0,23	0,42	0,33		CUMPLE	1,46	
39	0,23	0,22	0,17	0,21		CUMPLE	0,91	
40	0,25	0,27	0,24	0,26		CUMPLE	1,13	
41	0,35	0,22	0,22	0,26		CUMPLE	1,16	
42	0,14	0,13	0,12	0,13		CUMPLE	0,57	
43	0,28	0,26	0,22	0,25		CUMPLE	1,12	
44	0,24	0,13	0,29	0,22		CUMPLE	0,96	
45	0,17	0,19	0,09	0,15		CUMPLE	0,67	
46	0,19	0,20	0,16	0,18		CUMPLE	0,80	
47	0,17	0,17	0,25	0,20		CUMPLE	0,87	
48	0,13	0,10	0,09	0,10		CUMPLE	0,46	
49	0,18	0,22	0,15	0,18		CUMPLE	0,81	
50	0,17	0,09	0,21	0,16	CUMPLE	0,70		

Tabla 0. 8 Armónicos Individuales de corriente y THD I promedio de los 7 días antes del filtro.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)						THD total (%)		
ORDEN	L1-N MEDIA	L2-N MEDIA	L3-N MEDIA	TOTAL MEDIA	IEEE 519 (Isc/IL=20<50)	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	CUMPLE	0,00	19,452
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	656,10	
2	0,99	1,88	1,80	1,56		CUMPLE	10,22	
3	3,82	8,55	4,31	5,56		CUMPLE	36,48	
4	0,78	1,39	1,52	1,23		CUMPLE	8,08	
5	8,99	14,71	11,91	11,87	Limite del 7%	NO CUMPLE	77,87	
6	0,67	1,21	0,98	0,95		CUMPLE	6,25	
7	8,11	12,14	9,32	9,86		NO CUMPLE	64,68	
8	0,77	0,92	1,35	1,01		CUMPLE	6,66	
9	1,42	2,99	1,72	2,04		CUMPLE	13,41	
10	0,49	0,95	0,72	0,72		CUMPLE	4,72	
11	5,79	8,60	7,32	7,24		NO CUMPLE	47,47	
12	0,60	0,84	0,53	0,66		CUMPLE	4,32	
13	3,57	6,29	4,74	4,87	Limite del 3,5%	NO CUMPLE	31,94	
14	0,41	0,72	0,53	0,55		CUMPLE	3,64	
15	1,13	2,19	1,35	1,56		CUMPLE	10,20	
16	0,42	1,28	0,86	0,85		CUMPLE	5,60	
17	3,03	4,39	4,32	3,91		NO CUMPLE	25,68	
18	0,53	1,37	0,48	0,79		CUMPLE	5,21	
19	0,78	1,47	1,22	1,15		CUMPLE	7,58	
20	0,08	0,15	0,14	0,12	Limite del 2,5%	CUMPLE	0,82	
21	0,17	0,39	0,20	0,25		CUMPLE	1,66	
22	0,19	0,47	0,17	0,28		CUMPLE	1,83	
23	0,09	0,16	0,16	0,14		CUMPLE	0,90	
24	0,09	0,23	0,08	0,13		CUMPLE	0,85	
25	0,26	0,38	0,37	0,34		CUMPLE	2,22	
26	0,18	0,20	0,29	0,22		CUMPLE	1,45	
27	0,13	0,33	0,12	0,19		CUMPLE	1,27	
28	0,17	0,36	0,29	0,27		CUMPLE	1,78	
29	0,22	0,35	0,31	0,29		CUMPLE	1,91	
30	0,15	0,41	0,08	0,21		CUMPLE	1,41	
31	0,47	0,58	0,51	0,52		CUMPLE	3,42	
32	0,22	0,32	0,25	0,26		CUMPLE	1,71	
33	0,13	0,30	0,11	0,18		CUMPLE	1,19	
34	0,18	0,43	0,24	0,28		CUMPLE	1,86	
35	0,05	0,05	0,02	0,04		CUMPLE	0,28	
36	0,15	0,35	0,08	0,19	Limite del 1%	CUMPLE	1,26	
37	0,29	0,69	0,26	0,41		CUMPLE	2,71	
38	0,15	0,24	0,21	0,20		CUMPLE	1,30	
39	0,09	0,25	0,12	0,15		CUMPLE	1,00	
40	0,18	0,36	0,14	0,23		CUMPLE	1,50	
41	0,10	0,23	0,23	0,18		CUMPLE	1,21	
42	0,10	0,30	0,10	0,17		CUMPLE	1,09	
43	0,08	0,20	0,16	0,15		CUMPLE	0,97	
44	0,11	0,24	0,15	0,17		CUMPLE	1,09	
45	0,11	0,28	0,11	0,17		CUMPLE	1,10	
46	0,11	0,18	0,10	0,13		CUMPLE	0,85	
47	0,09	0,22	0,17	0,16		CUMPLE	1,03	
48	0,06	0,21	0,13	0,13		CUMPLE	0,87	
49	0,11	0,15	0,16	0,14		CUMPLE	0,90	
50	0,06	0,13	0,13	0,11		CUMPLE	0,70	

Tabla 0. 9 Armónicos Individuales de corriente y THD I promedio de los 7 días después del filtro.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)					THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (Isc/IL=20<50)	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA				
0	0,00	0,00	0,00	0,00	Limite del 7%	CUMPLE	0	6,99118
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	654,494823	
2	0,63	0,61	0,63	0,62		CUMPLE	4,08	
3	0,99	1,53	1,44	1,32		CUMPLE	8,64	
4	0,26	0,26	0,27	0,26		CUMPLE	1,72	
5	4,44	4,15	4,39	4,33		CUMPLE	28,31	
6	0,20	0,20	0,18	0,19		CUMPLE	1,27	
7	4,06	4,09	4,03	4,06		CUMPLE	26,56	
8	0,24	0,18	0,23	0,22		CUMPLE	1,42	
9	0,31	0,32	0,34	0,32		CUMPLE	2,12	
10	0,18	0,15	0,17	0,17	CUMPLE	1,09		
11	2,37	2,08	1,79	2,08	Limite del 3,5%	CUMPLE	13,62	
12	0,13	0,11	0,10	0,11		CUMPLE	0,74	
13	1,15	1,19	1,20	1,18		CUMPLE	7,70	
14	0,15	0,10	0,11	0,12		CUMPLE	0,80	
15	0,28	0,43	0,34	0,35		CUMPLE	2,28	
16	0,13	0,11	0,11	0,12		CUMPLE	0,76	
17	1,44	1,22	1,19	1,29	Limite del 2,5%	CUMPLE	8,42	
18	0,12	0,10	0,09	0,10		CUMPLE	0,68	
19	0,80	0,73	0,82	0,78		CUMPLE	5,13	
20	0,15	0,09	0,14	0,12		CUMPLE	0,81	
21	0,23	0,38	0,28	0,30		CUMPLE	1,95	
22	0,18	0,15	0,12	0,15	CUMPLE	0,98		
23	0,83	0,64	0,62	0,70	Limite del 1,0%	CUMPLE	4,55	
24	0,16	0,16	0,12	0,15		CUMPLE	0,96	
25	0,61	0,64	0,71	0,65		CUMPLE	4,27	
26	0,24	0,13	0,21	0,19		CUMPLE	1,24	
27	0,23	0,38	0,22	0,27		CUMPLE	1,80	
28	0,20	0,21	0,21	0,21		CUMPLE	1,36	
29	0,64	0,55	0,39	0,52		CUMPLE	3,42	
30	0,20	0,26	0,09	0,19		CUMPLE	1,21	
31	0,49	0,67	0,52	0,56		CUMPLE	3,65	
32	0,33	0,20	0,20	0,24		CUMPLE	1,60	
33	0,24	0,36	0,28	0,30	CUMPLE	1,93		
34	0,23	0,28	0,19	0,23	CUMPLE	1,52		
35	0,61	0,60	0,23	0,48	Limite del 0,5%	CUMPLE	3,14	
36	0,24	0,28	0,11	0,21		CUMPLE	1,37	
37	0,51	0,58	0,33	0,47		CUMPLE	3,09	
38	0,26	0,16	0,18	0,20		CUMPLE	1,32	
39	0,24	0,30	0,20	0,25		CUMPLE	1,62	
40	0,27	0,29	0,11	0,22		CUMPLE	1,47	
41	0,29	0,28	0,23	0,27		CUMPLE	1,74	
42	0,18	0,26	0,10	0,18		CUMPLE	1,19	
43	0,21	0,28	0,28	0,25		CUMPLE	1,65	
44	0,23	0,18	0,12	0,18		CUMPLE	1,15	
45	0,27	0,32	0,20	0,27		CUMPLE	1,74	
46	0,18	0,17	0,10	0,15		CUMPLE	0,98	
47	0,31	0,31	0,16	0,26		CUMPLE	1,70	
48	0,14	0,22	0,12	0,16		CUMPLE	1,04	
49	0,27	0,17	0,23	0,22		CUMPLE	1,47	
50	0,11	0,12	0,11	0,11	CUMPLE	0,72		

