



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE
ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”**

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de
Ingeniero en electricidad

Autores:

Alexis Joel Centeno García
Jhordy Manuel Vásquez Llumiquinga

Tutor:

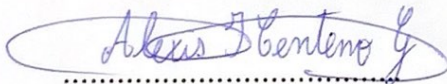
Franklin Hernán Vásquez Teneda

LATACUNGA-ECUADOR
AGOSTO-2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

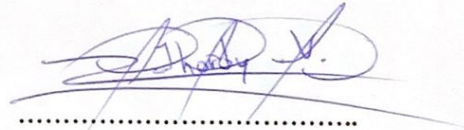
Nosotros, Centeno García Alexis Joel y Vásquez Llumiquinga Jhordy Manuel, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”, siendo el Ing. Vásquez Teneda Franklin Hernan M.Sc. tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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



Centeno García Alexis Joel

C.I. 160051084-4



Vásquez Llumiquinga Jhordy Manuel

C.I. 055044223-0

AVAIL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la siguiente propuesta de investigación sobre el título:

“ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”, de los ponentes: Centeno García Alexis Joel y Vásquez Llumiquinga Jhordy Manuel de la Carrera de **INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**, considero que dicho informe de investigación cumple con los requisitos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos 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 del 2024

.....
Ing. Vásquez Teneda Franklin Hernan M.Sc.

C.I. 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: Centeno García Alexis Joel y Vásquez Llumiyinga Jhordy Manuel con el título de Proyecto de Investigación:

“ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”, 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 del 2024

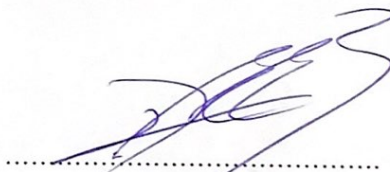
Para constancia firman



.....
Lector 1 (Presidente)

Ing. Rueda Flores Walter Paul M.Sc.

C.I. 050368989-5



.....
Lector 2

Ing. Estupiñán Tello Diego Enrique

C.I. 050165650-8



.....
Lector 3

Ing. León Segovia Marco Aníbal M.Sc.

C.I. 050230540-2

AGRADECIMIENTO

Al culminar este proyecto, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a quienes han sido fundamentales en este proceso.

En primer lugar, agradezco a Dios, por haberme brindado la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para llegar hasta este punto. Su guía ha sido mi luz en cada etapa de este camino.

A mi madre, Janeth García, quien ha sido mi pilar incondicional. Gracias por tu amor infinito, tu apoyo constante y por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles. Tus palabras de aliento y tu fe inquebrantable en mí han sido el motor que me ha impulsado a superar cada obstáculo. Sin tu comprensión, paciencia, y sacrificio diario, este logro no habría sido posible. Te agradezco profundamente por ser mi guía, mi confidente y por enseñarme el verdadero significado de la dedicación y el amor incondicional. Te amo mamá.

A mi hermana, Alison Centeno, gracias por tu apoyo, compañerismo y por estar siempre dispuesta a ofrecerme una palabra de ánimo. Tu presencia ha sido una fuente de consuelo y motivación, y te agradezco por ser parte de este logro.

Finalmente, quiero expresar mi sincero agradecimiento al ingeniero Franklin Vásquez, mi tutor de tesis, por su invaluable orientación, dedicación y paciencia. Sus consejos y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y su confianza en mis capacidades ha sido una fuente de inspiración.

A todos ustedes, mi gratitud eterna.

Centeno García Alexis Joel

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso de mi vida. A Él, que ha iluminado mi camino y me ha dado la sabiduría necesaria para alcanzar este logro.

A mi madre, Janeth García, por su inagotable amor, apoyo y sacrificio. Tú has sido mi sustento incondicional, inspirándome a perseverar y a superar cada desafío con valor y determinación.

A la memoria de mi padre, Luis Alfonso Centeno Mora, quien, aunque no está presente en esta tierra, sé que desde el cielo me ha acompañado en cada momento. Han pasado diez años desde su partida, pero su legado de integridad y rectitud sigue vivo en mi corazón. Este logro es para ti, papá, y espero que, desde donde estés, sientas orgullo por el camino que me has ayudado a seguir. Te amo con todo mi ser, y tu ejemplo y enseñanzas han sido la guía que ha orientado mi vida. Por ello, con profundo amor y veneración, te dedico este significativo logro.

Finalmente, dedico este trabajo a toda mi familia Centeno García, cuya presencia y apoyo han sido fundamentales en mi vida. A ustedes, por su amor, comprensión, y constante motivación, les dedico este logro con todo mi agradecimiento y cariño.

Centeno García Alexis Joel

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a aquellas personas cuya influencia y apoyo han sido fundamentales para la culminación de este proyecto.

En primer lugar, a mis queridos padres, Manuel Vásquez y Verónica Llumiyinga. Su amor incondicional, paciencia y fe en mis capacidades han sido mi mayor fuente de fortaleza. Su compromiso y sacrificios para brindarme oportunidades han sido esenciales en cada etapa de mi vida y en el desarrollo de este trabajo. Su confianza y aliento han sido una luz constante en mi camino académico.

A mi hermano, Jarol Vásquez, le agradezco profundamente por su constante apoyo y comprensión. Su compañía y palabras de aliento han sido un pilar de apoyo en los momentos más desafiantes. Su presencia y respaldo han hecho que este viaje sea más llevadero y enriquecedor.

A mi tía, Patricia Llumiyinga, y mi abuelita, Ortencia Remache, también quiero expresarles mi más profundo agradecimiento. Su apoyo, amor y motivación han sido esenciales en este camino. Cada uno de ustedes ha sido una fuente de fuerza y consuelo, y estoy inmensamente agradecido por contar con ustedes en mi vida.

Mi más sincero reconocimiento también al Ingeniero Franklin Vásquez, mi tutor de tesis. Su dedicación, guía experta y paciencia han sido invaluable en la realización de este proyecto. Su capacidad para orientar y motivar, así como su generosidad para compartir sus conocimientos, han sido clave en el logro de los objetivos propuestos.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Sin su apoyo y contribuciones, este logro no habría sido posible.

Vásquez Llumiyinga Jhordy Manuel

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, principalmente, a Dios, mi fuente constante de fortaleza y orientación. Él ha iluminado mi camino y me ha brindado la sabiduría necesaria para alcanzar este logro, guiándome a través de cada etapa de mi vida.

A mis padres, Verónica LLumiQuinga y Manuel Vásquez, por su inagotable amor, apoyo y sacrificio. Ustedes han sido mi sustento incondicional, inspirándome a perseverar y a superar cada desafío con valor y determinación. Gracias por estar siempre a mi lado y por enseñarme la importancia del esfuerzo y la dedicación. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A mi tío, José Remigio, quien ha sido como un padre para mí. Tu apoyo y orientación han sido fundamentales en mi vida, y te agradezco por todo lo que has hecho por mí. Has sido una figura paterna que ha dejado una huella imborrable en mi corazón. Este logro también te lo dedico con profundo respeto y gratitud.

Finalmente, dedico este trabajo a toda mi familia Vásquez LLumiQuinga, cuya presencia y apoyo han sido esenciales en mi vida. A ustedes, por su amor, comprensión y constante motivación, les dedico este logro con todo mi agradecimiento y cariño.

Vásquez LLumiQuinga Jhordy Manuel

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”

Autores:

Centeno García Alexis Joel

Vásquez Llumiyinga Jhordy Manuel

RESUMEN

La empresa TOPAC, dedicada a la fabricación de cubetas de huevos, enfrenta desafíos significativos en la calidad de su sistema eléctrico, influenciado en parte por el motor hydropulper que se apaga y enciende cada 15 minutos, generando picos de corriente. Además, el alto consumo de reactivos de la empresa agrava la situación.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar el estado del sistema eléctrico de TOPAC mediante la recopilación y evaluación de parámetros eléctricos obtenidos con un analizador de redes FLUKE 435-II. A través de un análisis exhaustivo de la normativa nacional e internacional, se identificaron varias deficiencias en el sistema, destacándose un factor de potencia bajo de 0,75, niveles de voltaje fuera de los rangos permitidos, y presencia de armónicos que afectan la estabilidad del suministro eléctrico. Aunque algunos índices como el THD cumplen con las normativas IEEE-519 y ARCERNR 002/20, se requiere atención inmediata en otras áreas.

Para mitigar estos problemas, se propuso la instalación de un banco de capacitores automático, compuesto por 5 pasos de 5 kVAr, con el objetivo de elevar el factor de potencia de 0,75 a 0,97. Actualmente, TOPAC enfrenta penalizaciones mensuales impuestas por la empresa eléctrica ELEPCO S.A. debido a esta deficiencia. La inversión total necesaria para la solución asciende a \$3438.50, con un retorno de inversión proyectado en 7 meses y 20 días. Esta medida no solo eliminará las penalizaciones, sino que también optimizará la eficiencia energética y garantizará la estabilidad operativa en TOPAC.

Palabras clave: Calidad de energía; Normativas; Factor de potencia; Bancos de capacitores, Penalizaciones eléctricas.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY

TOPIC: “POWER QUALITY ANALYSIS AND IMPROVEMENT AT THE TOPAC ENTERPRISE”

Authors:

Centeno García Alexis Joel

Vásquez Llumiyinga Jhordy Manuel

ABSTRACT

TOPAC enterprise, it dedicated in the egg cartons manufacture, it faces significant challenges in the quality its electrical system, it influenced in part by the hydropulper motor, what switches off and on every 15 minutes, generating current peaks. Further, the enterprise's high reagent consumption aggravates the situation. This research work has as main objective to analyze the status from TOPAC electrical system, by collecting and assessing electrical parameters got with a FLUKE 435-II network analyzer. Through an exhaustive analysis from national and international standard, they were identified several deficiencies in the system, by highlighting it a 0.75 low power factor, voltage levels outside the permitted ranges, and the harmonics presence, which affect the electrical supply stability. Although some indices as the THD comply with IEEE-519 and ARCERNNR 002/20 normative, they are required immediate attention in other areas. For mitigating these problems, it was proposed the installation an automatic capacitor bank, it composed 5 steps 5 kVAr, with the aim by raising the power factor from 0.75 to 0.97. Currently, TOPAC faces monthly penalties imposed by the electric ELEPCO S.A. enterprise, due to this deficiency. The necessary total investment for the solution amounts to \$ 3438.50, with a projected return on investment 7 months and 20 days. This measure will not only eliminate the penalties, but will also optimize energy efficiency and ensure operational stability at TOPAC.

Keywords: Power quality, regulations, power factor, capacitor banks, electrical penalties.



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: **“ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA EN LA EMPRESA TOPAC”** presentado por: **Centeno García Alexis Joel** y **Vásquez Llumiquinga Jhordy Manuel** 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 2024.

Atentamente,

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes



DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CC: 050266651-4

ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	PROBLEMA	2
2.1.1.	Situación problemática	2
2.1.2.	Formulación del problema.....	3
2.2.	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.3.	BENEFICIARIOS	3
2.4.	JUSTIFICACIÓN.....	4
2.5.	OBJETIVOS.....	5
2.5.1.	General	5
2.5.2.	Específicos.....	5
3.	FUNDAMENTACION TEÓRICA	6
3.1.	INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD DE ENERGÍA.....	6
3.1.1.	Definición y conceptos básicos	6
3.1.1.1.	Calidad de Energía	6
3.1.1.2.	Voltaje o Tensión Eléctrica	6
3.1.1.3.	Corriente Eléctrica.....	7
3.1.1.4.	Potencia Eléctrica	7
3.1.1.5.	Frecuencia.....	7
3.1.1.6.	Curvas de demanda diaria.....	8
3.2.	PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA	8
3.2.1.	Perturbaciones No Periódicas	8
3.2.1.1.	Variación de Voltaje.....	8
3.2.1.2.	Sobretensión Temporal a Frecuencia Industrial (Swell)	9
3.2.1.3.	Hueco de la Tensión de Alimentación (Sag).....	9
3.2.1.4.	Interrupción de Alimentación.....	9

3.2.1.5.	Microcorte	9
3.2.1.6.	Variación Rápida de Tensión	9
3.2.2.	Perturbaciones Periódicas.....	10
3.2.2.1.	Fluctuación de Tensión.....	10
3.2.2.2.	Parpadeo (Flicker)	10
3.2.2.3.	Tensión Armónica	10
3.2.2.4.	Tensión Inter armónica.....	10
3.2.2.5.	Desequilibrio de Tensión.....	10
3.2.3.	Sobretensiones y sobretensiones transitorias.....	11
3.2.4.	Armónicos.	11
3.3.	AFECCIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO	11
3.3.1.	Distorsión armónica.....	11
3.3.1.1.	Equipos que generan armónicos	13
3.3.2.	Límites de Distorsión Armónica en voltaje en % del voltaje nominal:..	14
3.3.2.1.	IEEE 519	15
3.3.2.2.	CONELC 004/01.....	15
3.4.	NORMATIVAS	16
3.4.1.	Norma IEC 61000-3-2.....	16
3.4.2.	Norma IEC 6100024.....	17
3.4.3.	Norma IEC 61000430.....	18
3.4.4.	Norma IEEE 1159.	18
3.4.5.	Norma IEC 5552.....	20
3.4.6.	Estándar IEEE 519.	20
3.4.7.	ARCERNR 002/20	21
4.	METODOLOGÍA.....	22
4.1.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	22
4.1.1.	Método inductivo – deductivo.....	22

4.1.2.	Método analítico – sintético	22
4.2.	TIPOS DE INVESTIGACIÓN.....	22
4.2.1.	Investigación Teórica	22
4.2.2.	Investigación de campo	23
4.2.3.	Investigación Cuantitativa	23
4.2.4.	Investigación Descriptiva	23
4.3.	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	23
4.3.1.	Observación directa y participativa	23
4.3.2.	Instrumentos de investigación	24
4.4.	OBTENCIÓN DE DATOS	24
4.4.1.	Paso 1: Reconocimiento de las áreas de la empresa.....	24
4.4.2.	Paso 2: Levantamiento de cargas, registro de equipos y maquinas eléctricas existentes	25
4.4.2.1.	Revisar los paneles de distribución eléctrica.....	26
4.4.3.	Paso 3: Diseño del diagrama unifilar de cargas.....	26
4.4.4.	Paso 4: Evaluación del consumo eléctrico y egresos económicos	27
4.4.5.	Paso 5: Condición para el análisis de carga.....	27
4.4.6.	Paso 6: Características del equipo	27
4.4.7.	Paso 7: Determinación del analizador de redes	28
4.4.7.1.	Características destacadas del Analizador de Redes Trifásico de Energía y Calidad de Energía Eléctrica FLUKE 435-II:	28
4.4.8.	Paso 8: Conexión del equipo a la red trifásica.....	30
4.4.9.	Paso 9: Verificación del funcionamiento del analizador de redes.....	31
4.4.9.1.	Condiciones para la medición del analizador de redes.....	31
4.4.10.	Paso 10: Obtención y descarga de datos medidos por el analizador de redes	32
4.4.11.	Paso 11: Simulación del Sistema Eléctrico en ETAP 19.0.1	32
4.4.11.1.	Software ETAP	33

5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	35
5.1.	UBICACIÓN DEL FLUKE 435-II	35
5.2.	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES.....	35
5.2.1.	Análisis de Nivel de Voltaje de los dos Breakers.....	35
5.2.1.1.	Voltaje nominal fase – neutro 127 V del transformador de 75 kVA..	36
5.2.1.2.	Voltaje nominal fase – fase 220 V del transformador de 75 kVA	39
5.2.1.3.	Voltaje en el neutro en el transformador 75 kVA	42
5.2.1.4.	Desequilibrio de voltaje del Transformador 75 kVA	43
5.2.2.	Análisis de corriente de Línea del Transformador de 75 kVA.....	44
5.2.3.	Potencia Activa del Transformador de 75 kVA	46
5.2.4.	Potencia Reactiva del Transformador de 75 kVA.....	48
5.2.5.	Potencia Aparente del Transformador de 75 kVA	50
5.2.6.	Análisis de Factor de potencia del TRAFO_75 kVA	53
5.2.7.	Distorsión armónica total de voltaje del transformador de 75 kVA.....	55
5.2.8.	Armónicos individuales de voltaje del transformador de 75 kVA	57
5.2.9.	Armónicos individuales de voltaje en el neutro del transformador de 75 kVA	59
5.2.10.	TDD de corriente del transformador	62
5.2.11.	Distorsión individual de corriente del transformador de 75 kVA.	65
5.2.12.	Armónicos individuales de corriente en el neutro del transformador de 75 kVA	68
5.2.13.	Curva de la demanda	70
5.2.14.	Energía consumida	71
5.3.	SIMULACIONES DEL SISTEMA EN ETAP 19.0.1	72
5.3.1.	Levantamiento de carga y mediciones.....	72
5.3.2.	Parámetros utilizados para la simulación	77
5.3.2.1.	Red equivalente	77

5.3.2.2.	Transformador de 75 kVA.....	77
5.3.3.	Resultados de la simulación	79
5.3.4.	Solución a la problemática presentada en TOPAC	83
6.	ANÁLISIS FINANCIERO.....	86
6.1.	CÁLCULO DE PENALIZACIÓN POR BAJO FACTOR DE POTENCIA.	86
6.2.	ESTUDIO Y VIABILIDAD DE LA INVERSIÓN	87
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal según IEEE 519 [7].	15
Tabla 2. Valores Límites de Armónicas De Voltaje [10].	15
Tabla 3. Límites para los equipos clase A según la norma 61000-3-2 [11].	17
Tabla 4. Definiciones de las variaciones de corta duración y de larga duración en el IEEE Std. 1159-1995 [12].	19
Tabla 5. Límites según norma IEEE519 [12].	21
Tabla 6. Límites según norma IEEE519 [7].	21
Tabla 7. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V.	36
Tabla 8. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V del breaker 1.	36
Tabla 9. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 1.	37
Tabla 10. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V del breaker 2.	38
Tabla 11. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.	38
Tabla 12. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V del breaker 1.	39
Tabla 13. Variación de voltaje 220 V del transformador 75 kVA del breaker 1.	40
Tabla 14. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V del breaker 2.	41
Tabla 15. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.	41
Tabla 16. Nivel de voltaje Neutro del breaker 1.	42
Tabla 17. Nivel de voltaje Neutro del breaker 2.	43
Tabla 18. Desequilibrio de voltaje breaker 1.	44
Tabla 19. Desequilibrio de voltaje breaker 2.	44
Tabla 20. Nivel de corriente fase-Neutro del transformador 75 kVA en el breaker 1.	44
Tabla 21. Nivel de corriente fase-Neutro del transformador 75 kVA en el breaker 2.	45
Tabla 22. Potencia activa en las tres fases en el breaker 1.	47
Tabla 23. Potencia activa en las tres fases en el breaker 2.	48
Tabla 24. Niveles de potencia reactiva del breaker 1.	49
Tabla 25. Niveles de potencia reactiva del breaker 2.	50
Tabla 26. Niveles de potencia aparente del breaker 1.	51
Tabla 27. Niveles de potencia aparente del breaker 2.	52
Tabla 28. Niveles de factor de la potencia TRAFO_75 kVA del breaker 1.	53
Tabla 29. Niveles de factor de la potencia TRAFO_75 kVA del breaker 2.	54
Tabla 30. Distorsión armónica total del breaker 1.	55

