



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

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES.**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Jácome Shigui Israel Vladimir

Salgado Guayracucha David Antonio

Tutor académico:

Ing. Vásquez Teneda Franklin Hernán Ms.C.

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2023



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Nosotros **JÁCOME SHIGUI ISRAEL VLADIMIR** y **SALGADO GUAYRACUCHA DAVID ANTONIO**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES**, siendo el Ing. Msc. Franklin Vásquez 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 mi exclusiva responsabilidad.

Jácome Shigui Israel Vladimir

C.C. 050320503-1

Salgado Guayracucha David Antonio

C.C. 050391842-7



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES”, de JÁCOME SHIGUI ISRAEL VLADIMIR y SALGADO GUAYRACUCHA DAVID ANTONIO, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto, 2023

El Tutor

Tutor de Titulación

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda

CC: 171043449-7



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 **JÁCOME SHIGUI ISRAEL VLADIMIR** y **SALGADO GUAYRACUCHA DAVID ANTONIO** con el título de Proyecto de Titulación “**EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGIA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, Agosto 2023

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)
Ing. Diego Jiménez
C.C. 050349370-2

Lector 2
Ing. Roberto Salazar
C.C. 050284761-9

Lector 3
Ing. Ángel León
C.C. 050204135-3



AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad técnica de Cotopaxi, a los docentes por sus enseñanzas y consejos, a mi querida madre Elisa por su apoyo incondicional, también mi esposa Alexandra por apoyarme en los momentos difíciles estando en los buenos y malos momentos gracias Amor, y por ultimo pero no menos importante a mi segunda madre María Teodolinda, muchas gracias querida familia.



DEDICATORIA

A Dios quien el cual ofrece sus enseñanzas a través de su palabra, a mi pilar fundamental Abuelito Fernando y a mis queridos hijos Fernanda e Israel.



ÍNDICE GENERAL

INFORMACIÓN GENERAL.....	1
INTRODUCCIÓN	2
1.1. EL PROBLEMA:.....	2
1.1.1. Situación problemática:	2
1.1.2. Formulación del problema.....	3
1.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
1.3. BENEFICIARIOS	3
1.3.1. Beneficiarios directos	3
1.3.2. Beneficiarios indirectos	3
1.4. JUSTIFICACIÓN	3
1.5. HIPÓTESIS	4
1.6. OBJETIVOS	4
1.6.1. General:	4
1.6.2. Especifico:	4
1.7. SISTEMA DE TAREAS	4
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
1.8. ANTECEDENTES	7
1.9. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	7
1.9.1. Problema E Importancia De Calidad De Energía Eléctrica.....	8
1.9.2. Características Y Aspectos Importantes De Calidad Energética.....	9
1.9.3. Nivel de tensión.....	10
1.9.4. Perturbaciones rápidas en la tensión.....	11
1.9.5. Mediciones y límites de perturbaciones rápidas de tensión.	13
1.9.6. Distorsión armónica de voltaje.....	13
1.9.7. Medida y límite en la distorsión armónica del voltaje	14
1.9.8. Desequilibrio de voltaje.....	15
1.9.9. Las medidas y límites del desequilibrio del voltaje.....	16
1.10. VARIACIONES DE VOLTAJE.....	16
1.10.1. Variaciones de voltaje de corta duración.....	16
1.10.2. Caídas de tensión (Sags).....	17
1.10.3. Aumento en el voltaje o corriente RMS (Swell).....	18
1.10.4. Desequilibrio de voltaje	19



1.11. TIPOS POTENCIAS	DE 20
1.11.1. Potencia activa (P)	20
1.11.2. Potencia reactiva (Q)	20
1.11.3. Potencia Aparente (S)	21
1.11.4. Factor de potencia (FP)	21
1.11.5. Sanción por bajo factor de potencia	22
1.12. TIPOS DE CARGAS	23
1.12.1. Cargas lineales	23
1.12.2. Cargas no lineales	24
1.12.3. Cargas con variabilidad rápida	24
1.12.4. Cargas con corrientes de pico	24
1.12.5. Cargas sensibles a la calidad de la energía	25
1.13. RESONANCIA	25
1.13.1. Frecuencia de resonancia	26
1.14. CORRIENTES DE FUGA	27
1.15. ARMÓNICOS	28
1.15.1. Orden de armónicos	30
1.16. NORMATIVA IEEE 519-2014	30
1.16.1. Distorsión armónica de corriente	31
1.17. FILTROS DE ARMÓNICOS	33
1.17.1. Filtros pasivos	34
1.17.2. Filtros activos	35
1.17.3. Filtros híbridos	36
METODOLOGÍA	37
1.18. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	37
1.18.1. Método inductivo - deductivo	37
1.18.2. Método analítico - Sintético	37
1.19. TIPOS DE INVESTIGACIÓN	38
1.19.1. Investigación Teórica	38
1.19.2. Investigación de campo	38
1.19.3. Investigación Cuantitativa	38
1.19.4. Investigación Descriptiva	38
1.20. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	38
1.20.1. Observación directa y participativa	38
1.20.2. Instrumentos de investigación	39



1.21.METODOLOGÍA UTILIZADA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS	39
1.21.1. Levantamiento de cargas y el diseño de diagramas unifilares	39
1.21.2. Obtención de parámetros eléctricos mediante el analizador de redes.....	39
1.21.3. Simulación del Sistema Eléctrico en ETAP 19.0.1.....	42
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
1.22. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	43
1.23. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL DE LA EMPRESA ..	43
1.24. LEVANTAMIENTO DE CARGAS EN LA EMPRESA “INDUPLAES”	44
1.24.1. Potencia Instalada	44
1.25. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES.....	45
1.25.1. Análisis de Nivel de Voltaje del TRAFIO	45
1.25.2. Análisis de corriente de Fase (Línea)	49
1.25.3. Demanda Eléctrica del Transformador 100kVA	51
1.25.4. Potencia Activa	52
1.25.5. Potencia Reactiva.....	54
1.25.6. Potencia Aparente	54
1.25.7. Análisis del Factor de Potencia.....	56
1.25.8. Distorsión armónica total de voltaje	56
1.25.9. Armónicos individuales de voltaje	57
1.25.10. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del transformador	59
1.25.11. TDD de corriente del transformador.....	60
1.25.12. Distorsión individual de corriente	62
1.25.12. SAG y SWELLS en el transformador.....	66
1.25.13. Estado actual del sistema eléctrico de la empresa “INDUPLAES”	67
1.26. SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN EL SOFTWARE ETAP	68
1.26.1. Procedimiento para la simulación.....	68
1.26.2. Primer caso de estudio	68
1.26.3. Propuesta para la mitigación de armónicos	71
1.26.4. Resultados de la simulación.....	73
1.27. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)..	75
1.27.1. Impacto Técnico	75
1.27.2. Factibilidad Económica	75
1.28. PROPUESTA PARA EL PROYECTO	75
1.29. AHORRO ENERGÉTICO DEL PROYECTO	76
1.29.1. Cálculo de las pérdidas del Transformador	76



	1.29.2.	
	Pérdidas Totales	76
1.29.3.	Cálculo de Energía.....	76
1.29.4.	Cálculo de pérdidas de Energía.	76
1.29.5.	Cálculo de costo por pérdidas.....	77
1.29.6.	Penalización por bajo factor de potencia	77
1.29.7.	Ahorro Económico.....	77
1.29.8.	Cálculo del TIR y VAN.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		79
1.30.	CONCLUSIONES	79
1.31.	RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA		81
ANEXOS.....		85
1.32.	ANEXO A: DIAGRAMA UNIFILAR	86
1.33.	ANEXO B: FLUJOS DE POTENCIA EN ETAP	87
1.34.	ANEXO C: ARMÓNICOS EN ETAP	88



ÍNDICE DE TABLAS



Tabla 3. 1. Nivel de Voltaje.....	10
Tabla 3. 2. Limites para de la distorsión armónica de voltaje.	15
Tabla 3. 3. Orden de armónicos.....	30
Tabla 3. 4. Limites según la normativa IEEE 519.	31
Tabla 3. 5. Límites de distorsión armónica de corriente.....	33
Tabla 5. 1. Características del transformador.....	44
Tabla 5. 2. Cargas conectadas al transformador de 100kVA.....	45
Tabla 5. 3. Niveles de voltaje fase-neutro: 127 V.	46
Tabla 5. 4. Variación de voltaje 127 V del transformador 100 kVA.....	46
Tabla 5. 5. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V.	47
Tabla 5. 6. Variación de voltaje 220 V del transformador 100 kVA.....	47
Tabla 5. 7. Nivel de voltaje Neutro.....	48
Tabla 5. 8. Desequilibrio de voltaje.....	49
Tabla 5. 9. Nivel de corriente fase-nutro del transformador 100 kVA.....	50
Tabla 5. 10. Desequilibrio de corriente en el transformador 100 kVA.	51
Tabla 5. 11. Demanda eléctrica del transformador.....	52
Tabla 5. 12. Potencia activa en as tres fases.	53
Tabla 5. 13. Niveles de potencias reactivas.....	54
Tabla 5. 14. Niveles de potencias aparentes.	55
Tabla 5. 15. Niveles del factor de potencia.....	56
Tabla 5. 16. Distorsión armónica total de voltaje.	57
Tabla 5. 17. Nivel de distorsión armónica individual de voltaje.....	58
Tabla 5. 18. Armónicos individuales de voltaje en el neutro.	59
Tabla 5. 19. Relación de la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu del transformador.	61
Tabla 5. 20. Distorsión total de la demanda (TDD).....	61
Tabla 5. 21. Distorsión individual de corriente.	62
Tabla 5. 22. Armónico total en el neutro.	63
Tabla 5. 23. Armónicos individuales de corriente en el neutro.....	64
Tabla 5. 24. Niveles de Flickers del transformador.....	65
Tabla 5. 25. Límites de la normativa.....	66



Tabla 5. 26. Nivel de SAGS.66 Tabla 5. 27. Límites de la normativa.	66
Tabla 5. 28. Nivel de SWELLS.	67
Tabla 5. 29. Estado actual del sistema eléctrico.	67



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1. Diseño de diagrama unifilar.	39
Figura 4. 2. Obtención de datos mediante el analizador de redes.	39
Figura 4. 3. Identificación del sitio para la instalación del analizador de redes.	40
Figura 4. 4. Analizador de redes FLUKE 435-II.....	41
Figura 4. 5. Conexión del equipo analizador.....	41
Figura 5. 1. Ubicación de la empresa “INDUPLAES”.....	43
Figura 5. 2 Sistema alimentado por el transformador de 100 kVA.....	44
Figura 5. 3. Nivel de Voltaje fase-neutro 127V del transformador 100 kVA.	47
Figura 5. 4. Nivel de Voltaje fase-fase 220V del transformador 100 kVA.	48
Figura 5. 5. Nivel de Voltaje en el Neutro.....	49
Figura 5. 6. Nivel de corrientes de fase del transformador de 100 kVA.	50
Figura 5. 7. Demanda de lunes a domingo del transformador de 100 kVA.	51
Figura 5. 8. Niveles de potencia activa trifásica.	53
Figura 5. 9. Niveles de potencia reactiva trifásica.....	54
Figura 5. 10. Niveles de potencias aparentes trifásicas.	55
Figura 5. 11. Nivel de factor de potencia.	56
Figura 5. 12. Nivel de THD de Voltaje.	57
Figura 5. 13. Armónicos individuales de voltaje.....	58
Figura 5. 14. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro.	59
Figura 5. 15. Nivel de la distorsión total de armónicos.....	61
Figura 5. 16. Porcentajes de armónicos de corriente individuales.	62
Figura 5. 17. Nivel de armónicos de corriente en el neutro.....	63
Figura 5. 18. Porcentaje de armónicos individuales de corriente en el neutro.	64



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES”

Autores: Jácome Shigui Israel Vladimir
Salgado Guayracucha David Antonio

RESUMEN

La calidad de energía de una empresa es importante para evitar daños parciales o permanentes en la maquinaria o equipos presentes en la Industria, esta calidad del sistema eléctrico se puede ver afectado por la presencia de cargas lineales y no lineales que producen perturbaciones que afectan el funcionamiento de los equipos y ocasionan pérdidas técnicas y económicas. En la presente Investigación se realiza el estudio de calidad energética de la Industria Induplaes, la cual presenta problemas energéticos en el transformador de 100 kVA, tales como la presencia de armónicos lo que genera un bajo factor de potencia en la industria, además los armónicos ocasionan el calentamiento de los equipos. Para identificar los problemas presentes en la industria se realiza una investigación de campo, donde se recopiló la información sobre la carga instalada, el tipo de conductores, protecciones, para el diseño del diagrama unifilar. Con el analizador de datos FLUKE 435 II para determinar el estado actual de los parámetros eléctricos como voltaje, corriente, factor de potencia, potencias, armónicos, etc.

Se realiza el análisis de las perturbaciones eléctricas y se efectuó una comparación con los límites establecidos por las normativas pertinentes, como el IEEE 519, IEEE 1159, ARCERNNR 002/20 y el pliego tarifario 025/2022. Utilizando los datos obtenidos, se realizó la simulación a través del software ETAP 19.0.1, lo que permitió identificar y caracterizar los problemas eléctricos que requerían corrección. En última instancia, se desarrollaron propuestas para abordar estas cuestiones, incluyendo el diseño de un filtro pasivo para atenuar armónicos y elevar el factor de potencia.

Palabras Clave: Perturbaciones, factor de potencia, armónicos, ETAP.



TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

TITLE: “ASSESSMENT OF THE ELECTRICITY QUALITY CRITERIA IN THE COMPANY INDUPLAES”.

Authors: Jácome Shigui Israel Vladimir

Salgado Guayracucha David Antonio

ABSTRACT

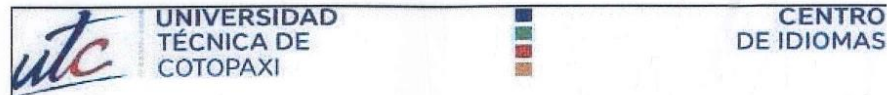
The power quality of a company is important to avoid partial or permanent damage to the machinery or equipment present in the industry, this quality of the electrical system can be affected by the presence of linear and non-linear loads that produce disturbances that affect the operation. equipment and cause technical and economic losses. In the present Investigation, the study of the energy quality of the Induplaes Industry is carried out, which presents energy problems in the 100 kVA transformer, such as the presence of harmonics, which generates a low power factor in the industry, in addition, the harmonics cause team warm up. To identify the problems, present in the industry, a field investigation is carried out, where information on the installed load, the type of conductors, protections, for the design of the single-line diagram, is collected. With the FLUKE 435 II data analyzer to determine the current status of electrical parameters such as voltage, current, power factor, powers, harmonics, etc.

The analysis of electrical disturbances is carried out and a comparison was made with the limits established by the relevant regulations, such as IEEE 519, IEEE 1159, ARCERNNR 002/20 and rate Sheet 025/2022. Using the data obtained, the simulation was carried out through the ETAP 19.0.1 software, which allowed the identification and characterization of electrical problems that required correction. Ultimately, proposals were developed to address these issues, including the design of a passive filter to attenuate harmonics and raise the power factor.

KEYWORDS: Disturbances, power factor, harmonics, ETAP.



AVAL DE TRADUCCIÓN



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELECTRICA EN LA EMPRESA INDUPLAES”** presentado por: **Jácome Shigui Israel Vladimir y Salgado Guayracucha David Antonio**, egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, agosto del 2023

Atentamente,



Escaneado electrónicamente por:
BLANCA GLADYS
SANCHEZ AVILA



MSc. Blanca Gladys Sánchez A.

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CI: 2100275375

INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Evaluación de los criterios de la calidad de energía eléctrica en la empresa Induplaes.

Fecha de inicio:

Abril 2023

Fecha de finalización:

Agosto 2023

Lugar de ejecución:

La empresa Induplaes, se ubica al sur de la ciudad de Latacunga, sector el Niágara al frente del complejo turístico San Andrés.

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

Carrera que auspicia:

Electricidad

Proyecto de investigación vinculado:

Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo:

Tutor: Ing. Franklin Vásquez MSc.

Estudiantes: Israel Jácome

 David Salgado

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:

Sublínea 2: Conversión y uso racional de la energía eléctrica

Grupos temáticos:

1. Eficiencia energética y desarrollo sostenible.
2. Calidad de Energía

INTRODUCCIÓN

1.1. EL PROBLEMA:

1.1.1. Situación problemática:

Hoy en día se ha producido un avance tecnológico en lo que respecta a la Industria de la elaboración de envases plásticos, donde involucra la utilización de equipos electrónicos, máquinas y herramientas de alta tecnología que producen la alteración de la onda sinusoidal de voltaje y de corriente lo que ocasiona perturbaciones en la red eléctrica que se pueden constatar en el consumo de energía eléctrica elevada, en las variaciones del factor de potencia, presencia de armónicos de voltaje y corriente en la red, calentamiento y deterioro de los conductores y las protecciones eléctricas, generando problemas en la producción de la Industria, en los costos elevados de las facturas eléctricas y las pérdidas económicas.

El término de Calidad de Energía es una temática de interés global que ha cobrado fuerza los últimos años, ya que se relaciona con las perturbaciones eléctricas que puede ocasionar efectos negativos en el suministro de energía eléctrica, lo que ocasiona el daño parcial o permanente de los equipos.

La Industria “Induplaes” es una industria que se enfoca en la elaboración de envases plásticos de Polietileno que se encuentran direccionados para diferentes usos y el mismo que cuenta de diferente maquinaria que ha ido evolucionando desde su creación en el año 2019, para la alimentación de las maquinarias existentes actualmente en la industria cuenta con un transformador de 100 kVA, el mismo que alimenta a un tablero general de distribución.

En la actualidad la Industria Induplaes se detectaron algunos problemas generales en el suministro de la red de energía lo que ocasionado consecuencias negativas en la empresa como paradas forzadas de los equipos que reduce su vida útil además de producir pérdidas en la producción, penalizaciones por parte de la empresa suministradora de electricidad por presentar un bajo factor de potencia y pérdidas económicas para la industria. Debido a las razones expuestas anteriormente, se recomienda realizar una Evaluación técnica de los criterios de la Calidad de Energía Eléctrica en la empresa Induplaes.

La presente Investigación se enfoca en el planteamiento de soluciones técnicas y económicamente viables ante los problemas identificados, para esto será necesario contemplar las normativas nacionales e internacionales como la IEEE 1159, IEEE – 519 y la ARCERNNR

– 002/20 para así con el cumplimiento de dichas regulaciones se pueda mejorar la eficiencia y calidad energética.

1.1.2. Formulación del problema

El inadecuado cumplimiento de los criterios de calidad de Energía Eléctrica en la empresa Induplaes, ocasiona la presencia de perturbaciones en el sistema eléctrico ocasionando pérdidas técnicas y económicas.

1.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

- El campo de acción para el proyecto: 330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.99 Eficiencia de la energía eléctrica.

1.3. BENEFICIARIOS

1.3.1. Beneficiarios directos

Los beneficiarios directos de la presente Investigación son los propietarios de la de la Industria “Induplaes”

1.3.2. Beneficiarios indirectos

Los beneficiarios indirectos son la Empresa Eléctrica de Cotopaxi y los clientes de la Industria.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Una mala calidad de energía eléctrica en una Industria puede ocasionar pérdidas económicas representativas, que puede ser ocasionado por los paros imprevistos de los equipos y por ende influye en el paro de producción. Una de las razones principales para realizar la presente Investigación, es realizar la evaluación del cumplimiento de los criterios de calidad de la energía eléctrica en la industria “INDUPLAES”, para constatar si los parámetros eléctricos de la industria cumplen con los rangos establecidas en las normativas nacionales e internacionales y lograr identificar las principales perturbaciones que están afectando la calidad de energía de la Industria.

Es importante tomar en consideración que en un circuito eléctrico industrial de corriente alterna que presentan perturbaciones tales como desequilibrio de voltaje y de corriente, bajo factor de potencia, presencia de armónicos de corriente y de voltaje, afectando a la eficiencia del sistema eléctrico, debido a esto es necesario conocer el estado actual de la industria y los problemas de calidad energética que presentan.

Al realizar la evaluación de los criterios de calidad de energía eléctrica, permitirá proponer alternativas de mejora mantener y asegurar un buen funcionamiento del sistema eléctrico de la

Industria, además de evitar daños en los equipos alargando su vida útil y produciendo un ahorro económico en la Industria. Es necesario mencionar que a través de esta evaluación se podrá beneficiar directamente la Industria Induplaes, debido a que con este estudio se puede mejorar la calidad del servicio eléctrico.

1.5. HIPÓTESIS

Mediante el análisis de Calidad de Energía en el Sistema Eléctrico de la industria Induplaes permitirá definir las perturbaciones más importantes que inciden en la industria y plantear las posibles soluciones a los problemas encontrados.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. General:

Evaluar los criterios de la calidad de energía eléctrica de la empresa Induplaes mediante el análisis de las mediciones realizadas para la identificación de perturbaciones más relevantes presentes en la industria y así plantear las posibles soluciones.

1.6.2. Especifico:

- Revisar el estado del arte referente a la calidad de energía aplicados a sistemas eléctricos industriales y las normativas establecidas para este respectivo estudio.
- Evaluar el estado actual del sistema eléctrico de la industria a través del análisis de los datos obtenidos por el analizador de carga y la simulación en el software ETAP para encontrar los problemas más representativos de Induplaes.
- Determinar las posibles soluciones para los problemas detectados mediante un análisis técnico – económico con el fin de cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales emitidas y así mejorar la calidad energética de la Industria.

1.7. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Revisar el estado del arte referente a la calidad de energía aplicados a	- Investigaciones bibliográficas referentes a los criterios de calidad de energía	- Base de datos referente a la Calidad de energía conformados por papers, documentos, normativas, etc.	Investigación bibliográfica: Libros Tesis Artículos Revistas

<p>sistemas eléctricos industriales y las normativas establecidas para este respectivo</p>	<p>- Validación de los fundamentos establecidos en las normas referente a calidad de energía.</p>		<p>Normativa IEEE 1159 Normativa IEEE Std. 519 Regulación ARCERNNR – 002/20</p>
<p>Evaluar el estado actual del sistema eléctrico de la industria a través del análisis de los datos obtenidos por el analizador de carga y la simulación en el software ETAP para encontrar los problemas más representativos de Induplaes.</p>	<p>- Análisis de la carga actual de la Industria Induplaes - Recopilación de datos y cálculos de los parámetros eléctricos de la Industria. - Análisis de los parámetros de calidad de energía obtenidos por el analizados de carga y comparar con las normativas nacionales e Internacionales.</p>	<p>- Identificar los problemas más relevantes de la Industria</p>	<p>- Simulación y corrida de flujos utilizando la herramienta digital ETAP - Mediciones con el analizador de carga FLUKER 435.</p>
<p>Determinar las posibles soluciones para los problemas detectados mediante un análisis técnico</p>	<p>- Verificación de las curvas tiempo corriente de los equipos de protección. - Coordinar los elementos de protección del sistema eléctrico Industrial.</p>	<p>- Encontrar las soluciones técnicas y económicas más viables para contrarrestar los problemas que afectan a la calidad de energía debido a la</p>	<p>Comparación de las posibles soluciones planteadas en base a las necesidades técnicas y económicas de la Industria.</p>

<p>– económico con el fin de cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales emitidas y así mejorar la calidad energética de la Industria.</p>	<p>- Determinación de los tiempos de actuación entre los dispositivos de protección empleados durante la coordinación.</p>	<p>contaminación armónica en la industria</p>	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------	--

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.8. ANTECEDENTES

En el año 2019 se constituye la empresa “INDUPLAES” en la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi - Ecuador, se enfoca en la producción de envases de plásticos de polietileno, especialmente en envases para el sector lácteo, los primeros meses las maquinarias con las que elaboraban sus productos era de baja potencia, durante el año 2021 se aumentó el nivel de las cargas debido al incremento de la demanda.

Desde el año 2019 no ha existido un estudio sobre la calidad de energía en el sistema eléctrico, por eso en el año 2023 se realiza este estudio “Evaluación de los criterios de la calidad de energía en la empresa INDUPLAES”. Con el objetivo de realizar un análisis de los criterios de la calidad de energía en la industria, para esto se realizó mediciones con el analizador de carga para determinar los problemas que presenta, como: bajo factor de potencia y presencia de armónicos. Además, se utilizó el software ETAP para determinar los problemas que presentan la industria y plantear alternativas, en esta Investigación se planteó la implementación de un filtro pasivo, el cambio de conductores eléctricos y el cambio de transformador.

1.9. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La calidad en la energía es el estado en la que se entrega la electricidad a usuarios. Una buena calidad de energía implica que la electricidad suministrada cumple con los estándares establecidos y es adecuada para su uso en equipos y dispositivos eléctricos sin causar problemas o daños.

Existen varios parámetros que se utilizan para evaluar la calidad de la energía eléctrica, como es el voltaje que suministra ya que debe mantenerse dentro de un rango aceptable, generalmente especificado por las normas y regulaciones locales. Alteraciones del voltaje pueden afectar la operación de los equipos [1].

La frecuencia de la electricidad suministrada también debe mantenerse estable y cualquier desviación significativa de esta frecuencia puede causar problemas en los equipos, las armónicas son componentes de frecuencia variada de la frecuencia fundamental de electricidad dada. La presencia de armónicos da paso a causar distorsiones en las ondas de voltaje y corriente, lo que puede afectar el rendimiento de los equipos y causar calentamiento excesivo.

Las fluctuaciones rápidas en el voltaje, como los picos y las caídas momentáneas de voltaje, pueden afectar el funcionamiento de los equipos sensibles. Estos eventos pueden ser causados por varias razones, como cambios repentinos en la carga o fallas en el sistema de suministro de energía, las interrupciones o cortes de energía pueden tener un impacto significativo en los equipos y en la continuidad de los procesos industriales o comerciales. La calidad de la energía implica minimizar la frecuencia y duración de estas interrupciones. Por último las perturbaciones transitorias son variaciones de corta duración en la forma de onda del voltaje o la corriente, como sobretensiones o sobrecorrientes breves. Pueden ser causadas por eventos como descargas atmosféricas o conmutación de cargas pesadas [1].

1.9.1. Problema E Importancia De Calidad De Energía Eléctrica

La calidad de la energía eléctrica es un tema de suma importancia debido a los problemas y las consecuencias que puede generar cuando no se cumple con los estándares adecuados. Algunos de los problemas asociados a una mala calidad de energía son los siguientes [2]:

- **Daños a equipos y dispositivos:** Las variaciones de voltaje, como picos y caídas de voltaje, así como los armónicos, pueden dañar los equipos eléctricos y electrónicos. Estos dispositivos están diseñados para operar dentro de ciertos rangos de voltaje y frecuencia, por lo que, si se exceden estos límites, pueden producirse fallas en los equipos, reducción de su vida útil e incluso pérdidas económicas significativas.
- **Interrupciones de servicio:** Los cortes de energía o las interrupciones momentáneas pueden ser muy problemáticos en muchos sectores, como la industria, los servicios de atención médica y los centros de datos. Estas interrupciones pueden ocasionar la paralización de la producción, la pérdida de datos, la interrupción de procedimientos médicos críticos y la pérdida de ingresos.
- **Inestabilidad de procesos industriales:** En los procesos industriales, el equilibrio y continuidad de suministro eléctrico son las bases. Fluctuaciones rápidas de voltaje o frecuencia pueden afectar el funcionamiento de las máquinas, causar paradas inesperadas y producir productos de baja calidad. Esto puede resultar en costos adicionales, rechazo de productos, retrabajo y retrasos en la producción [3].
- **Riesgos para la seguridad:** Una mala calidad de energía puede plantear peligro para la integridad de los individuos. Ejemplo, los elementos de protección y la seguridad pueden no funcionar correctamente si se ven afectados por problemas de calidad de energía, lo que podría comprometer la seguridad de los trabajadores en entornos industriales o la seguridad de las personas en instalaciones médicas.