Tabla 0. 10 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral antes del filtro máxima demanda.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)						THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (Isc/IL=20<50)	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)	
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA					
0	0,00	0,00	0,00	0,00		CUMPLE	0	30,91	
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	179,4		
2	1,14	2,20	3,01	2,12		CUMPLE	3,79501635		
3	6,83	12,85	8,85	9,51	Limite del 7%	NO CUMPLE	17,0595025		
4	0,96	1,76	2,70	1,81		CUMPLE	3,24594221		
5	12,54	23,39	21,36	19,10		NO CUMPLE	34,2590379		
6	0,90	1,56	1,67	1,37		CUMPLE	2,46640658		
7	9,00	18,23	15,30	14,17		NO CUMPLE	25,4291475		
8	1,18	1,35	2,33	1,62		CUMPLE	2,90655565		
9	3,37	3,14	9,01	5,17		CUMPLE	9,27984138		
10	0,82	1,39	1,28	1,16		CUMPLE	2,08967559		
11	6,57	12,34	14,02	10,98		Limite del 3,5%	NO CUMPLE		19,6913271
12	0,80	1,13	1,09	1,01			CUMPLE		1,80967337
13	4,55	10,46	9,98	8,33	NO CUMPLE		14,9428638		
14	0,64	1,07	0,99	0,90	CUMPLE		1,61541837		
15	2,11	3,26	5,79	3,72	NO CUMPLE		6,66751147		
16	0,75	1,79	1,48	1,34	CUMPLE		2,40828388		
17	3,77	5,96	9,40	6,38	Limite del 2,5%	NO CUMPLE	11,4402994		
18	0,80	1,96	1,05	1,27		CUMPLE	2,27933638		
19	1,03	2,14	2,27	1,81		CUMPLE	3,25294586		
20	0,12	0,21	0,26	0,20		CUMPLE	0,3561731		
21	0,20	0,63	0,61	0,48		CUMPLE	0,85821207		
22	0,33	0,68	0,32	0,45		CUMPLE	0,80035361		
23	0,13	0,48	0,39	0,33	Limite del 1%	CUMPLE	0,60004169		
24	0,15	0,53	0,23	0,31		CUMPLE	0,54804524		
25	0,50	0,83	0,68	0,67		CUMPLE	1,20040396		
26	0,31	0,54	0,68	0,51		CUMPLE	0,91040598		
27	0,23	0,76	0,44	0,48		CUMPLE	0,85326728		
28	0,33	0,75	0,76	0,61		CUMPLE	1,09577336		
29	0,38	0,79	0,80	0,66		CUMPLE	1,17982245		
30	0,27	0,81	0,28	0,45		CUMPLE	0,81076452		
31	0,54	0,61	0,43	0,53		CUMPLE	0,94676361		
32	0,35	0,67	0,59	0,54		CUMPLE	0,96144046		
33	0,21	0,64	0,28	0,38		CUMPLE	0,67442031		
34	0,31	0,78	0,60	0,56		CUMPLE	1,00968678		
35	0,29	0,58	0,53	0,47		CUMPLE	0,84462589		
36	0,25	0,69	0,24	0,39		CUMPLE	0,7023817		
37	0,47	1,10	0,58	0,72		CUMPLE	1,28518253		
38	0,24	0,56	0,52	0,44		CUMPLE	0,78436413		
39	0,17	0,56	0,29	0,34		CUMPLE	0,60960079		
40	0,31	0,69	0,42	0,47		CUMPLE	0,84963104		
41	0,18	0,56	0,52	0,42		CUMPLE	0,75213258		
42	0,15	0,60	0,25	0,33		CUMPLE	0,60039012		
43	0,15	0,46	0,32	0,31		CUMPLE	0,55939104		
44	0,18	0,56	0,39	0,38		CUMPLE	0,67438061		
45	0,18	0,57	0,30	0,35		CUMPLE	0,62622706		
46	0,17	0,42	0,31	0,30		CUMPLE	0,54254055		
47	0,13	0,56	0,43	0,37		CUMPLE	0,66314389		
48	0,09	0,48	0,32	0,30		CUMPLE	0,53589423		
49	0,16	0,38	0,41	0,32		CUMPLE	0,57197802		
50	0,08	0,39	0,37	0,28		CUMPLE	0,50383396		