Tabla 31. Distorsión armónica total del breaker 2.....	56
Tabla 32. Nivel de distorsión armónica individual del breaker 1.....	58
Tabla 33. Nivel de distorsión armónica individual del breaker 2.....	59
Tabla 34. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 1.	60
Tabla 35. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 2.	61
Tabla 36. Relación de la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu del transformador.	63
Tabla 37. Distorsión total de la demanda (TDD) del breaker 1.	63
Tabla 38. Relación de la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu del transformador.	64
Tabla 39. Distorsión total de la demanda (TDD) del breaker 2.	65
Tabla 40. Distorsión individual de corriente del breaker 1.	66
Tabla 41. Distorsión individual de corriente del breaker 2.	67
Tabla 42. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 1.	68
Tabla 43. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 2.	69
Tabla 44. Levantamiento de carga de TOPAC breaker1.....	73
Tabla 45. Levantamiento de carga de TOPAC breaker 2.....	74
Tabla 46. Comparación de corrientes nominales y reales consumidas breaker 1.	74
Tabla 47. Comparación de corrientes nominales y reales consumidas breaker 2.	75
Tabla 48. Potencias y corriente de cortocircuito en el punto de conexión de TOPAC. .	77
Tabla 49. Datos del transformador de la industria TOPAC.	78
Tabla 50. Factores de demanda de los equipos de la fábrica TOPAC breaker 1.....	78
Tabla 51. Factores de demanda de los equipos de la fábrica TOPAC breaker 2.....	78
Tabla 52. Tabla de costo del banco automático de capacitores de 25 kvar SUMELEC [18].	87
Tabla 53. Estudio financiero del TIR y VAN en un año de estudio.....	88
Tabla 54. VAN y TIR resultante de la inversión en el banco de capacitores.....	89
Tabla 55. Tiempo de recuperación de la inversión.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de carga diaria típica [5].	8
Figura 2. Distorsión Armónica [8].	13
Figura 3. Espectro armónico de una PC típico [6].	14
Figura 4. Espectro armónico de un puente de seis pulsos [6].	14
Figura 5. Proceso de elaboración de diagramas eléctricos.	25
Figura 6. Seguidor de circuitos Klein Tools ET-310 [14].	26
Figura 7. Dispositivo FLUKE 435-II para la evaluación de energía y la calidad eléctrica en redes trifásicas [15].	28
Figura 8. Conexión del analizador a un sistema trifásico de distribución [15].	31
Figura 9. Power Log Welcome Screen [16].	32
Figura 10. Diagrama de Flujo.	34
Figura 11. Ubicación del fluke 435-II.	35
Figura 12. Nivel de Voltaje fase-neutro 127 V del transformador 75 kVA del breaker 1.	37
Figura 13. Nivel de Voltaje fase-neutro 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.	39
Figura 14. Nivel de Voltaje fase-fase 220 V del transformador 75 kVA del breaker 1.	40
Figura 15. Nivel de Voltaje fase-fase 220 V del transformador 75 kVA del breaker 2.	41
Figura 16. Nivel de Voltaje en el Neutro en el breaker 1.	42
Figura 17. Nivel de Voltaje en el Neutro en el breaker 2.	43
Figura 18. Nivel de corrientes de fase del transformador de 75 kVA en el breaker 1.	45
Figura 19. Nivel de corrientes de fase del transformador de 75 kVA en el breaker 2.	46
Figura 20. Niveles de potencia activa trifásica breaker 1.	47
Figura 21. Niveles de potencia activa trifásica breaker 2.	48
Figura 22. Niveles de potencia reactiva trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 1.	49
Figura 23. Niveles de potencia reactiva trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2.	50
Figura 24. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 1.	51
Figura 25. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2.	52

Figura 26. Niveles de factor de la potencia TRAF0_75 kVA del breaker 1.	53
Figura 27. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2.	54
Figura 28. Nivel de THD de Voltaje del breaker 1.	56
Figura 29. Nivel de THD de Voltaje del breaker 2.	57
Figura 30. Armónicos individuales de voltaje del breaker 1.	58
Figura 31. Armónicos individuales de voltaje del breaker 2.	59
Figura 32. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 1.	60
Figura 33. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 2.	61
Figura 34. Nivel de la distorsión total de corriente breaker1.	64
Figura 35. Nivel de la distorsión total de corriente breaker 2.	65
Figura 36. Porcentajes de armónicos de corriente individuales del breaker 1.	66
Figura 37. Porcentajes de armónicos de corriente individuales del breaker 2.	67
Figura 38. Porcentaje de armónicos de corriente en el neutro del breaker 1.	69
Figura 39. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 2.	70
Figura 40. Curva de la demanda de la empresa TOPAC.	70
Figura 41. Consumo de energía de enero.	72
Figura 42. Equipos asociados al breaker de 100A.	76
Figura 43. Equipos asociados al breaker de 250A.	76
Figura 44. Transformador de la industria TOPAC.	77
Figura 45. Secuencia de eventos de los equipos.	79
Figura 46. Voltaje en la barra del secundario del transformador.	80
Figura 47. Potencia activa consumida del transformador.	81
Figura 48. Potencia reactiva consumida del transformador.	81
Figura 49. Potencia aparente consumida del transformador.	82
Figura 50. Factor de potencia de la industria.	82
Figura 51. Factor de potencia de la industria después de ingresar los bancos de capacitores.	84
Figura 52. Nivel de voltaje en la industria después de ingresar los bancos de capacitores.	85

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Análisis y mejoramiento de la calidad de energía en la empresa TOPAC.

Tipo de Proyecto: Proyecto de Investigación.

Carrera: Ingeniería en electricidad.

Proyecto de investigación vinculado: Calidad Energética

Equipo de Trabajo:

- Centeno García Alexis Joel
- Vásquez Llumiquinga Jhordy Manuel

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

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

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

2. INTRODUCCIÓN

2.1. PROBLEMA

2.1.1. Situación problemática

Con el transcurso del tiempo, se han registrado perturbaciones en la red de distribución eléctrica, dando origen a fenómenos como corrientes armónicas, variaciones de voltaje, bajos factores de potencia, daños en equipos y dispositivos, riesgos para la seguridad y pérdidas económicas. Estas anomalías son consecuencia del incorrecto uso de los equipos en el sistema eléctrico, así como de una planificación ineficiente en la construcción, que genera una carga excesiva, resultando en déficits para cubrir la demanda y afectando especialmente al sector industrial.

En respuesta a esta problemática, la ARCONEL aprobó en 2018 la regulación No 005/18, la cual supervisa los estándares que definen la excelencia en la prestación de servicios energéticos y la calidad de los productos.

Este proyecto de investigación se centra en la calidad de energía en el sistema eléctrico de la empresa TOPAC, cuya continuidad en el suministro eléctrico es crucial, especialmente debido a sus procesos químicos industriales diarios. Un apagón repentino tendría un impacto significativo en la producción y podría generar desviaciones en los parámetros eléctricos, superando los límites normativos. Estas desviaciones pueden atribuirse a la presencia de numerosos equipos no lineales, como motores y variadores de frecuencia, que forman parte de la infraestructura.

La falta de un análisis exhaustivo de calidad de energía eléctrica en la empresa conlleva problemas técnicos en el sistema eléctrico, manifestándose en una baja eficiencia en la potencia, la presencia de corrientes armónicas que aumentan las pérdidas en los cables, un incremento de la carga en el transformador, un aumento de la demanda durante las horas de mayor uso y fallos en el sistema eléctrico.

Para abordar estos problemas, es fundamental llevar a cabo una evaluación detallada del sistema eléctrico. Esto implica realizar un análisis exhaustivo de la carga para desarrollar una propuesta que contemple la implementación de métodos y prácticas destinadas a mejorar los parámetros eléctricos y garantizar el cumplimiento de las normativas establecidas en la regulación ARCERNR 002/20.

2.1.2. Formulación del problema

La carencia de una buena calidad de energía eléctrica en la empresa TOPAC representa riesgos a equipos, personal y afección importante a la productividad económica. Es por esa razón que se necesita realizar un estudio de calidad de energía, a fin de detectar los problemas y/o fenómenos eléctricos que afectan la eficiencia energética, una vez que se han detectado dichos eventos se debe formular las soluciones más efectivas para mitigarlos.

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Objeto de investigación: Sistemas eléctricos de la fábrica de cubetas de huevos - TOPAC

Campo de acción: 3322.99 Otras (Calidad de Energía)

2.3. BENEFICIARIOS

La empresa TOPAC se especializa en la fabricación de cubetas para huevos, y los beneficiarios directos se encuentran en la propia empresa, por ende, los empleados son quienes disfrutarían de un entorno laboral más cómodo al utilizar equipos eléctricos optimizados en el proceso de su producción. La mejora de la calidad de energía aseguraría una mayor estabilidad y continuidad en la producción, generando un entorno más productivo y eficiente para los trabajadores y principalmente los propietarios de TOPAC.

Por otro lado, los beneficiarios indirectos se orientarían hacia los consumidores finales. Aquellos que compran las cubetas de huevos se beneficiarían al recibir un producto final más confiable y de mayor calidad, debido a que la mejora en la calidad de energía en el proceso de fabricación reduciría el riesgo de fallas en el producto terminado, además, se podrían reducir los costos de operación y mantenimiento de los equipos eléctricos de TOPAC, lo que se traduciría en una mayor competitividad en el mercado y, potencialmente, en precios más favorables para los consumidores.

2.4. JUSTIFICACIÓN

Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad de la energía eléctrica en la empresa TOPAC. La diversidad de maquinaria en posesión de la empresa no solo conlleva una variedad de demandas de energía, sino también una serie de desafíos en términos de calidad energética. Estos desafíos incluyen problemas como el calentamiento de conductores, disparos de protecciones y un alto consumo de energía, todos los cuales pueden resultar costosos y perjudiciales para la producción y la calidad del producto.

El calentamiento de los conductores, surge de corrientes eléctricas excesivas que fluyen a través de los conductores, esto se debe a un consumo excesivo de parte de un equipo que pueda que este en falla o mal funcionamiento o por mal dimensionamiento del conductor.

Los disparos de las protecciones se producen por exceso de corriente que supera la capacidad nominal de la protección. Esto puede ser causado por un exceso de carga o por cortocircuitos que incrementan bruscamente el nivel de corriente.

El alto consumo de energía proviene de diversos factores, como estudios eléctricos poco realistas, los cuales al momento de implementarse no resultan funcionar de forma correcta, por mala dimensionamiento de los conductores de los equipos lo cual representa pérdidas eléctricas, mal dimensionamiento de los transformadores, etc.

Dada la complejidad y los desafíos inherentes a la gestión de la energía eléctrica en TOPAC, es esencial incorporar el uso de un analizador de energía. Este dispositivo permitirá realizar mediciones de todos los parámetros eléctricos necesarios para evaluar la buena o mala operatividad de la planta. Tales indicadores son los niveles de voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia y potencias tanto activa como reactiva.

El estudio propuesto se basa en la recopilación de datos a partir de las facturas de consumo de electricidad y la identificación de los circuitos más afectados, conectados al alimentador de estudio. El objetivo principal de este proyecto es proporcionar recomendaciones concretas y prácticas para mejorar tanto a corto como a largo plazo la eficiencia energética y la gestión de costos.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. General

- Analizar el estado del sistema eléctrico en la empresa TOPAC a través de la recopilación de parámetros eléctricos obtenidos mediante un analizador de redes eléctricas, con el fin de establecer criterios y acciones que faciliten el mejoramiento de la calidad de energía de la fábrica de ser necesario.

2.5.2. Específicos

- Realizar un análisis exhaustivo de la bibliografía actual sobre el estado del arte y las normativas nacionales e internacionales relacionadas con los estudios de calidad de la energía, centrándose en los principales índices aplicables al sector industrial.

- Evaluar las variables de calidad de energía que cumplen con las normas IEEE-519, ARCERNR 002/20 y proponer mejoras para los índices que están fuera de los rangos permitidos.

- Modelar un equivalente del sistema eléctrico de la empresa TOPAC que refleje fielmente la curva de demanda diaria, y que sirva como base para la evaluación de los índices de calidad de energía antes y después del rediseño propuesto en el presente estudio, permitiendo una mejora en la eficiencia energética y la estabilidad del suministro eléctrico en la empresa.

- Desarrollar un estudio económico que evalúe el costo total de la inversión requerida para la implementación de las propuestas técnicas, así como la proyección del tiempo para la recuperación de dicha inversión.

3. FUNDAMENTACION TEÓRICA

3.1. INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD DE ENERGÍA

3.1.1. Definición y conceptos básicos

3.1.1.1. Calidad de Energía

La calidad de la energía eléctrica es esencial para asegurar un suministro que cumpla con las especificaciones y condiciones adecuadas, permitiendo que los equipos y dispositivos operen de manera continua sin experimentar pérdida de rendimiento ni sufrir daños en sus componentes. Esto implica no solo la continuidad del suministro, sino también la estabilidad de las tensiones, corrientes y frecuencia, la minimización de fluctuaciones y variaciones, así como la reducción de armónicos y perturbaciones electromagnéticas [1].

Garantizar estos aspectos contribuye a optimizar la vida útil de los equipos, mejorar la eficiencia energética y prevenir posibles interrupciones o malfuncionamientos que podrían resultar costosos tanto en términos económicos como operativos. En resumen, la calidad de la energía no solo se trata de proporcionar electricidad de manera constante, sino de mantener un entorno eléctrico favorable que promueva un funcionamiento eficiente y confiable de los dispositivos conectados [2].

3.1.1.2. Voltaje o Tensión Eléctrica

El voltaje o la tensión eléctrica, constituye la medición de la disparidad en el potencial eléctrico entre dos puntos específicos. Esta magnitud se expresa en voltios [Joule/Coulomb] y desempeña un papel esencial en la comprensión y la regulación del flujo de corriente en un sistema eléctrico. Por ley de Ohm se representa como en la ecuación (1) puede definir como se muestra a continuación, siendo Z la impedancia [3].

$$\bar{V} = \bar{I} * \bar{Z} [V] \quad (1)$$

Donde:

\bar{V} : Voltaje

\bar{I} : Intencidad de corriente

\bar{Z} : Impedancia

3.1.1.3. Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica se caracteriza por la velocidad con la que se desplaza la carga eléctrica y se establece en la ecuación (2). En situaciones donde existe una corriente considerable, como la requerida para alimentar electrodomésticos como un frigorífico, se observa un flujo sustancial de carga que se desplaza a través del cable en un breve lapso de tiempo, su unidad es el Amperio [Coulomb/Segundo] (A) [3].

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} [A] \quad (2)$$

Donde:

\bar{V} : Voltaje

\bar{I} : Intencidad de corriente

\bar{Z} : Impedancia

3.1.1.4. Potencia Eléctrica

La potencia eléctrica se define como la cantidad de energía requerida para desplazar una determinada carga eléctrica en un intervalo de tiempo específico, en donde la ecuación (3) nos ayuda a calcular la potencia activa. Esta magnitud se expresa en vatios (W) y refleja la cantidad de energía necesaria para trasladar una cantidad específica de electrones en un segundo [3].

$$\bar{P} = \bar{V} * \bar{I} [W] \quad (3)$$

Donde:

\bar{P} : Potencia activa

\bar{V} : Voltaje

\bar{I} : Intencidad de corriente

3.1.1.5. Frecuencia

La frecuencia se define como la cantidad de repeticiones de un fenómeno periódico en un intervalo de tiempo determinado. Esta medida encuentra aplicaciones en distintos campos, como la física, ingeniería, música, electrónica y comunicación, entre otros. El hertz (Hz) es la unidad estándar para medir la frecuencia, representando un ciclo por segundo [4].

3.1.1.6. Curvas de demanda diaria

Estas curvas se trazan para el día pico de cada año dentro del período estadístico seleccionado.

Las curvas de carga diaria se construyen a partir de los picos obtenidos en intervalos de una hora a lo largo del día. Estas curvas indican las características de la carga en el sistema, ya sea residencial, comercial o industrial, y cómo se combinan para generar el pico. Su análisis debe llevar a conclusiones similares a las de las curvas de carga anual, pero ofrece detalles más específicos sobre cómo han variado a lo largo del tiempo.

Esto proporciona una base para identificar las tendencias predominantes en las cargas del sistema y para seleccionar adecuadamente los equipos de transformación, considerando la capacidad de sobrecarga, el tipo de enfriamiento para los transformadores de subestaciones y los límites de sobrecarga para los transformadores de distribución. En la Figura 1, se muestra una curva típica de carga obtenida en las subestaciones receptoras primarias [5].

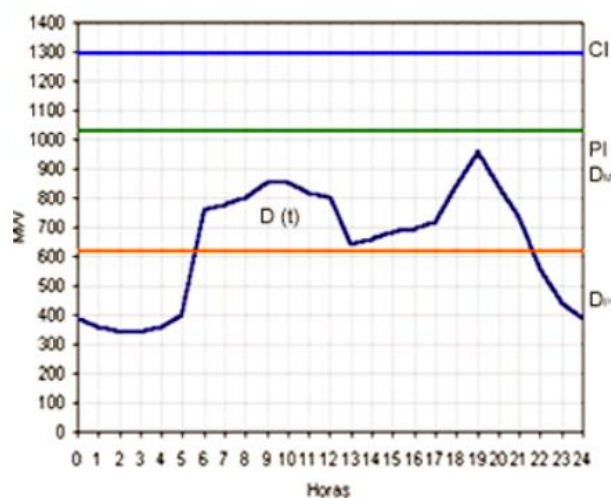


Figura 1. Curva de carga diaria típica [5].

3.2. PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA

3.2.1. Perturbaciones No Periódicas

3.2.1.1. Variación de Voltaje

Incremento o reducción en la fuerza eléctrica, comúnmente ocasionada por las fluctuaciones en la carga total de la red de distribución o de una sección específica de dicha red. Por lo general, se evalúa en promedios de 10 segundos. En términos generales,

en el ámbito de la distribución eléctrica, se requiere mantener la intensidad de voltaje en un rango de $\pm 10\%$ durante el 95% del tiempo [6].

3.2.1.2. Sobretensión Temporal a Frecuencia Industrial (Swell)

Aumento repentino del voltaje en un punto específico durante un período de tiempo considerable. Estas variaciones temporales en la tensión suelen originarse a raíz de operaciones o fallos, como la reducción abrupta de la carga, defectos monofásicos, presencia de no linealidades, entre otros [6].

3.2.1.3. Hueco de la Tensión de Alimentación (Sag)

Reducción en la fuerza eléctrica suministrada a un nivel que oscila entre el 90% y el 10% de la tensión nominal, seguida por la restauración de la tensión después de un breve intervalo. Según el acuerdo convencional, este fenómeno de disminución de la tensión tiene una duración que varía de 10 milisegundos a 1 minuto [6].

3.2.1.4. Interrupción de Alimentación

Situación en la cual el voltaje en los puntos de suministro de las tres fases es menor al 1% de la tensión nominal [6].

3.2.1.5. Microcorte

Aunque no se encuentra explícitamente definido en la normativa en cuestión, este concepto suele utilizarse de manera intercambiable con la interrupción breve, caracterizada por su brevedad en el rango de milisegundos. Esta forma de perturbación es comúnmente asociada a eventos como los disparos de protecciones con restablecimiento automático [6].

3.2.1.6. Variación Rápida de Tensión

La modificación en el valor efectivo de una tensión se produce entre dos niveles sucesivos que se mantienen durante períodos de tiempo específicos, sin que exista una secuencia repetitiva claramente definida [6].

3.2.2. Perturbaciones Periódicas

3.2.2.1. Fluctuación de Tensión

Se refiere a una secuencia de cambios en la magnitud del voltaje o alteraciones cíclicas en la forma general del voltaje. Esta forma general puede experimentar fluctuaciones de manera aleatoria o seguir perfiles específicos de variación, ya sea de manera irregular o periódica [6].

3.2.2.2. Parpadeo (Flicker)

Se trata de una sensación visual inestable causada por la exposición a una fuente de luz en la que la luminosidad o la distribución espectral experimentan cambios a lo largo del tiempo. Esta percepción intermitente, conocida como parpadeo, generalmente resulta de variaciones en la tensión de la red eléctrica y es detectable en frecuencias que oscilan entre 0,5 Hz y 25 Hz. La medida del parpadeo se denomina perceptibilidad, siendo PST el parámetro para periodos cortos (10 minutos) y PLT para periodos más extensos (2 horas) [6].

3.2.2.3. Tensión Armónica

Se denomina a la oscilación que existe en el voltaje la cual tiene una forma de onda sinusoidal, esta se caracteriza por poseer una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación [6].

3.2.2.4. Tensión Inter armónica

Se refiere a la onda de voltaje sinusoidal cuya frecuencia se encuentra entre las frecuencias de los armónicos, es decir, su frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia primordial [6].

3.2.2.5. Desequilibrio de Tensión

En un sistema de tres fases, se trata de una situación en la que los niveles eficaces de voltaje de las tres fases no son idénticos o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales [6].

3.2.3. Sobretensiones y sobretensiones transitorias.

Las sobretensiones transitorias se manifiestan cuando se registra un aumento repentino y significativo de la tensión en una red eléctrica, con una duración generalmente medida en microsegundos y alcanzando niveles de varios kilovoltios. Este fenómeno se origina predominantemente debido a descargas atmosféricas, aunque en ocasiones también puede ser resultado de cambios abruptos en la red eléctrica. La presencia de sobretensiones transitorias conlleva riesgos considerables, ya que puede resultar en daños severos e incluso la destrucción de equipos conectados, mal funcionamiento generalizado, disminución de la vida útil de los dispositivos y la interrupción del servicio para los usuarios.