- Problemas en sistemas de información y comunicaciones: La calidad de la energía eléctrica también puede afectar los sistemas de información y comunicaciones. Variaciones de voltaje y armónicos pueden causar errores en los sistemas informáticos, pérdida de datos y fallas en las comunicaciones, lo que puede tener un impacto significativo en las operaciones comerciales y los servicios de telecomunicaciones.

La calidad de energía eléctrica es objetivo para dar el funcionamiento adecuado y seguro de los equipos eléctricos y electrónicos, así como para mantener la continuidad de los procesos industriales y los servicios críticos. Una mala calidad de energía puede provocar daños en los equipos, interrupciones del servicio, problemas de seguridad y pérdidas económicas [3].

1.9.2. Características Y Aspectos Importantes De Calidad Energética

La calidad energética se refiere a la condición en la que se suministra y se utiliza la energía, ya sea eléctrica u otra forma de energía, de manera eficiente, confiable y segura, como es el voltaje y frecuencia estables la energía suministrada debe mantenerse dentro de los rangos de voltaje y frecuencia aceptables, el factor de potencia es un indicador de la eficiencia con la que se usa la energía eléctrica, los armónicos son componentes de frecuencia múltiple de la señal eléctrica fundamental, las interrupciones y variaciones de energía, como los cortes de energía y las fluctuaciones de voltaje, pueden tener un impacto significativo en los procesos y la continuidad del servicio, la calidad energética también se relaciona con la eficiencia en el uso de la energía, la protección contra sobretensiones y la correcta posición a tierra de equipos eléctricos. Hay normas y regulaciones claras que establecen los requisitos para la calidad energética, cumplir con estas normas es importante para garantizar un suministro seguro y confiable de energía [4]. La regulación (Regulación No. ARCERNNR - 002/20) en el Ecuador, es la que establece la regulación para el análisis de calidad y energía dentro del país, esta regulación menciona los indicadores, índices, límites válidos para el servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, dicha regulación se basa en normativas internacionales (IEEE, IEC).

La regulación No. ARCERNNR - 002/20 considera índices e indicadores para evaluar la calidad de servicio de energía eléctrica, como es la calidad de servicio comercial, calidad de servicio técnico y calidad de producto, el presente trabajo tomara como referencia la calidad de producto ya que esta estudia la forma de onda de voltaje obtenida por la distribuidora, enfocándose en los niveles de tensión, variación rápidas y desequilibrio de tensión, corriente y armónicos o perturbaciones [4].

1.9.3. Nivel de tensión

El nivel de tensión es un aspecto importante en la calidad de la energía eléctrica, ya que puede afectar el funcionamiento adecuado de los equipos y dispositivos eléctricos. Se refiere al valor eficaz del voltaje suministrado en un sistema eléctrico. Mantener el nivel de tensión dentro de los rangos especificados es esencial para garantizar el buen funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos [5]. Tensiones demasiado bajas pueden provocar un rendimiento deficiente de los equipos y una menor eficiencia energética, mientras que tensiones demasiado altas pueden sobrecargar y dañar los dispositivos conectados. Los límites de nivel de voltaje vienen establecidos en la Tabla.

Tabla 3. 1. Nivel de Voltaje

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

El nivel de voltaje en un punto del sistema de energía eléctrica se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100[\%] \quad (3.1)$$

Donde:

ΔV_k : Variación del voltaje en el punto K.

V_k : Voltaje de suministro en el punto K mediante el promedio de las medidas registradas al menos cada 3 segundos en un intervalo de 10 minutos.

V_N : Tensión nominal.

Medida y límites para los niveles de tensión.

Es importante que la medición y el control de los niveles de tensión se realicen en diferentes puntos del sistema eléctrico, desde la generación hasta los puntos de consumo, para garantizar una calidad de energía óptima y cumplir con las normas y reglas dictadas. Los operadores del sistema eléctrico, las compañías de distribución y los fabricantes de equipos eléctricos desempeñan un papel crucial en la implementación y mantenimiento de estos sistemas de medición y control para asegurar una calidad de energía confiable y segura [5].

Se describen algunos métodos comunes utilizados para medir y controlar los niveles de tensión:

- **Medición de tensión:** Se utilizan instrumentos de medición como voltímetros y medidores de energía para medir los niveles de tensión en los sistemas eléctricos. Estos instrumentos se conectan en paralelo al punto de medición y proporcionan la lectura del voltaje en tiempo real. La obtención del dato de tensión se realiza en diferentes puntos del sistema eléctrico, desde la generación hasta los puntos de consumo, para evaluar la calidad y el rendimiento de la energía suministrada [6].
- **Reguladores del voltaje:** Estos dispositivos son utilizados para mantener la tensión dentro de los límites especificados. Se utilizan en la distribución de energía para controlar y estabilizar el voltaje suministrado a los usuarios finales. Estos dispositivos ajustan automáticamente la relación de transformación en los transformadores para mantener la tensión en un rango óptimo.
- **Transformadores de distribución:** Se usan para ajustar y controlar los niveles de tensión en las redes de distribución eléctrica. Estos transformadores elevan o disminuyen la tensión de acuerdo con las necesidades específicas de las áreas de carga.
- **Sistemas de control de tensión:** Los sistemas de control de tensión monitorean continuamente los niveles de tensión y ajustan automáticamente los parámetros de regulación para mantener la tensión dentro de los límites deseados. Estos sistemas pueden incluir dispositivos de monitoreo y control basados en sensores, algoritmos de control y sistemas de comunicación para permitir una respuesta rápida y precisa a las variaciones de tensión [6].
- **Protección contra sobretensiones:** Para proteger los equipos y dispositivos sensibles contra sobretensiones transitorias, se utilizan dispositivos de protección contra sobretensiones, como varistores y supresores de sobretensión. Estos dispositivos desvían la energía de sobretensión hacia la tierra, evitando daños en los equipos y garantizando la calidad de la energía suministrada.

1.9.4. Perturbaciones rápidas en la tensión

Las perturbaciones rápidas de tensión son fluctuaciones transitorias de corta duración en el nivel de tensión eléctrica. Estas anomalías se pueden causar por diversas razones, como la conmutación de cargas pesadas, arranque o parada de motores, operación de dispositivos electrónicos de potencia, descargas atmosféricas, entre otros factores. Para mitigar los efectos de las perturbaciones rápidas de tensión en la calidad de la energía eléctrica, se utilizan dispositivos de protección como supresores de sobretensiones, filtros de línea, reguladores de tensión, estabilizadores, sistemas de almacenamiento de energía y sistemas de respaldo de

energía. Estos dispositivos ayudan a limitar los efectos de las perturbaciones rápidas de tensión y a mantener una calidad de energía adecuada para los equipos y dispositivos conectados [7]. El Índice de Severidad por Flicker de Corta Duración (Pst) es una medida utilizada para cuantificar la magnitud y la severidad de las fluctuaciones de voltaje que resultan en parpadeo o flicker en la iluminación. El Pst se halla desde las mediciones de voltaje tomadas a intervalos regulares durante un período de tiempo. El cálculo se realiza utilizando una fórmula específica definida por la norma IEC 61000-4-15. La fórmula tiene en cuenta la variabilidad y la frecuencia de las fluctuaciones de voltaje para determinar la severidad del flicker.

$$Pst = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (3.2)$$

Donde:

Pst: Índice de severidad de flicker de corta duración.

$P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$: Niveles de efecto "flicker".

El resultado del cálculo del Pst es un valor adimensional, que puede oscilar entre 0 y 1. Cuanto mayor sea el valor de Pst, mayor será la severidad del flicker. Un valor de Pst igual a 1 indica una severidad máxima del flicker.

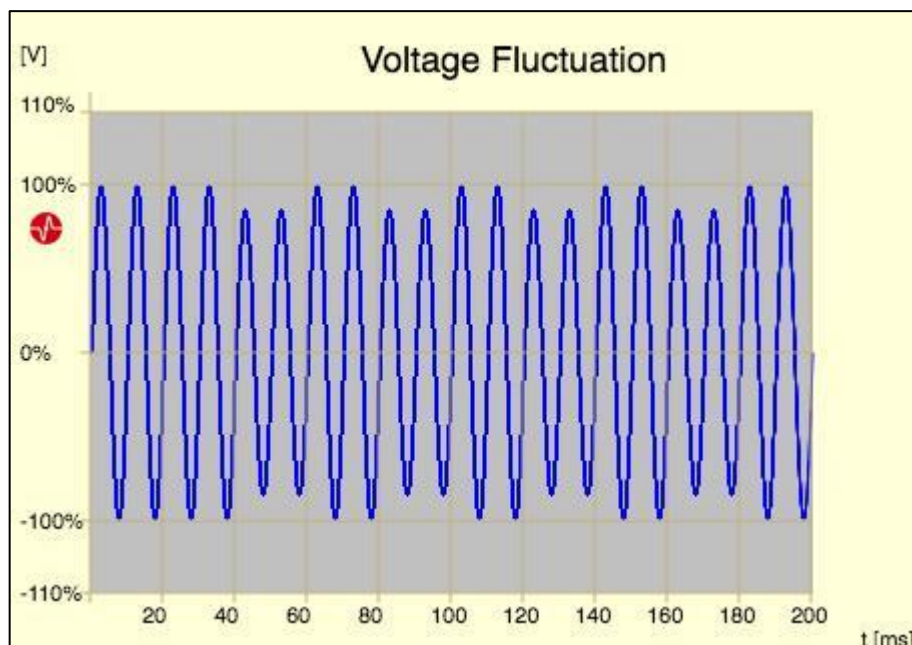


Figura 3. 1. Fluctuación de Voltaje [7].

1.9.5. Mediciones y límites de perturbaciones rápidas de tensión.

Las perturbaciones rápidas de tensión se utilizan como referencia para evaluar y comparar la calidad de la energía eléctrica en términos de flicker. Los límites aceptables varían según la aplicación y las normas y regulaciones locales. En general, un Pst por debajo de 0,8 se considera aceptable para la mayoría de las aplicaciones, mientras que valores superiores a 1 pueden ser incómodos o problemáticos para ciertas actividades, como la iluminación en áreas de trabajo o donde se requiere una alta precisión visual [7].

Es importante tener en cuenta que el flicker de corta duración puede ser causado por diversas fuentes, como cargas fluctuantes, equipos de conmutación, variaciones de carga en sistemas eléctricos, entre otros. La medición y el control del flicker son importantes para garantizar una calidad de iluminación adecuada y prevenir molestias o problemas relacionados con el rendimiento visual en entornos donde la iluminación es crítica.

1.9.6. Distorsión armónica de voltaje

La distorsión armónica de voltaje es una perturbación común en la calidad de la energía eléctrica que se produce debido a la presencia de componentes armónicos en la forma de onda del voltaje suministrado. Los armónicos son múltiplos totales de la frecuencia fundamental de la señal eléctrica dada.

Cuando hay distorsión armónica de voltaje, la forma de onda del voltaje se deforma y puede contener puntas y valles agregados en relación con la forma de onda sinusoidal. Esto puede causar problemas en los sistemas eléctricos y en los equipos conectados. Algunos efectos de la distorsión armónica de voltaje incluyen [8]:

- **Calentamiento excesivo:** Los armónicos pueden causar un aumento de la corriente en los equipos eléctricos y electrónicos, lo que puede provocar calentamiento excesivo en los conductores, transformadores y otros componentes.
- **Operación inestable:** La presencia de armónicos puede causar fluctuaciones y variaciones en el voltaje suministrado, lo que puede afectar el funcionamiento correcto de equipos sensibles.
- **Resonancia y amplificación de armónicos:** En algunos casos, los armónicos pueden interactuar con las características de la red eléctrica y provocar resonancias, lo que puede amplificar aún más la distorsión armónica y causar problemas adicionales en el sistema eléctrico.

La regulación No. ARCERNNR - 002/20 evalúa la distorsión armónica individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje con las siguientes formulas:

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (3.3)$$

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} * 100[\%] \quad (3.4)$$

$$THD_k = \left[\frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,i})^2} \right] * 100[\%] \quad (3.5)$$

Donde:

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

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

$DV_{h,k}$: Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h en el intervalo k de 10 minutos.

THD_k : Factor de distorsión armónica total de voltaje.

$V_{h,1}$: Valor eficaz de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

1.9.7. Medida y límite en la distorsión armónica del voltaje

Para evaluar la distorsión armónica de voltaje, se utilizan analizadores de calidad de energía que pueden medir y analizar la forma de onda del voltaje en busca de componentes armónicos. Estos analizadores proporcionan información sobre los niveles de distorsión armónica y otros parámetros relacionados.

Para mitigar los efectos de la distorsión armónica de voltaje, se utilizan filtros de armónicos, transformadores especiales y otros dispositivos de mitigación. Estos dispositivos ayudan a reducir los armónicos no deseados y mantener la calidad de la energía eléctrica internamente entre los bordes establecidos por las normas y regulaciones hechas.

Es importante destacar que los límites y las especificaciones para la distorsión armónica de voltaje están definidos por normas y regulaciones específicas en cada país o región. Las normas

internacionales, como la IEC 61000-2-2 y la IEC 61000-4-7, proporcionan directrices sobre mediciones y límites para la distorsión armónica de voltaje [8].

Tabla 3. 2. Límites para de la distorsión armónica de voltaje.

Niveles de voltaje	Factor de Distorsión Armónica Individual (%)	THD (%)
Alto Voltaje (Grupo 2)	5.0	8.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	3.0	5.0
Medio Voltaje	1.5	2.5
Bajo Voltaje	1.0	1.5

1.9.8. Desequilibrio de voltaje

El desequilibrio de voltaje es una condición en la que las magnitudes de las tensiones de fase en un sistema eléctrico trifásico no son iguales. En un sistema eléctrico equilibrado, las tensiones de fase deben ser iguales en magnitud y estar retrasados 120 grados entre ellas.

El desequilibrio de voltaje puede ocurrir debido a varias razones, como desequilibrio de carga entre las fases, problemas en los transformadores de distribución, conexiones sueltas o deterioro en los conductores, entre otros. Algunos efectos del desequilibrio de voltaje en la calidad de la energía eléctrica incluyen [9]:

- **Desgaste desigual de los equipos:** El desequilibrio de voltaje puede causar una distribución desigual de la potencia entre las fases.
- **Pérdida de eficiencia:** En presencia de desequilibrio de voltaje, los equipos pueden funcionar a una menor eficiencia energética.
- **Sobrecarga y subcarga:** El desequilibrio de voltaje puede provocar que algunas fases estén sobrecargadas, mientras que otras están subcargadas.
- **Inestabilidad del sistema:** El desequilibrio de voltaje puede afectar el equilibrio del sistema eléctrico en su totalidad. Puede provocar oscilaciones de voltaje, pérdida de sincronización en generadores y problemas en los sistemas de protección y control. Esto puede resultar en fallas del sistema y apagones.

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| * 100[\%] \quad (3.6)$$

Donde:

$-V$: Componente de secuencia negativa de voltaje.

$+V$: Componente de secuencia positiva de voltaje.

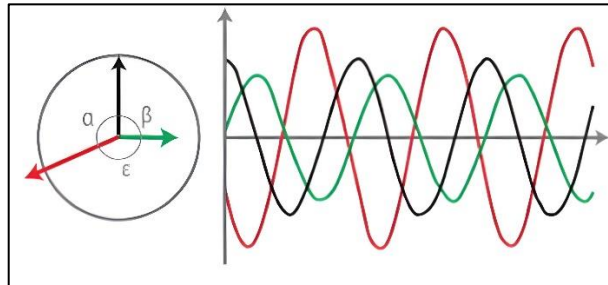


Figura 3. 2. Sistema trifásico desequilibrado [9].

1.9.9. Las medidas y límites del desequilibrio del voltaje

En la medición del desequilibrio de voltaje, se usan analizadores de calidad de la energía que miden las tensiones de fase y calculan los valores de desequilibrio, como el factor de desequilibrio de voltaje y el factor de desequilibrio de carga. Es importante mantener un equilibrio adecuado de las tensiones de fase en un sistema eléctrico trifásico para garantizar el rendimiento óptimo de los equipos y la estabilidad del sistema [9].

La mitigación del desequilibrio de voltaje implica identificar y corregir las causas subyacentes, como el equilibrio de carga, el mantenimiento de los transformadores y la revisión de las conexiones eléctricas. Además, el uso de reguladores de voltaje y transformadores con tap de regulación puede ayudar a compensar las alteraciones en las tensiones de las fases.

1.10. VARIACIONES DE VOLTAJE

1.10.1. Variaciones de voltaje de corta duración

Las variantes del voltaje de corto tiempo, también conocidas como las fluctuaciones momentáneas de voltaje, son perturbaciones transitorias en la tensión eléctrica que ocurren durante un breve período de tiempo. Estas variaciones pueden ser tanto aumentos (sobretensiones) como disminuciones (caídas de tensión) rápidas y breves en el nivel de voltaje. Las fallas en el sistema eléctrico pueden dar lugar a una variedad de problemas, como Sags (caídas de tensión), Swells (aumentos de tensión) e interrupciones [10].

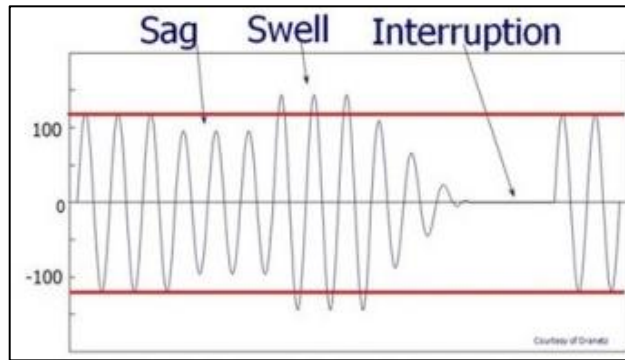


Figura 3. 3. Variaciones de Voltaje RMS [1].

1.10.2. Caídas de tensión (Sags)

Los Sags son breves disminuciones en la tensión eléctrica por debajo de los niveles normales y pueden ocurrir debido a diversas razones, como arranques de motores pesados, conmutación de cargas, fallas momentáneas o variaciones en la red eléctrica. Los Sags pueden afectar el funcionamiento de los equipos sensibles, como computadoras, sistemas de control, equipos médicos y maquinaria industrial, causando reinicios, pérdida de datos o interrupciones en los procesos [11].

Los Sags generalmente se definen como eventos en los que el voltaje es inferior al 90% del valor nominal. Además, la duración típica de un SAG puede variar desde tan corto como 10 milisegundos hasta 1 minuto. Es importante tomar en consideración de que esta duración puede diferir según los estándares y las especificaciones locales.

Además, es común que los Sags de voltaje sean eventos de corta duración, con muchos de ellos con una duración inferior a 1 segundo. Durante estos Sags, el voltaje residual, es decir, el voltaje que permanece durante el evento, puede ser superior al 40% del valor nominal. Estos valores proporcionan un criterio para la evaluación de la severidad del SAG.

La información proporcionada sobre la duración y el voltaje residual en los Sags de voltaje es útil para comprender mejor cómo pueden afectar a los equipos y sistemas eléctricos conectados. Los equipos sensibles pueden experimentar problemas de rendimiento, reinicios o incluso daños cuando se ven expuestos a Sags de voltaje severos y prolongados [10].

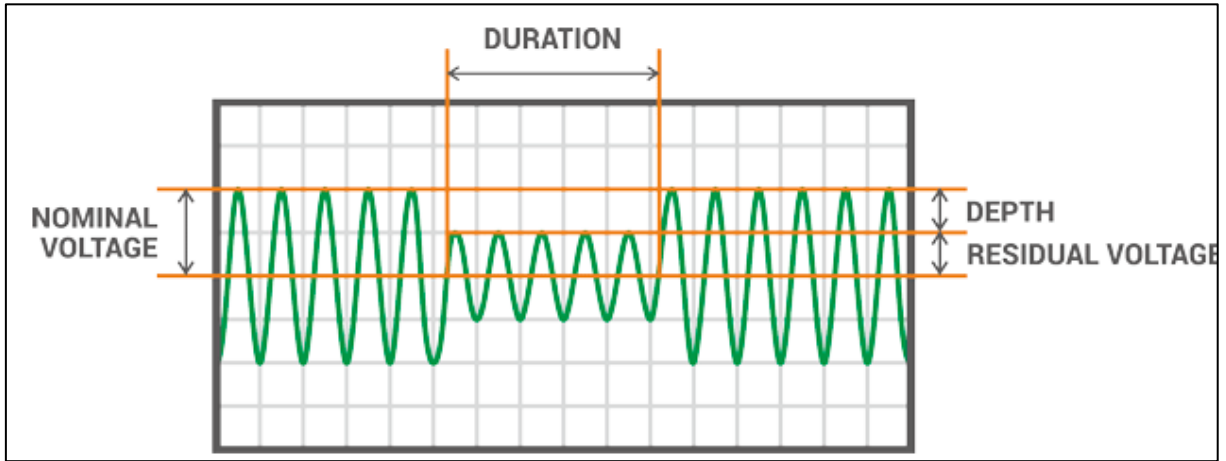


Figura 3. 4. Huecos de tensión [1].

1.10.3. Aumento en el voltaje o corriente RMS (Swell)

Los Swells son incrementos temporales de la tensión eléctrica por encima de los niveles normales. Pueden ocurrir debido a la desconexión de cargas pesadas o debido a la operación de dispositivos electrónicos de potencia. Los Swells pueden afectar a los equipos electrónicos delicados, como computadoras, sistemas de comunicación y equipos de audio/video, y acortar su vida útil [12].

El swell es un aumento del voltaje o corriente RMS a la frecuencia de la potencia durante un período que va desde 0,5 ciclos hasta 1 minuto. Las magnitudes típicas de un Swell se encuentran entre 1,1 y 1,8 p.u, donde 1,0 p.u. representa el valor nominal de tensión o corriente. Además, el voltaje restante, también conocido como voltaje residual, es un parámetro importante para describir la magnitud de un Swell. El voltaje residual se refiere al valor del voltaje que se mantiene durante el evento de Swell y se describe como mayor que 1,0, lo que indica que el voltaje ha experimentado un aumento referente al valor nominal [10].

Para mitigar los efectos de los Swells, se pueden tomar las siguientes medidas:

- Utilizar reguladores de voltaje o dispositivos de estabilización para mantener la tensión en niveles constantes y prevenir los Swells.
- Implementar sistemas de protección contra sobretensiones para limitar la magnitud de los Swells y proteger los equipos sensibles.
- Realizar un análisis y evaluación de la carga para asegurar una distribución equilibrada de la carga y evitar situaciones de sobrecarga.
- Implementar prácticas de diseño y mantenimiento adecuadas para garantizar una infraestructura eléctrica resistente y confiable.

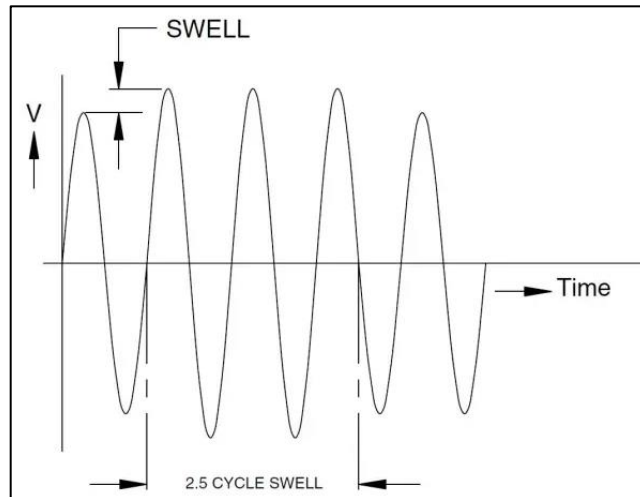


Figura 3. 5. Incremento de Voltaje [10].

1.10.4. Desequilibrio de voltaje

El desequilibrio de voltaje se refiere a una condición en la cual las magnitudes de las tensiones de fase en un sistema eléctrico trifásico no son iguales. En un sistema eléctrico equilibrado, las tensiones de fase deben ser iguales en magnitud y estar retrasados 120 grados entre ellas. El desequilibrio de voltaje puede ocurrir debido a varias razones, incluyendo:

- **Desequilibrio de carga:** Si las cargas están distribuidas de manera desigual entre las fases, puede haber un desequilibrio de voltaje. Esto puede ser causado por una conexión desigual de equipos o una carga desequilibrada en diferentes fases.
- **Variaciones en la impedancia de línea:** Las diferencias en la impedancia de las líneas de alimentación o en los transformadores pueden resultar en desequilibrio de voltaje. Esto puede ser causado por cables o conductores desgastados, conexiones flojas o problemas en los equipos de distribución eléctrica [11].
- **Problemas en los transformadores:** Si hay problemas en los transformadores, como desequilibrios en las conexiones, fallas en las bobinas o desgaste de los devanados, puede haber desequilibrio de voltaje en el sistema.

El desequilibrio de voltaje severo, que puede resultar de condiciones de fase única. En tales casos, cuando una fase tiene un voltaje significativamente diferente a las demás, se produce un desequilibrio de voltaje severo. Esto puede tener efectos adversos en los equipos y dispositivos conectados, ya que las cargas se ven afectadas de manera desproporcionada. La norma internacional IEEE Std 1159, que proporciona directrices para la calidad de la energía eléctrica, se establece un rango de desequilibrio de voltajes en estado estable entre 0.5% y 2%. Esto

significa que un desequilibrio de voltaje dentro de este rango se considera aceptable en condiciones normales de operación [13].

$$\text{Desequilibrio voltaje} = \frac{V_{max} - V_{med}}{V_{med}} * 100\% \quad (3.7)$$

1.11. TIPOS DE POTENCIAS

En términos de calidad de la energía eléctrica, es importante mantener un buen equilibrio entre la potencia activa y reactiva y un factor de potencia adecuado para garantizar una eficiencia energética óptima y un funcionamiento confiable del sistema eléctrico. El desequilibrio en estas potencias puede conducir a problemas como fluctuaciones de voltaje, pérdida de energía y daños en los equipos conectados [14].

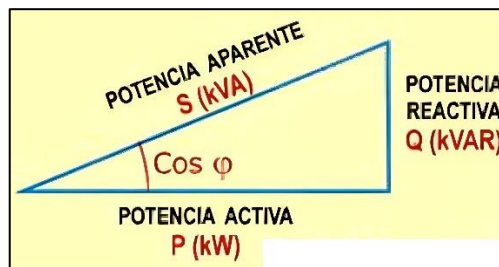


Figura 3. 6. Triangulo de potencias [14].

1.11.1. Potencia activa (P).

La potencia activa, medida en vatios (W), representa la parte de la potencia eléctrica que realiza un trabajo útil en un sistema eléctrico. Es la potencia que se convierte en luz, calor, movimiento u otra forma de energía útil. La potencia activa es la potencia real consumida o suministrada por una carga eléctrica y es el componente de potencia que se utiliza para calcular la facturación de la energía eléctrica [13].