Tabla 0. 11 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral después del filtro máxima demanda.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)					THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (Isc/IL=20<5)	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA				
0	0,00	0,00	0,00	0,00	Limite del 7%	CUMPLE	0,0	4,15255
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	311,9	
2	0,65	0,64	0,61	0,63		CUMPLE	1,98	
3	1,05	2,09	2,00	1,72		CUMPLE	5,35	
4	0,28	0,26	0,26	0,27		CUMPLE	0,84	
5	4,61	4,58	4,91	4,70		CUMPLE	14,66	
6	0,20	0,20	0,18	0,19		CUMPLE	0,60	
7	5,53	5,51	5,64	5,56		CUMPLE	17,33	
8	0,22	0,19	0,20	0,20		CUMPLE	0,63	
9	0,39	0,37	0,38	0,38		CUMPLE	1,18	
10	0,16	0,14	0,14	0,15	CUMPLE	0,46		
11	3,50	3,06	2,52	3,03	Limite del 3,5%	CUMPLE	9,44	
12	0,12	0,11	0,09	0,11		CUMPLE	0,33	
13	1,45	1,40	1,50	1,45		CUMPLE	4,52	
14	0,13	0,10	0,11	0,11		CUMPLE	0,35	
15	0,33	0,54	0,43	0,43		CUMPLE	1,36	
16	0,10	0,09	0,09	0,09	CUMPLE	0,29		
17	1,98	1,75	1,50	1,74	Limite del 2,5%	CUMPLE	5,44	
18	0,09	0,09	0,07	0,08		CUMPLE	0,26	
19	1,15	0,99	1,18	1,11		CUMPLE	3,45	
20	0,11	0,07	0,10	0,10		CUMPLE	0,30	
21	0,24	0,47	0,37	0,36	CUMPLE	1,13		
22	0,13	0,11	0,11	0,12	CUMPLE	0,36		
23	1,16	0,94	0,72	0,94	Limite del 1,0%	CUMPLE	2,94	
24	0,10	0,11	0,08	0,10		CUMPLE	0,30	
25	0,80	0,79	0,98	0,86		CUMPLE	2,67	
26	0,15	0,08	0,15	0,13		CUMPLE	0,40	
27	0,18	0,35	0,27	0,27		CUMPLE	0,83	
28	0,15	0,13	0,14	0,14		CUMPLE	0,44	
29	0,77	0,74	0,45	0,66		CUMPLE	2,04	
30	0,11	0,13	0,07	0,10		CUMPLE	0,33	
31	0,53	0,62	0,59	0,58		CUMPLE	1,80	
32	0,22	0,11	0,16	0,16		CUMPLE	0,50	
33	0,18	0,28	0,31	0,26	CUMPLE	0,80		
34	0,14	0,17	0,15	0,16	CUMPLE	0,49		
35	0,52	0,50	0,17	0,40	CUMPLE	1,24		
36	0,14	0,14	0,08	0,12	Limite del 0,5%	CUMPLE	0,38	
37	0,45	0,38	0,33	0,39		CUMPLE	1,22	
38	0,17	0,10	0,15	0,14		CUMPLE	0,44	
39	0,18	0,22	0,19	0,20		CUMPLE	0,61	
40	0,16	0,16	0,07	0,13		CUMPLE	0,41	
41	0,31	0,27	0,23	0,27		CUMPLE	0,84	
42	0,12	0,14	0,08	0,11		CUMPLE	0,35	
43	0,21	0,29	0,33	0,28		CUMPLE	0,87	
44	0,16	0,11	0,09	0,12		CUMPLE	0,37	
45	0,20	0,22	0,23	0,22		CUMPLE	0,69	
46	0,13	0,12	0,08	0,11		CUMPLE	0,35	
47	0,36	0,29	0,15	0,27		CUMPLE	0,84	
48	0,09	0,13	0,09	0,10		CUMPLE	0,32	
49	0,26	0,17	0,27	0,23		CUMPLE	0,73	
50	0,08	0,09	0,08	0,08	CUMPLE	0,26		

Tabla 0. 12 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada laboral antes del filtro mínima demanda.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)					THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (Isc/IL=20<5	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA				
0	0,00	0,00	0,00	0,00		CUMPLE	0	42,56
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	179,4	
2	1,76	3,41	4,68	3,28		CUMPLE	8,39091349	
3	9,35	20,59	8,99	12,97		NO CUMPLE	16,1212178	
4	1,46	3,25	4,49	3,07		CUMPLE	8,05973274	
5	18,07	33,44	26,95	26,16	Limite del 7%	NO CUMPLE	48,3553926	
6	1,57	2,63	2,83	2,34		CUMPLE	5,07760409	
7	12,88	24,13	17,43	18,14		NO CUMPLE	31,2711723	
8	2,15	2,72	3,44	2,77		CUMPLE	6,164184	
9	2,90	6,63	5,50	5,01		CUMPLE	9,870588	
10	1,17	2,87	1,88	1,97		CUMPLE	3,37513981	
11	10,06	17,58	17,23	14,95		NO CUMPLE	30,9147087	
12	1,40	2,03	1,52	1,65		CUMPLE	2,7207053	
13	7,38	14,91	12,07	11,45	imite del 3,5%	NO CUMPLE	21,6576687	
14	0,96	1,74	1,36	1,36		CUMPLE	2,44576437	
15	2,58	4,93	3,70	3,73		NO CUMPLE	6,63312726	
16	1,12	3,68	2,43	2,41		CUMPLE	4,35566512	
17	5,54	9,17	10,92	8,54		NO CUMPLE	19,5885608	
18	1,34	3,94	1,54	2,27		CUMPLE	2,75466614	
19	1,47	3,31	2,97	2,58	imite del 2,5%	NO CUMPLE	5,33195992	
20	0,19	0,36	0,33	0,30		CUMPLE	0,5925874	
21	0,42	0,97	0,48	0,62		CUMPLE	0,86492495	
22	0,53	1,34	0,44	0,77		CUMPLE	0,78994409	
23	0,15	0,29	0,40	0,28		CUMPLE	0,71152543	
24	0,23	0,64	0,24	0,37		CUMPLE	0,42476079	
25	0,68	0,97	0,93	0,86		CUMPLE	1,66177803	
26	0,49	0,58	0,78	0,62		CUMPLE	1,40643759	
27	0,36	0,90	0,35	0,53		CUMPLE	0,62001474	
28	0,47	0,93	0,84	0,74		CUMPLE	1,50539964	
29	0,53	0,84	0,87	0,75		CUMPLE	1,55992055	
30	0,42	1,10	0,22	0,58		CUMPLE	0,39684114	
31	0,60	0,73	0,50	0,61		CUMPLE	0,89449674	
32	0,60	0,95	0,63	0,73		CUMPLE	1,12936889	
33	0,33	0,82	0,30	0,49		CUMPLE	0,5381249	
34	0,48	1,10	0,72	0,77		CUMPLE	1,28710739	
35	0,15	0,23	0,15	0,18		CUMPLE	0,27070208	
36	0,40	0,94	0,21	0,52	Limite del 1%	CUMPLE	0,37089073	
37	0,74	0,78	0,79	0,77		CUMPLE	1,42154891	
38	0,41	0,70	0,55	0,56		CUMPLE	0,99338369	
39	0,29	0,72	0,31	0,44		CUMPLE	0,55807585	
40	0,49	0,91	0,43	0,61		CUMPLE	0,76802392	
41	0,25	0,67	0,56	0,49		CUMPLE	0,99962514	
42	0,21	0,72	0,26	0,40		CUMPLE	0,46722435	
43	0,24	0,48	0,42	0,38		CUMPLE	0,75640881	
44	0,30	0,66	0,39	0,45		CUMPLE	0,70558437	
45	0,30	0,72	0,27	0,43		CUMPLE	0,49114713	
46	0,25	0,38	0,27	0,30		CUMPLE	0,47615263	
47	0,21	0,60	0,38	0,40		CUMPLE	0,68032652	
48	0,14	0,52	0,37	0,34		CUMPLE	0,65812264	
49	0,27	0,33	0,46	0,36		CUMPLE	0,82828563	
50	0,14	0,33	0,38	0,28		CUMPLE	0,67375965	