En la mayoría de los casos, las descargas atmosféricas, como los rayos, representan la fuente principal de estas sobretensiones transitorias. Sin embargo, las conmutaciones en la red eléctrica, cambios repentinos en la carga o incluso eventos externos, como fallas en líneas de transmisión, también pueden desencadenar estos impulsos indeseados de tensión [6].

3.2.4. Armónicos.

Los armónicos están constituidos por elementos de frecuencia que se originan los sistemas eléctricos, estos causan distorsiones al superponerse a la onda senoidal original. La frecuencia por lo general es de 50 o 60 Hz este depende de cada país, actúa como punto de referencia para la generación de armónicos, tales como 100, 150, 200, 250 Hz en un sistema de 50 Hz, o 120, 180, 240, 300 Hz en un sistema de 60 Hz [7].

3.3. AFECCIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

3.3.1. Distorsión armónica

Cuando se introduce un tono de frecuencia f_0 en un sistema no lineal, la salida no solo contendrá dicho tono (aunque con posiblemente diferente amplitud y fase), sino que también se verá enriquecida con armónicos, tales como $2f_0$, $3f_0$ y así sucesivamente. La Distorsión Armónica Total (THD) se calcula como una medida de la proporción de la energía de estos armónicos con respecto a la energía total de la señal como muestra la ecuación (4), proporcionando así una evaluación cuantitativa de la distorsión introducida por la no linealidad en el sistema [7].

$$\begin{aligned}
 THD &= \frac{\sum \text{Potencia de los armónicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental}} \\
 &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_0}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

P_0 : Potencia del tono fundamental.

P_i : Potencia del armónico del i-ésimo que contiene la señal

La ecuación (5) expone cómo es posible descomponer cualquier señal periódica no senoidal $i(t)$ mediante la suma de su componente fundamental $i_1(t)$, que corresponde a la frecuencia de red de 60 Hz, junto con sus componentes armónicas $i_h(t)$, las cuales son componentes cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

$$i(t) = i_1(t) + \sum_{h \neq 1} i_h(t) \tag{5}$$

Además, la ecuación (6) y (7), mide THD en la forma de onda de voltaje y corriente:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \tag{6}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \tag{7}$$

Por otro lado, el avance tecnológico en los sectores industrial y doméstico ha propiciado el uso de dispositivos electrónicos que, debido a su principio de funcionamiento, generan corrientes no senoidales, es decir, cargas no lineales. Esta corriente, al propagarse en la red, ocasiona una caída de tensión también no senoidal aguas arriba, resultando en la alimentación de cargas lineales con una tensión distorsionada [7].

El matemático francés Fourier describió este fenómeno al afirmar que "cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia". Los armónicos, en este contexto, son las componentes de una forma de onda distorsionada y su aplicación permite el análisis de cualquier forma de onda periódica no senoidal, descomponiéndola en diversas componentes senoidales.

Aunque la Figura 2, ilustra un ejemplo de esta distorsión, no se profundizará en el desarrollo matemático de la serie de Fourier, ya que se alejaría del objetivo central de este estudio sobre la calidad de la energía.

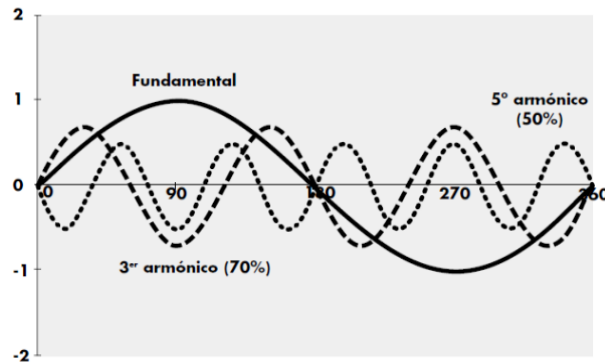


Figura 2. Distorsión Armónica [8].

3.3.1.1. Equipos que generan armónicos

3.3.1.1.1. Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS)

La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos emplean fuentes de alimentación conmutadas (SMPS), que se distinguen de las antiguas por sustituir el transformador reductor y el rectificador convencional con una unidad de rectificación de control directo. Esta unidad carga un condensador de almacenamiento, del cual se deriva la corriente continua hacia la carga mediante un método adaptado a los requisitos de voltaje y corriente de salida. Esta transición ha permitido a los fabricantes reducir significativamente el tamaño, costo y peso de los equipos, además de adaptar la unidad de potencia a diversas formas requeridas [9].

Sin embargo, este cambio conlleva un inconveniente, ya que, en lugar de obtener una corriente continua, la fuente de alimentación genera pulsos de corriente que contienen numerosos armónicos, especialmente terceros armónicos y superiores, como se ilustra en la Figura 3. A la entrada de la fuente de alimentación se coloca un filtro básico para descartar los componentes de alta frecuencia de la línea y el neutro, pero carece de efectividad contra las corrientes armónicas que regresan a la fuente de alimentación.

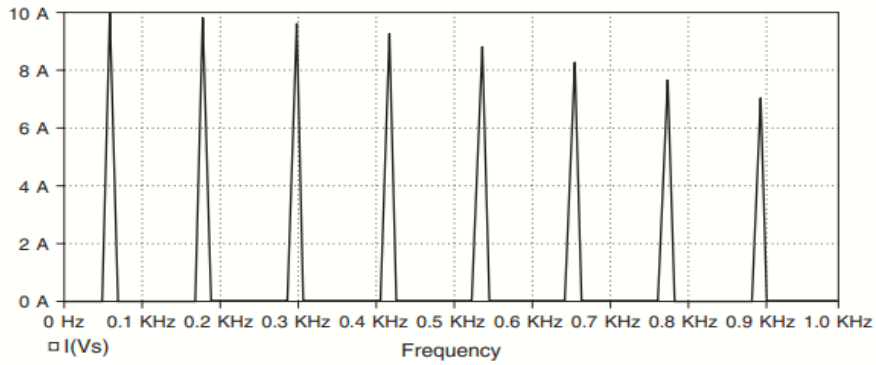


Figura 3. Espectro armónico de una PC típico [6].

3.3.1.1.2. Cargas trifásicas

Los controladores de velocidad variable, las unidades de UPS y, en general, los convertidores de corriente continua comúnmente se basan en el uso del puente trifásico. Este tipo de puente genera armónicos en frecuencias de $6n \pm 1$, es decir, a un número más o menos uno de cada múltiplo de seis. En teoría, la amplitud de cada armónico es inversamente proporcional a su número; por ejemplo, un quinto armónico tendría una amplitud del 20%, y un undécimo armónico tendría una amplitud del 9%, y así sucesivamente [6] como se muestra en la Figura 4.

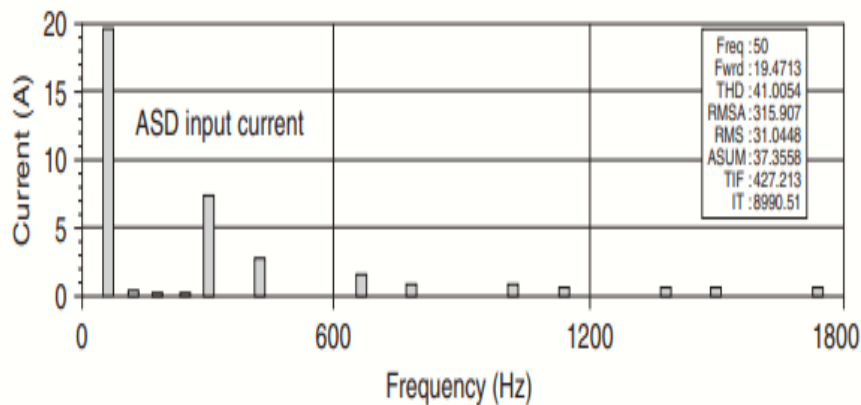


Figura 4. Espectro armónico de un puente de seis pulsos [6].

3.3.2. Límites de Distorsión Armónica en voltaje en % del voltaje nominal:

3.3.2.1. IEEE 519

Tabla 1. Límites de Distorsión Armónica en Voltaje en % del voltaje nominal según IEEE 519 [7].

Nivel de tensión en la acometida (Vn)	Distorsión Armónica Individual	Distorsión Armónica Total THD Vn
Vn < 69 k	3.00%	5.00%
69 kV < Vn < 161 kV	1.50%	2.50%
Vn > 161 kV	1.00%	1.50%

3.3.2.2. CONELEC 004/01

Tabla 2. Valores Límites de Armónicas De Voltaje [10].

ORDEN (n) DE LA ARMÓNICA Y THD	TOLERANCIA Vi' o THD' (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V < 40 kV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
>25	$0.1 + 0.6 \cdot 25/n$	$0.2 + 1.3 \cdot 25/n$
Impares múltiplos de 3		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
>21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
>12	0.2	0.2
THD	3.0	8.0

3.4. NORMATIVAS

3.4.1. Norma IEC 61000-3-2

La norma IEC 61000-3-2: 2006 + A1 + A2 se aplica a equipos eléctricos que reciben alimentación de la red con una tensión igual o superior a 220 V y una corriente de hasta 16 A (inclusive), con el objetivo de limitar la emisión de componentes armónicos. Esta norma excluye ciertos equipos en virtud de su alcance, tales como equipos con potencia nominal inferior a 75 W, a excepción de aquellos de clase C, equipos profesionales con potencia superior a 1 kW, elementos de calentamiento controlados simétricamente con una potencia de hasta 200 W, atenuadores independientes para luminarias incandescentes con potencia igual o inferior a 1 kW.

La norma EN 61000-3-2: 2006 + A1 + A2, que trata sobre compatibilidad electromagnética (EMC), específicamente en la parte 3-2 referente a límites para las emisiones de corriente armónica (con corriente de entrada del equipo ≤ 16 A por fase), se clasifica en distintas categorías [11].

La Clase A:

- Equipos trifásicos
- Electrodomésticos (excepto equipos de Clase D)
- Herramientas estacionarias fijas
- Equipos de atenuación diseñados para combinarse con lámparas incandescentes
- Otros equipos no clasificados como Clase B, Clase C o Clase D.

La Tabla 3 de la norma establece los límites permitidos para armónicos impares y pares, proporcionando así directrices para la conformidad de los equipos con los estándares especificados.

Tabla 3. Límites para los equipos clase A según la norma 61000-3-2 [11].

Orden armónico h	Corriente armónica máxima permitida (A)
Armónicos Impares	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15 ≤ h ≤ 39	0.25/h
Armónicos Pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
8 ≤ h ≤ 40	1.84/h

Clase B:

- Comprende herramientas portátiles
- Equipos de soldadura por arco no profesionales.

Clase C:

- Equipos de iluminación.

Clase D:

- Equipos de tipo con una potencia igual o inferior a 600 W
- Los ordenadores personales dispositivos similares
- Receptores de televisión.

3.4.2. Norma IEC 6100024

Esta norma define los niveles de coexistencia para las interferencias en entornos industriales y es aplicable tanto en redes de distribución de 50 Hz como de 60 Hz, abarcando tanto baja como media tensión. Para utilizar la norma de manera efectiva, es necesario identificar los equipos y sus características para asignar la clase correspondiente y aplicar los requisitos establecidos. Las clases se dividen de la siguiente manera:

- Clase 1: Incluye equipos altamente sensibles a las perturbaciones.
- Clase 2: Relacionada con puntos de conexión comunes y puntos de conexión interna en entornos industriales.
- Clase 3: Hace referencia a las alimentaciones a través de convertidores, máquinas de alto consumo de energía o motores grandes con arranques frecuentes [11].

3.4.3. Norma IEC 61000430

La norma IEC 61000-4-30 establece el método de medición, la precisión y la agregación de tiempo para verificar los parámetros de calidad de potencia, dividiendo estos requisitos en tres clases de rendimiento con el objetivo de lograr resultados repetibles y comparables. Simultáneamente, la norma IEC 62586-1 especifica los requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC), seguridad y medio ambiente para analizadores de calidad de energía en diversas condiciones de instalación. Asimismo, la IEC 62586-2 define los requisitos de prueba e incertidumbre para cumplir con la clase A de la IEC 61000-4-30. Este estándar se actualiza periódicamente para mantenerse al día con los avances de la industria y adaptarse a nuevos escenarios de medición que surgen.

Desde su introducción en 2003, ha experimentado varias actualizaciones y actualmente se encuentra en su tercera edición. La IEC 61000-4-30 establece tres clases de rendimiento de la siguiente manera:

- Clase A: Debe cumplir con los más altos estándares de rendimiento y precisión para garantizar resultados repetibles y comparables.
- Clase S: Los niveles de precisión son menos estrictos, siendo adecuados para encuestas estadísticas y aplicaciones contractuales donde no se requiere una medición comparativa rigurosa.
- Clase B (obsoleta): Esta clase se introdujo en las ediciones 1 y 2 para evitar que los instrumentos existentes se volvieran obsoletos. Sin embargo, en la tercera edición, se eliminó esta clase de rendimiento, ya que se requería que el método de medición y la precisión fueran definidos por el fabricante en la hoja de datos del instrumento [11].

3.4.4. Norma IEEE 1159.

El estándar IEEE 1159-1995 identifica siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos presentes en las redes eléctricas. Estas categorías son: transitorios,

variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de la tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia.

Dentro de la categoría de variaciones de corta duración se incluyen los huecos de tensión, las interrupciones y lo que se conoce como la antítesis al hueco de tensión o "swell". Cada tipo de variación se clasifica adicionalmente como instantáneo, momentáneo o temporal, dependiendo de su duración. Estos conceptos se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Definiciones de las variaciones de corta duración y de larga duración en el IEEE Std. 1159-1995 [12].

Categorías	Duración típica	Magnitud típica de la tensión
2.0 Variaciones de corta duración		
2.1 Instantánea		
2.1.1 Hueco	0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u.
2.1.2 Swell	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u.
2.2 Momentánea		
2.2.1 Interrupción	0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2 Hueco	30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 p.u.
2.2.3 Swell	30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 p.u.
2.3 Temporal		
2.3.1 Interrupción	3 s – 1 min	< 0.1 p.u.
2.3.2 Hueco	3 s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u.
2.3.3 Swell	3 s – 1 min	1.1 – 1.2 p.u.
3.0 Variaciones de larga duración		
3.1 Interrupción sostenida		
	> 1 min	0.0 p.u.
3.2 Bajada de tensión		
	> 1 min.	0.8 – 0.9 p.u.
3.3 Sobretensión		
	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u.

Las variaciones de corta duración suelen originarse principalmente debido a condiciones de fallo, como la conexión de cargas voluminosas que demandan elevadas corrientes de arranque o interrupciones intermitentes. La naturaleza del fallo, su ubicación en el sistema y el estado general del mismo pueden dar lugar a sobretensiones, descensos de tensión o interrupciones temporales. Ya sea que el fallo ocurra en proximidad al punto de interés o más distante, su repercusión en la tensión resultará en una variación de corta duración [12].

3.4.5. Norma IEC 5552.

La normativa establece las condiciones relativas a las armónicas que deben cumplir las maquinarias cuyo consumo sea inferior a 16 Amperios por fase en redes de 220 V a 415 V. Esta regulación abarca equipos como computadoras y televisores. Los parámetros definidos por la normativa incluyen las cantidades (RMS) de cada armónica, su relación con la cantidad máxima permitida y el valor máximo superior [16].

3.4.6. Estándar IEEE 519.

Existe una preocupación significativa en relación con las cargas no lineales y su impacto en las corrientes armónicas. Todos los operadores de redes de consumo de energía tienen la responsabilidad de mantener niveles adecuados de tensión y forma de onda. La norma IEEE 519 aborda la amplitud de las corrientes armónicas en función de la red suministradora.

En cualquier lugar donde se presenten problemas debido al exceso de corriente armónica o variación de tensión, tanto el proveedor como el receptor de la energía deben abordar y resolver estas situaciones de manera obligatoria. El propósito de esta propuesta es sugerir medidas ante situaciones extremas de distorsión armónica, basándose en dos fundamentos Tabla 5 [7].

Tabla 5. Límites según norma IEEE519 [12].

Límites de corriente Armónica para carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con otras cargas, para voltajes entre 120 – 69,000 volts.						
Máxima distorsión armónica impar de la corriente, en % del armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11<=h<11	17<=h<23	23<=h<35	35<h	TDD
<20	04.0	2.0	1.5	0.6	0.3	05.0
20<50	07.0	3.5	2.5	1.0	0.5	08.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

La norma IEEE 519 establece otros parámetros para evaluar la calidad de la energía eléctrica, uno de ellos es el Flicker de Tensión. Esta normativa incluye directrices específicas sobre la reducción de la tensión debida a usuarios individualizados Tabla 6 [7].

Tabla 6. Límites según norma IEEE519 [7].

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de tensión (%)	Distorsión total del voltaje THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y más	1.0	1.5

Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.

3.4.7. ARCERNNR 002/20

La normativa regulatoria sobre la calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica incluye disposiciones sobre la regulación y penalización del bajo factor de potencia.

Todos estos fenómenos contribuyen a la creación de normativas que penalizan el consumo excesivo de potencia reactiva. En Ecuador, esto se conoce como el cargo por bajo factor de potencia. Para evitar estas penalizaciones, las empresas distribuidoras implementan bancos de condensadores, lo que les permite reducir los recargos económicos y evitar sanciones [13].

4. METODOLOGÍA

4.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1.1. Método inductivo – deductivo

Se llevó a cabo el método para establecer el análisis del estado de la calidad de energía de la empresa "TOPAC", con el objetivo de identificar y comprender los problemas existentes, así como saber cuál es su causa. Este proceso incluyó la recopilación de datos relacionados con cargas lineales y no lineales, creación de un esquema unifilar y el registro de perturbaciones a través del analizador de redes Fluke 435-II. Y como último paso, se realizaron simulaciones en el software ETAP 19.0.1 utilizando los datos recabados previamente, con el fin de proponer soluciones efectivas para abordar los principales fenómenos que perturban al sistema eléctrico.

4.1.2. Método analítico – sintético

Mediante la recopilación de información proveniente de diversas fuentes bibliográficas, como libros y revistas científicas, este método fue empleado para estudiar el tema en investigación. La fundamentación teórica obtenida facilitó el análisis de los distintos problemas y causas relacionados con la calidad de la energía eléctrica. Asimismo, proporcionó los fundamentos para comprender los procesos necesarios en la elaboración de simulaciones, proponer soluciones a los fenómenos de mayor incidencia dentro del sistema eléctrico y para el beneficio económico de la empresa.

4.2. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

4.2.1. Investigación Teórica

Se recopiló información de libros, repositorios de universidades, revistas, informes, artículos científicos y sitios web de entidades relevantes que han garantizado fiabilidad del mismo para llevar a cabo la investigación teórica de este estudio. El propósito fue establecer un fundamento teórico conciso sobre la calidad de la energía eléctrica, comprender las normativas como IEEE, ARCERNR 002/02 y evaluar su aplicabilidad en situaciones de bajo voltaje.

4.2.2. Investigación de campo

Las visitas a las instalaciones de la empresa "TOPAC" en el cantón Latacunga ubicada en la parroquia Eloy Alfaro, fueron parte integral y fundamental de esta investigación. Durante estos encuentros, se llevó a cabo el levantamiento de cargas lineales y no lineales, conexión del sistema eléctrico general, información acerca de las maquinarias utilizadas en las diversas áreas y los procedimientos a los que se someten en la producción de cubetas de huevos. A través de mediciones precisas, se recopilaron datos y características esenciales para elaborar el diagrama unifilar eléctrico correspondiente a la empresa.

4.2.3. Investigación Cuantitativa

El enfoque principal de esta investigación radica en la obtención de datos numéricos a partir de instrumentos de medición, así como en la recolección de parámetros eléctricos de mayor relevancia. Estos datos se utilizan para llevar a cabo la tabulación, el análisis y la comparación con los criterios aceptables, con la finalidad de detectar posibles inconvenientes y formular soluciones adecuadas para abordarlos.