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos(\varphi) \quad (3.8)$$

1.11.2. Potencia reactiva (Q).

Esta se mide en voltamperios reactivos (VAr), que es la parte de la potencia eléctrica que fluye hacia atrás y hacia adelante entre las cargas inductivas y capacitivas en un sistema eléctrico. Esta potencia no realiza trabajo útil directamente, pero es necesaria para mantener los campos electromagnéticos en las bobinas y por otro lado los campos eléctricos en los capacitores. La

potencia reactiva puede causar efectos adversos en los sistemas eléctricos, como caídas de voltaje y pérdida de eficiencia energética [15].

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \sin(\varphi) \quad (3.9)$$

1.11.3. Potencia Aparente (S).

La potencia aparente el cual se mide en (VA), es la unión de la potencia activa y la potencia reactiva, y representa la magnitud total de la potencia que fluye en un sistema eléctrico. Aquella es la sumatoria vectorial de las potencias activa y reactiva y se usa para determinar la capacidad requerida de los equipos de generación, transmisión y distribución de energía [15].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.10)$$

$$S = U * I \quad (3.11)$$

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (3.12)$$

1.11.4. Factor de potencia (FP)

El f.p. de potencia es la relación de la potencia activa y la aparente. Se presenta con un valor entre 0 y 1. Un factor de potencia de 1 (o 100%) indica que toda la potencia aparente se utiliza para realizar trabajo, por lo tanto que un factor de potencia menos que 1 dice la presencia de potencia reactiva Q y una menor eficiencia en el sistema.

Un bajo factor de potencia puede tener efectos negativos en la calidad de la energía eléctrica y en la eficiencia del sistema. Algunos de los efectos asociados con un factor de potencia bajo incluyen [14]:

- Mayor pérdida de energía: La presencia de potencia reactiva en el sistema aumenta las corrientes y las pérdidas de energía en los cables y equipos eléctricos.
- Sobrecarga del sistema: Un bajo factor de potencia puede causar una carga excesiva en los generadores, transformadores y otros componentes del sistema eléctrico, ya que deben suministrar tanto la potencia activa como la reactiva.
- Caídas de voltaje: La presencia de potencia reactiva puede causar caídas de voltaje en el sistema, lo que afecta el rendimiento de los equipos conectados y puede provocar problemas de operación y funcionamiento inestable.

- Ineficiencia en la transmisión y distribución: La presencia de potencia reactiva en el sistema puede llevar a una mayor corriente y pérdida de energía en las líneas de transmisión y distribución, lo que reduce la eficiencia de la red eléctrica.

Es importante mantener un factor de potencia adecuado para mejorar la eficiencia energética, reducir pérdidas y garantizar un funcionamiento óptimo del sistema eléctrico. Esto se puede lograr mediante el uso de capacitores y otras técnicas de mejoramiento del factor de potencia (fp), que balancean la potencia reactiva y mejora el f.p. [16].

Un bajo factor de potencia puede ser causado por varias razones, que generalmente están relacionadas con la presencia de potencia reactiva en el sistema eléctrico. Algunas de las causas comunes de un bajo factor de potencia incluyen:

- Cargas inductivas: Las cargas inductivas, como motores eléctricos, transformadores, bobinados y reactivos, toman potencia reactiva del sistema.
- Cargas capacitivas insuficientes: La falta de cargas capacitivas en el sistema puede llevar a un desequilibrio entre la potencia activa y reactiva.
- Diseño y selección de equipos inadecuados: La elección incorrecta o el diseño inadecuado de equipos eléctricos, como transformadores y motores, tienen una potencia reactiva grande.
- Desequilibrio de carga: Cuando las cargas están distribuidas de manera desigual entre las fases en un sistema trifásico, puede haber un desequilibrio de carga que afecte el factor de potencia.
- Conexiones eléctricas deficientes: Las conexiones eléctricas flojas o defectuosas pueden aumentar la resistencia y la reactancia del sistema eléctrico, lo que a su vez puede resultar en un bajo factor de potencia.
- Falta de mantenimiento y ajuste de equipos: La falta de mantenimiento adecuado de los equipos eléctricos, como los capacitores y los transformadores, puede afectar el rendimiento del sistema y resultar en un bajo factor de potencia.

1.11.5. Sanción por bajo factor de potencia.

Los proveedores de energía eléctrica aplican penalizaciones o cargos adicionales a los consumidores que tienen un bajo factor de potencia. Estas penalizaciones tienen como objetivo incentivar a los usuarios a mantener un factor de potencia adecuado y eficiente. Para los consumidores de categoría general con un factor de potencia menor al 0,92 se le penalizara con cargos establecidos por el pliego tarifario con las siguientes ecuaciones [17]:

$$\begin{aligned}
 P_{BFP} &= \{P_{BFP} = 0 && \text{si } FP_r \geq 0.92 \\
 P_{BFP} &= \{P_{BFP} = B_{FP} * FSPEE_i && \text{si } FP_r < 0.92 \rightarrow B_{FP} = \frac{0.92}{FP_r} - 1
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Donde:

P_{BFP}: Sanción por bajo factor de potencia.

FP_r: Factor de potencia registrado o calculado.

B_{FP}: Factor de sanción.

FSPEE_i: Planilla de la energía eléctrica.

1.12. TIPOS DE CARGAS

En el contexto de la calidad de la energía eléctrica, las cargas se pueden clasificar en diferentes categorías según su comportamiento y características. Es importante considerar los diferentes tipos de cargas al analizar y abordar los problemas de la energía eléctrica. Cada tipo de carga puede tener requisitos específicos y requerir medidas de mitigación adecuadas para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar problemas relacionados con la calidad de la energía [18].

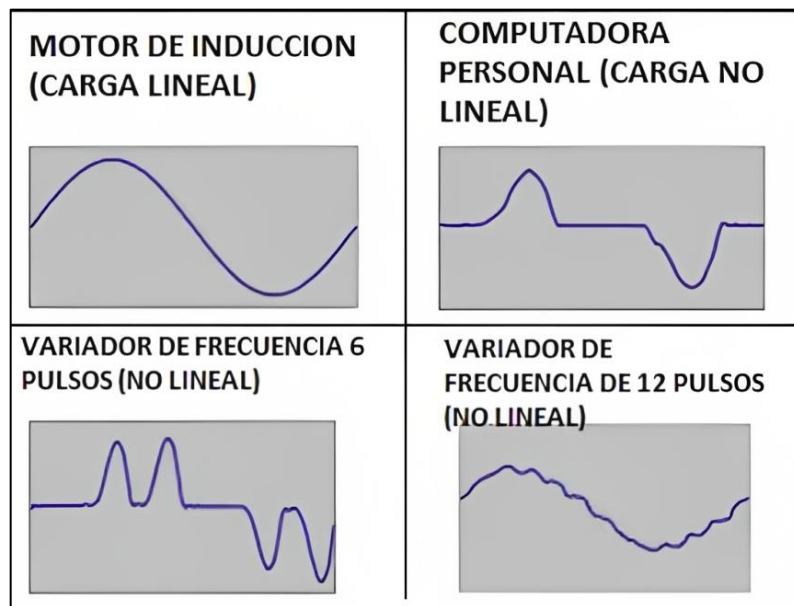


Figura 3. 7. Ondas según el tipo de carga [18].

1.12.1. Cargas lineales

Las cargas lineales son aquellas que presentan una relación lineal entre la tensión y la corriente, como las resistencias eléctricas. Estas cargas no introducen distorsión armónica ni alteran significativamente la forma de onda de la tensión. Ejemplos de cargas lineales son los focos incandescentes, las duchas eléctricos y los equipos de resistencia neto [18].

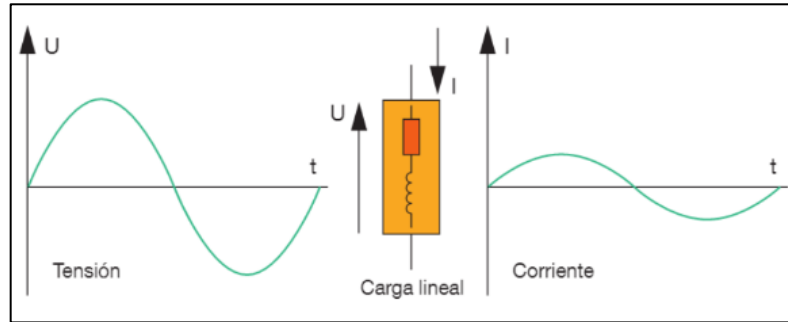


Figura 3. 8. Carga lineal [18].

1.12.2. Cargas no lineales

Las cargas no lineales son aquellas que introducen distorsión armónica en la forma de onda de la corriente, lo que puede afectar la calidad de la energía eléctrica. Estas cargas tienen una relación no lineal entre la tensión y la corriente, y su comportamiento varía con la tensión aplicada. Algunos ejemplos comunes de cargas no lineales son los equipos electrónicos, como computadoras, televisores, cargadores, sistemas de iluminación con tecnología LED y electrodomésticos con convertidores de frecuencia [18].

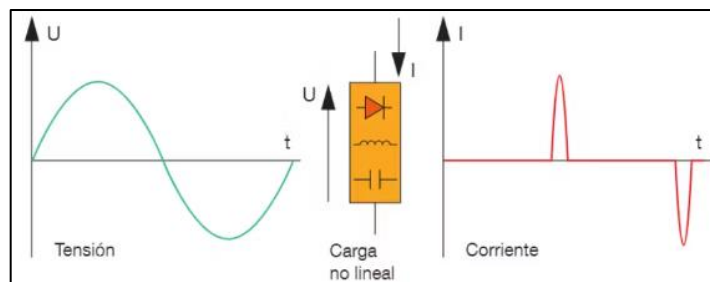


Figura 3. 9. Carga no lineal [18].

1.12.3. Cargas con variabilidad rápida

Estas cargas pueden generar fluctuaciones rápidas y transitorias en la corriente, lo que puede afectar la estabilidad del sistema eléctrico. Un ejemplo de carga con variabilidad rápida es una máquina con un motor de arranque y parada frecuentes, como un compresor de aire.

1.12.4. Cargas con corrientes de pico

Algunas cargas, como los equipos con motores eléctricos de alta potencia o equipos de soldadura, pueden generar corrientes de pico durante el arranque o la operación, lo que daña a la calidad de la energía. Estas corrientes de pico pueden causar fluctuaciones en la tensión y perturbaciones transitorias en el sistema.

1.12.5. Cargas sensibles a la calidad de la energía

Algunas cargas son particularmente sensibles a la calidad de la energía eléctrica y pueden experimentar problemas de funcionamiento o daños si la calidad de la energía no es adecuada. Esto incluye equipos electrónicos sensibles, sistemas de control, equipos médicos, sistemas de comunicación, entre otros [18].

1.13. RESONANCIA

La resonancia en la calidad de la energía eléctrica se refiere a una condición en la que las frecuencias naturales de un sistema eléctrico coinciden o están muy cerca de las frecuencias de las perturbaciones o armónicos presentes en la red eléctrica. Esto puede causar amplificaciones significativas en la amplitud de las señales eléctricas y provocar problemas en el sistema [19]. La resonancia puede ocurrir en sistemas eléctricos que contienen elementos capacitivos, inductivos o una combinación de ambos. Algunos ejemplos de elementos que pueden dar lugar a resonancia son los transformadores, los condensadores, las líneas de transmisión y las bobinas.

$$X_C = X_L \quad (3.14)$$

La resonancia puede tener varios efectos negativos en la calidad de la energía eléctrica, incluyendo:

- **Amplificación de armónicos:** La resonancia puede causar la amplificación de armónicos presentes en la red eléctrica. Esto puede resultar en un aumento de las distorsiones armónicas en la forma de onda de la tensión o corriente, lo que puede afectar el funcionamiento de los equipos sensibles y causar problemas de calidad de energía [18].
- **Sobretensiones o subvoltajes:** La resonancia puede causar sobretensiones o subvoltajes en el sistema eléctrico.
- **Pérdida de eficiencia:** La presencia de resonancia puede resultar en una pérdida de eficiencia en el sistema eléctrico, ya que se desperdicia energía debido a la amplificación y fluctuación de las señales.

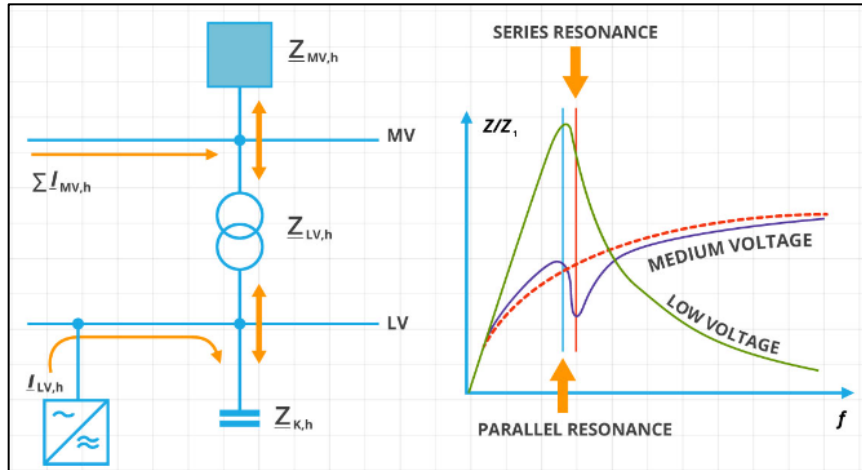


Figura 3. 10. Resonancia [18].

1.13.1. Frecuencia de resonancia

La resonancia ocurre cuando las frecuencias naturales de un sistema coinciden o están muy cerca de las frecuencias de las perturbaciones o armónicos presentes en la red eléctrica. En sistemas eléctricos de potencia, la frecuencia de resonancia más común está asociada con la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Sin embargo, también es posible que se produzcan resonancias en armónicos de frecuencia más alta, como el quinto armónico (250 Hz o 300 Hz) o el séptimo armónico (350 Hz o 420 Hz), dependiendo de las características del sistema y de las cargas presentes [19].

En un circuito resonante, que puede estar compuesto por inductores (bobinas) y capacitores, la resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva se igualan en magnitud, pero están en oposición de fase. En este punto, la impedancia total del circuito es mínima, lo que resulta en una alta corriente y una baja caída de tensión.

En la resonancia, la corriente en el inductor alcanza su valor máximo debido a la baja impedancia total del circuito en ese punto. Sin embargo, la tensión en el inductor también alcanza su valor máximo en la resonancia, ya que la corriente está en fase con la tensión en ese punto.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} \quad (3.15)$$

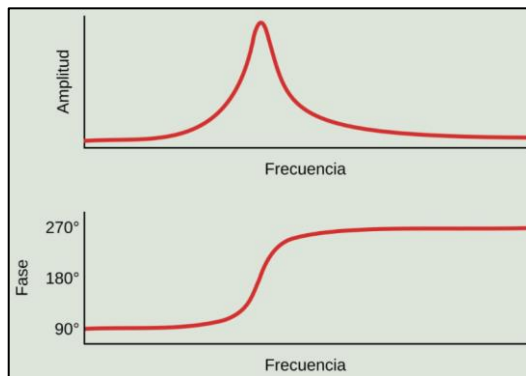


Figura 3. 11. Frecuencia de resonancia [19].

1.14. CORRIENTES DE FUGA

Las corrientes de fuga son corrientes eléctricas indeseables que fluyen a través de caminos no deseados en un sistema eléctrico. Estas corrientes pueden escapar o "fugarse" de los conductores y dispositivos y pueden tener un impacto negativo en la buena calidad de la energía eléctrica.

Las corrientes de fuga pueden tener diversas causas y manifestaciones en un sistema eléctrico. Algunas de las formas más comunes de corrientes de fuga incluyen [20]:

- Corrientes de fuga a tierra: Estas corrientes fluyen desde los conductores activos (fases) hacia la tierra, debido a fallos en la aislación o a problemas de conexión a tierra inadecuada. Las corrientes de fuga a tierra pueden causar riesgos de protección eléctrica y pérdida de eficiencia energética.
- Corrientes de fuga capacitivas: Estas corrientes son producidas por la capacitancia inherente entre conductores y entre conductores y tierra. Debido a la capacidad de almacenamiento y liberación de carga de los capacitores presentes en el sistema eléctrico, pueden fluir corrientes de fuga capacitivas. Estas corrientes pueden causar distorsión en la forma de onda de la corriente y la tensión [6].
- Corrientes de fuga en equipos y dispositivos: Algunos equipos y dispositivos eléctricos pueden presentar corrientes de fuga debido a problemas de aislamiento, condensación de humedad o defectos en los componentes. Estas corrientes de fuga pueden afectar el rendimiento y la eficiencia de los equipos y pueden generar problemas de seguridad eléctrica.

Las corrientes de fuga pueden provocar diversos problemas en la calidad de la energía eléctrica, incluyendo:

- Pérdida de eficiencia energética debido a la disipación de energía en corrientes indeseables.
- Perturbaciones en la forma de onda de la tensión y la corriente, lo que puede afectar el funcionamiento de los equipos conectados.
- Riesgos de seguridad eléctrica, como choques eléctricos y daños a los equipos.
- Mayor disipación de calor en los conductores y equipos, lo que puede llevar a un calentamiento excesivo y reducir la vida útil de los componentes.

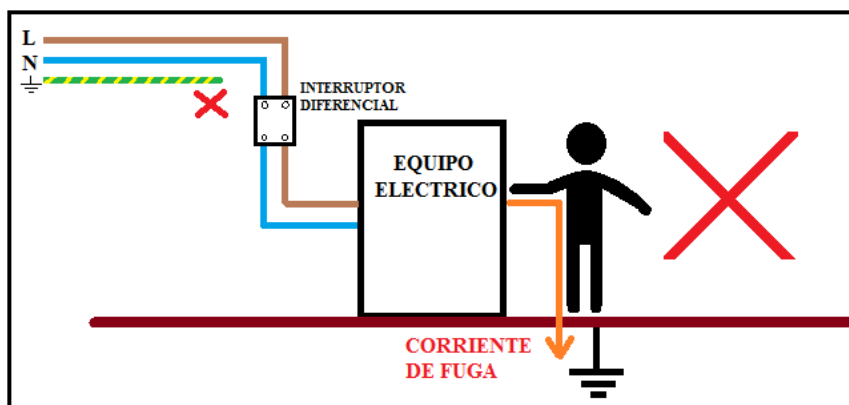


Figura 3. 12. Corriente de fuga [6].

1.15. ARMÓNICOS

Los armónicos en la calidad de la energía eléctrica se refieren a componentes de frecuencia no deseada que están superpuestos a la frecuencia fundamental de la señal eléctrica. Estos armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y pueden ser generados por cargas no lineales y dispositivos electrónicos conectados a la red eléctrica [21].

Cuando se presentan armónicos en la red eléctrica, pueden causar diversos problemas y afectar la calidad de la energía eléctrica. Algunos de los efectos negativos asociados con los armónicos incluyen:

- Distorsión de la forma de onda: Los armónicos distorsionan la forma de onda de la tensión y la corriente, lo que puede afectar el rendimiento y la operación de sus elementos eléctricos y de electrónica. Los armónicos pueden dar calentamiento excesivo, vibraciones y ruido en los equipos, lo que puede reducir su vida útil y afectar su eficiencia.
- Sobrecalentamiento y pérdida de energía: Los armónicos generan corrientes adicionales en los conductores y equipos, lo que puede provocar un aumento en las pérdidas de energía y un sobrecalentamiento de los cables, transformadores y otras partes del sistema eléctrico. El resultante es eficiencia energética disminuida y un alza de los costos de operación[3].

- **Resonancia y amplificación:** Los armónicos pueden interactuar con las características inductivas y capacitivas del sistema eléctrico, lo que puede provocar resonancia y amplificación de las señales armónicas. Esto puede resultar en mayores distorsiones armónicas y problemas adicionales en el sistema.
- **Interferencias electromagnéticas:** Los armónicos generados por las cargas no lineales pueden acoplar con otros equipos y sistemas eléctricos, causando interferencias electromagnéticas. La afectación en el trabajo de equipos de comunicación, sistemas de control y otros dispositivos sensibles.

Los niveles de distorsión armónica se pueden caracterizar utilizando el espectro armónico completo, que muestra las magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico presente en la señal eléctrica. En este punto se da una descripción detallada de la distorsión armónica en el sistema eléctrico [8].

Además,

es común utilizar una medida resumida llamada Distorsión Armónica Total (DHT) o Total Harmonic Distortion (THD). La DHT se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de los componentes armónicos dividida por la magnitud del componente fundamental. Se expresa típicamente como un porcentaje.

La DHT proporciona una indicación de la cantidad total de distorsión armónica presente en la señal eléctrica y se utiliza como una medida general de la calidad de la energía eléctrica. Cuanto mayor sea la DHT, mayor será la cantidad de distorsión armónica en el sistema.

Las corrientes armónicas se generan debido al funcionamiento normal de los dispositivos no lineales, como convertidores de frecuencia variable, equipos electrónicos con rectificadores o dispositivos de conmutación. Estos dispositivos no lineales introducen componentes armónicos en la corriente eléctrica, lo que resulta en distorsión armónica [22].

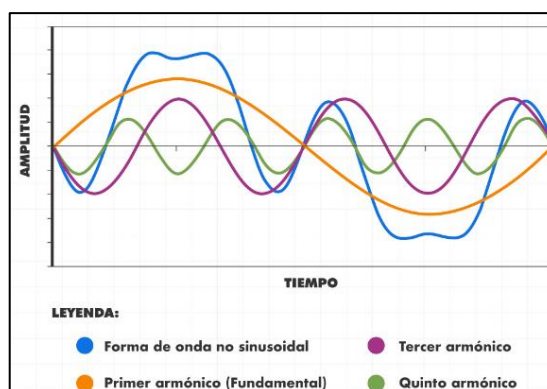


Figura 3. 13. Curva Fundamental con armónicos [22].

1.15.1. Orden de armónicos

Los armónicos en un sistema eléctrico se clasifican según su orden, que indica el número entero que representa la relación con la frecuencia fundamental de la señal eléctrica. A medida que aumenta el orden de los armónicos, la frecuencia de los mismos también aumenta proporcionalmente al orden. Los armónicos de mayor orden tienen frecuencias más altas.

Es importante tener en cuenta que existen armónicos de orden impar y de orden par, dependiendo de la naturaleza de las cargas no lineales en el sistema eléctrico. Los armónicos de orden impar (como el tercer armónico, quinto armónico, etc.) pueden causar distorsión en la forma de onda simétrica, mientras que los armónicos de orden par (como el segundo armónico, cuarto armónico, etc.) pueden causar distorsión en la forma de onda asimétrica [23].

Tabla 3. 3. Orden de armónicos.

Orden de armónicos	Frecuencia	
	50 Hz	60 Hz
3	150	180
5	250	300
7	350	420
11	550	660

1.16. NORMATIVA IEEE 519-2014

La norma IEEE 519-2014 aborda los problemas relacionados con la distorsión armónica y busca limitar los efectos perjudiciales de los armónicos en los sistemas eléctricos. Proporciona criterios y límites para la cantidad admisible de distorsión armónica en sistemas de baja tensión y media tensión [24].

Algunos aspectos importantes que se abordan en la norma IEEE 519-2014 incluyen:

- Límites de distorsión armónica: La norma establece límites para la distorsión armónica total (DHT) y los armónicos individuales en función del tipo de sistema y la capacidad de carga.
- Evaluación y medición de armónicos: Proporciona pautas y métodos para evaluar y medir los niveles de armónicos en un sistema eléctrico, incluyendo la selección de equipos de medición adecuados y los procedimientos de medición.
- Mitigación de armónicos: La norma incluye recomendaciones para mitigar los efectos de los armónicos, como el uso de filtros de armónicos, transformadores con núcleo de baja distorsión, capacitores con armónicos mínimos, entre otros [24].

- Cargas no lineales: La norma aborda los requisitos y recomendaciones para las cargas no lineales en términos de su impacto en la distorsión armónica y las técnicas de control.

Tabla 3. 4. Limites según la normativa IEEE 519.

Voltaje de bus V en PCC	Armónico individual	Distorsión Armónica Total THD
$V \leq 1.0 \text{ KV}$	5,0%	8,0%
$1 \text{ KV} < V \leq 69 \text{ KV}$	3,0%	5,0%
$69 \text{ KV} < V \leq 161 \text{ KV}$	1,5%	2,5%
$161 \text{ KV} < V$	1,0%	1,5%

1.16.1. Distorsión armónica de corriente

La distorsión armónica de corriente se refiere a la presencia de componentes armónicos no deseados en la corriente eléctrica. Estos componentes armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la corriente y pueden ser generados por cargas no lineales y dispositivos electrónicos conectados al sistema eléctrico [1].

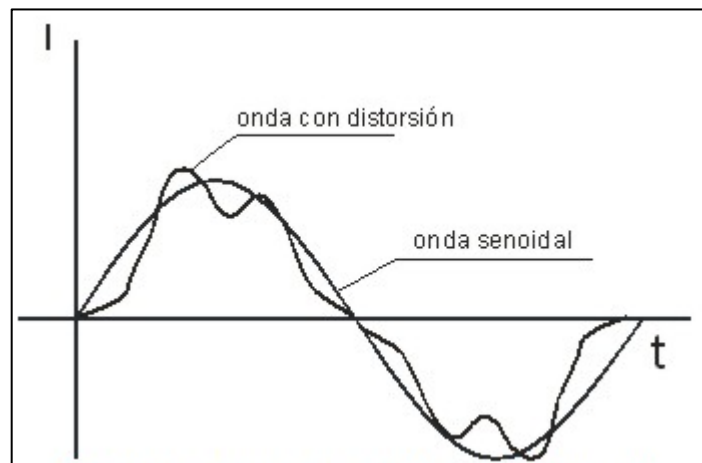


Figura 3. 14. Distorsión armónica de corriente [1].

La distorsión armónica de corriente puede tener varios efectos negativos en el sistema de la electricidad, con todo:

- Sobrecarga de conductores y equipos: Los componentes armónicos adicionales en la corriente pueden aumentar la carga en los conductores y equipos eléctricos, lo que puede llevar a un calentamiento excesivo y una reducción de la utilidad de los mismos componentes [14].

- Pérdida de eficiencia energética: La presencia de corrientes armónicas aumenta las pérdidas de energía en los conductores y equipos eléctricos, lo que resulta en una menor eficiencia energética y mayores costos operativos.
- Distorsión de la forma de onda de tensión: Las corrientes armónicas pueden generar distorsión en la forma de onda de la tensión, lo que afecta la operación de otros equipos y puede causar problemas adicionales en la calidad de la energía eléctrica.
- Interferencia electromagnética: Las corrientes armónicas pueden generar interferencia electromagnética, afectando la operación de equipos de comunicación, sistemas de control y otros dispositivos sensibles.

Para controlar y mitigar la distorsión armónica de corriente, se pueden tomar medidas como:

- Utilizar filtros de armónicos
- Diseñar y seleccionar equipos adecuados
- Cumplir con las normas y regulaciones
- Realizar análisis y monitoreo

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (3.16)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} * 100[\%] \quad (3.17)$$

$$TDD = \left[\frac{1}{I_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,i})^2} \right] * 100[\%] \quad (3.18)$$

Donde:

$I_{h,k}$: Armónica de corriente h en el intervalo k de 10 minutos.