Tabla 0. 13 Armónicos Individuales de corriente y THD I de jornada de descanso antes del filtro mínima demanda.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE (%)					THD total (%)			
ORDEN	L1-N	L2-N	L3-N	TOTAL	IEEE 519 (Isc/IL=20<5	OBSERVACIÓN	CORRIENTES (A)	THD (%)
	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA				
0	0,00	0,00	0,00	0,00		CUMPLE	0	59,90
1	100,00	100,00	100,00	100,00		NO CUMPLE	4,16	
2	1,61	4,56	5,05	3,74		CUMPLE	0,15561819	
3	12,53	29,91	14,40	18,95		NO CUMPLE	0,7882237	
4	2,05	3,84	4,87	3,58		CUMPLE	0,14911915	
5	19,85	45,61	43,28	36,24	Limite del 7%	NO CUMPLE	1,50776841	
6	1,80	3,79	3,45	3,01		CUMPLE	0,12537874	
7	12,95	36,09	33,54	27,53		NO CUMPLE	1,14511704	
8	2,12	2,52	4,77	3,14		CUMPLE	0,13056959	
9	4,09	7,89	15,92	9,30		NO CUMPLE	0,38698496	
10	1,56	2,95	2,81	2,44		CUMPLE	0,10157863	
11	11,61	22,23	30,10	21,31		NO CUMPLE	0,88663419	
12	1,88	2,48	2,20	2,19		CUMPLE	0,09105681	
13	7,94	23,23	24,74	18,64	imite del 3,5%	NO CUMPLE	0,77532144	
14	1,21	2,52	2,12	1,95		CUMPLE	0,08117826	
15	3,36	9,66	9,89	7,64		NO CUMPLE	0,31773781	
16	1,22	3,87	3,33	2,81		CUMPLE	0,11670581	
17	5,61	8,08	17,03	10,24		NO CUMPLE	0,42598448	
18	1,93	1,76	2,07	1,92		CUMPLE	0,07986141	
19	2,01	5,18	5,28	4,16	imite del 2,5%	NO CUMPLE	0,17296327	
20	0,22	0,52	0,66	0,47		CUMPLE	0,01942354	
21	0,44	1,65	1,11	1,07		CUMPLE	0,04441994	
22	0,61	1,57	0,69	0,95		CUMPLE	0,03970913	
23	0,21	0,61	0,51	0,44		CUMPLE	0,01850715	
24	0,32	0,73	0,27	0,44		CUMPLE	0,01843804	
25	0,88	1,37	0,76	1,00		NO CUMPLE	0,04177993	
26	0,71	0,76	1,28	0,92		CUMPLE	0,03818312	
27	0,46	1,18	0,63	0,76		CUMPLE	0,03148316	
28	0,69	0,70	0,62	0,67		CUMPLE	0,02788347	
29	0,74	1,58	1,45	1,26		NO CUMPLE	0,05229086	
30	0,58	1,45	0,38	0,81		CUMPLE	0,03356744	
31	0,54	0,62	0,39	0,52		CUMPLE	0,02156893	
32	0,76	1,06	1,09	0,97		CUMPLE	0,04042576	
33	0,44	0,90	0,35	0,57		CUMPLE	0,02350443	
34	0,64	1,35	1,01	1,00		CUMPLE	0,04155739	
35	0,97	0,98	0,97	0,97		CUMPLE	0,04050015	
36	0,55	1,14	0,31	0,66	Limite del 1%	CUMPLE	0,0276458	
37	0,93	0,90	0,88	0,90		CUMPLE	0,03758261	
38	0,50	0,75	0,93	0,73		CUMPLE	0,03021759	
39	0,32	0,72	0,36	0,47		CUMPLE	0,0194505	
40	0,67	1,19	0,64	0,83		CUMPLE	0,03472469	
41	0,36	0,74	1,11	0,74		CUMPLE	0,03064081	
42	0,37	0,98	0,34	0,57		CUMPLE	0,02354314	
43	0,25	0,53	0,42	0,40		CUMPLE	0,01660981	
44	0,39	0,82	0,64	0,62		CUMPLE	0,0257465	
45	0,33	0,83	0,47	0,54		CUMPLE	0,02256068	
46	0,41	0,56	0,46	0,48		CUMPLE	0,01979784	
47	0,20	0,81	0,82	0,61		CUMPLE	0,02541433	
48	0,21	0,66	0,46	0,44		CUMPLE	0,01844426	
49	0,30	0,42	0,56	0,43		CUMPLE	0,01772805	
50	0,16	0,42	0,56	0,38		CUMPLE	0,01582726	

Tabla 0. 14 Máxima demanda 7 días antes del filtro

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	408 A	265.8 kW	88.9%	19.45 %
Excel	400 A	260.44 kW	88%	19.54%
Margen de Error (%)	2.17 %	1.90%	1.012%	0.46 %

Tabla 0. 15 Máxima demanda 7 días después del filtro

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	408 A	265.8 kW	88.9%	6.99 %
Excel	400 A	260.44 kW	88%	6.95%
Margen de Error (%)	2.17 %	1.90%	1.012%	0.57 %

Tabla 0. 16 Máxima demanda jornada laboral sin filtro

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	311A	204.9kW	87.5%	30.92%
Excel	311.90 A	205.56 kW	90%	30.91%
Margen de Error (%)	0.28%	0.32%	2.77%	0.03%

Tabla 0. 17 Máxima demanda jornada laboral con filtro

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	311A	204.9kW	87.5%	4.12%
Excel	311.90 A	205.56 kW	90%	4.15%
Margen de Error (%)	0.28%	0.32%	2.77%	0.72%

Tabla 0. 18 Mínima demanda jornada laboral.

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	1.2A	0.66kW	72%	42.56%
Excel	1.2 A	0.66 kW	72%	42.56%
Margen de Error (%)	0%	0%	0%	0%

Tabla 0. 19 Mínima demanda jornada de descanso.

ITEM	Corriente	Potencia Activa	FP	THD I
ETAP	1.1A	0.73kW	87%	59.91%
Excel	1.1 A	0.73 kW	87%	59.90%
Margen de Error (%)	%	%	%	0.01%

Tabla 0. 20 Factor de Utilización de cargas en simulación de ETAP

Motor	Factor de utilización
M#1	50%
M#2	30%
M#3	50%
M#4	30%
M#5	20%
M#6	30%
M#7	50%
M#8	50%
M#9	100%
M#10	50%
M#11	100%
M#12	100%
M#13	30%
M#14	50%
M#15	50%
M#16	50%
M#17	50%
M#18	50%
M#19	50%
M#20	50%
M#21	50%
M#22	100%
M#23	100%
M#24	100%
M#25	100%
M#26	30%
M#27	30%
M#28	10%
M#29	30%
M#30	10%
M#31	30%
M#32	10%
M#33	60%
M#34	50%
M#35	100%
M#36	30%
M#37	50%
M#38	50%
M#39	30%
M#40	30%

ANEXO B

A. Descripción y ubicación geográfica de la industria

La descripción de los procesos que realiza una industria es necesaria para tener una idea de los elementos eléctricos que interactúan dentro de cada uno de los procesos y los efectos eléctricos que ocurren el momento de ejecutarlos.

B. Acometida Principal

Este dato es entregado por la empresa distribuidora que proporciona energía a la región donde funciona la industria, en el caso de las ciudades principales estos datos son de fácil acceso ya que el sistema GIS de algunas empresas distribuidoras de energía tiene una base de datos de los equipos eléctricos instalados en su red eléctrica como: transformadores, seccionadores, alimentadores principales, alimentadores secundarios, etc. Debido a la posibilidad de acceder a la base de datos de las empresas distribuidoras de energía, se pueden obtener datos reales de los conductores usados en las redes eléctricas de toda la región, del tipo de red instalada, el calibre y tipo de conductor que es usado en las redes de distribución y la distancia real que recorre cada tramo de distribución.