4.2.4. Investigación Descriptiva

La investigación posibilita la descripción de manera detallada las perturbaciones eléctricas que existen en la empresa, así como los procedimientos requeridos para atenuar dichos problemas. En consecuencia, la investigación descriptiva proyecta varias alternativas potenciales para optimizar el consumo de energía mediante el estudio de la calidad de la energía eléctrica.

4.3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

4.3.1. Observación directa y participativa

A través de la implementación de esta técnica, se logró establecer una comunicación directa con la empresa "TOPAC", así como con el equipo administrativo y técnico encargado del mantenimiento eléctrico. Este acercamiento facilitó la obtención de datos necesarios para identificar los equipos, maquinarias y componentes eléctricos instalados en la empresa.

4.3.2. Instrumentos de investigación

Se emplearon diferentes instrumentos de investigación para abordar este tema de estudio, centrándose principalmente en la recopilación de información visual y documental relacionada con la empresa "TOPAC". Se utilizaron fotografías que capturaron cargas, maquinaria, así como elementos eléctricos con posibles vínculos a perturbaciones en el sistema eléctrico. Además, se emplearon fichas de registro donde se detallaron las características y datos de conductores, maquinarias y otros elementos eléctricos. Este enfoque permitió obtener un panorama completo, abordando aspectos como cargas lineales, cargas no lineales, el sistema de puesta a tierra y el esquema unifilar del sistema eléctrico.

4.4. OBTENCIÓN DE DATOS

4.4.1. Paso 1: Reconocimiento de las áreas de la empresa

En esta etapa, mediante la ayuda del personal de mantenimiento, se llevó a cabo la exploración exhaustiva de todas las áreas de trabajo de la empresa. Se realizó una observación detallada de las maquinarias y los procesos que impulsan las operaciones de dicha entidad. A partir de este análisis, se logró la identificación de los circuitos que suministran energía a cada transformador, considerando información crucial como los datos de placa, el calibre de los conductores y las protecciones de cada equipo. Como paso final, se procedió a la elaboración del esquema unifilar. La Figura 5, proporciona una representación visual en diagrama de bloques de lo anteriormente mencionado.

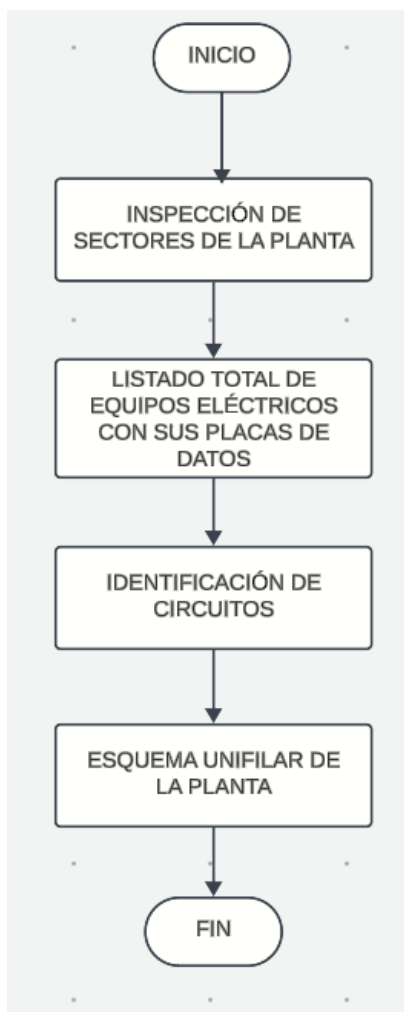


Figura 5. Proceso de elaboración de diagramas eléctricos.

4.4.2. Paso 2: Levantamiento de cargas, registro de equipos y maquinas eléctricas existentes

Se llevó a cabo la recopilación de datos correspondientes a las placas de todas las maquinarias, equipos eléctricos y conductores de la empresa. Un desafío significativo surgió al encontrarse que algunos de los datos de placa en los motores trifásicos y máquinas no eran legibles o estaban inaccesibles. Para superar esta situación, se procedió a realizar mediciones directas con la colaboración del técnico del área de mantenimiento eléctrico.

En la Tabla 44 y Tabla 45 se proporciona un listado detallado de cargas, tanto lineales como no lineales, registradas en la empresa "TOPAC".

4.4.2.1. Revisar los paneles de distribución eléctrica.

Se llevó a cabo una inspección general de los tableros principales como parte del proceso de verificación. Esto permitió establecer puntos de referencia y rastrear el cableado hacia los sub-tableros. Se utilizó un equipo Seguidor de circuitos que se demuestra en la Figura 6, y se evaluaron dos marcas: MASTECH MS5902 y Klein Tools modelo ET-310 [14].

Se compararon ambas marcas, observando que MASTECH es más adecuada para instalaciones domiciliarias debido a su alcance de recepción limitado. En contraste, Klein Tools es versátil, sirviendo tanto para instalaciones domiciliarias como industriales, con un alcance mayor, y cuenta con un reconocimiento más amplio en el mercado. La elección final fue Klein Tools, ya que permitía identificar puntos entre tableros, especialmente considerando la ausencia de un diagrama eléctrico y la falta de cumplimiento de normativas en instalaciones industriales en la empresa.



Figura 6. Seguidor de circuitos Klein Tools ET-310 [14].

Se procedió a registrar la información mediante la toma de notas, donde se enumeraron y identificaron previamente los números de los tableros de distribución. Se registraron los valores de amperios de cada interruptor y, finalmente, se documentaron las conexiones correspondientes hacia los puntos de carga existentes.

4.4.3. Paso 3: Diseño del diagrama unifilar de cargas

Se llevó a cabo la creación del diagrama unifilar para el sistema eléctrico de la empresa, ofreciendo una visión general de la estructura de las instalaciones eléctricas y el funcionamiento del sistema de distribución eléctrica. En el proceso de elaboración de este diagrama, se siguieron las pautas establecidas por la norma IEC 60617, ya que los elementos eléctricos instalados en la empresa se adhieren a dicha normativa. Utilizando los datos recopilados en la fase anterior, se procedió al diseño del diagrama unifilar

empleando el software AutoCAD 2020. Este diagrama constituirá un punto de referencia esencial para el análisis detallado del sistema eléctrico el cual se encuentra en la sección de anexos.

4.4.4. Paso 4: Evaluación del consumo eléctrico y egresos económicos

Se procedió a evaluar el consumo eléctrico utilizando las planillas proporcionadas por la Empresa Eléctrica ELEPCO S.A., abarcando el período comprendido entre los años 2019 y 2022. El registro de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software Excel, permitiendo calcular los desembolsos económicos derivados de posibles penalizaciones, la cantidad total de energía consumida durante los años especificados, y la elaboración de tabulaciones correspondientes. Este análisis detallado tiene como objetivo proporcionar una comprensión profunda del estado de la empresa en relación con su consumo de energía eléctrica.

4.4.5. Paso 5: Condición para el análisis de carga

Se consideró la normativa internacional IEEE std 519, la cual establece que el periodo de evaluación de los equipos no debe ser inferior a siete días consecutivos, y que el registro de datos debe realizarse en intervalos de 10 minutos. Este estándar proporciona directrices importantes para garantizar una evaluación exhaustiva y precisa, asegurando un monitoreo detallado del rendimiento durante un lapso significativo y con una frecuencia específica de registro de datos [7].

4.4.6. Paso 6: Características del equipo

Según las directrices establecidas por la normativa IEEE std 519, el equipo analizador debe ser capaz de medir y registrar diversas variables críticas, entre las que se incluyen:

- Voltaje
- Potencia de carga
- Armónicos de voltaje y corriente
- Flickers Sags y Swells
- Desbalance de voltaje

Esto posibilitará el registro preciso de estos parámetros en una red trifásica de 4 hilos, ya que dicha configuración es la presente en el transformador de la empresa TOPAC.

4.4.7. Paso 7: Determinación del analizador de redes

Para analizar la energía y los parámetros eléctricos en la empresa TOPAC, se empleó el analizador de redes trifásico de energía y calidad de energía eléctrica FLUKE 435 – II, como se muestra en la Figura 7.

Este equipo fue instalado en todas las fases de los bornes de las entradas al tablero principal, con mediciones realizadas en el transformador de 75 kVA que abarca toda la empresa. Se registraron y evaluaron diversos parámetros, como Potencia Activa (P), Potencia Reactiva (Q), Potencia Aparente (S), Voltaje (V), Corriente (I), Frecuencia (f) y Factor de Potencia (FP) en la red de la empresa TOPAC, siendo estos sujetos a un análisis detallado.



Figura 7. Dispositivo FLUKE 435-II para la evaluación de energía y la calidad eléctrica en redes trifásicas [15].

4.4.7.1. Características destacadas del Analizador de Redes Trifásico de Energía y Calidad de Energía Eléctrica FLUKE 435-II:

- Estudio avanzado de la calidad eléctrica.
- Función de calculadora de pérdidas de energía.
- Máxima categoría de seguridad garantizada.
- Capacidad de registro de energía eléctrica y parámetros configurados por hasta un mes y medio.
- Control de la demanda máxima en relación con la potencia durante periodos específicos según las necesidades del usuario.
- Verificación del consumo de energía para evidenciar las mejoras implementadas.
- Captura de fluctuaciones de tensión causadas por la conexión y desconexión de cargas significativas.

- Configuración sencilla del instrumento mediante la visualización en color de las formas de los fasores de corriente y voltaje.
- Medición de las tres fases y el neutro con las sondas flexibles incluidas.
- Generación de informes y visualización de gráficos a través del software PowerLog 430-II [15].

En la selección de este Analizador de Redes para el proyecto, se evaluaron criterios importantes:

- **Calidad:** El dispositivo cumple con la normativa EN61010 - 2ª edición "2001", que establece requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medida, control de medidas y uso de laboratorio, siendo clasificado como Clase III, Grado 2 de contaminación.
- **Memoria:** El analizador cuenta con una tarjeta de memoria SD de 8 GB para almacenar datos de medidas.
- **Interfaz:** Equipado con una interfaz USB aislada para la comunicación con una PC u ordenador personal, con cable de interfaz suministrado.
- **Velocidad de muestreo:** La velocidad de muestreo para la detección de transitorios es de 200 Ks/s, con capacidad para capturar hasta 9.999 eventos.
- **Frecuencia nominal:** Cumple con la norma IEC 61000-4-30, con frecuencia nominal de 50Hz/60Hz y opción seleccionable por el usuario, con sincronización automática.
- **Alimentación eléctrica:** Incorpora una batería de iones de litio de 28Wh, con autonomía de más de 7 horas.

Estos criterios se basaron en el manual del usuario FLUKE 434-II, 435-II, 437-II Analizador Trifásico de Energía y Calidad de la Energía Eléctrica, que proporciona información detallada sobre el equipo [15].

4.4.7.1.1. Obtención de datos.

En concordancia con la norma IEEE Std 519, dada la imprevisibilidad de las alteraciones en la calidad de la energía eléctrica, es esencial registrar y procesar continuamente los datos para mejorar la eficacia del tiempo de registro. Para capturar señales transitorias de alta frecuencia, se utilizan detectores de pico doble, caracterizados por su respuesta

rápida, ventana estrecha, capacidad reinicialable y, generalmente, convertidores analógicos de alta velocidad.

A partir de los datos de muestra sin procesar y los valores RMS, se calculan diversos parámetros adicionales en cada ciclo o en ventanas de tiempo específicas (por ejemplo, cada X milisegundos), según el parámetro en consideración. Por ejemplo, la medición del voltaje suele llevarse a cabo ciclo por ciclo, donde X podría ser de 16.66 ms para una frecuencia de 60 Hz. Para la medición de armónicos, esta ventana de tiempo generalmente se extiende a 200 ms, abarcando parámetros como los relacionados con la potencia, la energía y los armónicos.

El analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435-II cumple con los criterios necesarios para la adquisición de datos, ya que cuenta con una velocidad de muestreo para la detección de transitorios de 200 Ks/s a una frecuencia de 60 Hz. Este cumplimiento asegura la captura precisa de información relevante para el análisis de la calidad de la energía eléctrica.

4.4.8. Paso 8: Conexión del equipo a la red trifásica

El analizador cuenta con 4 entradas BNC destinadas a las pinzas amperimétricas y 5 entradas de tipo banana adicionales para la medición de la tensión. En un sistema trifásico, la conexión se realiza de acuerdo con la representación mostrada en la Figura 8 en el lado de bajo voltaje del transformador de la industria. Como detalle significativo se tiene que existen dos breakers principales de 250A y de 100A, por lo cual se debe realizar el análisis por derivación.

En el proceso inicial de conexión del analizador de redes al sistema trifásico, se procederá colocando las pinzas amperimétricas alrededor de los conductores de las fases A (L1), B (L2), C (L3) y N (Neutro). Dichas pinzas están marcadas con una flecha que indica la polaridad correcta. Posteriormente, como segundo paso, se realiza la conexión de la tensión, comenzando con la conexión a tierra y siguiendo con N, A (L1), B (L2) y C (L3).

En el tercer y último paso, es fundamental verificar las conexiones en dos ocasiones, asegurándose de que las pinzas amperimétricas estén correctamente sujetas y completamente cerradas alrededor de los conductores. Este proceso garantiza una conexión segura y precisa del analizador al sistema trifásico.

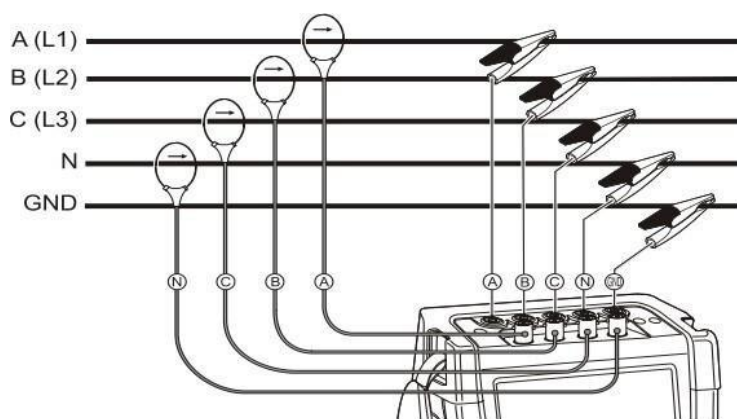


Figura 8. Conexión del analizador a un sistema trifásico de distribución [15].

4.4.9. Paso 9: Verificación del funcionamiento del analizador de redes

Para garantizar el registro preciso de los datos, es esencial contar con un analizador de redes previamente calibrado por un instituto de calibración y ensayo. Antes de iniciar la recopilación de datos, se debe verificar la pantalla del osciloscopio, así como el diagrama fasorial, cuya correcta conexión de los cables de voltaje y las sondas amperimétricas puede ser confirmada. En el diagrama vectorial, las corrientes y los voltajes de las fases A (L1), B (L2) y C (L3) deben presentarse de manera consecutiva cuando se observan en el sentido de las agujas del reloj, denotando que se obtenga una secuencia positiva en la red.

4.4.9.1. Condiciones para la medición del analizador de redes

En el siguiente paso, la normativa internacional IEEE std 519 establece las condiciones de análisis, parámetros eléctricos, medición, registro y almacenamiento de los datos recopilados en cada punto seleccionado. De acuerdo con esta normativa, se especifica que el periodo de evaluación del equipo no debe ser inferior a siete días continuos y que el registro de datos debe realizarse en intervalos de 10 minutos. En este contexto, el analizador de calidad de energía eléctrica llevará a cabo el registro de los datos durante una semana [7].

El periodo de análisis para el transformador de 75 kVA de la empresa TOPAC abarca desde las 11:55 horas del 07 de enero del 2024 hasta las 11:45 horas del 14 de enero del 2024 para el breaker de 250A y desde las 11:55 horas del 16 de enero del 2024 hasta las 11:45 horas del 22 de enero del 2024 para el breaker de 100A, totalizando 7 días para

cada breaker con una recopilación de datos cada 10 minutos, conforme a lo mencionado previamente.

4.4.10. Paso 10: Obtención y descarga de datos medidos por el analizador de redes

Al concluir el proceso de registro de mediciones realizado a través del analizador trifásico de energía y calidad de energía eléctrica FLUKE 435-II, se posibilita la transferencia de los datos al ordenador mediante el software Power Log de FLUKE Figura 9, o a través de la tarjeta SD incorporada en el equipo. Los resultados de los parámetros eléctricos o la hoja de datos pueden ser obtenidos en cualquier día y hora dentro del periodo total de medición y tienen la opción de ser exportados en formato (.csv), que es una extensión compatible con programas de cálculo como Excel [16].

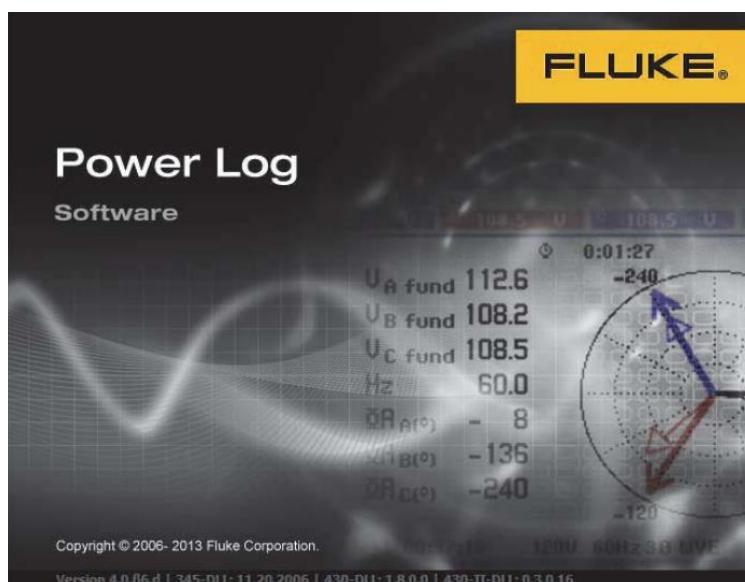


Figura 9. Power Log Welcome Screen [16].

4.4.11. Paso 11: Simulación del Sistema Eléctrico en ETAP

19.0.1

El software destinado al diseño de la simulación debe cumplir con ciertos parámetros fundamentales, entre los cuales se incluyen:

- Proporcionar un modelado preciso de un sistema eléctrico de potencia trifásica y monofásico, integrando diversos elementos eléctricos.
- Incluir el modelado de elementos de instrumentación con análisis y coordinación de protecciones.

- Ofrecer un control interactivo gráfico con diagramas unifilares inteligentes y capacidad para gestionar múltiples niveles de tensión.
- Permitir la visualización gráfica de los resultados directamente en el diagrama unifilar con formatos configurables.
- Realizar el cálculo de ampacidad y capacidad de carga, incluyendo el dimensionado de conductores de fase.
- Facilitar el análisis de parámetros y perturbaciones eléctricas.

Considerando estos requisitos, el software ETAP se presenta como la opción más adecuada para el diseño de la simulación.

4.4.11.1. Software ETAP

ETAP proporciona soluciones de software líderes en el mercado para sistemas eléctricos, abarcando desde la fase de diseño e ingeniería hasta las operaciones y el mantenimiento. Mediante su plataforma integrada de gemelo digital eléctrico, ETAP ofrece una experiencia excepcional para el cliente y tecnologías de aprovechamiento de la nube que aseguran la accesibilidad universal para diseñadores, ingenieros y operadores. Esto permite a los usuarios mejorar la productividad, fomentar la colaboración y aumentar la eficiencia, facilitando así su transición hacia la era de la energía [17].

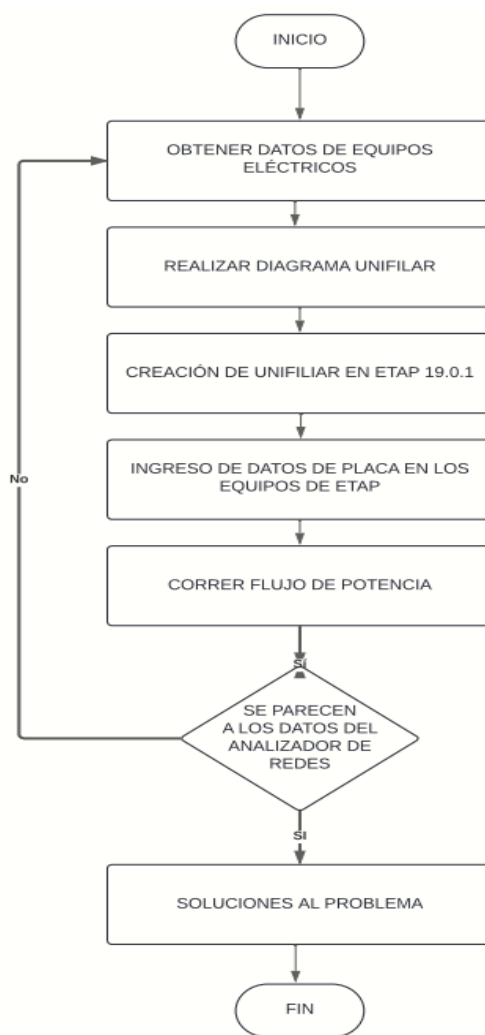


Figura 10. Diagrama de Flujo.