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

$DI_{h,k}$: Factor de distorsión individual de corriente de la armónica h en el intervalo k de 10 minutos.

TDD_k : Factor de distorsión de demanda total (armónicos de corriente).

$I_{h,1}$: Valor eficaz de la componente fundamental de corriente.

Tabla 3. 5. Límites de distorsión armónica de corriente.

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

Acorde con la normativa ARCERNR 002/20 sobre la distorsión armónica de la corriente, el consumidor cumple con el factor de distorsión armónica individual de corriente y con el factor de distorsión de demanda total, cuando el 95 % o más de los valores registrados, en el periodo de evaluación de al menos siete días continuos, se encuentran dentro de los límites definidos [19].

1.17. FILTROS DE ARMÓNICOS

Las filtraciones de armónicos son aquellos dispositivos usados para reducir la distorsión de armónicos en sistemas de electricidad. Estos filtros se diseñan específicamente para reducir o eliminar los componentes armónicos no deseados de la corriente o la tensión eléctrica, permitiendo que solo la frecuencia fundamental pase a través del sistema.

Los filtros de armónicos se pueden utilizar en diferentes puntos del sistema eléctrico, como en la carga, en los paneles de distribución o en la fuente de alimentación principal. La selección del tipo y la ubicación del filtro dependen de las características del sistema y las necesidades de mitigación de armónicos específicas [2].

Al aplicar filtros de armónicos, es importante considerar aspectos como la capacidad de filtrado requerida, la impedancia del sistema, el rango de frecuencias de los armónicos a tratar y la interacción con otros equipos o sistemas conectados.

Los filtros de armónicos ayudan a reducir la distorsión armónica y a mejorar la calidad de la electricidad, lo que representa en una operacionabilidad más eficiente y confiable de los equipos y sistemas eléctricos [14].

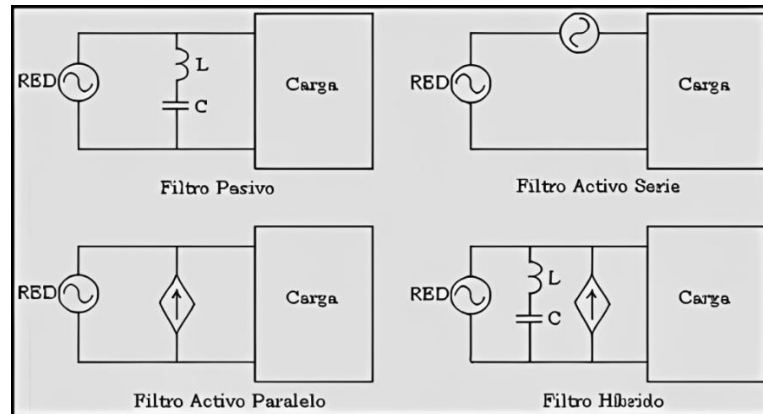


Figura 3. 15. Filtros de armónicos [14].

Hay diferentes tipos de filtros de armónicos que se utilizan según las necesidades y la utilidad especificada. Algunos de los filtros de armónicos más comunes son:

1.17.1. Filtros pasivos

Los filtros en mención usaban elementos pasivos, como el inductor, capacitores y las resistencias, para crear una impedancia selectiva que atenúa los armónicos específicos. Los filtros pasivos se pueden diseñar para atenuar armónicos de orden particular o para atenuar un rango de armónicos [19].

Hay muchos tipos de filtros pasivos usados para calmar los armónicos:

- Filtros de armónicos de un solo nivel.
- Filtros de armónicos de múltiples niveles.
- Filtros de los armónicos sintonizados.
- Filtros de armónicos de banda ancha.

Es importante tener en cuenta que los filtros pasivos introducen cierta pérdida de energía debido a las resistencias inherentes de los componentes. Además, la impedancia del filtro debe ser compatible con las características del sistema y la carga para asegurar una atenuación efectiva de los armónicos sin afectar negativamente la operación del sistema [22].

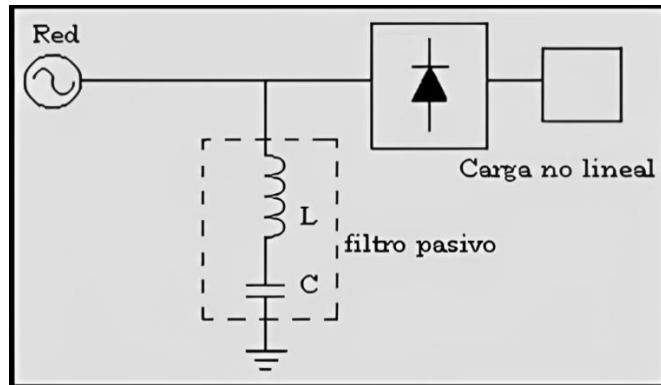


Figura 3. 16. Filtro pasivo [22].

1.17.2. Filtros activos

Los filtros activos utilizan componentes electrónicos, como convertidores de potencia y controladores, para generar una corriente o tensión con fase y amplitud opuesta a los armónicos no deseados. Esta corriente o tensión se inyecta en el sistema para cancelar o neutralizar los armónicos.

A diferencia de los filtros pasivos, los filtros activos utilizan componentes electrónicos, como convertidores de potencia y controladores, para generar una corriente o tensión con fase y amplitud opuesta a los armónicos no deseados. Esta corriente o tensión generada se inyecta en el sistema eléctrico para cancelar o neutralizar los armónicos [23].

Los filtros activos ofrecen varias ventajas en comparación con los filtros pasivos, incluyendo:

- Mayor eficiencia de mitigación
- Amplio rango de mitigación:
- Capacidad de seguimiento dinámico
- Flexibilidad y configuración

Es importante tener en cuenta que los filtros activos requieren una fuente de energía auxiliar para su funcionamiento, generalmente en forma de un convertidor de potencia controlado. Además, su implementación puede ser más compleja y costosa que la de los filtros pasivos.

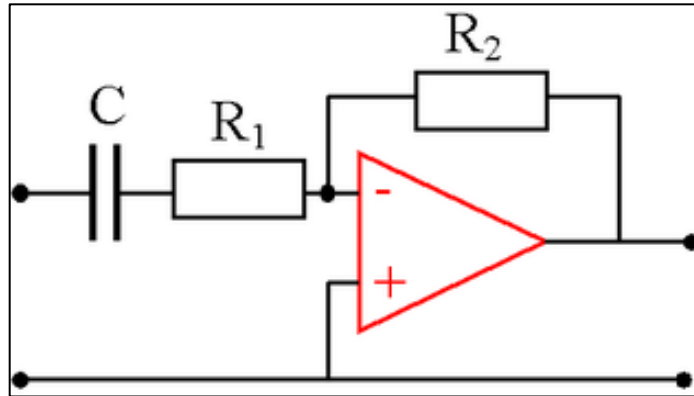


Figura 3. 17. Filtro activo [23].

1.17.3. Filtros híbridos

Los filtros híbridos combinan elementos de filtros pasivos y activos para proporcionar una solución más eficiente y efectiva para la mitigación de armónicos. Estos filtros pueden ofrecer una mejor capacidad de adaptación y control de múltiples armónicos. Un filtro híbrido típico consta de una etapa pasiva y una etapa activa [4]:

- Etapa pasiva: La etapa pasiva del filtro híbrido utiliza componentes pasivos, como inductores y capacitores, para proporcionar una atenuación inicial de los armónicos. Esta etapa se encarga de atenuar los armónicos de mayor frecuencia y reducir la carga de la etapa activa.
- Etapa activa: La etapa activa del filtro híbrido utiliza componentes electrónicos, como convertidores de potencia y controladores, para generar una corriente o tensión con fase y amplitud opuesta a los armónicos no deseados. Esta etapa se encarga de cancelar los armónicos restantes y proporcionar una mitigación precisa y eficiente.

Al combinar las etapas pasiva y activa, los filtros híbridos pueden ofrecer las siguientes ventajas:

- Mayor eficiencia y capacidad de mitigación
- Adaptabilidad y flexibilidad
- Mejor control de resonancias

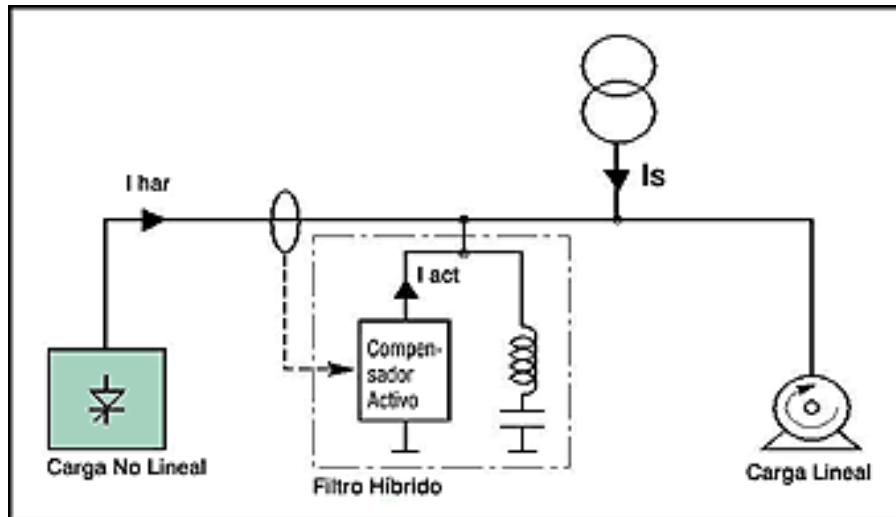


Figura 3. 18. Filtro híbrido.

METODOLOGÍA

En esta sección se detalla de manera exhaustiva la metodología empleada, las técnicas de investigación utilizadas, el sistema de procedimientos, así como las herramientas y materiales empleados en el presente estudio. El enfoque metodológico propuesto establece un conjunto de procedimientos, técnicas y métodos para el procesamiento de datos y conocimientos, con el objetivo de obtener parámetros válidos para el desarrollo de la investigación.

1.18. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

1.18.1. Método inductivo - deductivo

Se empleó este método para evaluar el estado del sistema eléctrico de la empresa "INDUPLAES". Mediante este enfoque, se identificaron los problemas y las causas que afectaban al sistema, y se propusieron posibles soluciones para mitigarlos. Para llevar a cabo esta evaluación, se recolectaron datos sobre las cargas presentes en la industria, se realizó el diagrama unifilar, se registraron las perturbaciones utilizando el analizador de redes Fluke 435-II y se analizaron los parámetros de calidad de energía. Finalmente, se realizaron simulaciones en el software ETAP 19.0.1 utilizando los datos recopilados previamente, con el objetivo de proponer soluciones a los principales fenómenos que afectaban al sistema eléctrico.

1.18.2. Método analítico - Sintético

Este enfoque se utilizó para examinar la información relacionada con el objeto de investigación, utilizando una base teórica extraída de varias fuentes bibliográficas confiables, como libros y revistas académicas. Esta base teórica facilita los análisis de los diversos problemas y causas

relacionados con la calidad de la energía, así como el procedimiento para realizar simulaciones y por tanto proponer soluciones a los principales fenómenos que ocurren en el sistema eléctrico.

1.19. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

1.19.1. Investigación Teórica

Para realizar la investigación teórica de este estudio, se recopiló información de diversas fuentes, como libros, repositorios de universidades, revistas, artículos científicos y sitios informáticos de entidades relevantes. El objetivo fue establecer un fundamento teórico preciso sobre la calidad de la energía eléctrica, con el fin de comprender las normativas pertinentes, como IEEE y ARCERNNR 002/20, y la aplicación en bajo voltaje.

1.19.2. Investigación de campo

La fase de investigación de campo se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa "INDUPLAES", al realizar una investigación en el lugar de estudio. El objetivo principal fue obtener información necesaria sobre los equipos y las maquinas utilizadas en las distintas áreas de la industria y que se involucran directamente en la elaboración y producción de los envases plásticos

1.19.3. Investigación Cuantitativa

Este tipo de investigación se enfoca en la recolección de información digital mediante dispositivos y por ende en la determinación de parámetros eléctricos, los cuales son de gran importancia para determinar el nivel de calidad energética de la empresa. Dichos datos se utilizan para recopilar, analizar y luego compararlos con los estándares permitidos por la norma, para identificar los problemas y sugerir posibles soluciones.

1.19.4. Investigación Descriptiva.

Con esta investigación se puede especificar la información necesaria acerca de las perturbaciones eléctricas presentes en la industria, además de detallar las posibles soluciones para mejorar la calidad energética de la industria.

1.20. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

1.20.1. Observación directa y participativa

Gracias a esta técnica, se estableció una comunicación directa con el responsable del área de mantenimiento de la planta, lo cual facilitó la identificación de las maquinarias, equipos y otros elementos instalados. Después, se recopiló información valiosa sobre los transformadores de alimentación de 100 kVA y de la carga conectada al transformador.

1.20.2. Instrumentos de investigación

En este estudio, se emplearon instrumentos de investigación como fotografías y fichas de registro para documentar diversos aspectos, tales como conductores, cargas lineales, cargas no lineales, protecciones y el esquema unifilar del sistema eléctrico.

1.21. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Es necesario determinar la metodología a utilizar para mejorar la calidad de energía de la industria para esto se sigue los siguientes pasos:

1.21.1. Levantamiento de cargas y el diseño de diagramas unifilares

En esta etapa, en colaboración con el personal de mantenimiento, se llevó a cabo la exploración exhaustiva de todas las zonas de la planta. Se realizaron observaciones detalladas de las maquinarias y los procesos que impulsan el funcionamiento de la empresa. A partir de este análisis, se logró identificar los circuitos que alimentan a cada transformador, con el propósito de llevar a cabo el registro preciso de las cargas. Se consideraron datos como la información de placa, el calibre de los conductores y las protecciones correspondientes a cada equipo. Finalmente, se procedió al diseño y elaboración de esquemas unifilares. La Figura 4.1 ilustra lo descrito anteriormente.

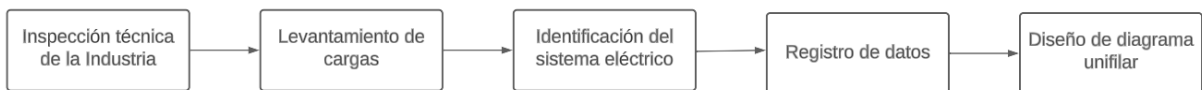


Figura 4. 1. Diseño de diagrama unifilar.

1.21.2. Obtención de parámetros eléctricos mediante el analizador de redes

La Figura 4.2 representa el proceso que debe ser seguido con el objetivo de adquirir medidas eléctricas destinadas al análisis de la calidad de energía en la compañía "INDUPLAES"

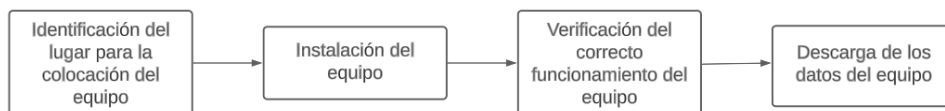


Figura 4. 2. Obtención de datos mediante el analizador de redes.

a) Identificación del lugar para colocar el analizador de redes

Utilizando la información recopilada en la primera fase, se procedió a ubicar el analizador de redes siguiendo las directrices establecidas por las normativas IEEE-1159-2019 y ARCERNR 002/20, que establecen lo siguiente:

Si el objetivo del monitoreo es analizar la calidad general de la energía en la instalación, el analizador debe ser colocado en la parte secundaria del transformador al ingreso del servicio principal. Este transformador generalmente es de clase 600 V. El analizador registra tanto el

impacto de la calidad de la energía suministrada como el impacto de las principales cargas de la instalación. En caso de ser necesario, los analizadores deben ser ubicados en puntos más adelante en el sistema de distribución para probar la calidad de la energía en alimentadores individuales, como se muestra en la Figura 4.3.

Basándose en estas premisas, se decidió instalar el analizador de redes en la parte secundaria de los transformadores y en el tablero principal de distribución. Esto permitirá evaluar el sistema aguas abajo y validar los datos de acuerdo con normativas extranjeras y nacionales.

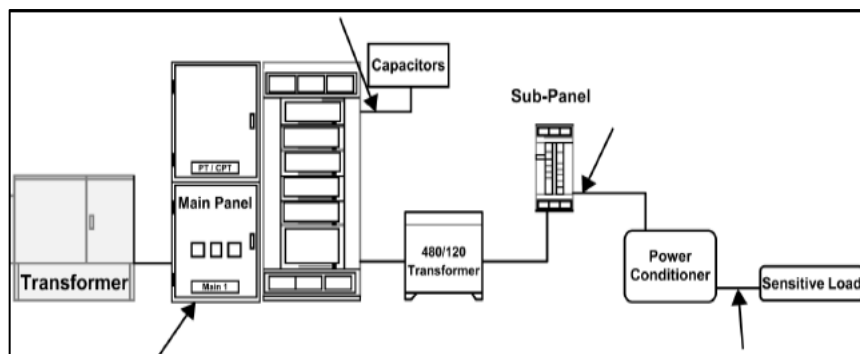


Figura 4. 3. Identificación del sitio para la instalación del analizador de redes.

b) Selección del equipo

En la elección del analizador de red, se considera lo establecido en el capítulo siete de la normativa ARCENNR 002/20. Dicho capítulo establece que los equipos requeridos para realizar mediciones en el sistema eléctrico deben cumplir con los requisitos de las normativas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30. Estas normativas determinan que, para cada mes o periodo de medición, los valores registrados deben tener un intervalo de 10 minutos y el tiempo de evaluación no debe ser inferior a siete días.

El analizador de redes FLUKE 435-II, que cumple con estas características, fue seleccionado, como se puede observar en la Figura 4.4. Este analizador se conectó a las tres fases, neutros y tierra del transformador de 100 kVA. Su función es obtener parámetros como potencia, factor de potencia, armónicos de corriente y voltaje, flicker, Sags, swells, entre otros.



Figura 4. 4. Analizador de redes FLUKE 435-II

c) Colocación del equipo FLUKE 435-II

Se realizó la implementación del dispositivo de medición en el lado secundario del tablero de distribución. Antes de iniciar la recopilación de datos, se verificó en la pantalla el diagrama fasorial, así como los parámetros de potencia, voltaje y corriente asociados a las tres líneas. Durante esta etapa, se aseguró que los cables de voltaje y las sondas amperimétricas estuvieran conectados de manera adecuada. La instalación del dispositivo Fluke se indica en la Figura 4.5 para una referencia visual.

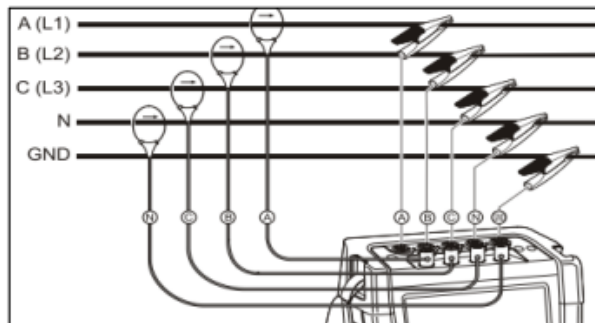


Figura 4. 5. Conexión del equipo analizador.

d) Comparación de resultados con los marcos normativos.

Se emplearon las siguientes normativas para llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos:

ARCERNNR-002/20: Esta normativa se utilizó para evaluar la calidad del producto en relación al nivel y desequilibrio de voltaje en la empresa "INDUPLAES".

IEEE 519-2014: Se recurrió a esta normativa para contrastar los límites de distorsión armónica tanto en tensión como en corriente, tanto individualmente como en el total.

IEEE 1159-2019: Esta normativa se utilizó para el análisis de fenómenos electromagnéticos que hayan en el sistema eléctrico, como sags, swells, sobretensiones, bajos voltajes, desequilibrio de voltaje, variación de frecuencia, entre otros.

Reglamento del Pliego Tarifario 025/2022: Este reglamento se empleó para examinar el factor de potencia en la empresa. El pliego tarifario 2022, establece los límites en relación al factor de potencia, como se explicó en la sección teórica.

En resumen, se utilizaron estas normativas para realizar comparaciones y valoraciones de los resultados obtenidos en el estudio.

1.21.3. Simulación del Sistema Eléctrico en ETAP 19.0.1

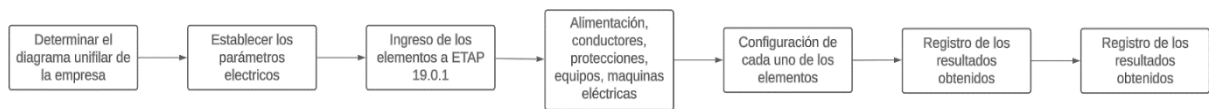


Figura 4. 6. Procedimiento para la simulación del sistema eléctrico en ETAP.

Para llevar a cabo la simulación del sistema utilizando el programa ETAP 19.0.1, el procedimiento se inicia con la identificación de los diversos elementos que serán simulados, así como los puntos de conexión comunes de cada rama. Esta identificación se realizó utilizando planos unifilares y los datos recopilados durante la fase uno, que abarcó el levantamiento de cargas.

Posteriormente, se determinaron las magnitudes de potencia, voltaje, corriente y factor de potencia que serían introducidas en el programa. A continuación, se llevó a cabo la conexión de los elementos y maquinarias a los diferentes puntos de conexión común. Se procedió a poner en funcionamiento las máquinas, considerando la demanda máxima registrada, la información obtenida en la investigación de campo anteriormente mencionada y las experiencias individuales. Los resultados emitidos por la simulación se compararon con los datos reales capturados por el analizador de redes.

Finalmente, se plantean casos de estudio y se proponen soluciones pertinentes basadas en los resultados de la simulación y las comparaciones con los datos reales.

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

1.22. DESCRIPCION DE LA EMPRESA

“LA FÁBRICA INDUPLAES” es una empresa especializada en la fabricación de envases de plástico polietileno, cuenta con un equipo de expertos y colaboradores en el campo de la extrusión e inyección de plástico dedicados a desarrollar envases de alta calidad, la misma está ubicada en la Provincia de Cotopaxi cantón Latacunga en la panamericana sur kilómetro dos y medio a doscientos metros de la gasolinera Puma sector Tiobamba, con sus coordenadas dadas en la figura 5.1.

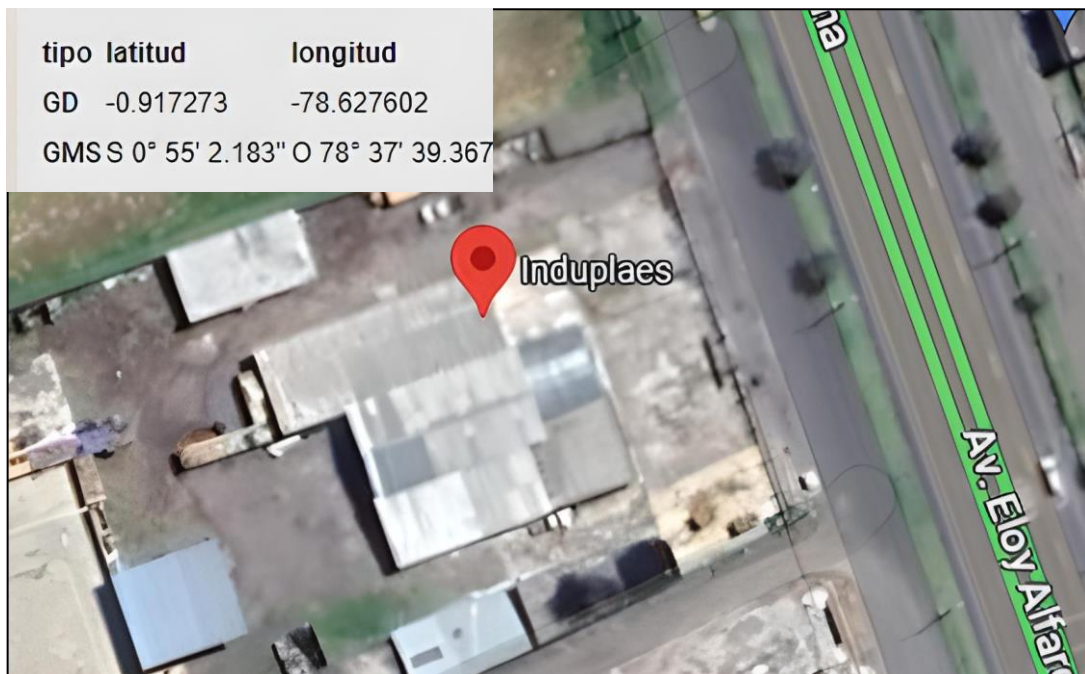


Figura 5. 1. Ubicación de la empresa “INDUPLAES”

1.23. DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRICO ACTUAL DE LA EMPRESA

El sistema actual de la empresa “INDUPLAES” consiste en una red eléctrica trifásica de 13.8 kV proveniente de la red de distribución de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi, la cual alimenta un transformador de 100 kVA y a su vez distribuye a las diversas cargas existentes con una tensión de 220 V. Las características de este transformador se muestran a continuación en la Tabla 5.1

Tabla 5. 1. Características del transformador.

Descripción	Datos
Marca	INATRA
Potencia	100KVA
Voltaje primario	13.8kV
Voltaje secundario	220V
Conexión	Dyn1
Impedancia	3%
Frecuencia	60Hz

El transformador de 100kVA conectado al tablero principal con una tensión de 220V con cuatro conductores de cobre calibre 2/0 AWG, este se acopla a una protección de 65kA.

El trafo_100kVA se encarga del suministro eléctrico de la empresa, como se muestra en la figura 5.2, alimentando a la compresora, sopladoras 1 y 2, a los shillers 1, 2 y 3, motor 1, luminarias industriales, luminarias y tomacorrientes de oficina, carga 1, toma especial y molinos. El trafo_30kVA alimenta a la inyectora.

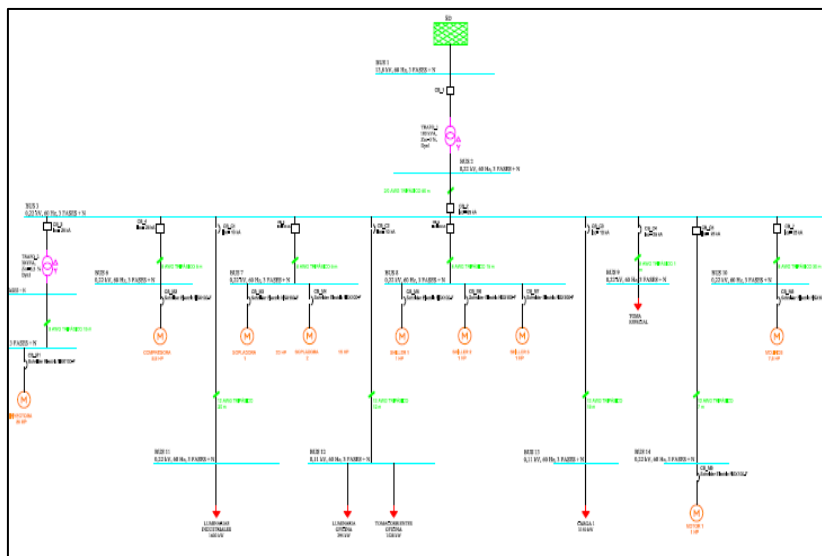


Figura 5. 2 Sistema alimentado por el transformador de 100 kVA.