Los datos necesarios de la acometida principal son:

- Tipo de red (Aéreo o Subterránea)
- Longitud de la red.
- Calibre y tipo de conductor.

La acometida principal empieza desde el transformador de distribución más cercano a la industria y termina en los bornes de alto voltaje del transformador que abastecerá la demanda de la industria.

C. Acometida Secundaria

La acometida secundaria comienza desde los bornes de bajo voltaje del transformador que abastecerá la demanda de la industria en cuestión, y termina en la entrada de los equipos utilizados para la energización o des energización de los equipos eléctricos de la industria, equipos utilizados para el control de motores (MCC).

- **Levantamiento de Cargas**

Para la elaboración del diagrama unifilar de la empresa AVIPAZ procedimos a organizar el levantamiento de cargas realizado con el personal de mantenimiento de la empresa en la cual en la tabla 7.2 del Anexo A tenemos los motores con su marca, potencia en kW, configuración, RPM, eficiencia, y su corriente nominal

- **Levantamiento de Conductores**

En la tabla 7.2 tenemos el levantamiento de conductores en cual tenemos en mm² de marca THWN2 y posteriormente para simulación se transformó sus valores de mm² a AWG para su colocación dentro de la simulación, además, de la longitud que tiene el conductor del tablero principal a su carga o motor.

- **Levantamiento de Variadores y Protecciones**

En las Tablas 7.5 y 7.6 del Anexo A se detalla la información correspondiente a los variadores de frecuencia y a los sistemas de protección asociados. Se incluye la marca comercial, el tipo de arranque y la corriente nominal de operación, información fundamental para la correcta configuración y dimensionamiento de estos equipos dentro del sistema eléctrico.

Es importante destacar que, de acuerdo con lo indicado por Carrión [25] la generación de armónicos de corriente está directamente relacionada con la operación de los variadores de frecuencia. Estos equipos, al controlar la velocidad de motores mediante la modulación de la señal de salida, introducen distorsiones no lineales en la forma de onda de corriente, lo que da lugar a la presencia de armónicos, especialmente de orden impar (5, 7, 11, etc.).

- **Modelación y Simulación**

Para llevar a cabo la simulación de un sistema industrial, es fundamental emplear un software comercial que facilite la introducción de datos y permita realizar de manera eficiente análisis de flujo de potencia, cortocircuitos, armónicos y simulaciones dinámicas, según los distintos escenarios definidos por el usuario.

ETAP 21.0.1 es una herramienta de simulación comercial que se destaca por su interfaz intuitiva y su amplia gama de módulos, los cuales permiten efectuar estudios de flujo armónico, análisis de cortocircuitos, flujo de potencia, evaluación de arco eléctrico, entre otros análisis eléctricos esenciales.

- Diseño de la Industria

Para el diseño del sistema eléctrico de la industria AVIPAZ, se dispone del diagrama unifilar presentado en el Anexo C, el cual permite visualizar la distribución de las cargas. En dicho diagrama se identifican claramente las cargas que operan mediante variadores de frecuencia y aquellas que utilizan arranque suave, además de detallarse la potencia activa asociada a cada motor y el tipo de conductor utilizado en su conexión.

D. Ingreso de Datos en ETAP 21

- Configuración de cargas

A partir del levantamiento de información previamente realizado, se procede a la configuración de las cargas en el software de simulación, tal como se muestra en la Figura 8.1. En esta interfaz se dispone del menú para ingresar los parámetros operativos de cada motor, incluyendo la potencia nominal, la velocidad en revoluciones por minuto (RPM), la eficiencia y el factor de servicio (SF), el cual ha sido considerado con un valor de 1.15, de acuerdo con las recomendaciones establecidas por Kundur en su obra sobre dinámica y control de sistemas de potencia.

Induction Machine Editor - M#1

Cable Amp Info	Protection Nameplate	Time Domain Imp	Reliability Load	Remarks Start Cat	Comment Cable/Vd
1	200 kW, 0.44 kV				Cable Info not available

Ratings

	FL 100 %	75 %	50 %	NL 0 %	OL 100 %
kW	200	86	87.3	83.25	0.49
kVA	244.8	FLA 321.2	% PF 86	% Eff 95	97.1, 97.53
Poles	2	RPM 3600	%FLA 100	72.29, 50.31	23.44
	% Slip 0.44	RPM 3584			SF 1.15

Library...

Loading

	Loading			Motor Load		Feeder Loss	
	Category	%	kW	kW	kvar	kW	kvar
1	Design	100	200	105.3	62.46	0	0
2	Normal	90	180	93.91	54.43	0	0
3	Brake	0	0	0.14	28.69	0	0
4	Winter Load	0	0	0.14	28.69	0	0
5	Summer Load	0	0	0.14	28.69	0	0
6	FL Reject	0	0	0.14	28.69	0	0
7	Emergency	0	0	0.14	28.69	0	0
8	Shutdown	0	0	0.14	28.69	0	0
9	Accident	0	0	0.14	28.69	0	0
10	Backup	0	0	0.14	28.69	0	0

Operating Load: 103.5 kW +j 61.42 kvar

M#1

Figura 0. 1 Configuración de Motores en ETAP

- Configuración de Conductor

Para la configuración de los conductores en el software de simulación, se utilizaron los datos obtenidos del levantamiento de información en campo. A partir de esta información, se realizó la conversión de las secciones de conductor de milímetros cuadrados (mm²) a su equivalente en el sistema American Wire Gauge (AWG), con el fin de seleccionar adecuadamente el tipo de conductor comercialmente disponible y compatible con la base de datos del software.

Se optó por utilizar conductores del tipo THWN-2, ya que es la referencia empleada en la instalación eléctrica de la industria AVIPAZ, cumpliendo con los requisitos de resistencia térmica, condiciones de humedad y facilidad de canalización en tuberías o bandejas. Este tipo de conductor es adecuado para ambientes industriales por su aislamiento de termoplástico resistente al calor y la humedad, además de permitir una temperatura de operación continua de hasta 90 °C en condiciones secas o húmedas.

Como se muestra en la Figura 8.2, se configuró la librería del software para trabajar con cables del tipo 4 conductores de cobre (4/C CU), ajustando los parámetros eléctricos y físicos de acuerdo con los valores levantados en sitio.

Ava	Phase		Ground/Neu		Duct Bank	Buried	Free Air	Conduit	
	Code	Size	#	Size	30°C 90°C	30°C 90	30°C 90	30°C 90	
1	Yes	14	14	0		25	25	35	25
2	Yes	12	12	0		30	30	40	30
3	Yes	10	10	0		40	40	55	40
4	Yes	8	8	0		55	55	80	55
5	Yes	6	6	0		75	75	105	75
6	Yes	4	4	0		95	95	140	95
7	Yes	3	3	0		110	110	165	110
8	Yes	2	2	0		130	130	190	130
9	Yes	1	1	0		150	150	220	150
1	Yes	1/0	1/0	0		170	170	260	170
1	Yes	2/0	2/0	0		195	195	300	195
1	Yes	3/0	3/0	0		225	225	350	225
1	Yes	4/0	4/0	0		260	260	405	260
1	Yes	250	250	0		290	290	455	290
1	Yes	300	300	0		320	320	505	320
1	Yes	350	350	0		350	350	570	350
1	Yes	400	400	0		380	380	615	380
1	Yes	500	500	0		430	430	700	430

Figura 0. 2 Librería de conductor THWN2.