En el programa ETAP 19.0.1, la simulación del sistema sigue el procedimiento delineado en la Figura 10, como referencia. La primera fase implica la identificación de los diversos elementos que serán simulados, así como los puntos de conexión comunes para cada rama, basándose en planos unifilares y en la recopilación de cargas explicada en la fase inicial.

A continuación, se definen magnitudes como potencia, voltaje, corriente y factor de potencia, que se ingresarán al programa. Posteriormente, se procede a la conexión de los elementos y maquinarias a los distintos puntos de conexión común. La puesta en servicio de las máquinas se realiza considerando el registro máximo de la demanda, la investigación de campo y las experiencias personales. Luego, se lleva a cabo una comparación de los resultados obtenidos con los datos reales registrados por el analizador de redes. Finalmente, se plantean casos de estudio y se proponen soluciones adecuadas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. UBICACIÓN DEL FLUKE 435-II

Para este análisis, se dispusieron dos Breakers principales siendo el breaker 1 de 250 A y el breaker 2 de 100 A de la empresa TOPAC, ubicados inmediatamente después del transformador, como se ilustra en la Figura 11. Utilizando el analizador de redes FLUKE 435-II, se realizaron mediciones durante un periodo de 7 días, conforme a lo estipulado por la normativa vigente. Este estudio se llevó a cabo para ambos Breakers con el propósito de evaluar exhaustivamente todos los parámetros eléctricos presentes en la empresa y determinar su estado, ya sea óptimo o deficiente.

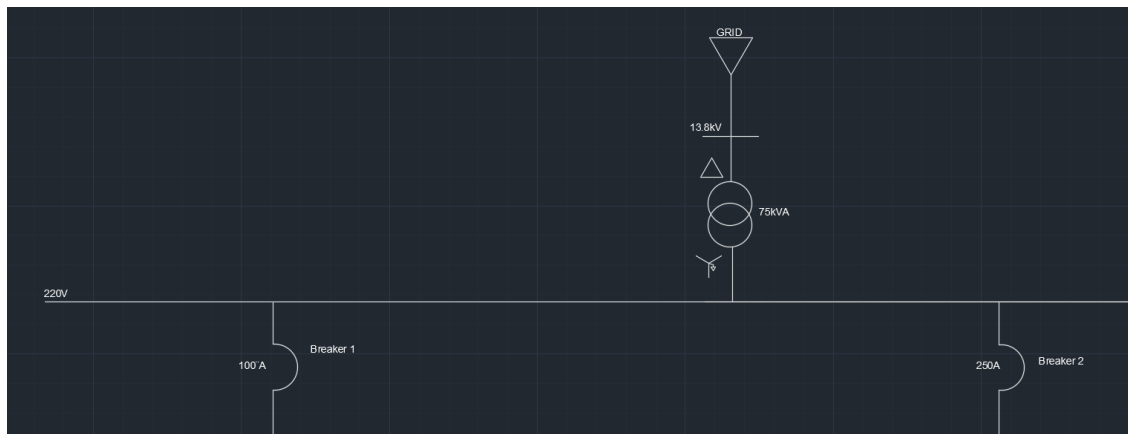


Figura 11. Ubicación del fluke 435-II.

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

5.2.1. Análisis de Nivel de Voltaje de los dos Breakers

Para el análisis de los niveles de voltaje se toma como referencia el voltaje nominal Fase – Fase (220 V) y Fase – Neutro (127 V). La calidad de nivel de voltaje en un punto del sistema de distribución se determinará con la siguiente ecuación (8):

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

Donde:

ΔV_k = Variación del voltaje de suministro respecto al voltaje nominal en el punto k.

V_k = Voltaje de suministro en el punto k, determinado como el promedio de las medidas registradas (al menos cada 3 segundos) en un intervalo de 10 minutos.

V_N = Voltaje nominal en el punto k.

La Regulación ARCERNNR 002/20 establece que los niveles de voltaje no se cumplen si los datos recolectados exceden el porcentaje especificado en un 5% o más. La Industria 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 7.

Tabla 7. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V.

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

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.

5.2.1.1. Voltaje nominal fase – neutro 127 V del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

Los valores de V_{rms} fase-neutro se muestra en la Tabla 8, determinados por el analizador de red considerando las medidas mínima, media y máxima obtenidas durante el periodo de registro de 7 días.

Tabla 8. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V del breaker 1.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	V_{rms} ph-n AN	V_{rms} ph-n BN	V_{rms} ph-n CN	V_{rms} ph-n Promedio
11/01/2024	10:15	V Mínimo	110.80	110.21	110.62	110.54
		V Medio	116.07	115.14	115.72	115.64
14/01/2024	06:45	V Máxima	125.33	124.06	124.76	124.72

Para verificar si los valores de la Tabla 8 cumplen con los límites establecidos por la normativa, se realizaron los cálculos según la ecuación (8) para obtener los valores de la Tabla 9. 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 9. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 1.

	% De Variación		Norma ARCERNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	1.31%	12.76%	No Cumple
V_{BN}	2.31%	13.22%	No Cumple
V_{CN}	1.76%	12.90%	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 12 muestra la variación de estos valores máximos y mínimos para un transformador de 75 kVA.

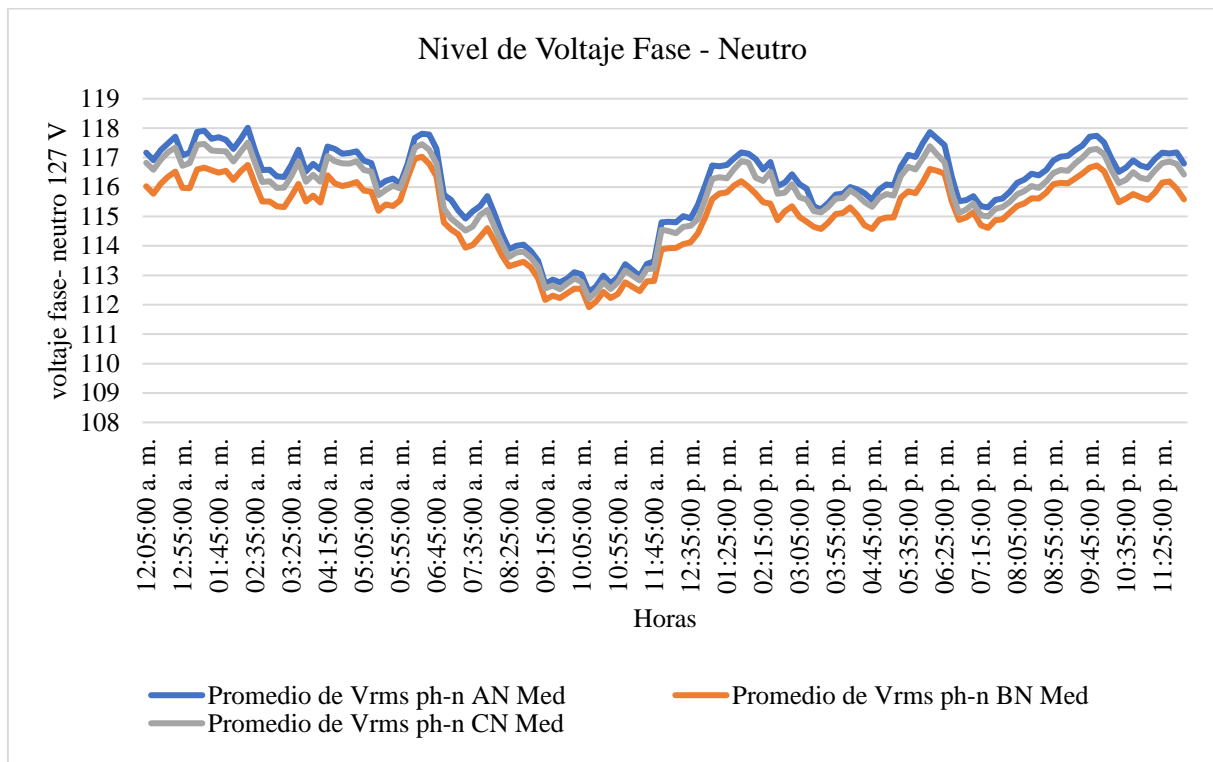


Figura 12. Nivel de Voltaje fase-neutro 127 V del transformador 75 kVA del breaker 1.

- Breaker 2

De la misma manera se presenta los resultados de las mediciones de voltaje fase-fase mínimas, medias y máximas correspondientes al breaker 2 en la Tabla 10, para verificar su estado ante la normativa ARCERNNR 002/20.

Tabla 10. Niveles de voltaje fase-Neutro: 127 V del breaker 2.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	Vrms ph-n	Vrms ph-n	Vrms ph-n	Vrms ph-n
			AN	BN	CN	Promedio
19/01/2024	08:54	V Mínimo	114.82	114.51	114.84	114.72
		V Medio	120.81	119.80	120.49	120.37
17/01/2024	17:04	V Máxima	125.21	124.21	125.04	124.82

En la Tabla 11 y la Figura 13, los cuales muestran variaciones que exceden el 8% del límite permitido. Estas discrepancias están influenciadas por factores como el horario, el tipo de carga o las condiciones de la instalación eléctrica.

Tabla 11. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.

	% De Variación		Norma ARCERNNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	1.41%	9.59%	No Cumple
V_{BN}	2.20%	9.83%	No Cumple
V_{CN}	1.54%	9.57%	No Cumple

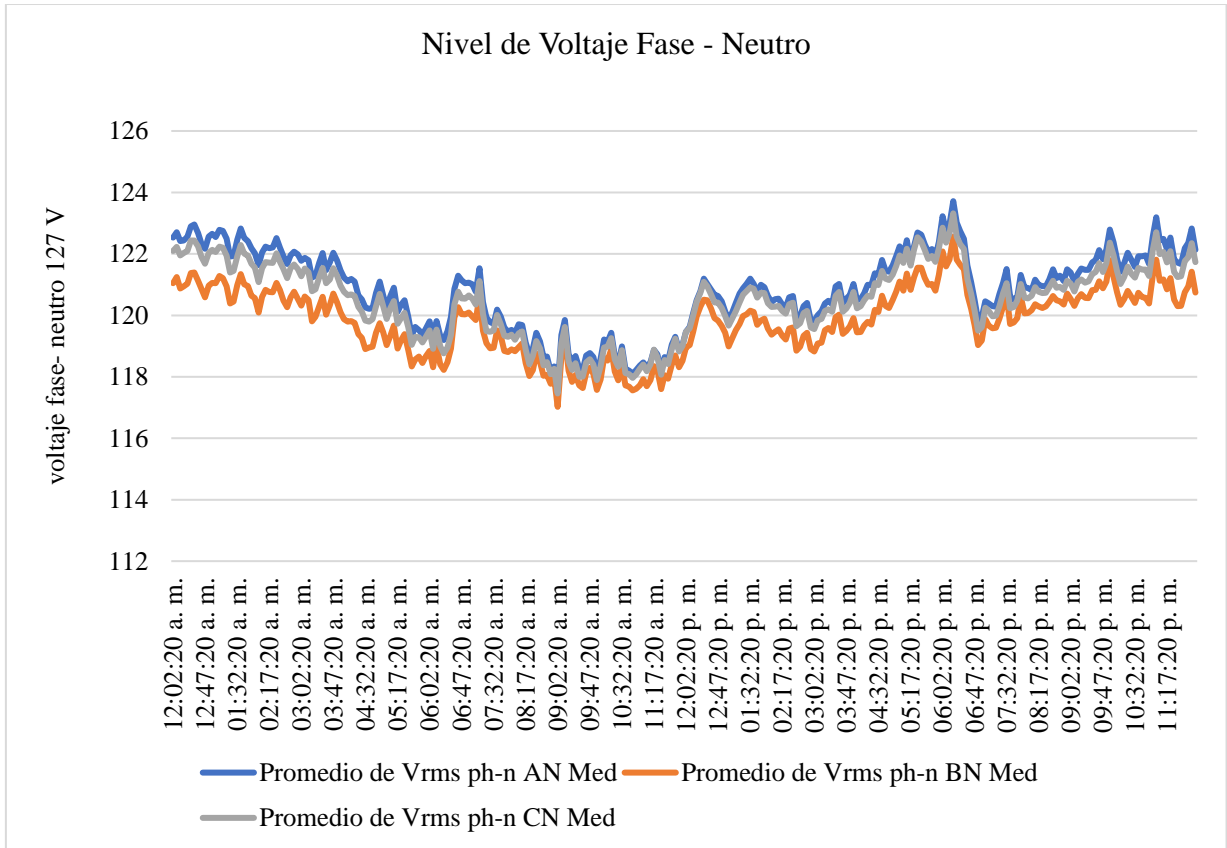


Figura 13. Nivel de Voltaje fase-neutro 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.

5.2.1.2. Voltaje nominal fase – fase 220 V del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

La Tabla 12 se muestra los valores de voltaje fase-fase y en la Tabla 13, se puede verificar que el sistema eléctrico si presenta variaciones de voltaje en el nivel de 220 V, como aprecia en la Figura 14 estas se encuentran fuera de las tolerancias (± 8) en voltajes fase-fase.

Tabla 12. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V del breaker 1.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	Vrms ph-ph AN	Vrms ph-ph BN	Vrms ph-ph CN	Vrms ph-ph Promedio
11/01/2024	10:15	V Mínimo	194.38	194.30	193.25	193.98
		V Medio	203.03	202.99	202.44	202.82
14/01/2024	06:45	V Máxima	218.90	218.21	218.51	218.54

Tabla 13. Variación de voltaje 220 V del transformador 75 kVA del breaker 1.

	% De Variación		Norma ARCERNNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	0.50%	11.65%	No Cumple
V_{BN}	0.82%	11.68%	No Cumple
V_{CN}	0.68%	12.16%	No Cumple

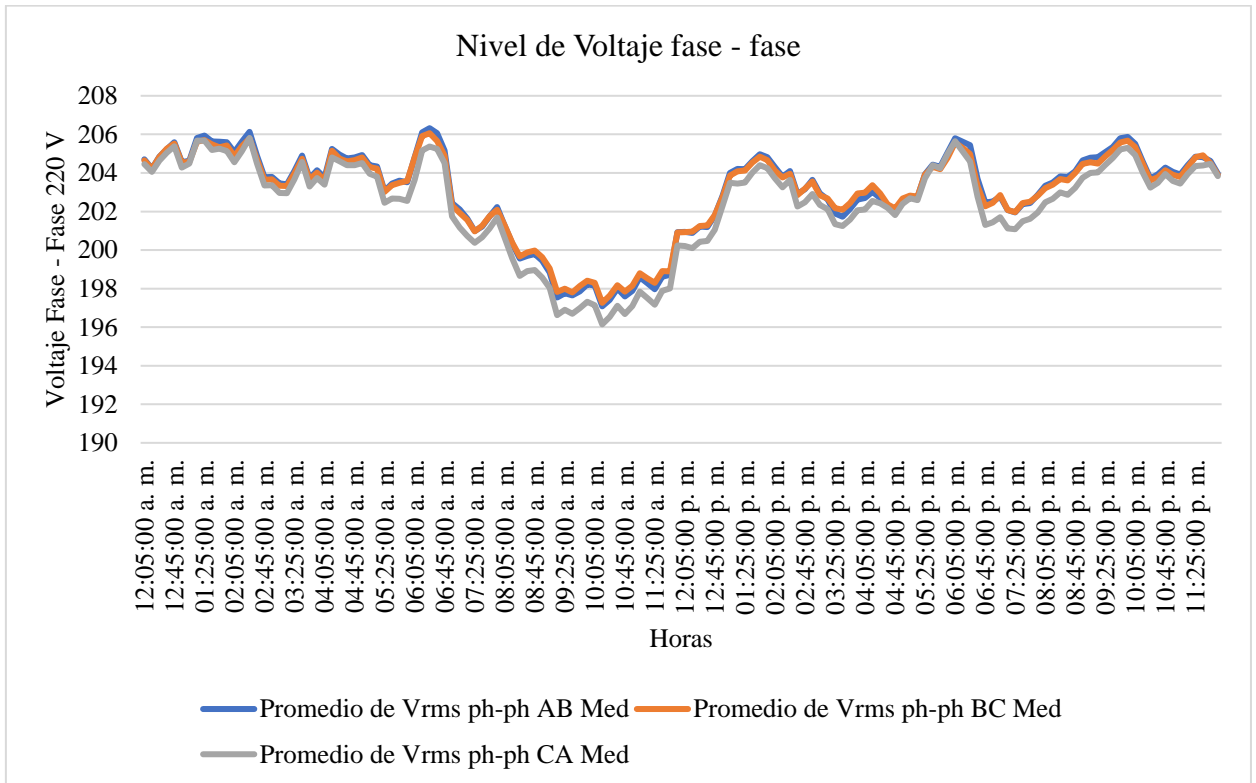


Figura 14. Nivel de Voltaje fase-fase 220 V del transformador 75 kVA del breaker 1.

- Breaker 2

Se presenta los resultados de las mediciones de voltaje fase-fase mínimas, medias y máximas correspondientes al breaker 2 en la Tabla 14 y en la Figura 15, para verificar su estado ante la normativa ARCERNNR 002/20.

Tabla 14. Niveles de voltaje fase-fase: 220 V del breaker 2.

Fecha	Hora	Nivel de Voltaje	Vrms ph-ph AN	Vrms ph-ph BN	Vrms ph-ph CN	Vrms ph-ph Promedio
19/01/2024	8:54	V Mínimo	198.48	198.50	197.37	198.98
		V Medio	207.13	206.99	206.44	206.85
17/01/2024	17:04	V Máxima	222.90	222.51	222.55	222.65

En la Tabla 15 se presentan los resultados, los cuales muestran variaciones que exceden el 8% del límite permitido. Estas discrepancias están influenciadas por factores como el horario, el tipo de carga o las condiciones de la instalación eléctrica.

Tabla 15. Variación de voltaje 127 V del transformador 75 kVA del breaker 2.

	% De Variación		Norma ARCERNNR 002/20
	Mínimo	Máximo	
V_{AN}	1.25%	10.35%	No Cumple
V_{BN}	1.41%	10.48%	No Cumple
V_{CN}	1.28%	10.26%	No Cumple

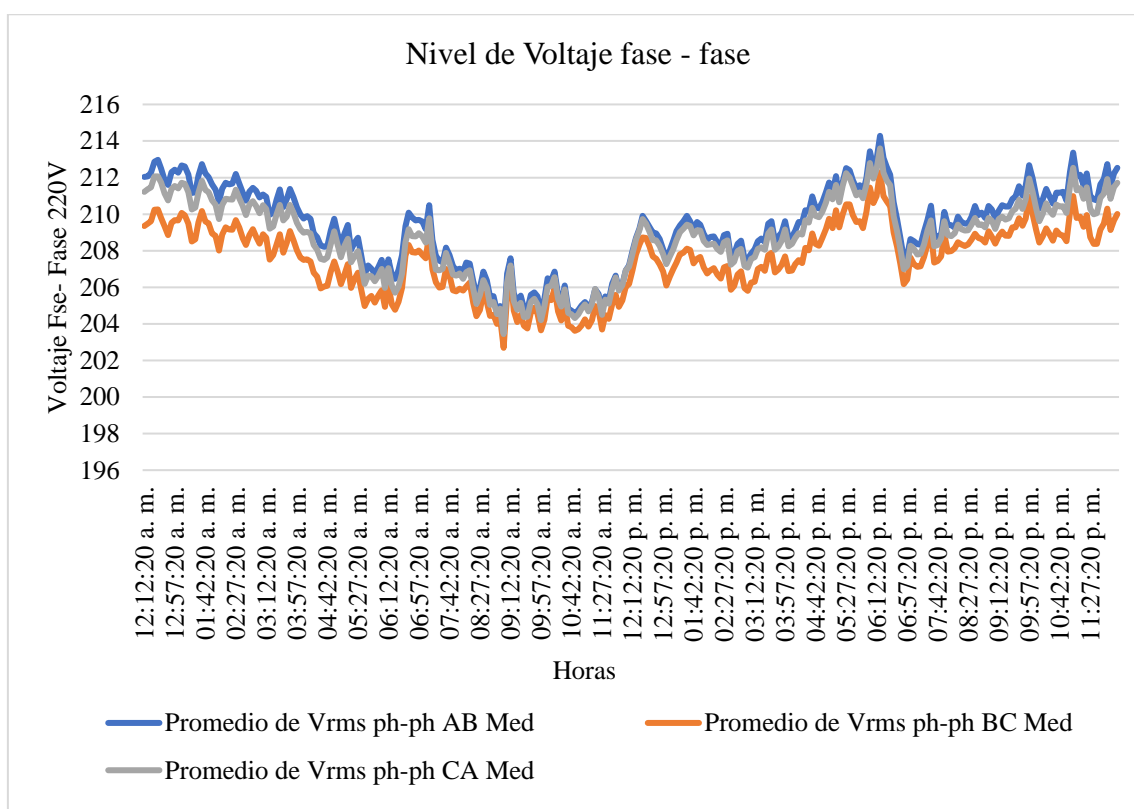


Figura 15. Nivel de Voltaje fase-fase 220 V del transformador 75 kVA del breaker 2.