1.24. LEVANTAMIENTO DE CARGAS EN LA EMPRESA “INDUPLAES”

1.24.1. Potencia Instalada

Para determinar su potencia instalada se realiza el levantamiento de cargas mediante la información que existe en cada una de las maquinas mencionadas anteriormente, para el transformador de 100kVA.

- Transformador de 100kVA

En la tabla 5.3 se presenta un listado de las cargas recopiladas dentro de la empresa “INDUPLAES”.

Tabla 5. 2. Cargas conectadas al transformador de 100kVA.

N.º	Maquinaria	Potencia (kW)	Longitud (m)	Conductor
1	Compresora	4,10	5	8 AWG
2	Sopladora 1	14,91	5	8 AWG
3	Sopladora 2	11,18	5	8 AWG
4	Shiller 1, 2 y 3	0,745	15	8 AWG
5	Motor 1	0,745	7	12 AWG
6	Luminarias industriales	1,600	20	12 AWG
7	Toma corriente de oficina	1,528	12	12 AWG
8	Luminaria de oficina	0,295	12	12 AWG
9	Carga 1	3,150	15	12 AWG
10	Molinos	5,59	30	8 AWG
11	Inyectora	14,91	15	8 AWG
	Carga total Instalada (kW)	58,753		

1.25. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES.

1.25.1. Análisis de Nivel de Voltaje del TRAFIO

La Regulación ARCERNR 002/20 establece que los niveles de voltaje no se cumplen si los datos recolectados exceden el porcentaje especificado en un 5% o más. Induplaes corresponde al nivel de Bajo Voltaje, por lo consiguiente su nivel de voltaje no debe sobrepasar el $\pm 8\%$. Como se muestra en la tabla 3.1 de la fundamentación teórica.

A continuación, se analiza los niveles de voltaje de la industria, tanto para el voltaje fase-neutro (127 V), como para el nivel de voltaje fase-fase (220V), y se compara con los niveles establecidos por la regulación.

1.25.1.1. Voltaje nominal fase-Neutro: 127 V

Los valores de V_{rms} fase-neutro se muestra en la tabla 5.4, determinados por el analizador de red considerando las medidas mínima, media y máxima obtenidas durante el periodo de registro de 7 días.

Tabla 5. 3. Niveles de voltaje fase-neutro: 127 V.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	Vrms ph-n AN	Vrms ph-n BN	Vrms ph-n CN	Vrms ph-n Promedio
09/06/2023	02:56	V Mínimo	116,36	116,05	115,88	116,10
		V Medio	121,40	121,68	121,48	121,52
07/06/2023	09:56	V Máxima	125,07	125,57	125,36	125,33

Para verificar si los valores de la tabla 5.4 cumplen con los límites establecidos por la normativa, se realizaron los cálculos según la ecuación (3. 1) para obtener los valores de la tabla 5.5. De lo anterior, podemos confirmar que el sistema eléctrico si presenta variaciones en nivel de 127 V. Estos exceden la tolerancia permisible (8%), lo que significa que la maquinaria existente en la industria no está operando al voltaje ideal para los cuales fueron diseñados.

Tabla 5. 4. Variación de voltaje 127 V del transformador 100 kVA.

	% De Variación		Norma ARCERNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	1,52%	8,38%	No Cumple
V_{BN}	1,13%	8,62%	No Cumple
V_{CN}	1,29%	8,76%	No Cumple

En los sistemas eléctricos es necesario considerar que las variaciones de tensión que pueden ser ocasionadas por fenómenos internos o externos a la empresa, afectan elementos sensibles como máquinas y equipos electrónicos que son menos flexibles a la variación de tensión. Estos también pueden ser causados por instalaciones eléctricas defectuosas. Causado por el dimensionamiento inadecuado de conductores, o contactos desajustados. Por lo tanto, es importante solucionar estos problemas. En la figura 5.3 muestra la variación de estos valores máximos y mínimos para un transformador de 100kVA.

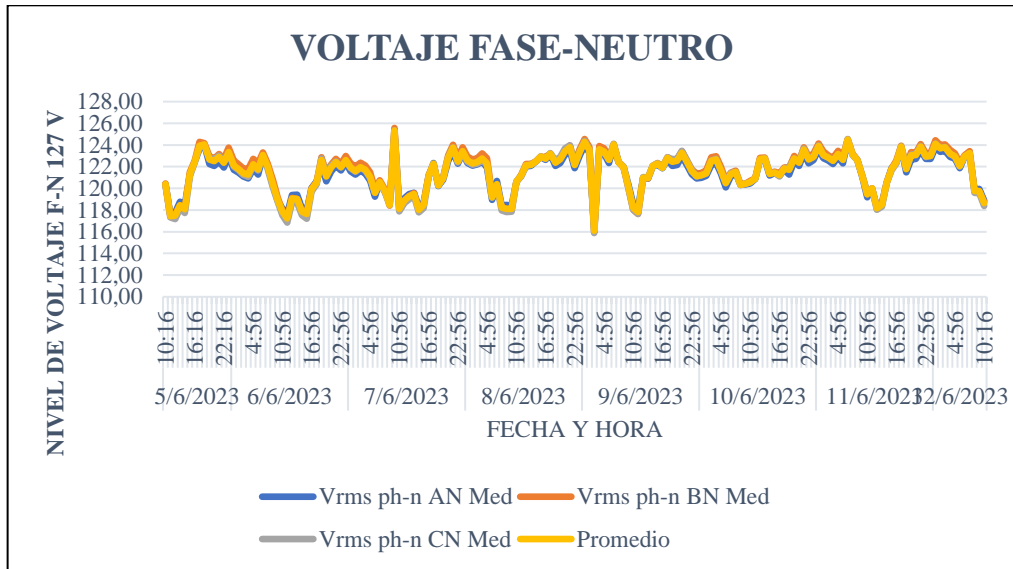


Figura 5. 3. Nivel de Voltaje fase-neutro 127V del transformador 100 kVA.

1.25.1.2. Voltaje Nominal Fase – Fase: 220 V

Tabla 5.6 se muestra los valores de voltaje fase-fase y en la tabla 5.7, se puede verificar que el sistema eléctrico no presenta variaciones de voltaje en el nivel de 220 V, estas se encuentran dentro de las tolerancias (± 8) en voltajes fase-fase.

Tabla 5. 5. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	Vrms ph-n AN	Vrms ph-n BN	Vrms ph-n CN	Vrms ph-n Promedio
09/06/2023	02:56	V Mínimo	202,39	202,42	204,48	203,10
		V Medio	211,61	212,35	213,49	212,48
07/06/2023	09:56	V Máxima	218,22	219,15	219,89	219,09

Tabla 5. 6. Variación de voltaje 220 V del transformador 100 kVA.

	% De Variación		Norma ARCERNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	0,81%	8,00%	Cumple
V_{BN}	0,39%	7,99%	Cumple
V_{CN}	0,05%	7,05%	Cumple

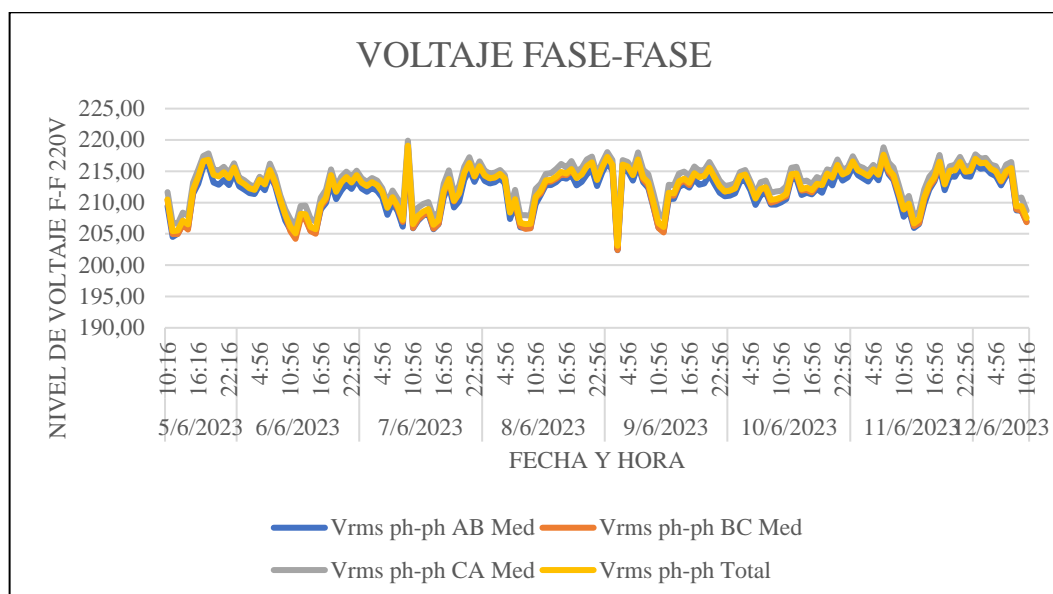


Figura 5. 4. Nivel de Voltaje fase-fase 220V del transformador 100 kVA.

1.25.1.3. *Voltaje en el neutro en el transformador 100kVA*

La Tabla 5.8 indica los resultados de la variación de voltaje en el neutro del transformador de 100kVA, donde se aprecia que existen voltajes donde el pico más alto es de 1.18 voltios. Tomando en cuenta que el nivel de voltaje en la línea del neutro debe ser cero o menor de un voltio, se puede determinar que estos voltajes parásitos pueden ser producidos por la presencia de armónicas o se requiera un mantenimiento en la puesta a tierra, dichas hipótesis se demostraran posteriormente.

Tabla 5. 7. Nivel de voltaje Neutro.

	Fecha	Hora	Vrms ph-n NG
V neutro Máximo	07/06/2023	09:56	1,18
V neutro Promedio			1,13
V neutro Mínimo	09/06/2023	02:56	1,09

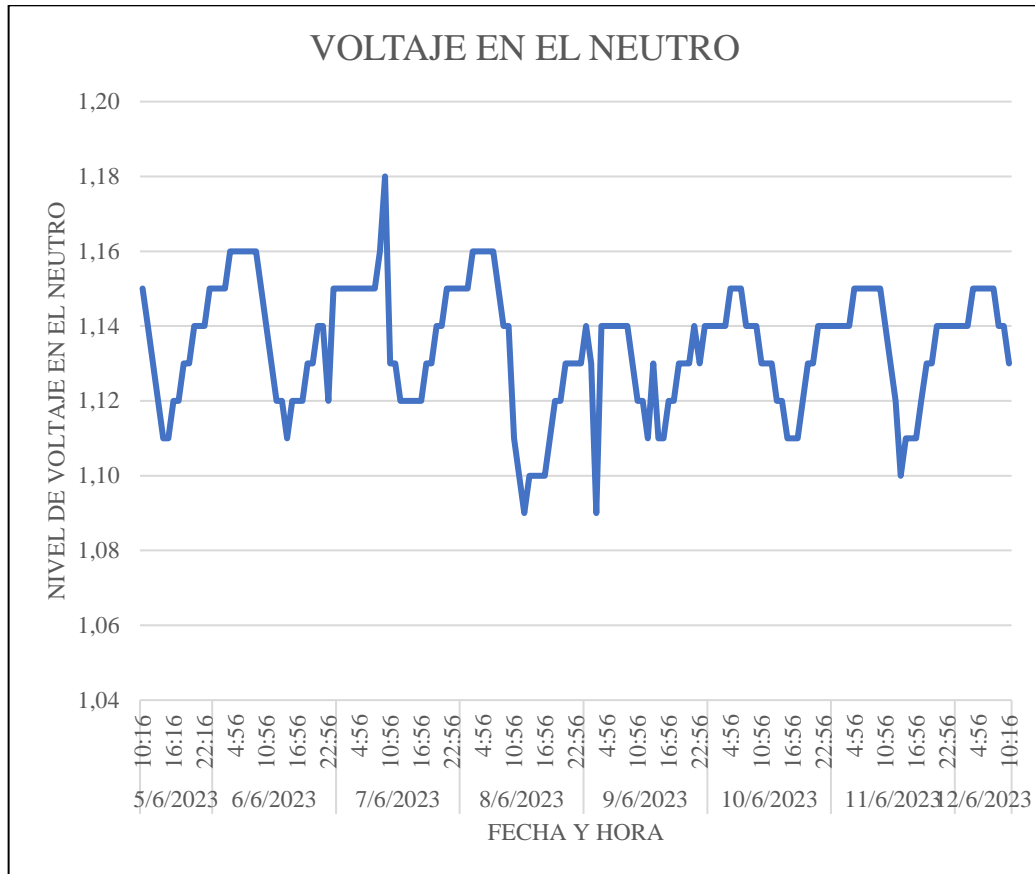


Figura 5. 5. Nivel de Voltaje en el Neutro.

1.25.1.4. Desequilibrio de voltaje del transformador 100KVA

De acuerdo con la norma IEEE 1159 la tolerancia al desequilibrio de voltaje es de 0.5% a 2%. De acuerdo con la tabla 5.9, el desequilibrio de voltaje es del 0.37% que está dentro de la regulación concluyendo que no se encuentra desequilibrado el voltaje.

Tabla 5. 8. Desequilibrio de voltaje.

V₁	V₂	V₃	Vmax	Vmed	%D	Observaciones
218,22	219,15	219,89	219,89	219,09	0,37%	Dentro de la norma

1.25.2. Análisis de corriente de Fase (Línea)

La corriente de fase eléctrica promedio aproximado durante las horas normales de funcionamiento es de 31,03 amperios. La figura 5.6 muestra el pico máximo de corriente de 75,2 amperios que se produjo a las 12:56 de la tarde. Esto puede ser causado por el arranque de maquinaria o quipos, estas corrientes altas pueden provocar sobrecalentamiento en los equipos

y causar sus fallos operacionales. A partir de las 18:06 la corriente mínima es de 0,40 amperios y se estabiliza a las 8:48 de la mañana.

Tabla 5. 9. Nivel de corriente fase-nutro del transformador 100 kVA.

Fecha	Hora	Nivel de corriente	I. ph-AN	I. ph-BN	I. ph-CN	I. ph-Promedio	I. Neutro
05/06/2023	18:06	I. Mínima	0,40	0,40	0,20	0,33	0,20
		I. Media	31,03	30,16	31,68	30,96	0,21
05/06/2023	12:56	I. Máxima	75,20	74,60	77,80	75,87	0,30

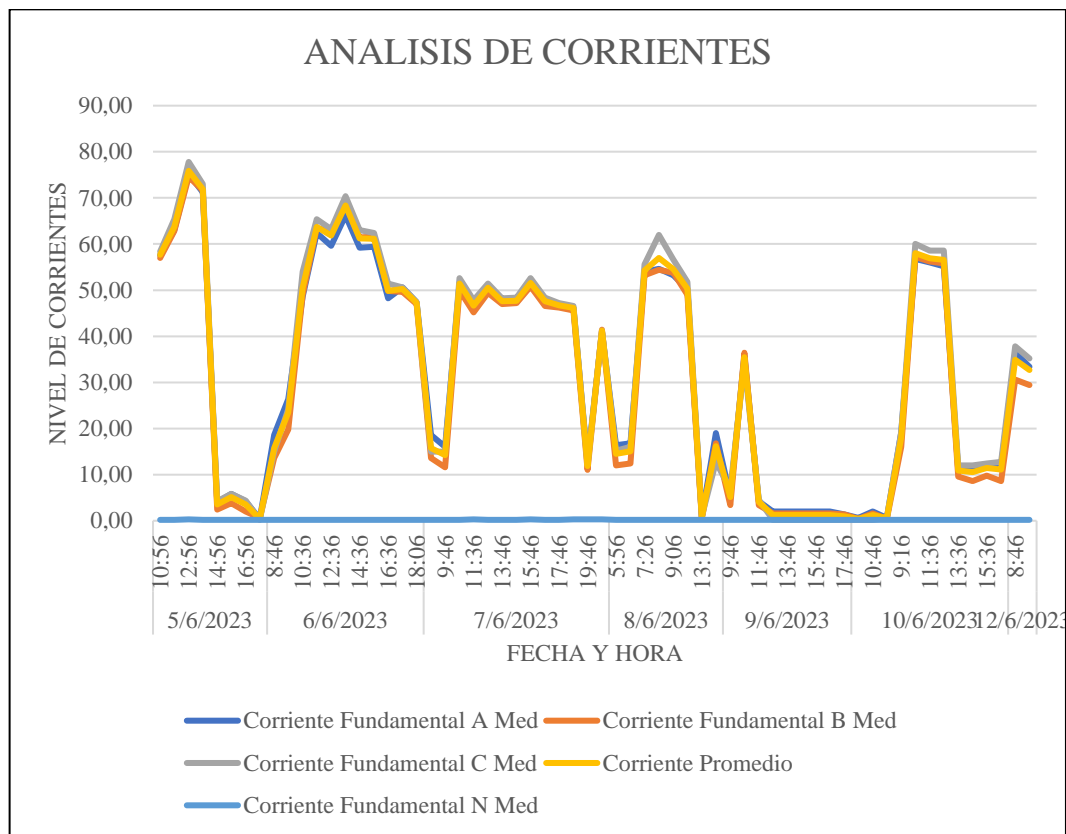


Figura 5. 6. Nivel de corrientes de fase del transformador de 100 kVA.

1.25.2.1. Desequilibrio de corriente del transformador 100kVA

Según las normas de calidad de la energía eléctrica para evitar problemas el desequilibrio en la corriente no debe superar el rango de 1,0% – 3,0%. De acuerdo con la tabla 5.11 el desequilibrio de corriente está en el 2,55% por lo tanto está dentro de la normativa. Los desequilibrios de corriente pueden degradar el rendimiento y reducir la vida útil de los equipos y motores presentes.

Tabla 5. 10. Desequilibrio de corriente en el transformador 100 kVA.

I₁	I₂	I₃	I_{max}	I_{med}	%D	Observaciones
75,20	74,60	77,80	77,80	75,87	2,55%	Dentro de la norma

Estos problemas pueden ser causados por conexiones flojas, contactos desgastados, conductores viejos, etc. Otra causa del desequilibrio de corriente puede ser la presencia de armónicos que necesitan ser mitigados. Los desequilibrios pueden ocurrir en cualquier momento en todo el sistema eléctrico conectado. Las cargas deben distribuirse uniformemente en todas las fases del tablero.

1.25.3. Demanda Eléctrica del Transformador 100kVA

Las mediciones de potencia de la industria se las efectuó cada 10 minutos con el analizador de redes Fluke 435 series II desde 05/06/2023 hasta el 12/06/2023, de acuerdo al procedimiento descrito en la regulación ARCERNR 002/20, los resultados obtenidos se indican en la tabla 5.11.

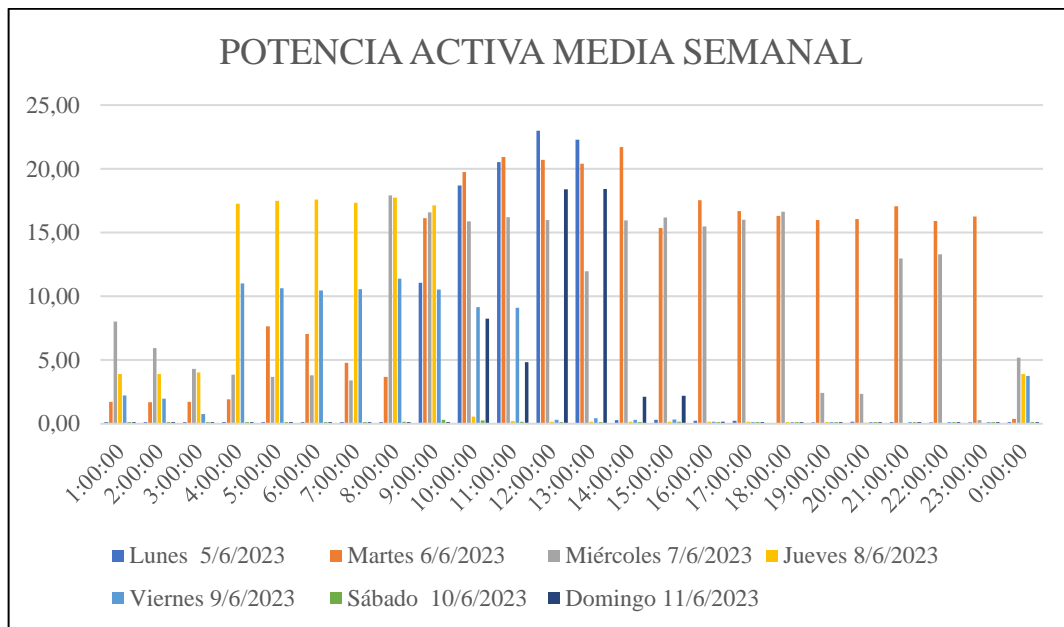


Figura 5. 7. Demanda de lunes a domingo del transformador de 100 kVA.

De acuerdo a la figura se puede observar el comportamiento de la industria donde el día miércoles 05 de junio del 2023 tiene la mayor actividad a las 12:56 de la tarde y el día con menor actividad es el 05 de junio del 2023.

Tabla 5. 11. Demanda eléctrica del transformador.

N.º	Hora	Lunes 5/6/2023	Martes 6/06/2023	Miércoles 7/6/2023	Jueves 8/6/2023	Viernes 9/6/2023	Sábado 10/6/2023	Domingo 11/6/2023
1	1:00:00	0,14	1,71	8,01	3,91	2,22	0,13	0,4
2	2:00:00	0,14	1,70	5,93	3,90	1,97	0,13	0,19
3	3:00:00	0,14	1,71	4,31	4,02	0,75	0,13	0,13
4	4:00:00	0,13	1,91	3,86	17,26	11,02	0,13	0,13
5	5:00:00	0,13	7,65	3,67	17,49	10,63	0,13	0,13
6	6:00:00	0,13	7,04	3,80	17,58	10,46	0,13	0,13
7	7:00:00	0,13	4,78	3,39	17,34	10,55	0,13	0,13
8	8:00:00	0,13	3,67	17,91	17,74	11,39	0,15	0,13
9	9:00:00	11,07	16,13	16,58	17,15	10,54	0,31	0,13
10	10:00:00	18,70	19,76	15,87	0,57	9,16	0,25	8,25
11	11:00:00	20,54	20,92	16,22	0,21	9,09	0,16	4,82
12	12:00:00	22,99	20,70	15,98	0,15	0,30	0,14	18,39
13	13:00:00	22,18	20,41	11,96	0,15	0,44	0,14	18,41
14	14:00:00	0,29	21,70	15,95	0,15	0,32	0,14	2,12
15	15:00:00	0,32	15,36	16,18	0,15	0,33	0,15	2,20
16	16:00:00	0,23	17,53	15,49	0,16	0,15	0,13	0,16
17	17:00:00	0,24	16,68	16,00	0,15	0,13	0,13	0,14
18	18:00:00	0,04	16,31	16,63	0,13	0,13	0,13	0,13
19	19:00:00	0,10	15,97	2,43	0,13	0,13	0,13	0,14
20	20:00:00	0,17	16,07	2,35	0,08	0,13	0,13	0,14
21	21:00:00	0,13	17,07	12,98	0,05	0,13	0,13	0,14
22	22:00:00	0,12	15,91	13,30	0,03	0,13	0,13	0,14
23	23:00:00	0,12	16,27	0,29	0,03	0,13	0,13	0,14
24	24:00:00	0,14	0,39	5,19	3,90	3,74	0,13	0,13

1.25.4. Potencia Activa

La siguiente tabla 5.12 se detallan las potencias mínimas, medias y máximas de cada fase. Donde se constató que la potencia activa varía en las tres fases siendo la fase C la de mayor valor con una potencia máxima de 7,85kW, el 05/06/2023 a las 12:56 de la tarde y la mínima se registró en las fases A y C a las 18:06 de la tarde con un valor de 0,01kW y 0,01kW respectivamente.

Tabla 5. 12. Potencia activa en as tres fases.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	05/06/2023		05/06/2023
HORA	12:56:00		18:06:00
kW _A	7,42	1,65	0,01
kW _B	7,72	1,60	0,02
kW _C	7,85	1,70	0,01
TOTAL	22,99	4,95	0,04

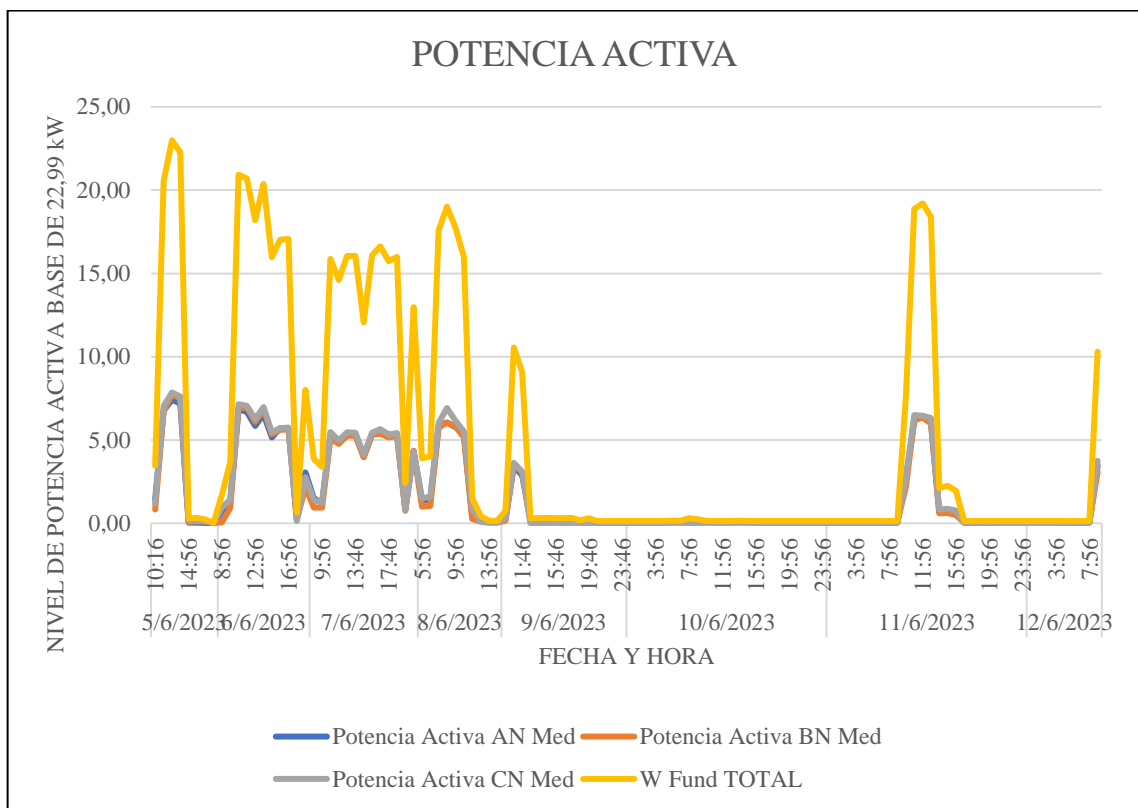


Figura 5. 8. Niveles de potencia activa trifásica.