Configuración del Transformador

Como se muestra en la Figura 8.3, el transformador principal del sistema presenta una tensión nominal de 13.8 kV en el lado de alta tensión y 440 V (0.44 kV) en el lado de baja tensión, cumpliendo la función de alimentar la red de distribución interna de la planta industrial a nivel de baja tensión. Este transformador tiene una potencia nominal de 500 kVA, y ha sido diseñado para operar bajo una temperatura ambiente de 30 °C y a una altitud de 9843 pies (aproximadamente 3000 metros sobre el nivel del mar).

El transformador cuenta con una configuración de conexión delta-estrella (Δ -Y), donde el lado de alta tensión está conectado en delta (Δ) y el lado de baja tensión en estrella (Y) con neutro accesible. Esta configuración es común en sistemas de distribución industrial, ya que permite el uso de protección contra desequilibrios, la conexión de cargas monofásicas y una mayor facilidad para la compensación de armónicos. Además, contribuye a la reducción de las corrientes de secuencia cero, mejorando la estabilidad del sistema ante fallas a tierra.

Cabe señalar que, debido a la altitud elevada, las condiciones dieléctricas y de enfriamiento del transformador pueden verse afectadas. La menor densidad del aire a esta altitud reduce la capacidad de disipación térmica, lo cual puede impactar negativamente en la capacidad de carga del equipo. Por ello, es necesario aplicar factores de corrección por altitud y temperatura, conforme a normas como IEEE C57.91 o IEC 60076, para garantizar una operación segura y eficiente del transformador.

En la Figura 8.4 se muestra la configuración de impedancias eléctricas del transformador, donde se define el porcentaje de impedancia ($Z\%$), parámetro clave para los estudios de cortocircuito, regulación de voltaje y análisis armónico. La correcta modelación de esta impedancia asegura que las simulaciones reflejen adecuadamente el comportamiento real del sistema eléctrico ante diferentes condiciones operativas.

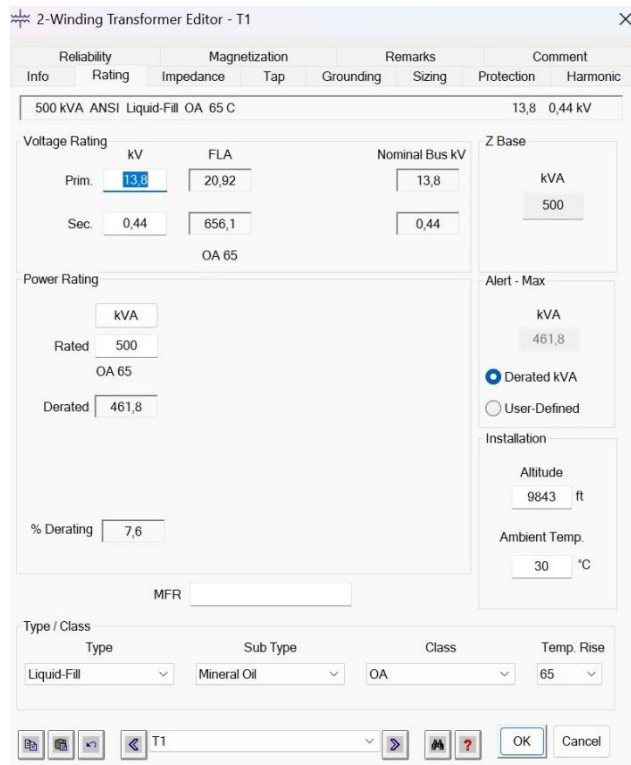


Figura 0. 3 Configuración del transformador en ETAP

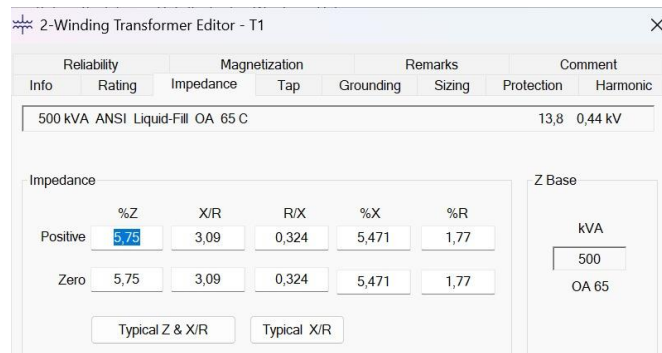


Figura 0. 4 Impedancias del transformador en ETAP

- Instalación de Cargas Armónicas

Como se muestra en la figura 0.5, se incorporaron en la simulación los valores medidos por el analizador de redes para reproducir el comportamiento armónico del sistema y evaluar cómo se reduce o aumenta el THD de corriente a medida que estos armónicos ingresan a la red. Además, contar con la medición individual de cada orden armónico permite analizar distintos escenarios operativos y comparar su impacto en la distorsión total.

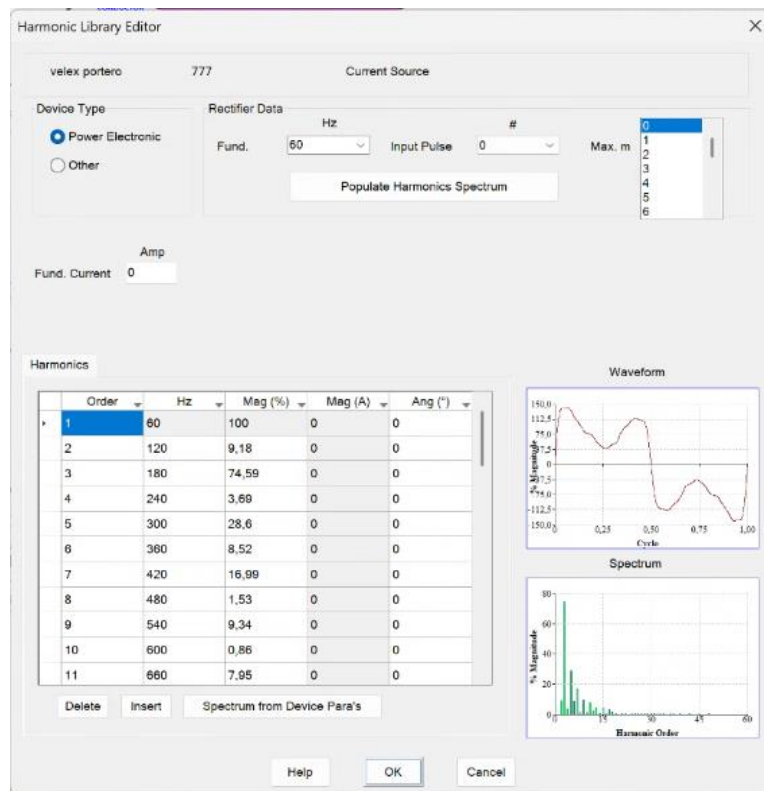


Figura 0. 5 Armónicos de corriente individuales en ETAP

E. Modelo de Filtro

Para simular un filtro activo el cual mitiga todos los armónicos presentes en la red vamos a tomar los 4 armónicos principales situados en las barras a tratar y vamos a instalar 4 filtros en la misma barra como se puede observar en la Figura 5.18 siendo cada filtro para mitigación de un armónico distinto, pero simulando un filtro activo el cual contrarresta todos los armónicos presentes en la red.