5.2.1.3. Voltaje en el neutro en el transformador 75 kVA

- Breaker 1

La Tabla 16 y en la Figura 16, indica los resultados de la variación de voltaje en el neutro del transformador de 75 kVA, donde se aprecia que existen voltajes donde el pico más alto es de 4.40 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 16. Nivel de voltaje Neutro del breaker 1.

	Fecha	Hora	Vrms ph-n NG
V neutro Máximo	14/01/2024	06:45	4.40
V neutro Promedio			1.56
V neutro Mínimo	11/01/2024	10:15	1.12

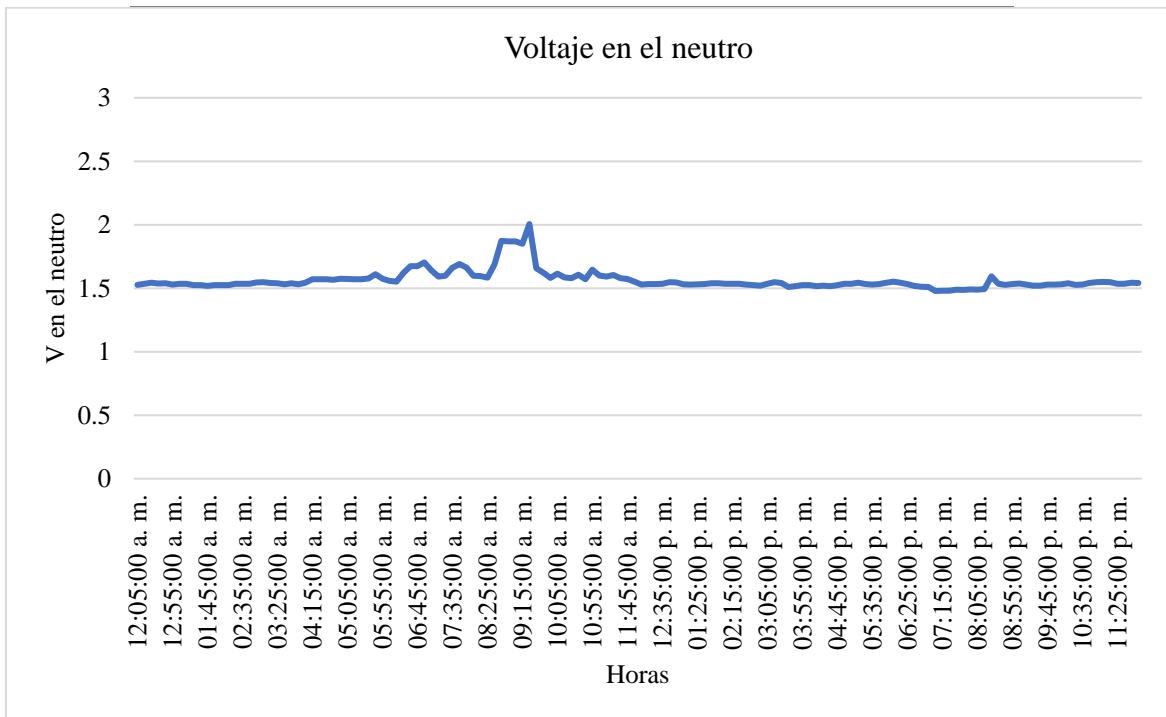


Figura 16. Nivel de Voltaje en el Neutro en el breaker 1.

- Breaker 2

En la Tabla 17 y en la Figura 17, se presentan los datos de la variación de voltaje en el neutro del breaker 2. Se puede observar que el valor más elevado es de 3.18 V, registrado el 20/01/2024 a las 02:14 am, lo que indica que no cumple con el límite establecido de 1

V. Por lo tanto, este transformador también muestra la presencia de armónicos y una insuficiencia en la conexión a tierra.

Tabla 17. Nivel de voltaje Neutro del breaker 2.

	Fecha	Hora	Vrms ph-n NG
V neutro Máximo	18/01/2024	17:50	3.18
V neutro Promedio			1.95
V neutro Mínimo	20/01/2024	02:14	1.17

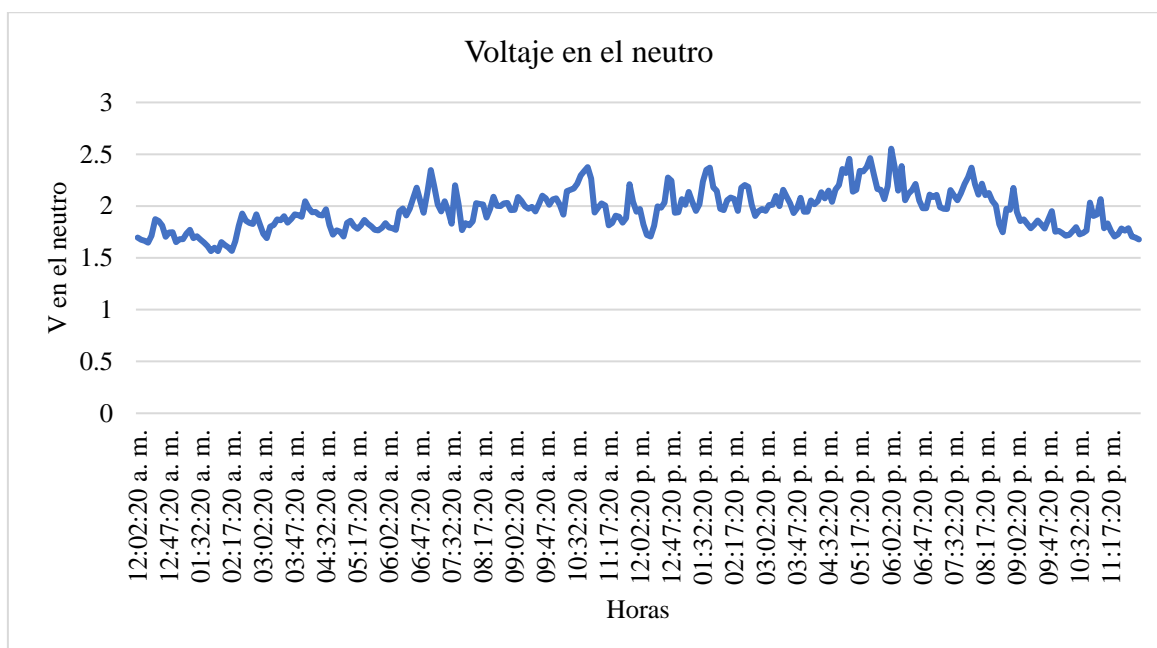


Figura 17. Nivel de Voltaje en el Neutro en el breaker 2.

5.2.1.4. Desequilibrio de voltaje del Transformador 75 kVA

- Breaker 1

Conforme a las directrices establecidas por la normativa IEEE 1159, el intervalo aceptable para el desequilibrio de voltaje es de 0.5 % a 2 %. Según los datos presentados en la Tabla 18, el desequilibrio de voltaje es del 0.37 %, lo que indica que se encuentra dentro de los límites permitidos por la normativa. Por lo tanto, se puede concluir que el voltaje no presenta desequilibrios significativos.

Tabla 18. Desequilibrio de voltaje breaker 1.

V_{LA}	V_{LB}	V_{LC}	V_L max	V_L med	%Desequilibrio	IEEE-1159	Observaciones
218.90	218.21	218.51	218.90	218.54	0.16%	0.50% - 2.00%	Cumple

- Breaker 2

Según se desprende de la Tabla 19, el desequilibrio de voltaje se sitúa en el 0.49 %, lo que indica que está dentro de los límites establecidos por la normativa IEEE 1159. En resumen, el voltaje en este transformador no presenta desequilibrios.

Tabla 19. Desequilibrio de voltaje breaker 2.

V_{LA}	V_{LB}	V_{LC}	V_L max	V_L med	%Desequilibrio	IEEE-1159	Observaciones
216.11	218.86	218.41	218.86	217.79	0.49%	0.50% - 2.00%	Cumple

5.2.2. Análisis de corriente de Línea del Transformador de 75 kVA

- Breaker 1

La información de la Tabla 20 y la Figura 18, detalla las corrientes de fase con un valor promedio de 84.57 amperios durante los periodos de trabajo estándar. Por otro lado, la Figura 16 ilustra picos de corriente máxima que alcanzan hasta los 97.53 amperios, los cuales pueden ser generados por el arranque de maquinaria o equipos. Estas corrientes de arranque, aunque temporales, tienen el potencial de causar daños internos en la maquinaria.

Tabla 20. Nivel de corriente fase-Neutro del transformador 75 kVA en el breaker 1.

Fecha	Hora	Nivel de corriente	Corriente ph-n AN	Corriente ph-BN	Corriente ph-CN	Corriente ph-Promedio
08/01/2024	19:05	C. Mínima	04.80	04.40	04.20	04.47
		C. Media	82.53	90.08	81.11	84.57
08/01/2024	06:35	C. Máxima	9160	104.00	97.00	97.53

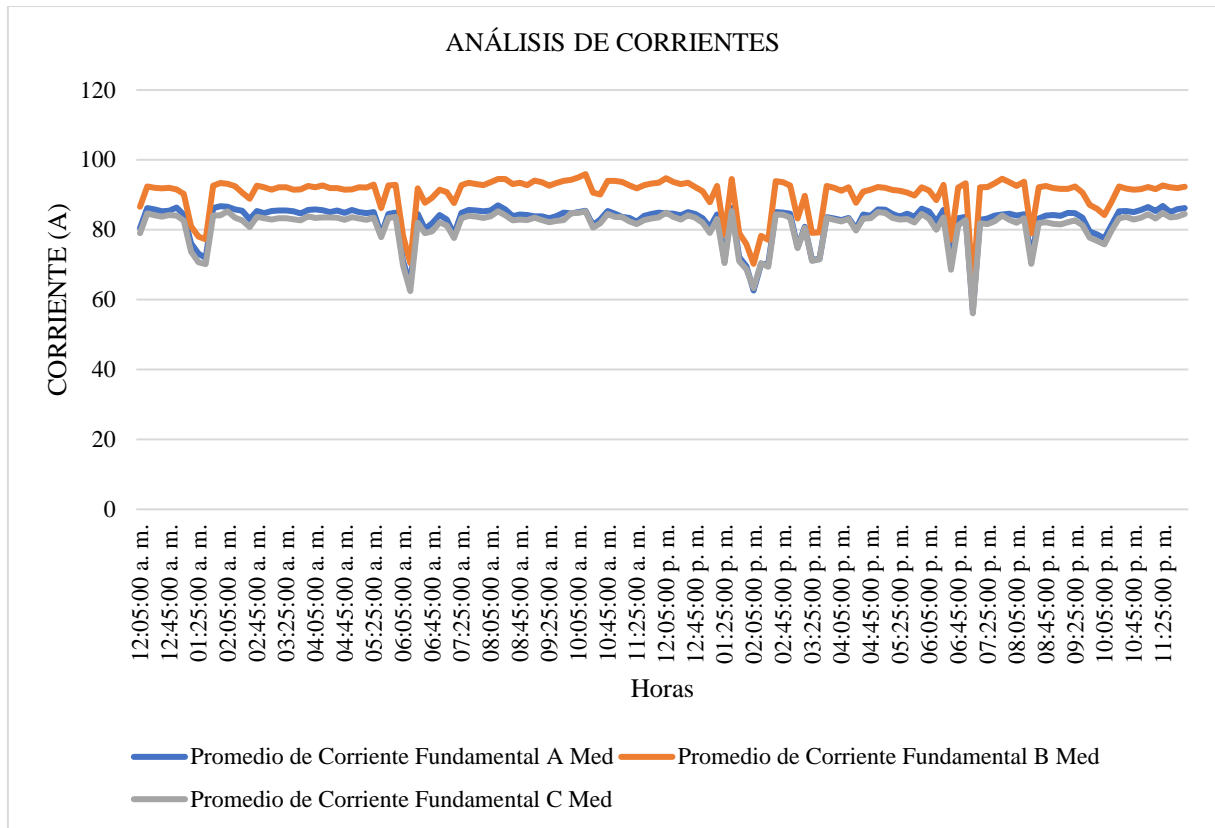


Figura 18. Nivel de corrientes de fase del transformador de 75 kVA en el breaker 1.

- Breaker 2

En la Tabla 21 y la Figura 19, se muestran los valores de corriente de fase mínima, media y máxima del transformador de 75 kVA del breaker 2, registrados durante un periodo de medición de 7 días. Estas corrientes eléctricas presentan un valor promedio aproximado de 45.71 amperios durante los periodos de trabajo normales. Además, se observan valores máximos de corriente pico de hasta 59.87 amperios.

Tabla 21. Nivel de corriente fase-Neutro del transformador 75 kVA en el breaker 2.

Fecha	Hora	Nivel de corriente	Corriente ph-n AN	Corriente ph-BN	Corriente ph-CN	Corriente ph-Promedio
18/01/2024	12:19	C. Mínima	06.20	07.40	06.00	06.53
		C. Media	45.16	48.33	43.65	45.71
17/01/2024	5:39	C. Máxima	59.60	62.80	57.20	59.87

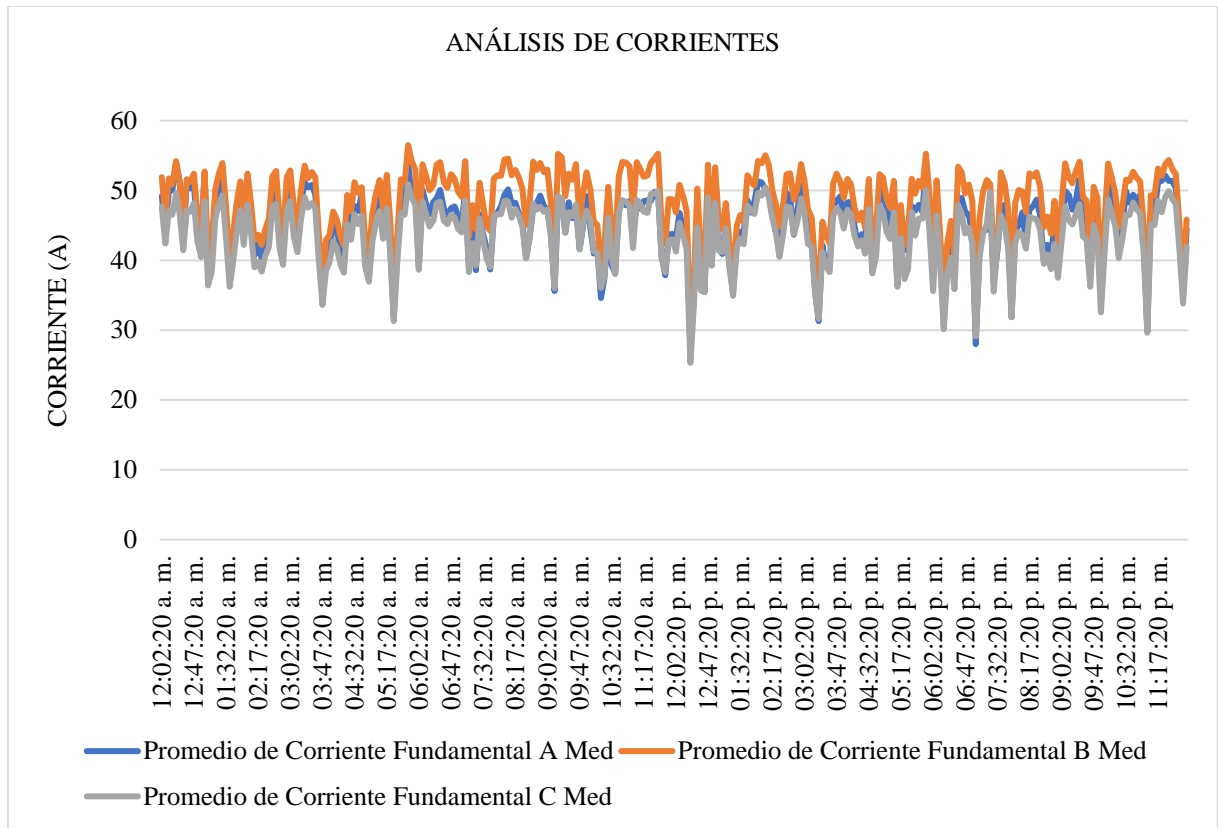


Figura 19. Nivel de corrientes de fase del transformador de 75 kVA en el breaker 2.

5.2.3. Potencia Activa del Transformador de 75 kVA

- Breaker 1

En la siguiente Tabla 22 y en la Figura 20, se detalla las potencias mínimas, medias y máximas de cada fase. Donde se constató que la potencia activa varía en las tres fases siendo la fase B la de mayor valor con una potencia máxima de 8.85kW, el 08/01/2024 a las 06:35 de la mañana y la mínima se registró en las fases A, B y C a las 19:05 de la noche con un valor de 0.02 kW, además en la tabla mencionada se muestra los porcentajes de desbalance de las fases, que el mayor desbalance es de 12.20%, mismas que superan el 5 %.

Tabla 22. Potencia activa en las tres fases en el breaker 1.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	08/01/2024	-	08/01/2024
HORA	06:35:00	-	19:05:00
kW_A	08.13	07.18	0.02
kW_B	08.85	07.36	0.02
kW_C	07.77	06.48	0.02
TOTAL	24.75	21.03	0.06
Desbalance	12.20%	11.95%	00.00%
ARCENNR 002-20	No Cumple	No Cumple	Cumple

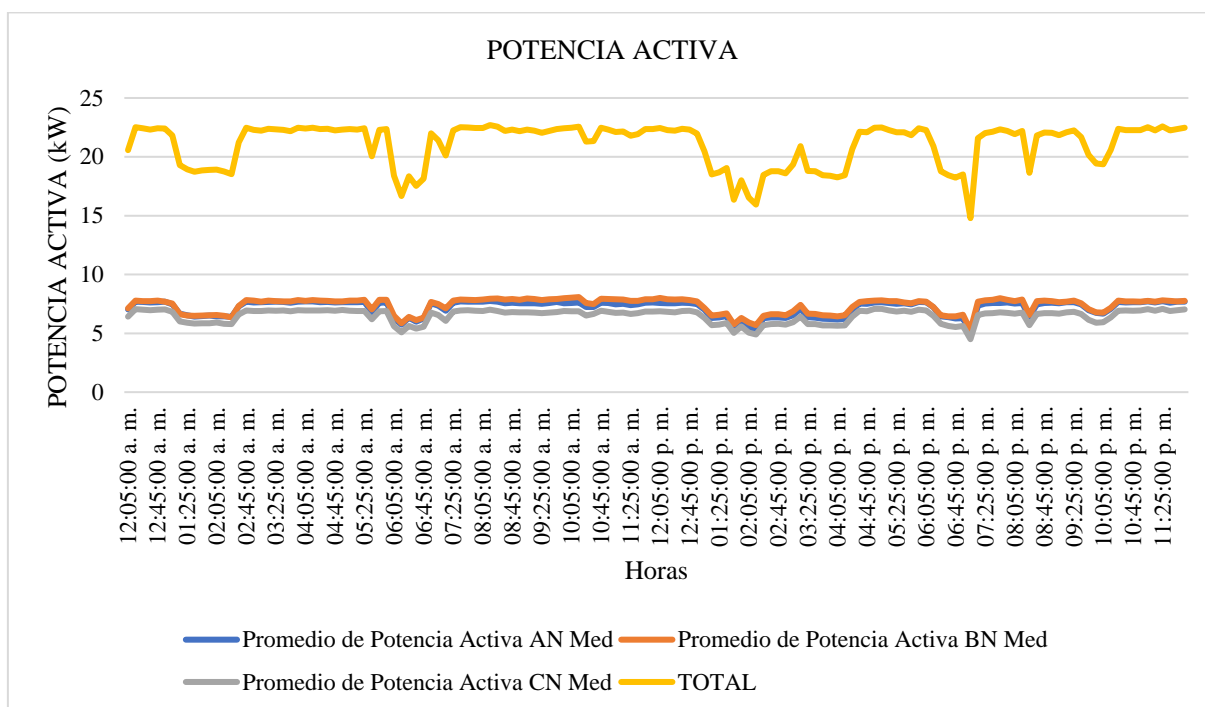


Figura 20. Niveles de potencia activa trifásica breaker 1.