La Figura 5.8, se puede ver el comportamiento del transformador de la industria, donde la mayor actividad se da el 05 de junio del 2023 a partir de las 12:56 de la tarde con una potencia máxima total de 22,99 kW y existe una potencia mínima total de 0,04 kW a la 18:06 el 05 de junio del 2023, la potencia de trabajo se normaliza a partir de las 9:00 en un promedio total de 4,95 kW. Hay que aclarar que la empresa los sábados y domingos no laboran a excepción que tenga pedidos los días mencionados.

1.25.5. Potencia Reactiva

Tabla 5.13 se presenta los valores de la potencia reactiva tomando en cuenta los valores máximos, mínimos y promedio de cada fase, así como la potencia reactiva total del sistema.

Tabla 5. 13. Niveles de potencias reactivas.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	05/06/2023		05/06/2023
HORA	12:56:00		18:06:00
kVAR _A	3,42	0,51	0,02
kVAR _B	3,51	0,41	0,01
kVAR _C	3,70	0,52	0,01
TOTAL	10,63	1,43	0,04

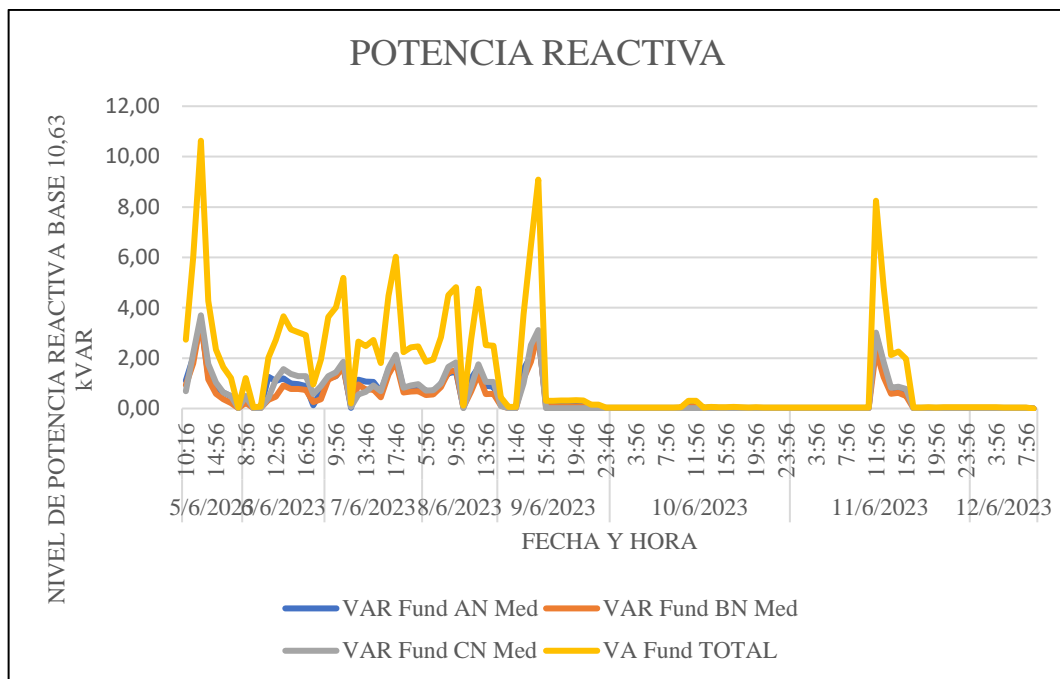


Figura 5. 9. Niveles de potencia reactiva trifásica.

Se registra una potencia máxima total de 10,63 kVAR a partir de las 12:56 de la tarde el 05 de junio del 2023 y existe una potencia mínima total de 0,04 kVAR a las 18:06 de la tarde el 05 de junio del 2023, a partir de las 09:00 de la mañana la potencia de trabajo se normaliza en un promedio total de 1,43 kVAR. Es el mismo caso que el expuesto en la parte de la potencia activa, siendo los sábados y domingos que permanece cerrada la industria.

1.25.6. Potencia Aparente

Se registra una potencia máxima total de 22,99 kVA a partir de las 12:56 de la tarde el 05 de junio del 2023 y existe una potencia mínima total de 0,04 kVA a las 18:06 de la tarde el 05 de

junio del 202, a partir de las 9:00 de la mañana la potencia de trabajo se normaliza en un promedio total de 4,05 kVA a partir de las 09:00.

Tabla 5. 14. Niveles de potencias aparentes.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	05/06/2023		05/06/2023
HORA	12:56:00		18:06:00
kVA _A	8,39	1,36	0,02
kVA _B	8,22	1,30	0,01
kVA _C	8,68	1,39	0,01
TOTAL	22,29	4,05	0,04

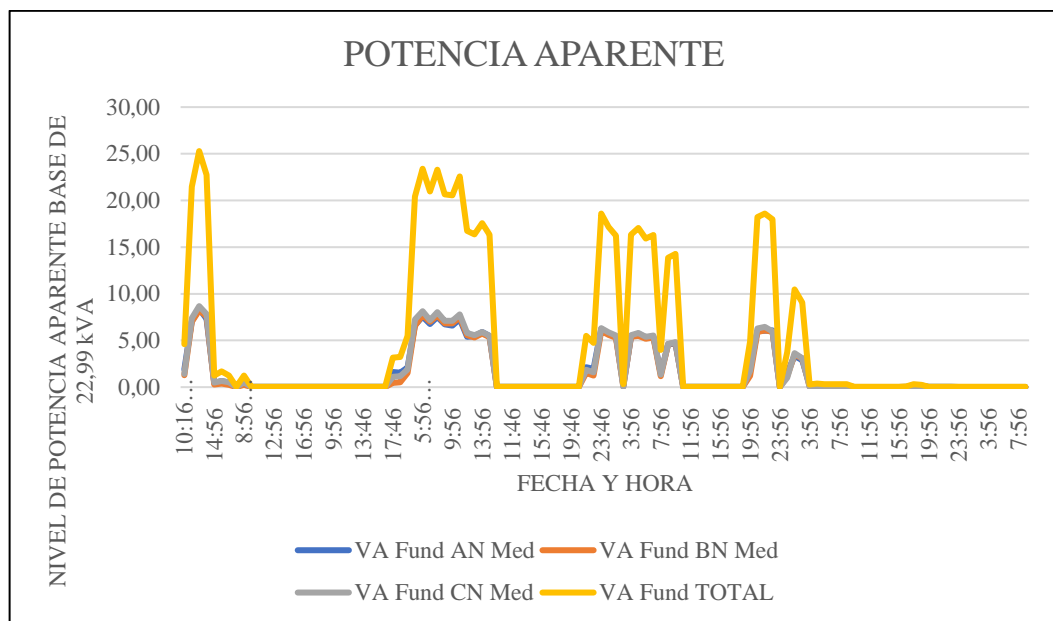


Figura 5. 10. Niveles de potencias aparentes trifásicas.

La salida del transformador industrial es de 100kVA, según los datos tabulados, el consumo total de energía es de 22,29 kVA. Se concluye que el transformador no se encuentra sobrecargado y cuenta con una potencia sobrante de 77,71 kVA para el crecimiento de la carga futura.

1.25.7. Análisis del Factor de Potencia

En la tabla 5.15 se han registrado los valores del factor de potencia correspondientes a las tres fases y los valores totales correspondientes a este transformador, de donde se puede apreciar que estos valores se encuentran fuera de rango permitido por la ARCERNNR 025/2022

Tabla 5. 15. Niveles del factor de potencia.

FECHA	HORA	Factor de potencia (F.P.)	Referencia Pliego Tarifario 025/2022	F.P. Total	Observaciones
12/06/2023	08:36	F.P. Mínima	0,92	0,18	Fuera de la norma
		F.P. Media	0,92	0,47	Fuera de la norma
07/06/2023	10:06	F.P. Máxima	0,92	0,99	Dentro de la norma

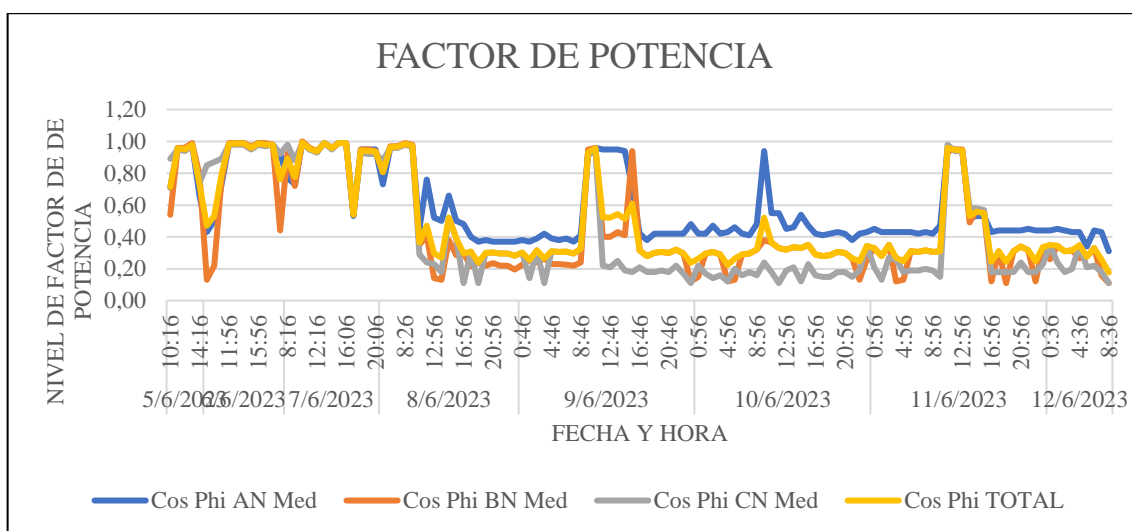


Figura 5. 11. Nivel de factor de potencia.

De acuerdo con el artículo 27 de la codificación de normas tarifarias, se impondrán sanciones a los clientes que registren un factor de potencia medio mensual inferior a 0,92. La industria tiene un factor de potencia medio de 0,47, el cual no cumple con el límite regulatorio de 0,92 y está sujeto a sanciones por parte de la empresa distribuidora de electricidad de Cotopaxi.

1.25.8. Distorsión armónica total de voltaje

Determinar si los armónicos de voltaje están presentes en el sistema eléctrico de una empresa requiere de un análisis de los niveles de THD de la industria. Según la norma IEEE 519, no debe exceder el 8% para Tensiones inferiores a 1,0 kV.

Los detalles de los resultados obtenidos a partir de los datos recopilados por el analizador de energía, se muestran en la tabla 5.16.

Tabla 5. 16. Distorsión armónica total de voltaje.

Fecha	Hora	THD Voltaje	THD Promedio %	THD LA %	THD LB %	THD LC %	Referencia IEEE 519	Observación
12/06/2023	2:56	THD Mínimo	0,54	0,65	0,46	0,51	8%	Dentro de la norma
		THD Promedio	1,16	1,27	1,03	1,17	8%	Dentro de la norma
05/06/2023	14:36	THD Máximo	1,85	1,90	1,77	1,89	8%	Dentro de la norma

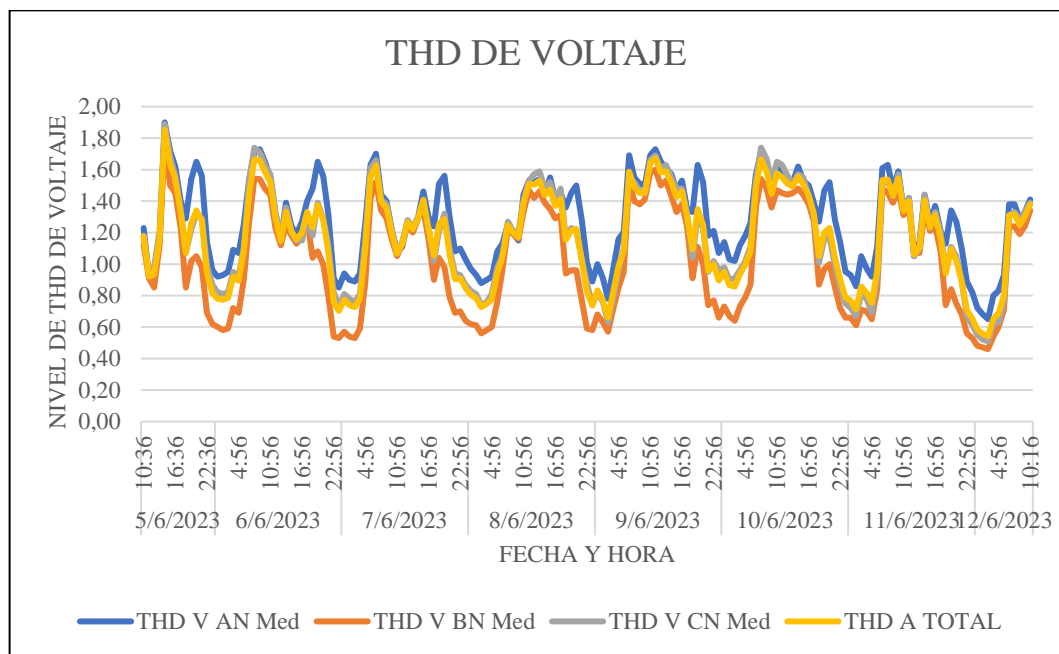


Figura 5. 12. Nivel de THD de Voltaje.

El límite de THD de tensión para las tres fases es de 1,85%, que se encuentra dentro del rango reglamentario del 8%.

En base a los datos obtenidos, se puede concluir que no existen armónicos de tensión.

1.25.9. Armónicos individuales de voltaje

Según el estándar IEEE 519 dice que cada nivel de armónico individual no debe superar el 5%. Los resultados de la Tabla 5.17 muestran que ninguno de los armónicos de tensión asociados con el transformador supera el 5 % especificado para tensiones inferiores a 1 kV.

Tabla 5. 17. Nivel de distorsión armónica individual de voltaje.

Armónicos de voltaje		Referencia IEEE 519	Observación
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %		
3	0,41	5%	Cumple
5	1,67	5%	Cumple
7	0,77	5%	Cumple
9	0,21	5%	Cumple
11	0,62	5%	Cumple
13	0,51	5%	Cumple

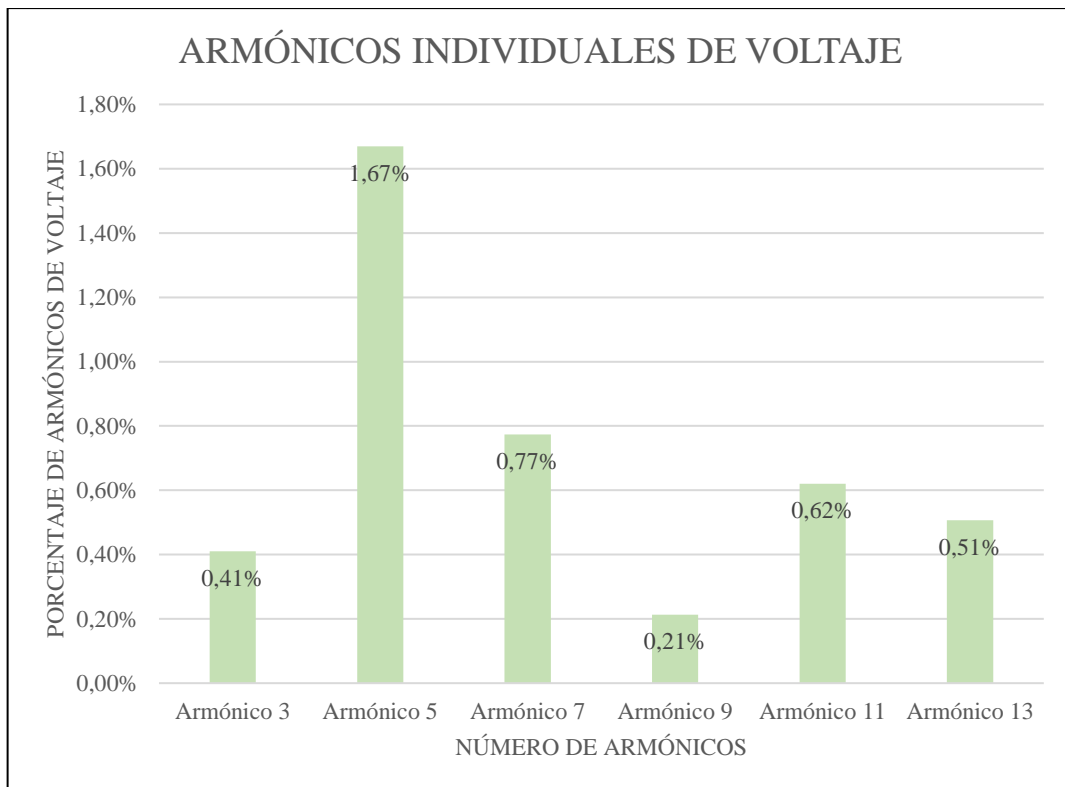


Figura 5. 13. Armónicos individuales de voltaje.

La armónica tercera de voltaje con un valor del 0,41%, la armónica quinta de voltaje con un valor de voltaje de 1,67%, la armónica séptima con un valor del 0,77%, la armónica novena con un valor del 0,21%, la armónica decimoprimer con un valor del 0,62% y la armónica decimotercera con 0,51%.

La Figura 5.13 ilustra visualmente los resultados obtenidos. El porcentaje más alto es 1.67% en el quinto armónico y el menor es el noveno armónico.

1.25.10. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del transformador

La tabla 5.18 muestra el valor porcentual de cada nivel de armónico de tensión en la línea del neutro. En general, el conductor neutro tiene un alto porcentaje de armónico individual del tercer orden y múltiplos de tres. Para ello se comparó con los valores especificados en la norma IEEE 519. El transformador tiene armónicos típicos, pero no superan el 5% por lo que no es problema, pero podría llegar a serlo en el futuro.

Tabla 5. 18. Armónicos individuales de voltaje en el neutro.

Armónicos de voltaje		Referencia IEEE 519	Observación
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %		
3	4,48	5%	Cumple
5	1,72	5%	Cumple
7	1,34	5%	Cumple
9	0,76	5%	Cumple
11	0,77	5%	Cumple
13	0,87	5%	Cumple

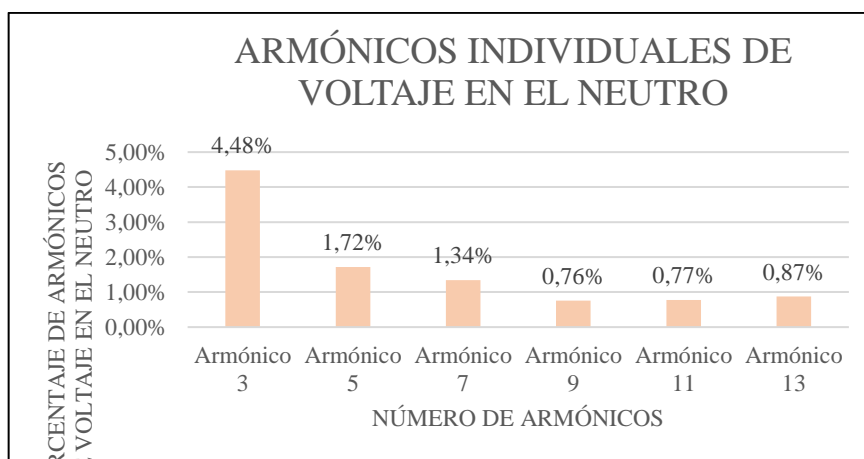


Figura 5. 14. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro.

Se visualiza en la Figura 5.14, los diferentes niveles de armónicos de voltaje en el neutro expresado en porcentajes confirmando que no supera el 5% de la referencia.

1.25.11. TDD de corriente del transformador

La Distorsión Total de la Demanda TDD es la distorsión armónica basada en la máxima corriente de demanda (componente fundamental). Esta es una medida de la distorsión armónica de corriente total en el PCC (punto de conexión común) a través de las cargas conectadas.

De acuerdo a la regulación IEEE-519, para determinar si la industria tiene presencia de armónicos de corriente, hay que analizar el nivel de TDD de Corriente que tiene la industria y el primer paso es calcular la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea.

$$\alpha = \frac{I_{CC}}{I_{Lpu}} \quad (5.1)$$

Para calcular la corriente de cortocircuito, necesitamos conocer el valor de la reactancia que figura en la placa de identificación del transformador. En este caso $X_{pu} = 3\%$. Se calcula utilizando la ecuación (5.2).

$$I_{CC} = \frac{1}{X_{pu}} \quad (5.2)$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,03} \quad (5.3)$$

$$I_{CC} = 33.33 \text{ A} \quad (5.4)$$

Para hacer esto, necesitamos calcular la corriente de línea y se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_L = \frac{S}{V_{f-f}} \quad (5.5)$$

$$I_L = \frac{100000VA}{127 * \sqrt{3}} \quad (5.6)$$

$$I_L = 454,61 \text{ A} \quad (5.7)$$

Para determinar el factor de distorsión requerido y los armónicos de corriente individuales, necesitamos calcular la corriente de línea por unidad.

$$I_{Lpu} = \frac{I_{fase}}{I_L} \quad (5.8)$$

Aplicando a lo anterior se obtiene la tabla 5.19

Tabla 5. 19. Relación de la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu del transformador.

Fases	X_{pu}	I_{cc}	I_{Lpu}	I_{cc}/I_{Lpu}
L ₁	0,03	33,33	0,165	201,51
L ₂	0,03	33,33	0,164	203,13
L ₃	0,03	33,33	0,171	194,78

De acuerdo a la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea I_{cc}/I_{Lpu} está dentro del rango $100 < 1000$, lo que corresponde un valor de TDD correspondiente al 15%.

Tabla 5. 20. Distorsión total de la demanda (TDD).

Hora	Fecha	TDD	L _A %	L _B %	L _C %	TDD Promedio %	Referencia IEEE 519	Observación
11:16	08/06/2023	Máximo	5,61	6,16	4,97	5,58	15%	Dentro de la norma
		Promedio	48,12	33,01	27,27	36,13	15%	Fuera de la norma
16:06	08/06/2023	Mínimo	113,94	64,30	44,54	80,93	15%	Fuera de la norma

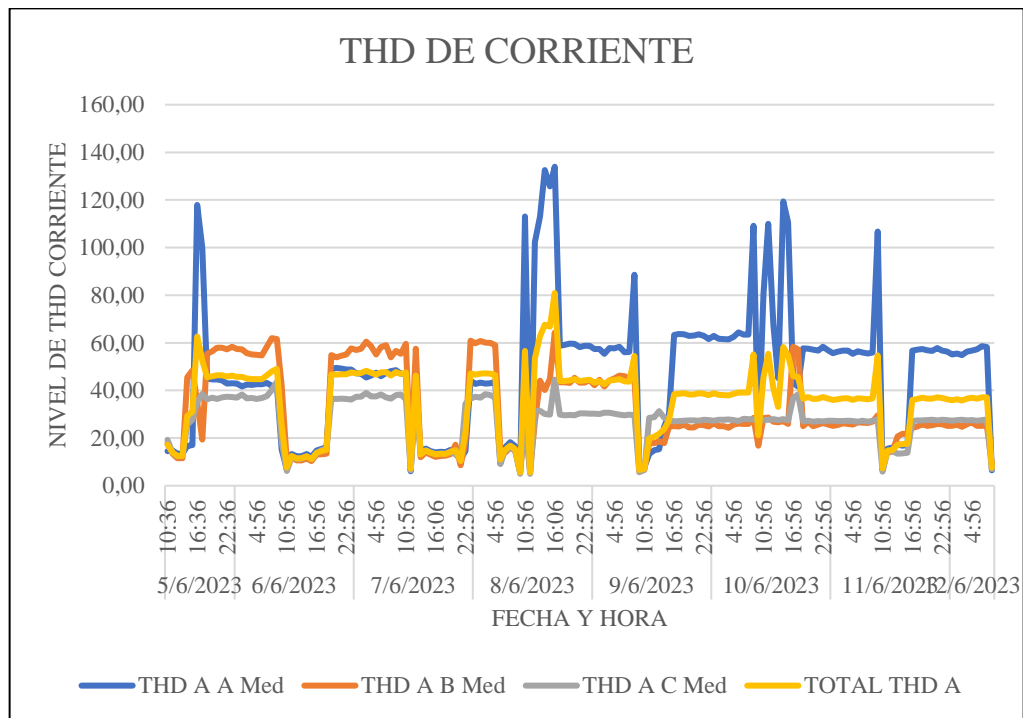


Figura 5. 15. Nivel de la distorsión total de armónicos.

El límite del THD de corriente de las tres líneas es de 44,54% que se produce el día 08 de junio del 2023 a las 16:06 de la tarde, el mismo que se encuentra fuera de los rangos dictados por la regulación que es el 15%.

De acuerdo a los datos obtenidos se puede concluir que existe un porcentaje significativo con el que sobrepasa, es necesario disminuir el valor para evitar problemas futuros.

5.4.12. Distorsión individual de corriente

De acuerdo a la regulación internacional los armónicos individuales de corriente deben estar por debajo del 12% en los armónicos del 3 al 9 y el 5,5% a partir del armónico 11.

Tabla 5. 21. Distorsión individual de corriente.

Nivel armónico	Total, de armónicos en %	Limite – IEEE 519	Observaciones
3	20,76	12%	No cumple
5	12,58	12%	No cumple
7	12,43	12%	No cumple
9	16,95	12%	No cumple
11	6,32	5,5%	No cumple
13	5,17	5,5%	Cumple

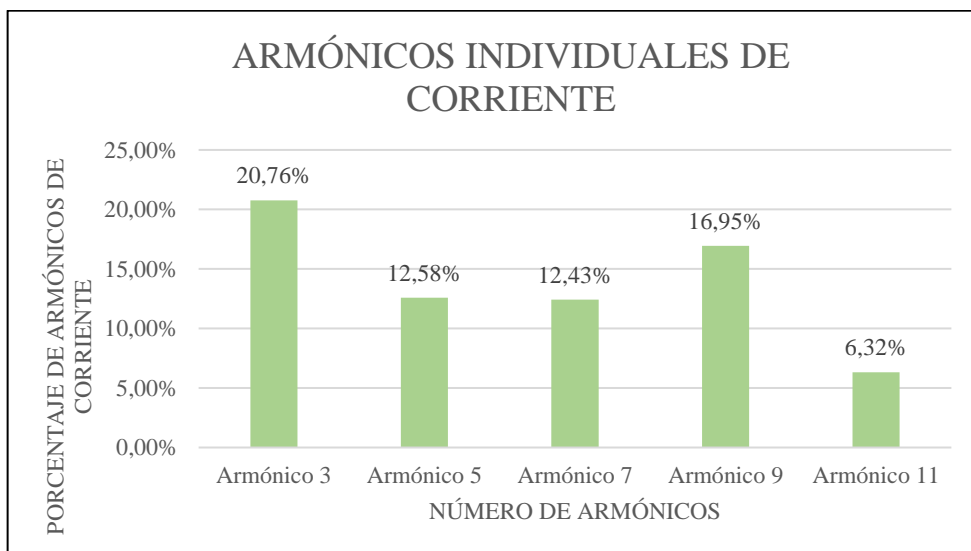


Figura 5. 16. Porcentajes de armónicos de corriente individuales.