Los datos previos para obtener para configurar el filtro son:

- El armónico que corregir.
- La corriente del armónico (la cual se busca en el barrido armónico a la barra).
- El factor de potencia que se tiene en la barra (por medio de un flujo de carga).
- El factor de potencia deseado.
- La carga en MVA (la cual se obtiene con el flujo de carga y ese valor dividiéndole para tres).

Ejemplo calculo de filtro

Como ejemplo matemático se ocupará la barra "Bus 3" en los armónicos de estudio, con los datos antes mencionados la herramienta ETAP hace el proceso directo del filtro óptimo

para la mitigación del armónico, en esta barra el más alto es el numero 5 pero para tener una noción de los parámetros que calcula veremos el siguiente ejemplo y así hacer el filtro "HF5" de forma manual.

Donde:

X_{eff} : Reactancia efectiva

Q_{eff} : Potencia reactiva efectiva (Mvar)

$V_{LL\ sis}$: Voltaje nominal de ; línea a línea

X_c : Reactancia capacitiva

X_L : Reactancia inductiva

h : Numero de armonico

Datos:

$$S : 298.98[kVA]$$

$$fp : 0.889$$

Cálculos:

Potencia de dice Diseño

$$P = fp * S$$

$$P = 0.889 * 298.98[kVA]$$

$$P = 265.8 [kW]$$

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

$$Q = \sqrt{298.98^2 - 265.98^2}$$

$$Q = 136.90[kvar]$$

Se requiere incrementar el factor de potencia a un valor de 0.99

$$Q_c = P * \tan(\cos^{-1}(0.99))$$

$$Q_c = 265.8 * \tan(\cos^{-1}(0.99))$$

$$Q_c = 37.873 [kvar]$$

$$Q_{eff}: Q - Q_c$$

$$Q_{eff}: 136.90[kvar] - 37.873 [kvar]$$

$$Q_{eff}: 99.03[kvar]$$

$$X_{eff} = \frac{VLL - sist[KV]^2}{Q_{eff}[Kvar]}$$

$$X_{eff} = \frac{0.44^2}{0.9903}$$

$$X_{eff} = 0.1936 [\Omega]$$

$$X_c = \frac{(h * 0.97)^2}{(h * 0.97)^2 - 1} * X_{eff}$$

$$X_c = \frac{(5 * 0.97)^2}{(5 * 0.97)^2 - 1} * 0.1936$$

$$X_c = 0.2021 [\Omega]$$

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C}$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 0.1936}$$

$$C = 265.172[\mu F]$$

$$X_l = \frac{x_c}{(h * 0,97)^2}$$

$$X_l = \frac{0.2021}{(5 * 0,97)^2}$$

$$X_l = 0.008591 [\Omega]$$

$$L = \frac{0.008591}{2 * \pi * f}$$

$$L = \frac{0.008591}{2 * \pi * 60}$$

$$L = 0.002278[mH]$$

Filtro Utilizado en AVIPAZ

FILTRO ACTIVO AFQM

El filtro activo AFQM es un equipo de compensación y mitigación de armónicos de alto rendimiento, diseñado para operar en sistemas eléctricos industriales y comerciales. Su tecnología multinivel permite una elevada eficiencia energética y una capacidad de respuesta inmediata frente a perturbaciones en la red.

El equipo se encuentra disponible en configuraciones de 100 A, 200 A, 300 A y 400 A, con una potencia máxima que varía entre 69 kVA y 276 kVA para sistemas de 400 V, y entre 82.8 kVA y 331.2 kVA para sistemas de 480 V. Su eficiencia media supera el 97.2 %, garantizando un bajo consumo interno.

Este filtro está diseñado para sistemas de 3 hilos (3W) y 4 hilos (4W), operando en un rango de tensión de 208 a 480 V (fase-fase) y frecuencia de 50/60 Hz ± 6 %, soportando una distorsión armónica total de voltaje (THDv) de hasta 25 %.

Entre sus principales prestaciones técnicas se incluyen:

- Filtrado activo hasta el armónico 50 (equivalente a 2500 Hz), con selección de frecuencias específicas.
- Tiempo de respuesta inferior a 1 ms, permitiendo una acción prácticamente instantánea ante variaciones de carga.
- Compensación de potencia reactiva tanto inductiva como capacitiva.
- Equilibrado de fases y reducción de corriente en el neutro (en configuraciones de 4 hilos).
- Capacidad de funcionamiento en paralelo con hasta 100 unidades sincronizadas mediante comunicación por bus de fibra óptica, lo cual permite una ampliación modular del sistema.

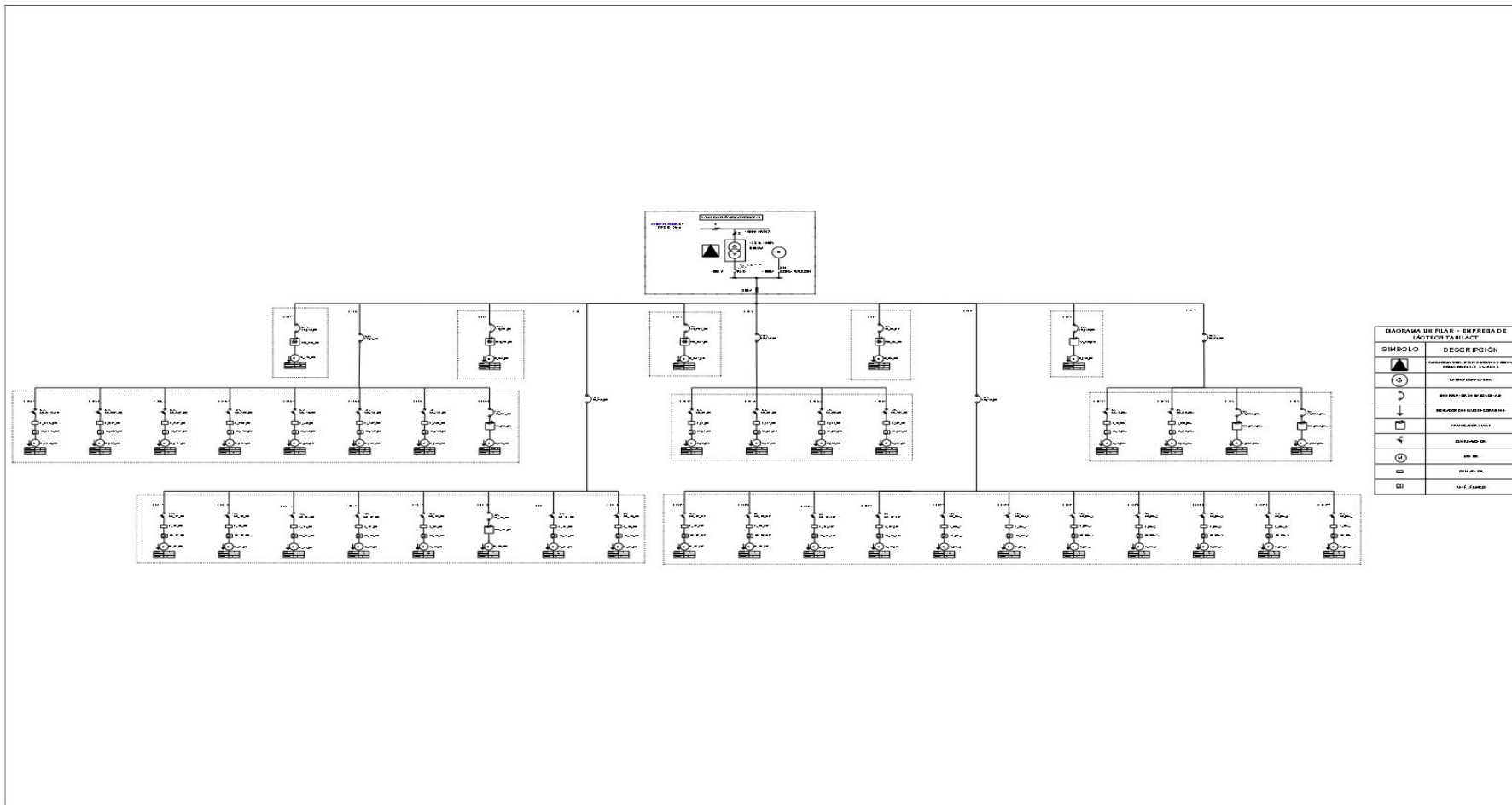
Para mayor detalle técnico, se recomienda consultar la Tabla 0.21, la cual recoge todas las especificaciones clave del equipo.