- Breaker 2

En la Tabla 23 y en la Figura 21, se puede apreciar que la potencia activa fluctúa en las tres fases, siendo la fase B la que alcanza el valor más alto con una potencia máxima de 5.74 kW, registrada el jueves 18 de diciembre de 2021 a las 05:39 a.m. Por otro lado, la fase C muestra la potencia mínima, alcanzando un valor de 0.21 kW el 17 de enero de 2024 a las 12:14 a.m. La potencia total del sistema alcanza su valor máximo de 16.64 kW.

Asimismo, se registra una potencia total mínima de 1.01 kW a las 12:14 a.m. del 17 de enero de 2024.

Tabla 23. Potencia activa en las tres fases en el breaker 2.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	17/01/2024	-	18/01/2024
HORA	05:39:00	-	12:14:00
kW _A	05.63	03.92	0.27
kW _B	05.74	04.10	0.53
kW _C	05.27	03.66	0.21
TOTAL	16.64	11.68	1.01
Desbalance	8.19%	10.73%	60.37%
ARCERNNR 002-20	No Cumple	No Cumple	No Cumple

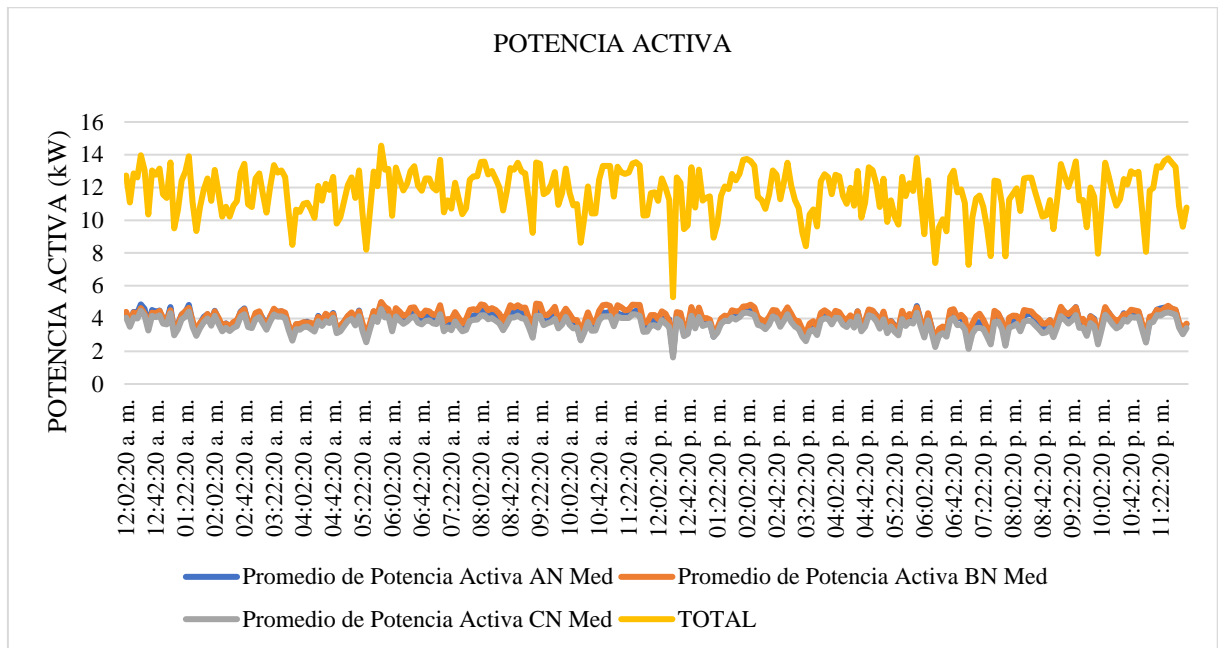


Figura 21. Niveles de potencia activa trifásica breaker 2.

5.2.4. Potencia Reactiva del Transformador de 75 kVA

- Breaker 1

La Tabla 24 y la Figura 22, muestra los datos de la potencia reactiva, considerando los valores máximos, mínimos y promedios de cada fase para verificar si cumplen con el desbalance máximo del 5%. Además, se proporciona la potencia reactiva total del sistema asociada al transformador TRAF0_75 kVA en el breaker 1. Se destaca que el desbalance

de potencia reactiva entre las fases B y A es del 14.64%, excediendo el límite permitido por la normativa ARCERNNR 002/20.

Tabla 24. Niveles de potencia reactiva del breaker 1.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	08/01/2024	-	08/01/2024
HORA	06:35:00	-	19:05:00
kW _A	07.26	05.48	0.01
kW _B	07.64	06.42	0.01
kW _C	07.42	06.00	0.01
TOTAL	22.32	17.90	0.03
Desbalance	4.97%	14.64%	0.00%
ARCERNNR 002-20	Cumple	No Cumple	Cumple

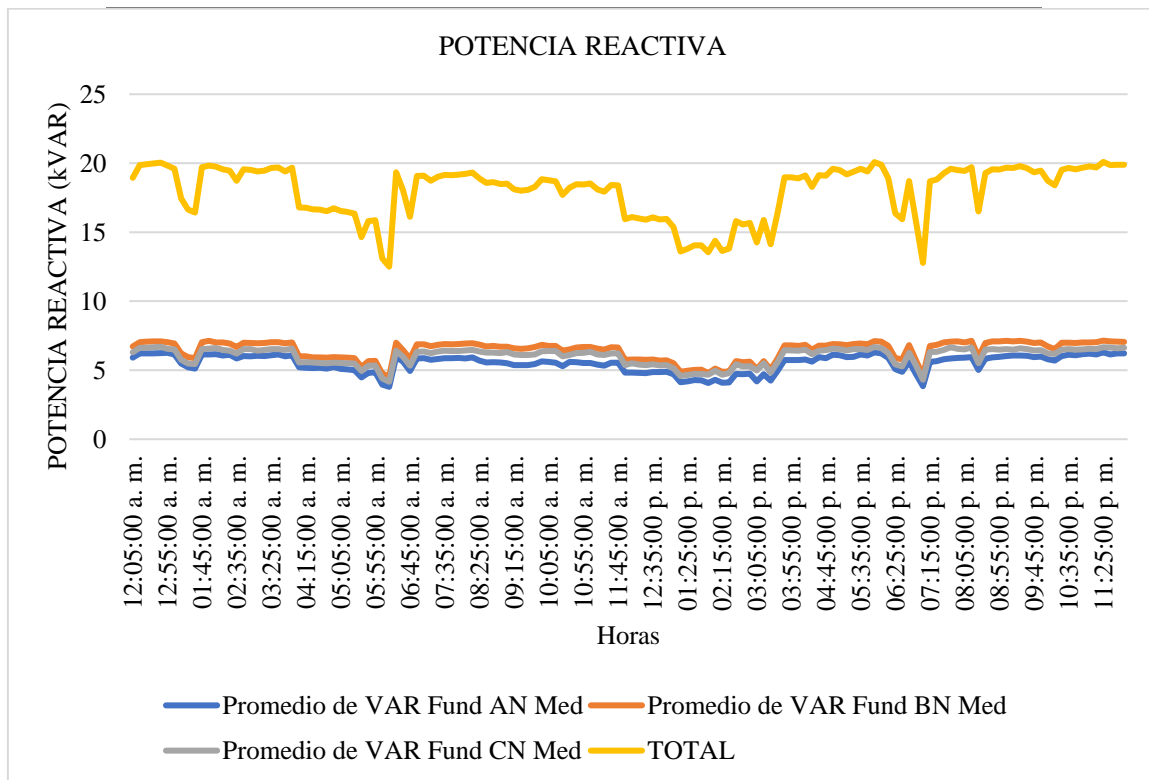


Figura 22. Niveles de potencia reactiva trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 1.

- Breaker 2

La Tabla 25 y en la Figura 23, presenta los detalles de la potencia reactiva en el breaker 2. Se resalta que el desequilibrio de potencia reactiva entre las fases B y A alcanza el 60.37%, superando el umbral permitido por la regulación ARCERNNR 002/20.

Tabla 25. Niveles de potencia reactiva del breaker 2.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	17/01/2024	-	18/01/2024
HORA	05:39:00	-	12:14:00
kW _A	3.69	3.02	0.27
kW _B	4.05	3.35	0.53
kW _C	3.68	3.08	0.21
TOTAL	11.42	9.45	1.01
Desbalance	9.13%	9.85%	60.37%
ACENNR 002-20	No Cumple	No Cumple	No Cumple

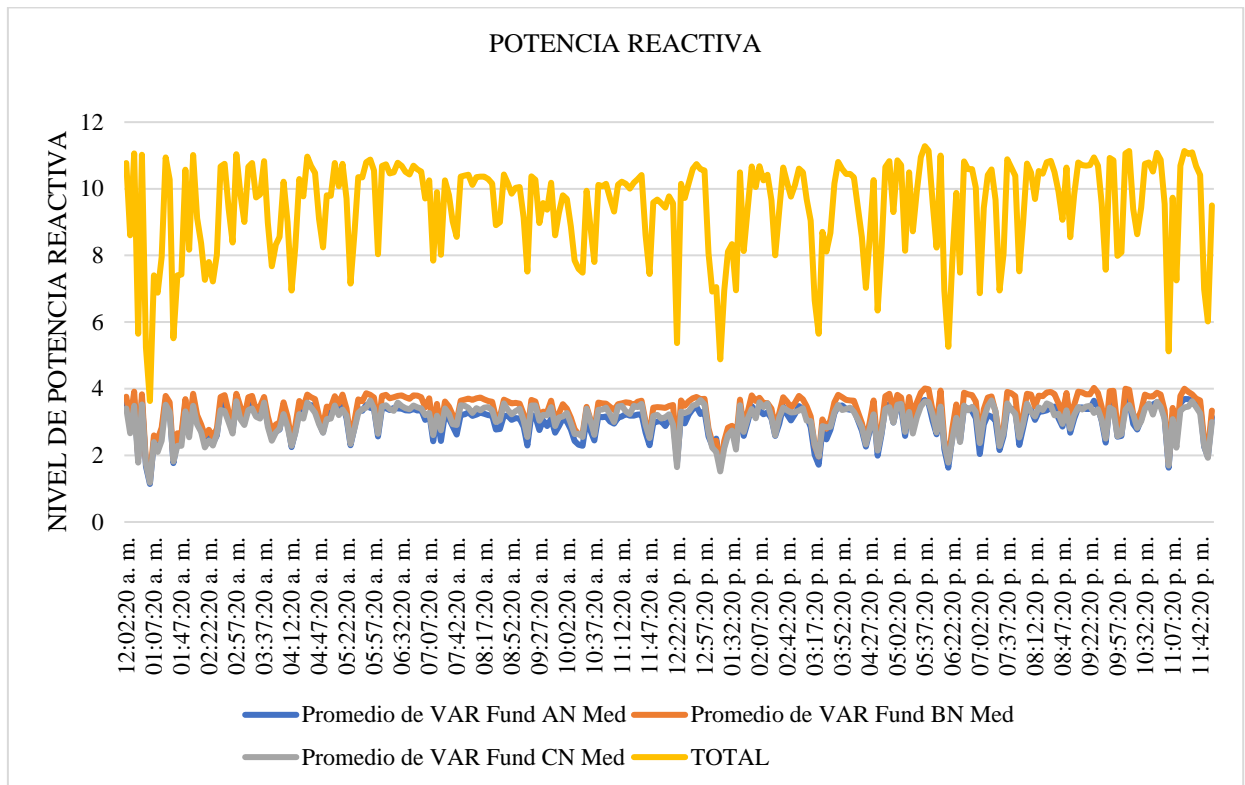


Figura 23. Niveles de potencia reactiva trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2.

5.2.5. Potencia Aparente del Transformador de 75 kVA

- Breaker 1

En la Tabla 26 y en la Figura 24, se anotan una potencia total máxima de 32.67 kVA, que se alcanza a partir de las 06:35 a.m. del 08 de enero de 2024. Además, se registra una

potencia total mínima de 32.67 kVA a las 19:05 p.m. del 08 de enero de 2024. A partir de las 21:35 p.m., la potencia de trabajo se normaliza en un promedio total de 26.77 kVA.

Tabla 26. Niveles de potencia aparente del breaker 1.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	08/01/2024	-	08/01/2024
HORA	06:35:00	-	19:05:00
kVA _A	10.41	8.74	0.02
kVA _B	11.49	9.47	0.02
kVA _C	10.77	8.57	0.02
TOTAL	32.67	26.77	0.06
Desbalance	9.13%	9.85%	60.37%
ARCERNNR 002-20	No Cumple	No Cumple	No Cumple

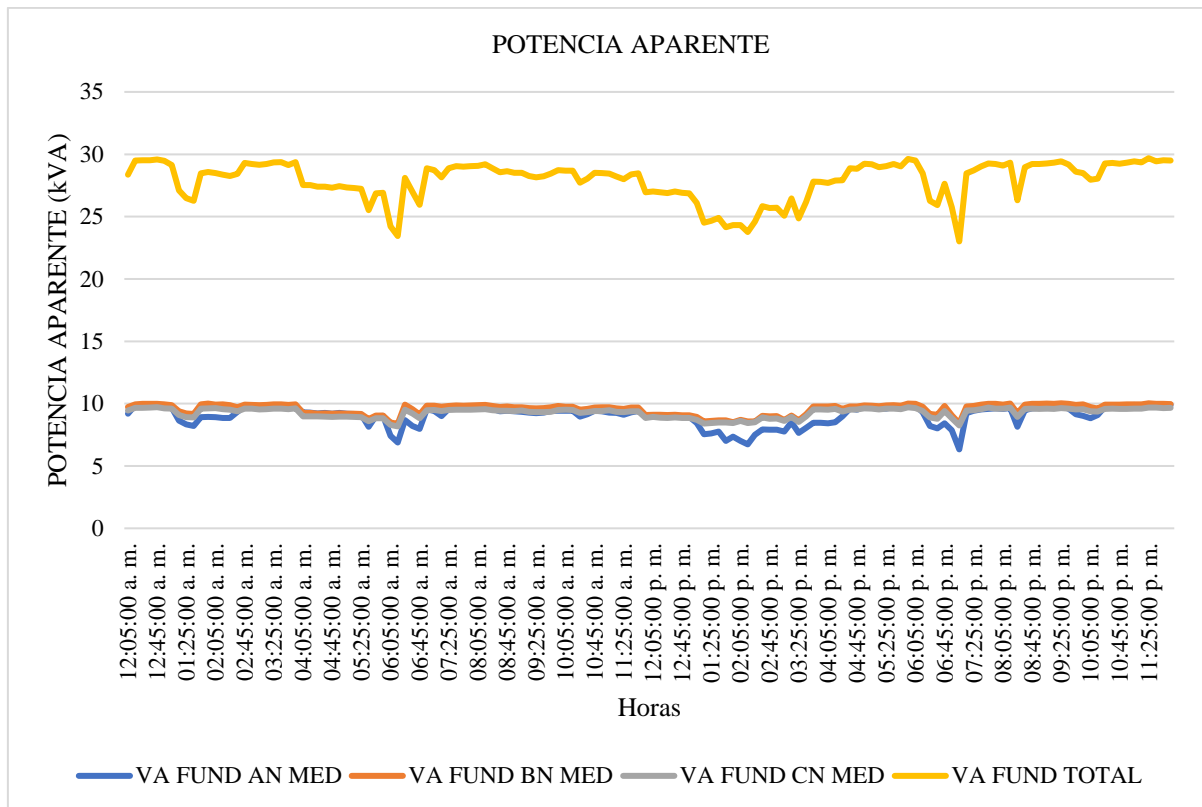


Figura 24. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 1.

- Breaker 2

En la Tabla 27 y la Figura 25, se consigna una potencia total máxima de 11.42 kVA, alcanzada a partir de las 05:39 a.m. del 17 de enero de 2024. Además, se observa una

potencia total mínima de 2.04 kVA a las 12:14 p.m. del 18 de enero de 2024. A partir de las 13:09 p.m., la potencia de trabajo se estabiliza en un promedio total de 9.45 kVA.

Tabla 27. Niveles de potencia aparente del breaker 2.

Potencia	Máximo	Promedio	Mínimo
FECHA	17/01/2024	-	18/01/2024
HORA	05:39:00	-	12:14:00
kVA _A	3.69	3.02	0.64
kVA _B	4.05	4.05	0.79
kVA _C	3.68	3.08	0.61
TOTAL	11.42	9.45	2.04
Desbalance	9.13%	25.43%	22.78%
ACENNR 002-20	No Cumple	No Cumple	No Cumple

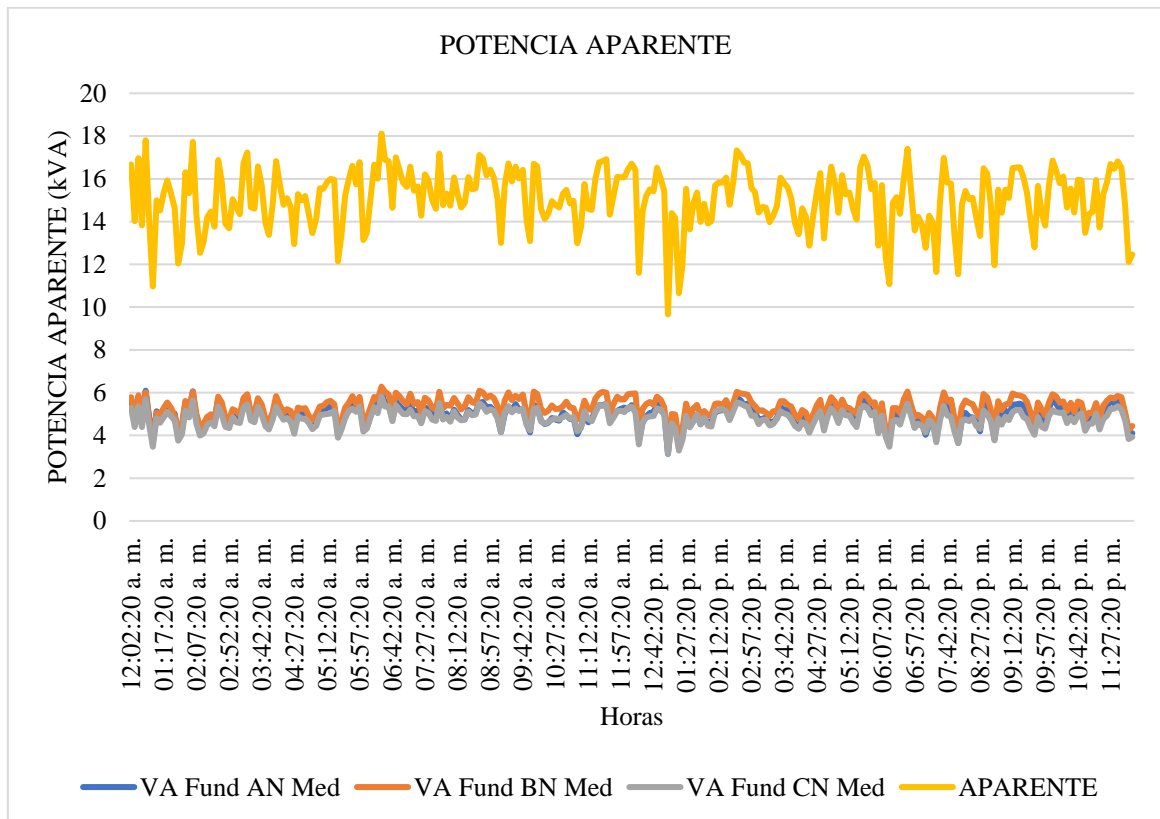


Figura 25. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2. La salida del transformador industrial es de 75 kVA, según los datos tabulados, el consumo total de energía es de 44.09 kVA. Se concluye que el transformador no se

encuentra sobrecargado y cuenta con una potencia sobrante de 30.91 kVA para el crecimiento de la carga futura.