La armónica tercera de voltaje con un valor del 20,76%, la armónica quinta de voltaje con un valor de 12,58%, la armónica séptima con un valor de 12,43%, la armónica novena con un valor del 16,95%, la armónica decimoprimer con un valor del 6,32%, la armónica decimotercera con un valor del 5,17%. De acuerdo a este análisis se observa que el armónico más elevado

que presenta el transformador es armónico en el orden tercero y noveno los que están por encima de los valores impuestos por la norma y con valores demasiados significativos, por lo que es necesario corregir el valor. La presencia de armónicos de corriente puede ocasionar daños en el aislamiento de los conductores, o el daño permanente en equipos electrónicos o motores.

5.4.13.1. Armónico total de corriente en el neutro del transformador

La presencia de armónicos en el conductor neutro suele estar provocada por un desequilibrio de carga en el sistema eléctrico. Para validar los resultados obtenidos, se compara con los valores establecidos por la norma IEEE 519, esto se muestra en la tabla 5.20.

Tabla 5. 22. Armónico total en el neutro.

Fecha	Hora	Nivel de TDD	TDD neutro en %	TDD Promedio en %	Referencia IEEE 519	Observación
12/06/2023	1:55	Mínima	0,49	0,49	12%	Cumple
		Promedio	1,97	1,97	12%	Cumple
08/06/2023	9:56	Máxima	7,51	7,51	12%	Cumple

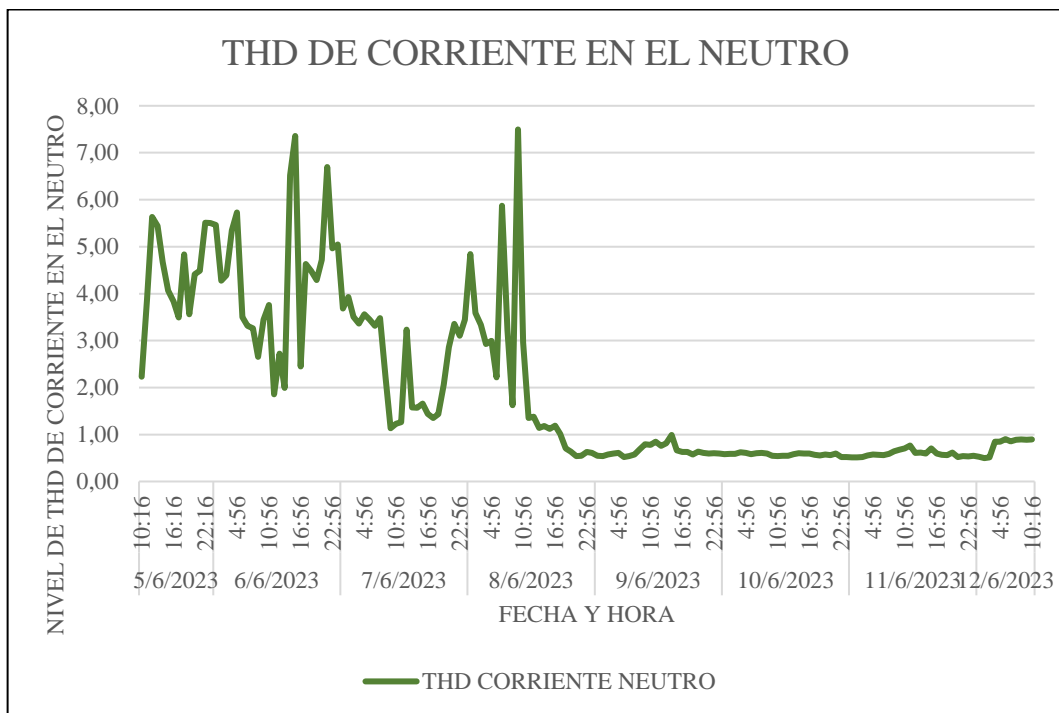


Figura 5. 17. Nivel de armónicos de corriente en el neutro.

Tras analizar la tabla y el grafico, podemos concluir que el nivel medio de armónicos del neutro es de 7,51%, que se encuentra dentro del 12% especificado por la norma internacional IEEE 519.

1.25.11.1. Armónicos individuales de corriente en el neutro

Tabla 5. 23. Armónicos individuales de corriente en el neutro.

Nivel de armónicos	Total, de armónicos %	Referencia IEEE 519	Observaciones
3	0,89	12%	Cumple
5	0,54	12%	Cumple
7	0,35	12%	Cumple
9	0,27	12%	Cumple
11	0,12	5,5%	Cumple
13	0,19	5,5%	Cumple

Con base en las normas IEEE 519, se analiza los sistemas eléctricos en busca de armónicos de corriente y determine si estos niveles cumplen con las disposiciones de las normas.

De acuerdo con las normas internacionales, los armónicos de corriente individuales deben ser inferiores al 12% desde el tercer armónico al noveno armónico y menos del 5,5% desde el onceavo armónico.

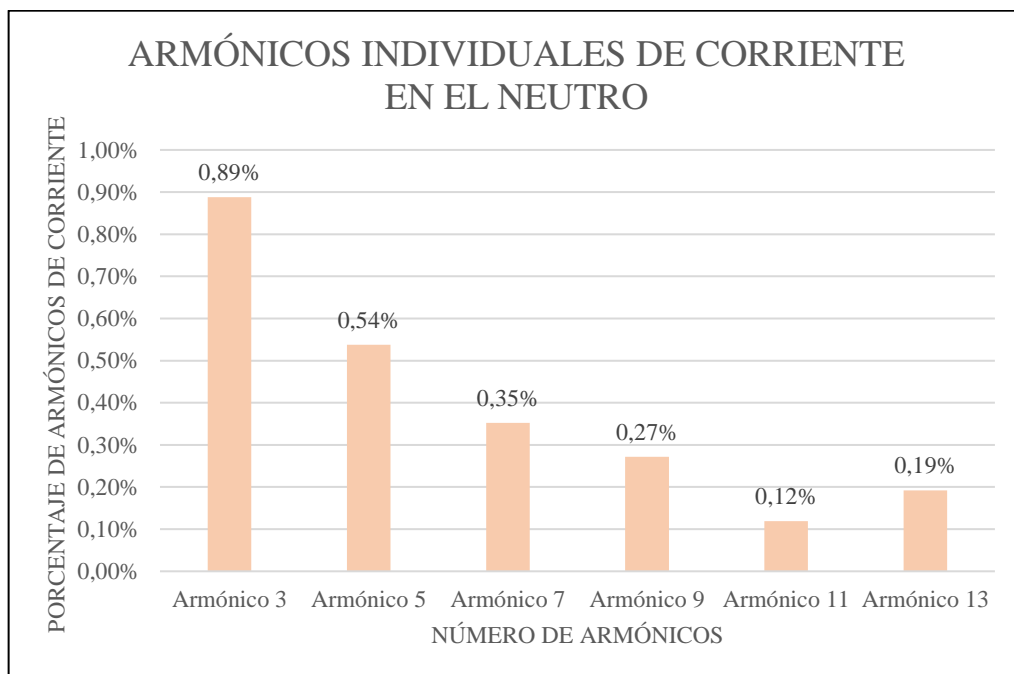


Figura 5. 18. Porcentaje de armónicos individuales de corriente en el neutro.

La armónica tercera de corriente con un valor del 0,89%, la armónica quinta con un valor de 0,54%, la armónica séptima con un valor del 0,35%, la armónica novena con un valor del 27%,

la armónica decimoprimeras con un valor del 0,12% y la armónica decimotercera con el 0,19%. De acuerdo a este análisis se observa que el transformador no presenta armónicos en el neutro.

1.25.11.2. Presencia de Flickers en el transformador

Según la normativa ARCERNNR 002/20, el límite de Flickers en el punto de medida no debe superar la unidad. Se realiza el análisis respectivo para el transformador de 100kVA con los siguientes resultados.

Tabla 5. 24. Niveles de Flickers del transformador.

Fecha	Hora	Flicker	Pst1	Pst2	Pst3	Pst Promedio	ARCERNNR 002/20
08/06/2023	13:36	Mínimo	0,01	0,01	0,01	0,01	Cumple
		Promedio	0,03	0,03	0,02	0,03	Cumple
08/06/2023	11:06	Máximo	0,25	0,23	0,22	0,23	Cumple

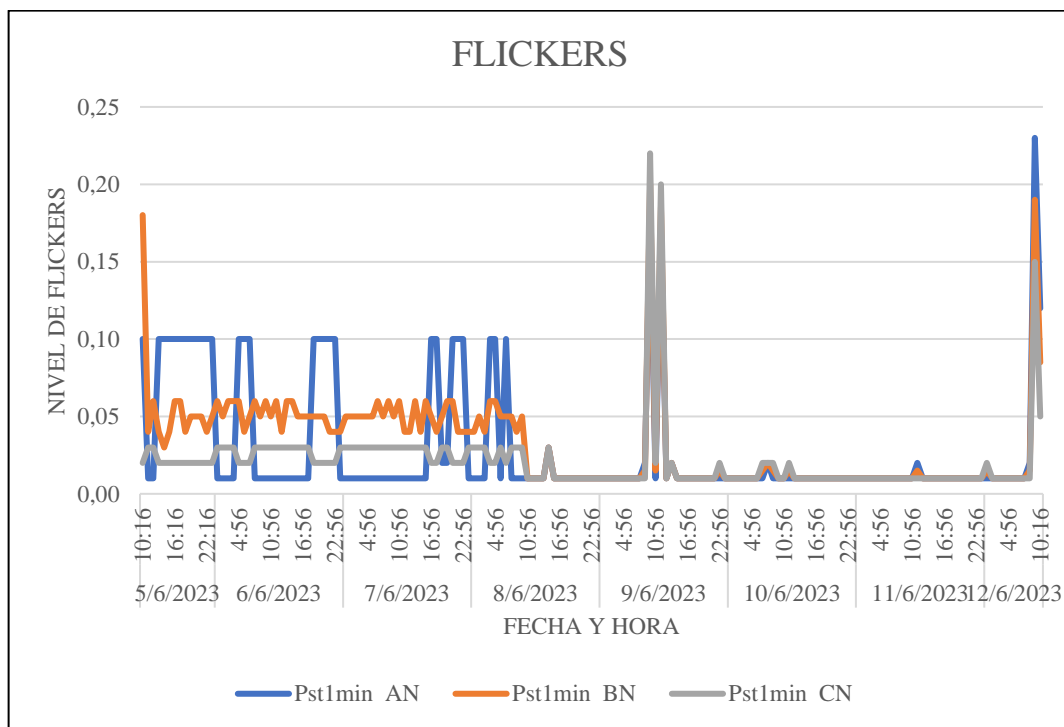


Figura 5.19. Nivel de Flickers

El resultado es un valor medio de 0,03, que no supera las unidades dadas en norma ARCENNR 002/20.

1.25.12. SAG y SWELLS en el transformador

1.25.12.1. SAG en el transformador

SAG es una reducción de voltaje RMS temporal del 10% o más por debajo del rango nominal especificado durante un periodo de ½ ciclo a 1 minuto. La normativa IEEE Std 1159 define los criterios que se deben cumplir para evitar las caídas de voltaje en los sistemas eléctricos industriales, y la siguiente tabla describe los límites.

Tabla 5. 25. Límites de la normativa.

Categoría	Duración Típica	Voltaje típico de magnitud
SAG	>3s -1 min	0,1-0,9 pu

Una de las principales causas de las caídas de voltaje es el arranque de grandes motores de inducción, que consumen cantidades significativas de corriente, provocando caídas rápidas de voltaje y disparos innecesarios de equipos sensibles, lo que genera pérdidas económicas para la industria.

Tabla 5. 26. Nivel de SAGS.

	SAGS	Referencia - IEEE Std 1159	Observaciones
L_{A-B}	0,81	0,1-0,9 pu	Si cumple
L_{B-C}	1,02	0,1-0,9 pu	No cumple
L_{C-A}	1,83	0,1-0,9 pu	No cumple

1.25.12.2. SWELL en el transformador

Estos se definen como aumentos transitorios en el voltaje RMS mayores o iguales al 10% por encima del voltaje del dispositivo (voltaje nominal) durante medio ciclo a un minuto.

El estándar IEEE Std 1159 especifica los criterios que se deben cumplir para evitar la presencia de sobretensiones o swells en los sistemas eléctricos industriales. Este límite se muestra en la tabla 5.27.

Tabla 5. 27. Límites de la normativa.

Categoría	Duración Típica	Voltaje típico de magnitud
SWELL	>3s -1 min	1,1-1,2 pu

Se obtienen datos de tensión RMS de medio ciclo para analizar si existe swells en el sistema eléctrico. Los resultados se muestran en la tabla 5.28.

Tabla 5. 28. Nivel de SWELLS.

	SWELL	Referencia IEEE Std 1159	Observaciones
L_{A-B}	0,41	1,1-1,2 p. u	Cumple
L_{B-C}	1,46	1,1-1,2 p. u	No cumple
L_{C-A}	1,05	1,1-1,2 p. u	No cumple

Los resultados muestran la presencia de Swells en el transformador de 100 kVA, que es consecuencia del funcionamiento de grandes motores y de las fluctuaciones de tensión en la industria.

1.25.13. Estado actual del sistema eléctrico de la empresa “INDUPLAES”

Se concluyó que el sistema eléctrico de “INDUPLAES” presenta problemas como caída de tensión, bajo factor de potencia, presencia de armónicos de corriente, desequilibrio de corriente y huecos en el transformador de 100 kVA. Esto se debe a que todos estos parámetros superan los límites máximos permitidos por las normas IEEE 1159, IEEE 519 y ARCERNR 002/20. La tabla 5.29 describe el estado actual del sistema según el análisis realizado.

Tabla 5. 29. Estado actual del sistema eléctrico.

PARÁMETROS	RESULTADOS
Potencia Activa (kW)	22,9
Potencia Reactiva (kVAr)	0,249
Potencia Aparente (kVA)	22,9
Fp	0,99
PERDIDAS	
P(kW)	0,059
Q(kVAr)	0,146
% de Cargabilidad del Transformador	22,9
TRANSFORMADOR 100 kVA	
Potencia Nominal	100 kVA
Cargabilidad del sistema	22,9
Reserva	77,1
CAÍDA DE VOLTAJE	
V A-B	7,99 %
V B-C	7,98 %
V C-A	7,04 %
VOLTAJE EN EL NEUTRO	
VN	1,17
DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE	
%D	0,36 %
DESEQUILIBRIO DE CORRIENTE	
%D	2,54 %
POTENCIAS TOTALES	
Potencia Activa (kW)	22,9
Potencia Reactiva (kVAr)	0,249
Potencia Aparente (kVA)	22,9
PERDIDAS	

P(kW)	0,059
Q(kVAr)	0,146
FACTOR DE POTENCIA	
FP	0,99

1.26. SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN EL SOFTWARE ETAP

Utilizando la información obtenida del sistema eléctrico de la empresa “INDUPLAES”, se modeló el sistema en el software ETAP 19.0.1 para confirmar el análisis realizado por el analizador de redes, el cual ayuda a identificar los puntos más críticos de la red.

1.26.1. Procedimiento para la simulación.

- **Selección de datos.**

Para simular el sistema del transformador de 100kVA e utilizan datos de carga, transformador, protección, espaciamento de carga, estos parámetros se pueden apreciar en la tabla 5.3 y 5.4, las características del transformador se toman de la tabla 5.1.

- **Definición de parámetros a ser ingresados en ETAP**

Los parámetros elegidos son las potencias activa, reactiva y aparente, la corriente, el voltaje de línea y el factor de potencia.

- **Ingreso de las fuentes de alimentación.**

Se ingresa un equivalente de red que está establecido en el software ETAP, además con los datos del transformador de la tabla 5.1, y por último se ingresan con los voltajes especificados los cuales son 13,8 kV y 0,22 kV.

- **Conexión de elementos y maquinas**

Con los datos de placa de la máquina, distancia, sección del conductor y protección, se procede a conectar las diferentes barras de suministro de energía a cada área de la empresa “INDUPLAES”.

1.26.2. Primer caso de estudio

1.26.2.1. Comparación de resultados entre el analizador de redes y el software ETAP

19.0.1

En la Tabla 5.30 se exhiben los valores totales de parámetros, además de sus respectivos porcentajes de error, que fueron contrastados entre el analizador de redes y el software ETAP 19.0.1, específicamente para el transformador de 100 kVA. Esta comparación se basó en los parámetros más significativos que se destacaron durante el análisis del apartado 5.4. El sistema simulado relacionado con este transformador se muestra en la Figura 5.20.

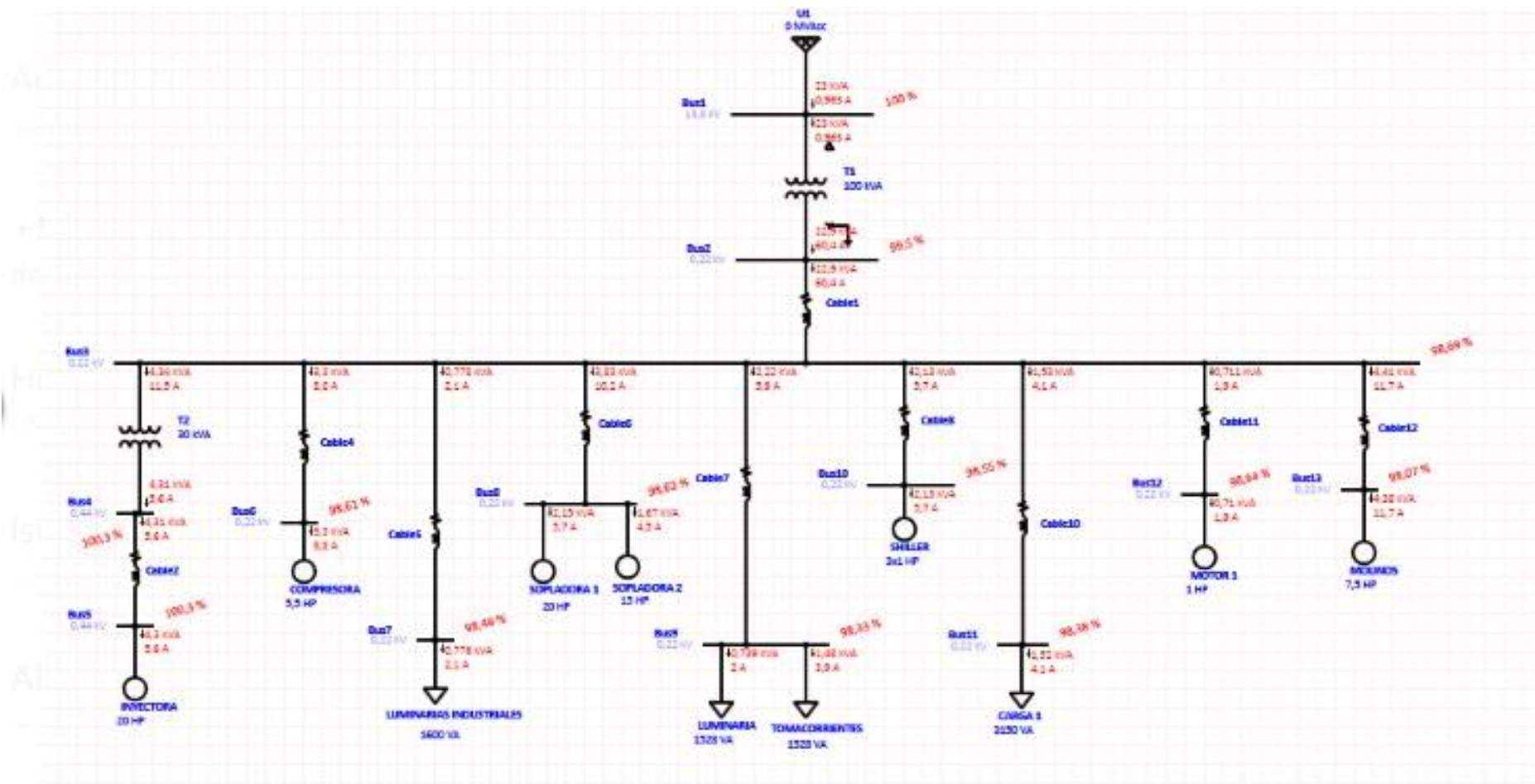


Figura 5.20. Simulación realizada en el transformador de 100 kVA.

En la Tabla 5.30 se muestra la variación que existe entre los datos reales registrados por el analizador de redes y el software ETAP 19.0.1, estas presentan un porcentaje de error menor al 5 % debido a que los datos ingresados al software pueden variar por errores humanos de registro.

Tabla 5.30. Parámetros del transformador 100 kVA

PARÁMETROS	ANALIZADOR DE REDES V	ETAP 19.0.1	ERROR
Voltaje máximo (V)	219,09	220,13	0,47%
Voltaje mínimo (V)	203,10	202,15	0,47%
Potencia activa total (kW)	22,99	22,9	0,39%
Potencia reactiva total (kVAr)	10,63	10,13	4,70%
Potencia aparente total (kVA)	22,99	22,9	0,39%
Factor de potencia	0,47	0,49	2%
ARMÓNICOS DE CORRIENTES			
3	20,76%	20,62%	0,67%
5	12,58%	12,51%	0,56%
7	12,43%	12,28%	0,67%
9	16,95%	16,22%	4,5%
11	6,32%	6,37%	0,79%
13	5,17%	5,40%	4,48%
ARMÓNICOS DE VOLTAJES			
3	0,41%	0,40%	2,43%
5	1,67%	1,69%	1,18%
7	0,77%	0,78%	1,28%
9	0,21%	0,20%	4,76%
11	0,62%	0,61%	1,61%
13	0,51%	0,50%	2%

- **Cargabilidad del transformador de 100 kVA**

Se llevó a cabo el cálculo de la capacidad de carga del transformador de 100 kVA de la empresa utilizando la potencia máxima del sistema obtenida a través del analizador de redes. Luego, esta capacidad se comparó con los resultados de la simulación realizada en el software ETAP 20.0.0, tal como se detalla en la Tabla 5.31. Como resultado, se determinó que el transformador de 100 kVA puede soportar una carga del 22,99%, dejando una reserva del 77,01%.

Tabla 5.31. Cargabilidad del transformador 100 kVA

TRANSFORMADOR	%CARGABILIDAD CALCULADO	%CARGABILIDAD ETAP 20.0.0	% ERROR
100 kVA	22,99%	22,65%	1,50%

1.26.3. Propuesta para la mitigación de armónicos

a) **Cálculo para el diseño del filtro armónico de todo el sistema eléctrico de la Industria.**

Potencia consumida del sistema = 22, 99 kW

Lo primero que se procede a realizar es el cálculo de los ángulos.

$$f_{p1}=0,47 \quad \theta_1 = \cos^{-1}(0,47) = 61,96$$

$$f_{p2}=0,98 \quad \theta_2 = \cos^{-1}(0,98) = 11,48$$

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

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

$$Q_{\text{eff}} = 22,99 (\tan (61,96) - \tan (11,48))$$

$$Q_{\text{eff}} = 23,11 \text{ kVAR}$$

Este valor en KVAR es el que se deberá instalar en total del sistema

El siguiente paso es calcular la reactancia efectiva del filtro.

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

$$X_{\text{eff}} = \frac{(220 \text{ v})^2}{23,11 \times 10^3}$$

$$X_{\text{eff}} = 10,90 \Omega \text{ x fase}$$

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

$$h = \frac{180}{60} ; h=3 ; \quad 3*6\%=0.18 ; \quad 3-0.18=2.82$$

Cálculo de la reactancia capacitiva.

$$X_c = \frac{(hx0.06)^2}{(hx0.06)-1} * X_{\text{eff}}$$

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

$$X_c = \frac{(2.82)^2}{(2.82)^2-1} * 10.90 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2*\pi*60*12.47} = 0,000213 \text{ F} = 0,213 \times 10^{-3} \text{ F}$$

$$X_c = 12.47 \Omega$$

$$C = 0.213 \text{ mF}$$

Debemos elegir un capacitor de valor comercial de 0.213 mF

Cálculo de la reactancia inductiva. -

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

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

$$X_L = \frac{12.47}{3^2}$$

$$L = \frac{1.39 \Omega}{2\pi \times 60}$$

$$X_L = \frac{12.47}{9}$$

$$L = 3.69 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$X_L = 1.39 \Omega$$

$$L = 3.69 \text{ mH}$$

Cálculo de la Resistencia del Filtro

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

$$R = \frac{1.39 \Omega \times 2.82}{20}$$

$$R = 0.196 \Omega$$

Cálculo de la Impedancia del Filtro

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

$$Z = 0.196 \Omega + j \left(2 \times \pi \times 60 \times 3.69 \times 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0.213 \times 10^{-3}} \right)$$

$$Z = 0.0705 \Omega + j (1.39 - 12.45)$$

$$Z = 0.0705 - j 11.06$$

Cálculo de los kVAR del Filtro

$$K_{\text{var}_{\text{filtro}}} = \frac{V_i^2 I - I}{X_c - X_L}$$

$$K_{\text{var}_{\text{filtro}}} = \frac{(220)^2}{12.47 - 1.39}$$

$$K_{\text{var}_{\text{filtro}}} = 4368.23 \text{ kVA}$$

$$K_{\text{var}_{\text{filtro}}} = 0.00437 \text{ MVA}$$

Se colocará un filtro pasivo porque los filtros pasivos se constituyen mediante el empleo de componentes reactivos, como bobinas y condensadores, que se conectan en paralelo con la carga. El propósito es lograr que estos elementos entren en resonancia con la frecuencia del armónico que se desea suprimir. De esta manera, la porción no deseada detectará un camino de impedancia mínima a través de estos componentes y será desviada hacia la tierra.

Los resultados de los cálculos de los elementos que conforma el filtro se han detallado en la siguiente Tabla

Tabla 5.32. Parámetros del Filtro

PARÁMETROS	RESULTADOS
X_c	12,47 ohm
X_L	1,39 ohm
C	0.213 mF
L	3.69 mH
R	0.196 ohm
Q_{eff}	23,11 kVAR

1.26.4. Resultados de la simulación

En la Tabla se realizó la comparación de los resultados obtenidos del diseño de un filtro pasivo implementado en el sistema eléctrico el cual permitirá corregir el factor de potencia a 0,96.

Tabla 5.33. Resultado del Factor de Potencia

	ANTES DEL FILTRO	DESPUÉS DEL FILTRO
Factor de Potencia	0,47	0,96

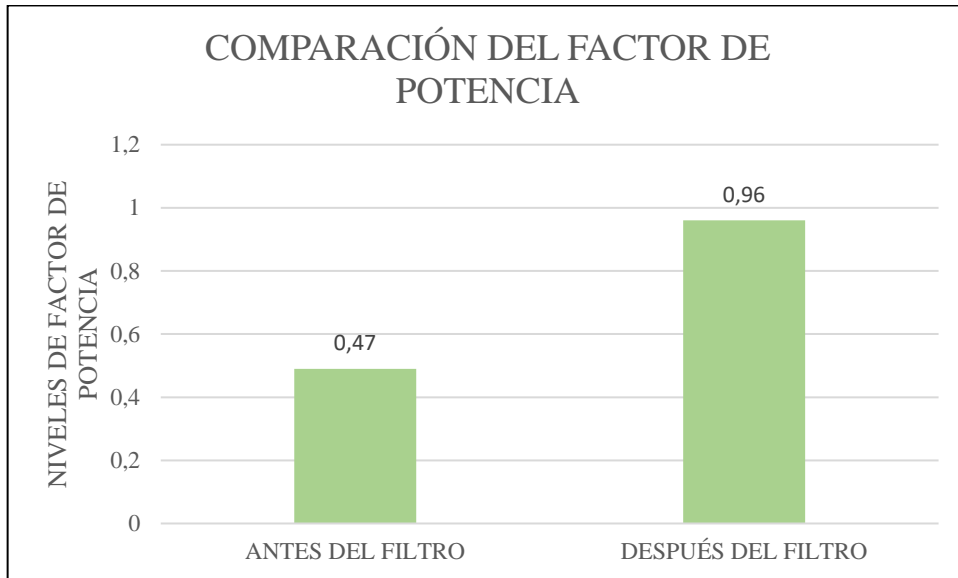


Figura 5.21. Comparación del Factor de Potencia

En la Tabla se realizó la comparación de los resultados obtenidos del diseño de un filtro pasivo implementado en el sistema eléctrico el cual permitirá mitigar el tercer armónico de 20,76% que es el más representativo a un 10,95% y a su vez la reducción de los armónicos de orden 5,7 y 9.