Tabla 0. 21 Características Técnicas del filtro activo AFQm

Características técnicas						
Características eléctricas	Tensión nominal	4 hilos (4W) 3P+N: 208...400 V fase-fase ± 10 % 3 hilos (3W) 3P: 208...480 V fase-fase ± 10 %				
	Frecuencia	50/60 Hz ± 5 %				
	THDv máximo	25%				
Potencia	Modelos	100 A	200 A	300 A	400 A	
	Potencia máxima	4W (400V) 3W (480V)	69000 VA 76300 VA	138000 VA 152600 VA	207000 VA 228900 VA	276000 VA 305200 VA
	Eficiencia media	>97,2%				
	Corriente máxima (fase)	100 A(rms) 200 A(rms) 300 A(rms) 400 A(rms)				
	Corriente máxima (neutro) sólo 4W	300 A(rms) 600 A(rms) 900 A(rms) 1200 A(rms)				
	Prestaciones	Filtrado	Filtrado 2-50 armónico, seleccionables Tiempo respuesta <0,1ms			
Compensación fases		Seleccionable				
Compensación potencia reactiva		Seleccionable, objetivo 0,7 inductivo ... 0,7 capacitivo				
Programación prioridades		Prioridad de filtrado o equilibrado / reactiva seleccionable				
Modelos		100 A	200 A	300 A	400 A	
Instalación en paralelo		<ul style="list-style-type: none"> Hasta 100 dispositivos/racks Conexión de TC al equipo maestro. Permite redundancia (funcionamiento del sistema en caso de fallo equipos). 				
Nivel de ruido		≤ 60 dBA	≤ 63 dBA	≤ 66 dBA	≤ 69 dBA	
Interfaz de usuario		Pantalla táctil a color 3,5" Servidor web y datalogger				
RS-485		Modbus RTU, 9600, 1, Sin paridad				
Ethernet		TCP/IP (Modbus TCP)				
Instalación	Categoría de la instalación	OVC III (300 V)				
	Grado de polución	2				
	Temperatura de trabajo	-10...+45 °C				
	Temperatura de almacenamiento	-20...+55 °C				
	Humedad relativa	0...95 % sin condensación				
	Altitud	3000m (2000 m sin reducción de capacidad)				
	Grado de protección	IP 20 (u otros grados de protección previa solicitud)				
Conexión	Red	Borne de anilla M8 Anchura máxima de la anilla 23 mm. Par de apriete 8-10 Nm				
	TC	Conector de 6 polos Sección transversal máxima del conductor 2,5 mm ² Borneo con fijación por recorte				
	RS485	Conector de 3 polos Sección transversal máxima del conductor 2,5 mm ² Par de apriete 0,5-0,6 Nm				
	Ethernet	RJ45				
	Normativa	IEC 62477-1:2012, IEC 55011:2011, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-4:2007, IEC 61439-1:2011				

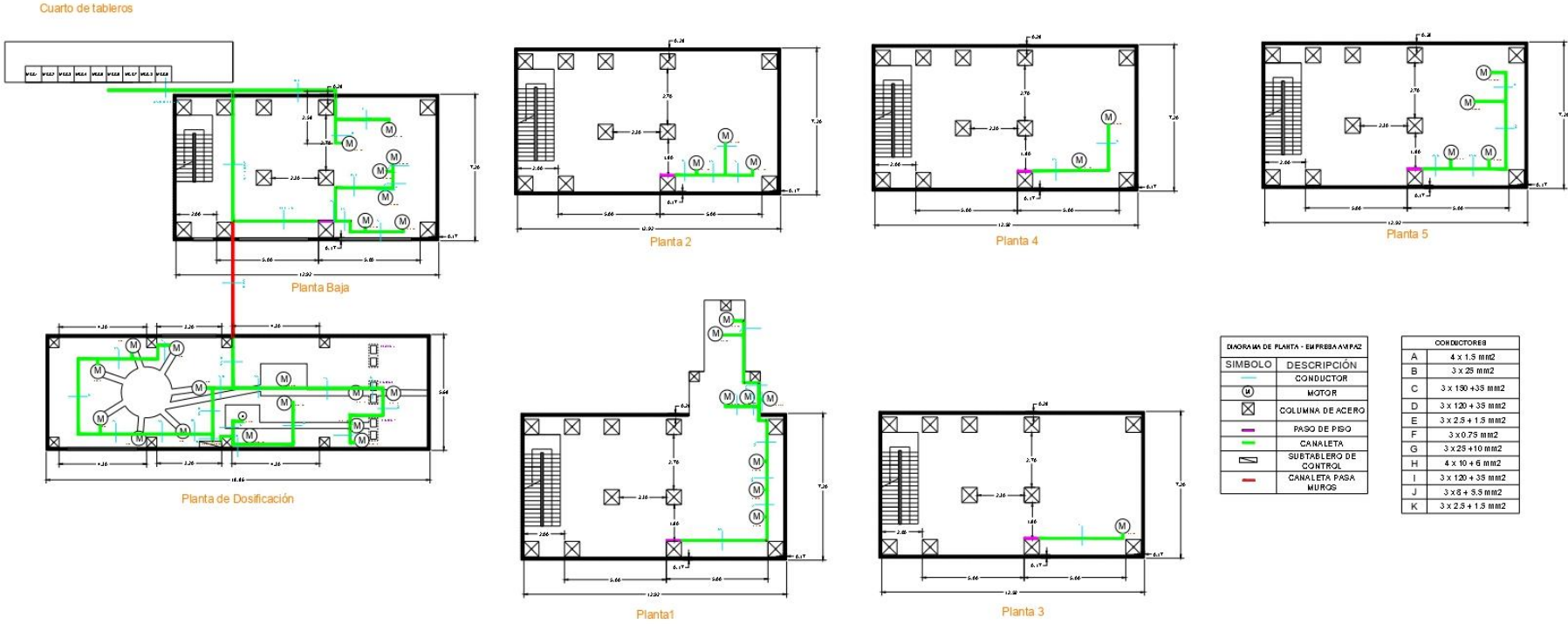
ANEXO C

Diagrama Unifilar de planta de Molienda AVIPAZ



ANEXO D

Diagrama de Planta de planta de Molienda y Dosificadora



ANEXO E

Diagrama de ubicación de FLUKE 435-II en planta de Molienda AVIPAZ