Tabla 5.34 Resultado de los armónicos

ARMÓNICOS DE CORRIENTE	ANTES DEL FILTRO	DESPUÉS DEL FILTRO
3	20,76%	10,95%
5	12,58%	8,27%
7	12,43%	8,15%
9	16,95%	9,36%
11	6,32%	4,20%
13	5,17%	3,80%

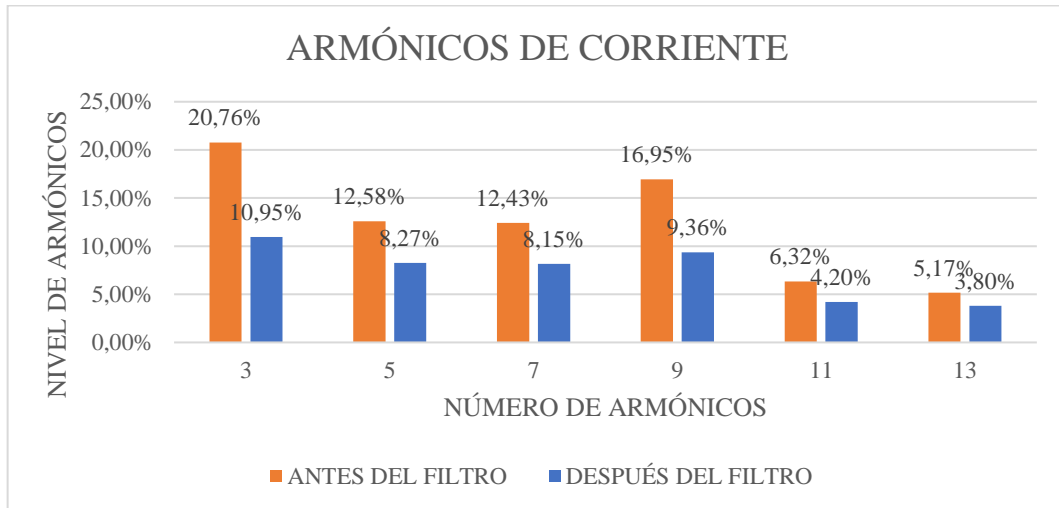


Figura 5.22. Comparación de armónicos de corriente

1.27. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)

1.27.1. Impacto Técnico

En términos técnicos, la implementación de las soluciones propuestas anteriormente es factible, ya que contribuirá a reducir y fortalecer el sistema eléctrico de la empresa "INDUCE DEL ECUADOR". En su mayoría, esto resultará en una mejora en el rendimiento de sus operaciones y en la prevención de posibles fallos en la maquinaria.

1.27.2. Factibilidad Económica

Realizar inversiones en medidas correctivas como el ajuste de conductores, la implementación de filtros y la mejora de la puesta a tierra tendrá como resultado la prevención de posibles daños en los equipos, la disminución de pérdidas en los conductores, la estabilización de las fluctuaciones de tensión y la evitación de sanciones por incumplimiento de normativas. Este enfoque contribuirá significativamente a aumentar la confiabilidad del sistema al reducir los gastos económicos relacionados con el mantenimiento y los perjuicios en los equipos, entre otros costos.

1.28. PROPUESTA PARA EL PROYECTO

La Tabla 5.35 muestra el desglose presupuestario del filtro pasivo creado para la solución. El costo de \$ 5.892,20 se derivó de la evaluación de cotizaciones. Además de ello, se incorporaron los gastos relacionados con la importación, el transporte y la instalación del filtro. En conjunto, estas consideraciones suman un monto de inversión total de \$ 10.803,21.

Tabla 5.35 Presupuesto del Filtro Pasivo del Transformador de 100 kVA

Modelo	Tensión (V)	Pasos	Costo Unitario	Costo Total
Filtro Pasivo VEMAC- 60 HZ	220/440	3	\$5892,20	\$5892,20
Costo de importación			\$2835,56	\$2835,56
Costo de transporte			\$500,00	\$500,00
Instalación			\$900	\$900
			IVA	\$675,45
			TOTAL	\$10.803,21

1.29. AHORRO ENERGÉTICO DEL PROYECTO

1.29.1. Cálculo de las pérdidas del Transformador

En la tabla 5.36 se indican las respectivas pérdidas antes y después de la implementación de los resultados.

Tabla 5.36 Pérdidas iniciales y finales del transformador

	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAR)
Pérdidas Iniciales	1,569	0,754
Pérdidas Finales	0,492	0,272

1.29.2. Pérdidas Totales

$$Pérdidas_{totales} = 1,569 \text{ kW} - 0,492 \text{ kW}$$

$$Pérdidas_{totales} = 1,077 \text{ kW}$$

1.29.3. Cálculo de Energía.

$$(EH) = \frac{\text{Energía total consumida en un período (kWh)}}{\text{Carga Máxima (kW)}}$$

Carga máxima= 22,99 kW

Energía total consumida en un periodo (kWh)= 1015,450

$$(EH) = \frac{1015,450 \text{ (kWh)}}{22,99 \text{ (kW)}}$$

$$(EH) = 44,16$$

1.29.4. Cálculo de pérdidas de Energía.

$Ploss = \text{Pérdidas totales} \times \text{semanas} \times \text{horas}$

$$Ploss = 1,077 \text{ kWh} \times 4 \times 90,5 \text{ h}$$

$$Ploss = 389,874 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

1.29.5. Cálculo de costo por pérdidas.

$$\text{Costo por pérdidas} = 389,874 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \times 0,090 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 35,09 \frac{\text{USD}}{\text{mes}}$$

$$\text{Costo por pérdidas} = 35,09 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{1 \text{ año}} = 421,06 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

1.29.6. Penalización por bajo factor de potencia

En la tabla 5.37, se indica el valor que paga por la penalización de bajo factor de potencia la empresa “Induplaes”.

Tabla 5.37 Pérdidas iniciales y finales del transformador

MES	VALOR CONSUMO CANCELADO	PENALIZACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	CONSUMO SIN PENALIZACIÓN
ENERO	\$ 1.044,15	\$ 53,56	\$ 990,59
FEBRERO	\$ 1.203,68	\$ 68,15	\$ 1.135,53
MARZO	\$ 1.340,80	\$ 75,20	\$ 1.265,60
ABRIL	\$ 1.250,20	\$ 102,58	\$ 1.147,62
MAYO	\$ 1.125,85	\$ 60,38	\$ 1.065,47
JUNIO	\$ 1.520,45	\$ 110,36	\$ 1.410,09
JULIO	\$ 1.230,12	\$ 102,45	\$ 1.127,67
AGOSTO	\$ 1.120,15	\$ 28,35	\$ 1.091,80
SEPTIEMBRE	\$ 1.052,15	\$ 67,34	\$ 984,81
OCTUBRE	\$ 1.018,12	\$ 112,15	\$ 905,97
NOVIEMBRE	\$ 1.123,15	\$ 58,40	\$ 1.064,75
DICIEMBRE	\$ 1.003,58	\$ 17,20	\$ 986,38
TOTAL	\$ 14.032,40	\$ 856,12	\$ 13.176,28

1.29.7. Ahorro Económico

$\text{Ahorro económico} = \text{Costo por pérdidas anual} + \text{Multas por bajo factor de potencia}$

$$\text{Ahorro económico} = 421,06 \frac{\text{USD}}{\text{año}} + 856,12 \frac{\text{USD}}{\text{año}} = 1277,18 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

1.29.8. Cálculo del TIR y VAN

Inversión del Proyecto = 10803,21 USD

Ahorro económico por Bfp = 1277,18 $\frac{\text{USD}}{\text{año}}$

Instalación de equipos = 1000 USD

Mantenimiento = 500 USD

Reparación = 200 USD

Tasa de Inflación = 10%

A través de las variables ya mencionadas se puede calcular el TIR Y VAN como parte del análisis económico (Ver el anexo), los valores obtenidos son los siguientes:

TIR = 15 %

VAN = \$ 3.547,3

Tiempo de recuperación: 7 años

La viabilidad financiera del proyecto es evidente, ya que el lapso para recobrar la inversión de capital es de siete años, lo cual es un plazo sensato dado que la vida útil de los equipos se extiende hasta diez años. Adicionalmente, es crucial considerar los beneficios derivados, tales como la reducción en el consumo de energía y el correcto desempeño de la maquinaria.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.30. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión exhaustiva de la situación actual y la investigación de campo a través del análisis detallado de las cargas conectadas, se pudo determinar que la compañía "Induplaes" dispone de una variedad de cargas eléctricas que incluyen sistemas monofásicos y trifásicos. Estas cargas tienen una capacidad total de 22,99 kW. La alimentación de estas cargas proviene de un transformador de 100 kVA. A través de la identificación minuciosa de los paneles de distribución, se procedió a diseñar un diagrama unifilar con el propósito de evaluar la condición presente de la empresa y detectar posibles interrupciones en el sistema eléctrico.
- La propuesta planteada de este proyecto para mejorar la calidad energética presenta una factibilidad técnica – económica viable, esto se debe a que la inversión inicial necesaria para llevar a cabo estas mejoras es inferior a los ingresos mensuales que se generarán al solucionar los problemas en el sistema eléctrico y eliminar la necesidad de pagar multas por un bajo factor de potencia.
- La identificación de los problemas existentes en la instalación eléctrica ha posibilitado la formulación de la solución que incluye el diseño de filtros pasivos para contrarrestar armónicos y elevar el factor de potencia.

1.31. RECOMENDACIONES

- En la actualidad se encuentran disponibles diversas regulaciones que brindan respaldo al equipo técnico, en las cuales se esclarecen múltiples elementos como la elección de filtros pasivos, así como el cálculo de filtros activos. Además, existe una guía para llevar a cabo análisis de la calidad de energía, ejemplificadas por normativas tales como IEEE 18, IEEE 519, IEEE 1159 y IEEE 1131.
- Para obtener una visión más completa de un sistema industrial de tamaño moderado, es fundamental llevar a cabo una recopilación de datos durante un período más extenso. Esto se debe a que la demanda eléctrica de una empresa fluctúa según su producción mensual, lo que a menudo dificulta la formulación de soluciones para abordar deficiencias de manera más efectiva.
- Es recomendable destinar recursos al proyecto debido a su viabilidad tanto desde una perspectiva técnica como económica, respaldada por los datos obtenidos. La inversión se amortiza en un periodo razonable, ya que se evitan cargos adicionales por penalizaciones debido al bajo factor de potencia, además de reducir las pérdidas de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Viviana Roxana Cano Vera y Elicza Isabel Ziadet Bermudez, «Evaluación de la satisfacción del cliente de la tarifa comercial de las empresas distribuidoras de electricidad en Ecuador», *Revista Mapa*, p. 21, sep. 2019.
- [2] «Calidad de Energía», *Ingeniería Internacional*, 3 de agosto de 2011. <https://ingenieriainternacional.wordpress.com/ingenieria-internacional-e-informatica-2/%c2%bfsabias-que/calidad-de-energia/> (accedido 10 de julio de 2023).
- [3] Visarrea Lima Luis Alberto, «Análisis de calidad de energía eléctrica en la Empresa textil Etiquetex S.A. ubicada en el cantón Quito, mediante la REGULACIÓN ARCERNNR 002/20», Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, 2022. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/29330/1/T-ESPEL-EMI-0423.pdf>
- [4] Transequipos S.A, «Confiabilidad en motores eléctricos, diagnóstico a sus zonas de falla», *Transequipos S.A.*, 25 de septiembre de 2020. <https://transequipos.com/confiabilidad-en-motores-electricos-diagnostico-a-sus-zonas-de-falla/> (accedido 10 de julio de 2023).
- [5] R. H. O. Tamayo, «Evaluación De La Calidad De La Potencia Eléctrica (Cpe) Ante Eventos De Corta Duración En Un Sistema De Distribución», Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2006. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.grupo-epm.com/site/Portals/1/biblioteca_epm_virtual/tesis/evaluacion_calidad_potencia_electrica.pdf
- [6] Sergio Alejandro Guzmán Chacón y Miguel Andrés Velasco Rojas, «Planeación estratégica para el suministro de calidad del servicio de energía eléctrica en Bogotá.», Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28057/VelascoRojasMiguelAndres2020.pdf?sequence=1>
- [7] Rogger Fabricio Criollo Suntaxi, «Diseño De Las Instalaciones Eléctricas De Bajo Voltaje Para La Nueva Infraestructura De La Empresa Metalmecánica IMEC Considerando Criterios De Eficiencia Energética», Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20989/1/CD%2010513.pdf>
- [8] Ricardo Diaz Mendoza, «Evaluación De La Calidad De La Energía De Un Centro De Carga En Alta Tensión Para Cumplimiento Del Código De Red», Universidad Autónoma Del

Estado De Morelos, Cuernavaca, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1568/DIMRNC04T.pdf?sequence=1>

[9] X. Proaño, P. Potes, D. Jiménez, y G. Pesántez, «Evaluación de Eficiencia Energética del Sistema Eléctrico para Mejorar los Indicadores de Desempeño IDEn en la Finca “La Cordillera” Perteneciente al Cantón Mejía, Provincia de Pichincha», *Rev. Téc. Energ.*, vol. 19, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.508.

[10] V. M. Polo, J. B. Peña, y L. Pacheco, «Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra», *Cienc. E Ing.*, vol. 38, n.º 2, pp. 167-176, 2017.

[11] O. J. V. Osorio y D. P. Delgado, «Evaluación De La Calidad De Energía En La Universidad Tecnológica De Pereira», Universidad Tecnológica De Pereira, Pereira, 2008. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/71395435.pdf>

[12] María Verónica Flores Soria, «Evaluación Del Costo - Beneficio De Energía Eléctrica No Servida En El Sistema Eléctrico Ecuatoriano Durante El Período 2007-2008», Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador, 2009. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/961/1/T728-MBA-Flores-Evaluaci%
c3%b3n%20del%20costo-beneficio%20de%20energ%
c3%ada%20el%
c3%a9ctrica.pdf](https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/961/1/T728-MBA-Flores-Evaluaci%c3%b3n%20del%20costo-beneficio%20de%20energ%c3%ada%20el%c3%a9ctrica.pdf)

[13] Marcos Holguin y David Gomezcoello, «Análisis De Calidad De Energía Eléctrica En El “Nuevo Campus” De La Universidad Politécnica Salesiana», Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil-Ecuador, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2110/13/UPS-GT000145.pdf>

[14] Juan José Mora Flórez, «Perturbaciones en la onda de tensión: Huecos [sag] y Sobretensiones [swell]», presentado en Calidad del servicio eléctrico [Power Quality], Girona, 11 de marzo de 2003. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/19962992-Perturbaciones-en-la-onda-de-tension-huecos-sag-y-sobretensiones-swell.html>

[15] Kerry Zerpa Seminario, «Evaluación De La Eficiencia Energética Y Diseño Óptimo De Una Línea De Distribución En Media Tensión-10kV», Universidad de Piura, Piura, 2013. [En línea]. Disponible en: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1758/IME_170.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [16] Jonathan Zambrano Orellana y Josué Damian Santana Chiriboga, «Estudio Y Análisis De Calidad De Energía Del Cuarto Eléctrico Servicios Generales Holcim Planta Guayaquil», Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Guayaquil-Ecuador, 2013. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5303/1/UPS-GT000487.pdf>
- [17] Jhoel Pablo Yaurivilca Rojas, «Evaluación de la calidad de energía eléctrica dentro de horarios punta y fuera de punta en la estación de fibra óptica en la ciudad de Tayacaja - Huancavelica 2020», Universidad Continental, Huancayo, 2020. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10380/3/IV_FIN_109_TI_Yaurivilca_Rojas_2020.pdf
- [18] Jeanett Hernández Maya, «Evaluación del Desempeño Energético en una empresa de autopartes, como base para la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía», Instituto Politécnico Nacional, 2018.
- [19] Gonzales Retamoso Cirilo, «Evaluación Y Análisis De La Calidad De Producto Bajo Los Efectos De Las Tensiones Y Corrientes Armónicas En Un Punto De Acoplamiento Común (PAC)», Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 2019. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2969/Cirilo%20Gonzales_Tesis_Titulo%20Profesional_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [20] Franklin Fernando Duarte Campos y Carlos Andre Freire Plaza, «Evaluación de las normativas de calidad de energía eléctrica para consumidores en baja y media tensión en la región», Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/56350/1/T-112730%20Duarte%20-%20Freire.pdf>
- [21] Blanca Heidi Castaneda Martinez, Y. C. C. Henriquez, y Edgardo Ernesto Mendez Recinos, «Evaluación de las Normas de Calidad del Servicio en los Sistemas de Distribución de SIGET», Universidad De El Salvador, Ciudad Universitaria, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2873/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20normas%20de%20calidad%20del%20servicio%20en%20los%20sistemas%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20SIGET.pdf>


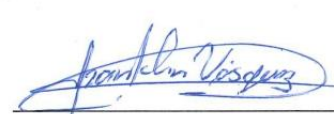
- [22] Andrés Martínez Usma, «Metodología Para Evaluar Estrategias De Eficiencia Energética Asociadas Al Uso Final De La Energía Eléctrica En El Sector Residencial Colombiano», Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/41bd4f1e-c9fe-4a65-af35-19899681f41e/content>
- [23] Andrés Felipe Zambrano Mejía, «Procedimiento para la Evaluación de la Calidad de la Energía en Industrias con Cargas Eléctricas Variables no Lineales», Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia, 2022. Accedido: 10 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/9654/Ambientes%20innovadores%20de%20aprendizaje%20como%20mediaci%C3%B3n%20para%20el%20fortalecimiento%20de%20las%20competencias%20lectoescritoras.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] John Cheng, «IEEE Standard 519-2014», presentado en Schneider Electric, [En línea]. Disponible en: http://www.egr.unlv.edu/~eebag/IEEE_STD_519_1992vs2014.pdf

ANEXOS

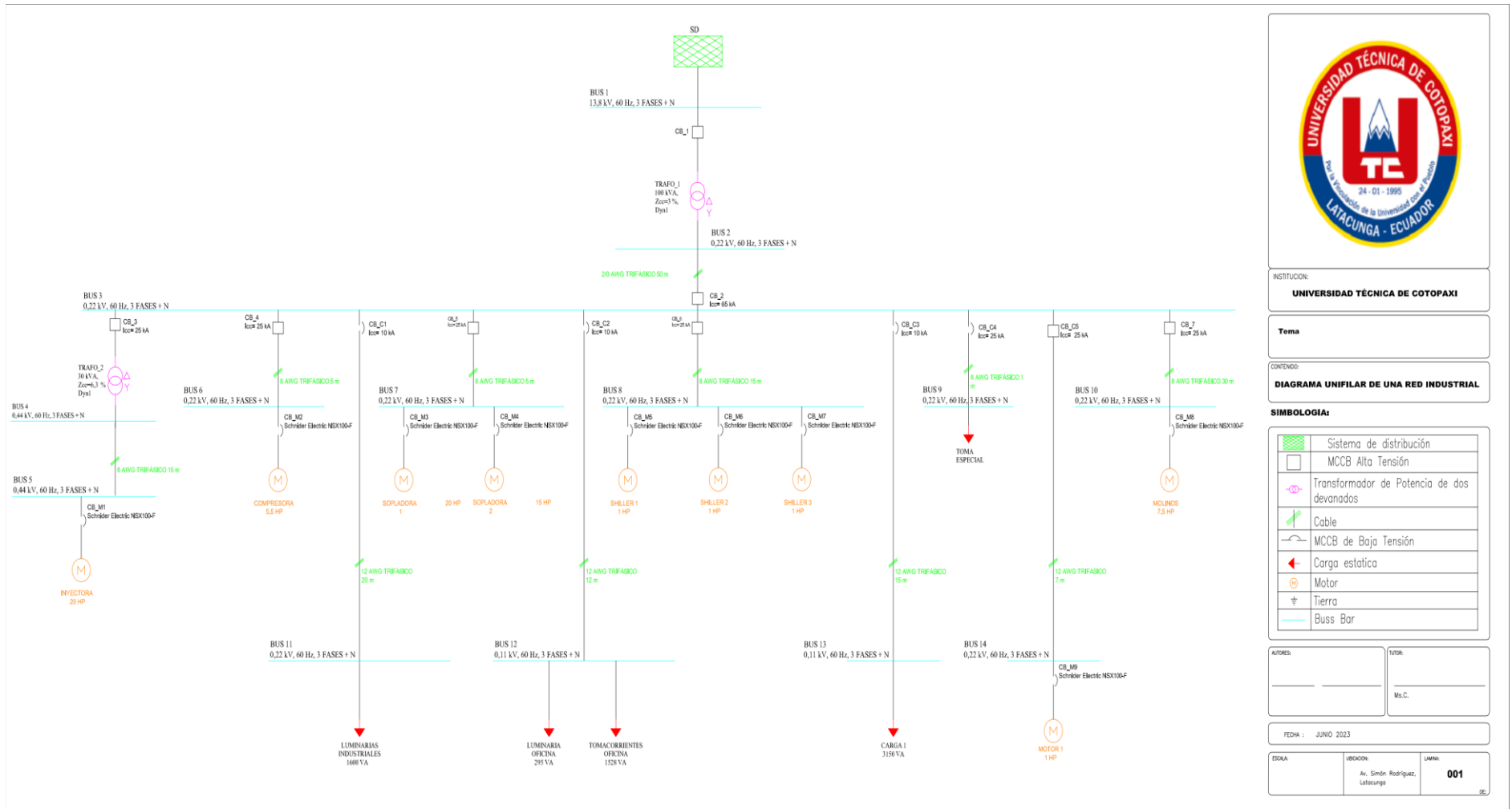
ANEXO A: INFORME DE PLAGIO PROYECTO DE TITULACIÓN



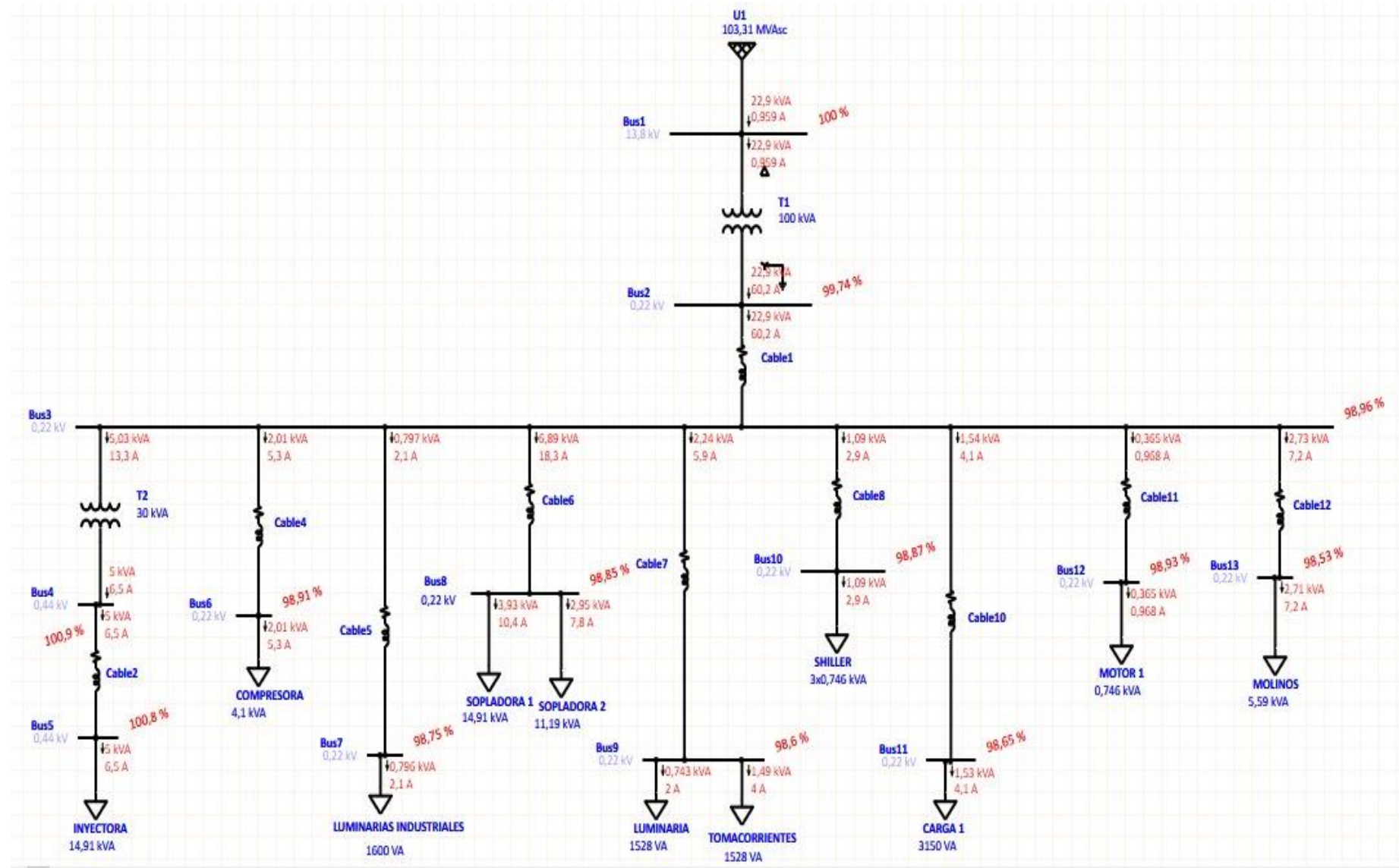
ANEXO 1. INFORME ANTI PLAGIO PROYECTO DE TITULACIÓN

Facultad:	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas
Carrera:	Ingeniería en Electricidad
Nombre del docente evaluador que emite el informe:	Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda
Documento evaluado:	Propuesta de Investigación presentada previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico.
Autores del documento:	Jácome Shigui Israel Vladimír
Programa de similitud utilizado:	Sistema COMPILATIO
Porcentaje de similitud según el programa utilizado:	2%
Observaciones: Calificación de originalidad atendiendo a los siguientes criterios: <ul style="list-style-type: none"> • El documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones. • El documento cumple criterios de originalidad, con observaciones. • El documento no cumple criterios de originalidad. 	-X- --- ---
Fecha de realización del informe:	17/08/2023
Captura de pantalla del documento analizado: 	
 Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda Director de la Propuesta de Investigación	

1.32. ANEXO B: DIAGRAMA UNIFILAR



1.33. ANEXO C: FLUJOS DE POTENCIA EN ETAP



1.34. ANEXO D: ARMÓNICOS EN ETAP