5.2.6. Análisis de Factor de potencia del TRAF0_75 kVA

- Breaker 1

En la Tabla 28, se indica los valores del factor de potencia fueron registrados para las tres fases, así como un valor total correspondiente a este transformador, y se observó que estos valores están fuera de los límites permitidos por la regulación ARCERNNR 002/20.

Tabla 28. Niveles de factor de la potencia TRAF0_75 kVA del breaker 1.

FECHA	HORA	Factor de potencia (F.P.)	Referencia		Observaciones
			F.P. Total	norma ARCERNNR 002/20	
13/01/2024	19:05	F.P. Mínima	0.45	0.92	Fuera de la norma
		F.P. Media	0.75	0.92	Fuera de la norma
12/01/2024	14:35	F.P. Máxima	0.90	0.92	Fuera de la norma

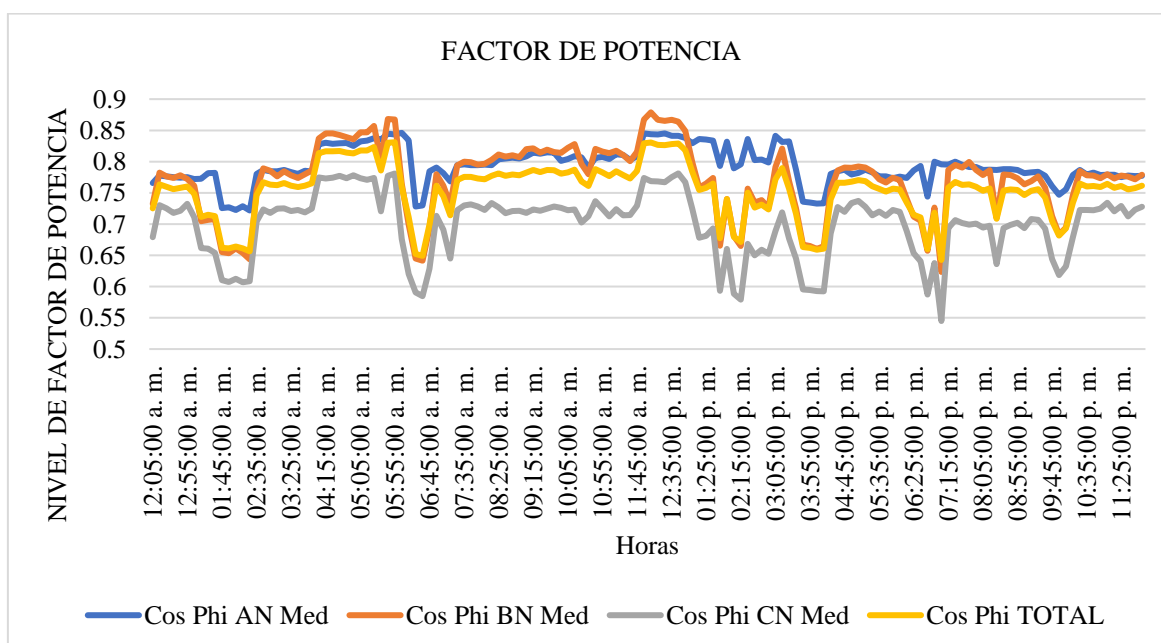


Figura 26. Niveles de factor de la potencia TRAF0_75 kVA del breaker 1.

Según lo estipulado en el Artículo 27 de la Codificación de Reglamentos de Tarifas, se establece que los clientes que presenten un factor de potencia promedio mensual inferior a 0.92 serán sujetos a una penalización. El transformador TRAF0_175 kVA de la fábrica

de huevos tiene un factor de potencia promedio de 0.75, incumpliendo con el valor mínimo de 0.92 exigido por el reglamento, y, por ende, está sujeto a una penalización por parte de la Empresa Eléctrica Cotopaxi. Esta situación se visualiza en la Figura 26.

- Breaker 2

En la Tabla 29, se consignan los valores del factor de potencia para las tres fases, así como un valor total asociado a este transformador, y se constata que dichos valores están por encima de los límites permitidos por la regulación ARCERNNR 002/20.

Tabla 29. Niveles de factor de la potencia TRAF0_75 kVA del breaker 2.

FECHA	HORA	Factor de potencia (F.P.)	F.P. Total	Referencia	Observaciones
				norma ARCERNNR 002/20	
20/01/2024	14:54	F.P. Mínima	0.53	0.92	Fuera de la norma
		F.P. Media	0.76	0.92	Fuera de la norma
18/01/2024	12:44	F.P. Máxima	0.98	0.92	Dentro de la norma

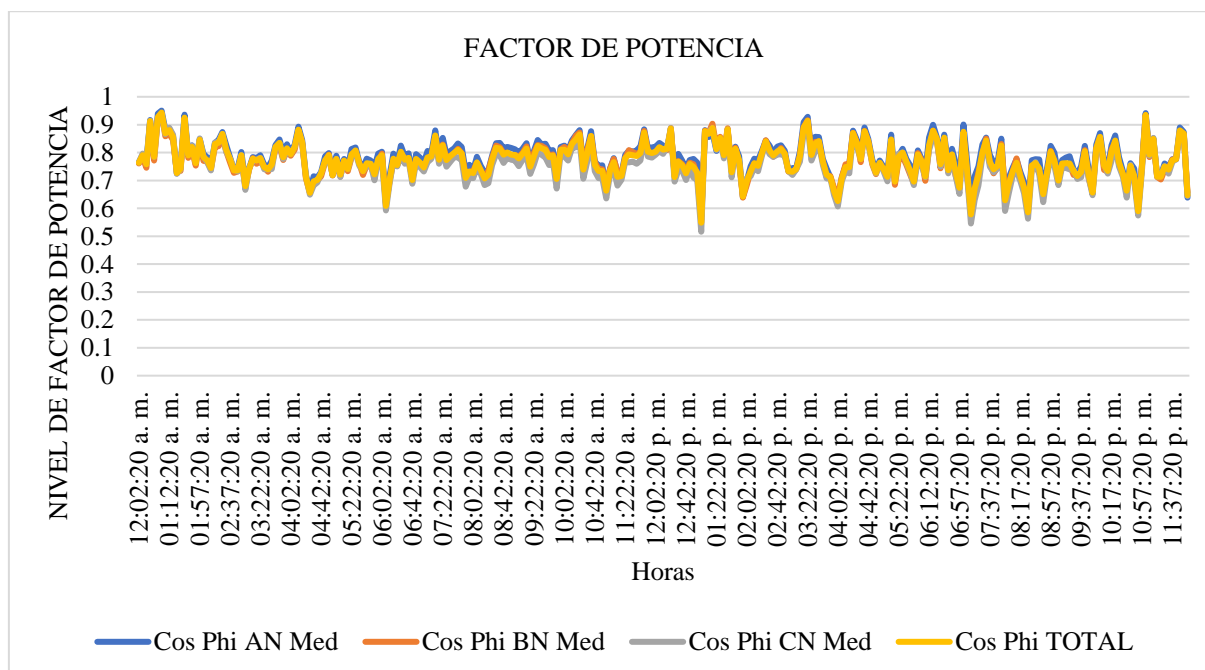


Figura 27. Niveles de potencia aparente trifásica en las tres fases y la total del sistema del breaker 2. En el caso del transformador TRAF0_175 kVA en el breaker 2 de la industria su factor de potencia promedio es de 0.76, incumpliendo con el mínimo de 0.92 requerido por el

reglamento, lo que conlleva a una penalización por parte de la Empresa Eléctrica Cotopaxi. Esta situación se muestra en la Figura 27.

5.2.7. Distorsión armónica total de voltaje del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

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 30.

Tabla 30. Distorsión armónica total del breaker 1.

Fecha	Hora	THD Voltaje	THD Promedio %	THD L _A %	THD L _B %	THD L _C %	Referencia IEEE 519	Observación
09/01/2024	0:05	THD Mínimo	0.08	0.09	0.09	0.07	8%	Dentro de la norma
		THD Promedio	0.65	0.66	0.64	0.64	8%	Dentro de la norma
08/01/2024	1:35	THD Máximo	13.77	13.72	13.54	14.04	8%	Fuera de la norma

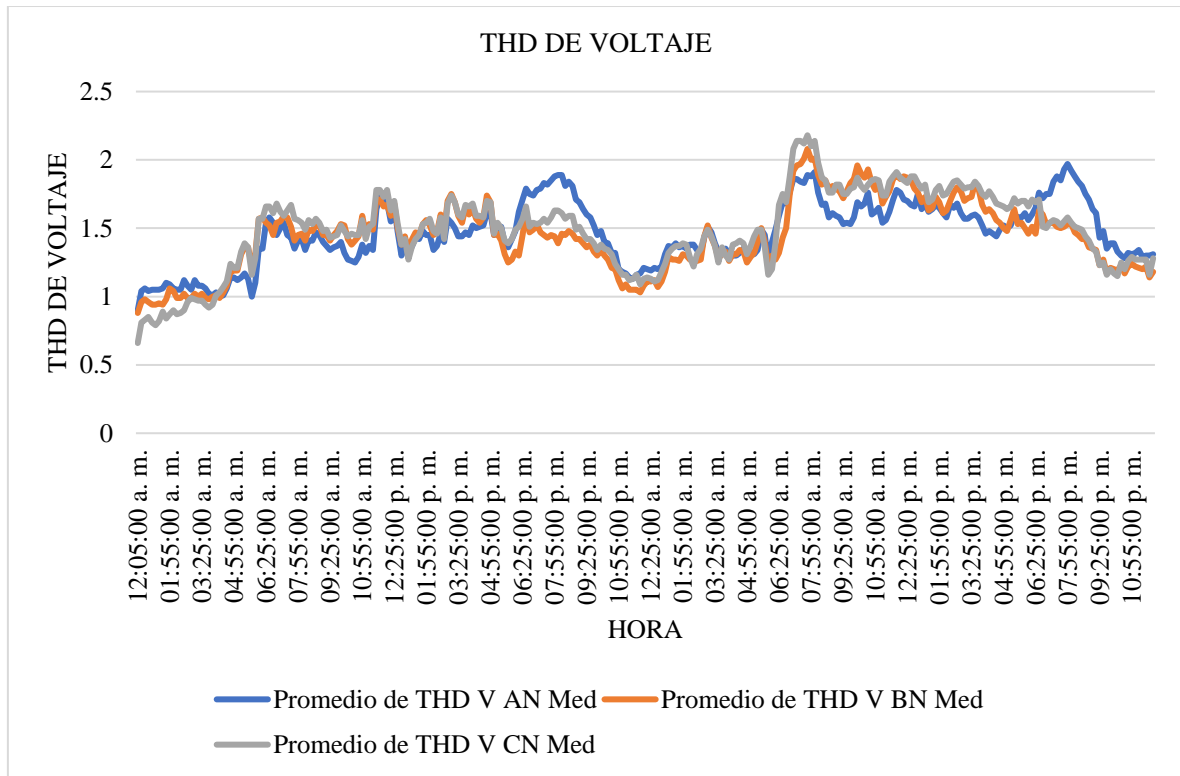


Figura 28. Nivel de THD de Voltaje del breaker 1.

En la Figura 28, se aprecia el límite de THD de tensión para las tres fases es de 13.77%, que se encuentra fuera del rango reglamentario del 8%.

En base a los datos obtenidos, se puede concluir que SI existen armónicos de tensión.

- Breaker 2

En la Tabla 31, se notó que el nivel máximo de THD es del 2.71 %, el cual está dentro del intervalo de tolerancia establecido por la normativa IEEE 519. Por ende, no se evidencian problemas significativos de THD de voltaje.

Tabla 31. Distorsión armónica total del breaker 2.

Fecha	Hora	THD Voltaje	THD			Referencia IEEE 519	Observación	
			THD Promedio %	THD LA %	THD LB %			
19/1/2024	4:59	THD Mínimo	1.35	1.31	1.39	8%	Dentro de la norma	
		THD Promedio	1.77	1.75	1.83	8%	Dentro de la norma	
18/1/2024	13:14	THD Máximo	2.71	2.71	2.40	3.01	8%	Dentro de la norma

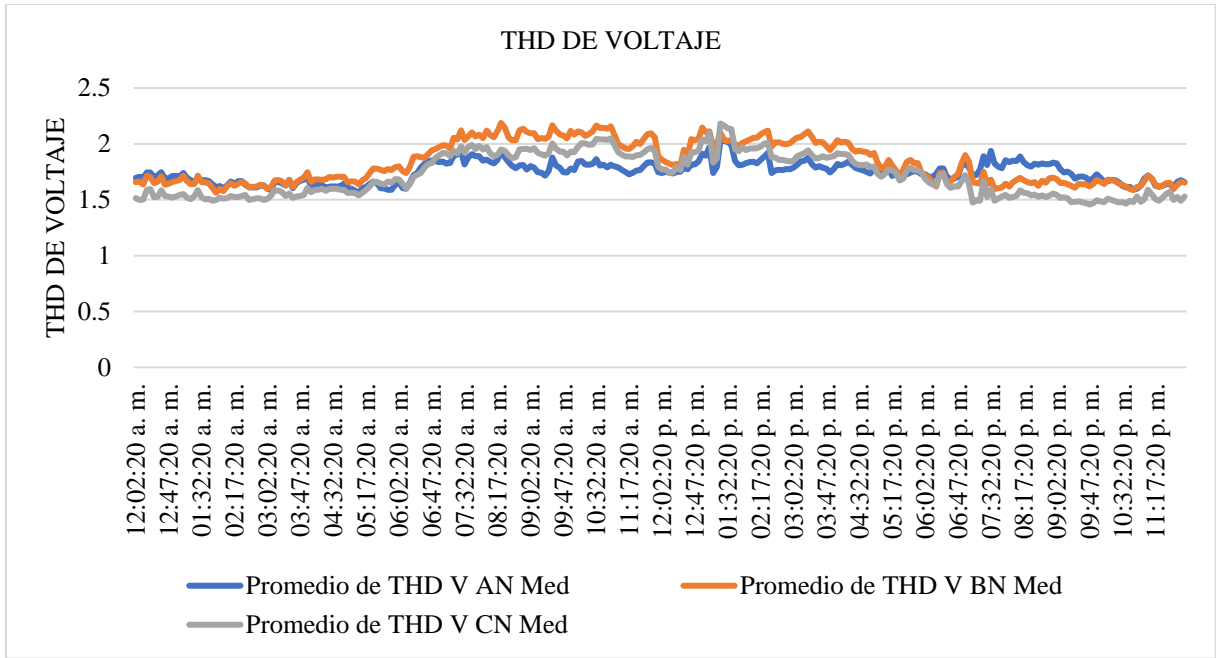


Figura 29. Nivel de THD de Voltaje del breaker 2.

En la Figura 29, muestra que en el breaker 2, la distorsión total de armónicos de voltaje no excede el 2.71% en su promedio, lo que indica que se encuentra dentro de los límites aceptables.

5.2.8. Armónicos individuales de voltaje del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

Según el estándar IEEE 519 dice que cada nivel de armónico individual no debe superar el 5%. Los resultados de la Tabla 32, muestran que los armónicos de tensión tercero, quinto y noveno asociados con el transformador supera el 5 % especificado para tensiones inferiores a 1 kV.

Tabla 32. Nivel de distorsión armónica individual del breaker 1.

Armónicos de voltaje		Referencia - IEEE 519	Observación
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %		
3	6.18	5.00 %	No Cumple
5	5.78	5.00 %	No Cumple
7	4.80	5.00 %	Cumple
9	8.08	5.00 %	No Cumple
11	2.18	5.00 %	Cumple
13	2.19	5.00 %	Cumple

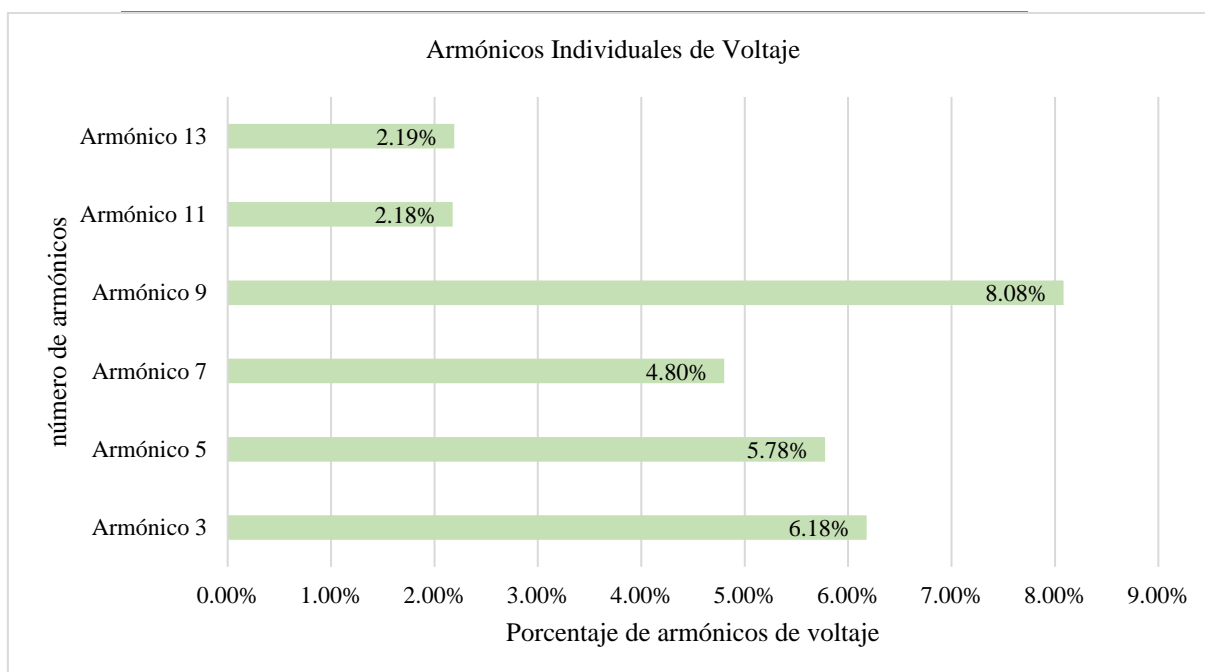


Figura 30. Armónicos individuales de voltaje del breaker 1.

La armónica tercera de voltaje con un valor del 6.18%, la armónica quinta de voltaje con un valor de voltaje de 5.78%, la armónica séptima con un valor del 4.80%, la armónica novena con un valor del 8.08%, la armónica decimoprimer con un valor del 2.18% y la armónica decimotercera con 2.19%.

La Figura 30, ilustra visualmente los resultados obtenidos. El porcentaje más alto es 8.08% en el noveno armónico y el menor es el onceavo armónico. Por lo tanto, el armónico más alto que se debe tratar de disminuir es el armónico noveno.

- Breaker 2

Los valores proporcionados en la Tabla 33 para el transformador TRAF0_75 kVA en el breaker 2, no superan los rangos de tolerancia, lo que significa que cumple con los estándares establecidos por la normativa IEEE 519.

Tabla 33. Nivel de distorsión armónica individual del breaker 2.

Armónicos de voltaje		Referencia - IEEE 519	Observación
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %		
3	0.71	5.00 %	Cumple
5	2.12	5.00 %	Cumple
7	1.57	5.00 %	Cumple
9	0.77	5.00 %	Cumple
11	0.98	5.00 %	Cumple
13	0.43	5.00 %	Cumple

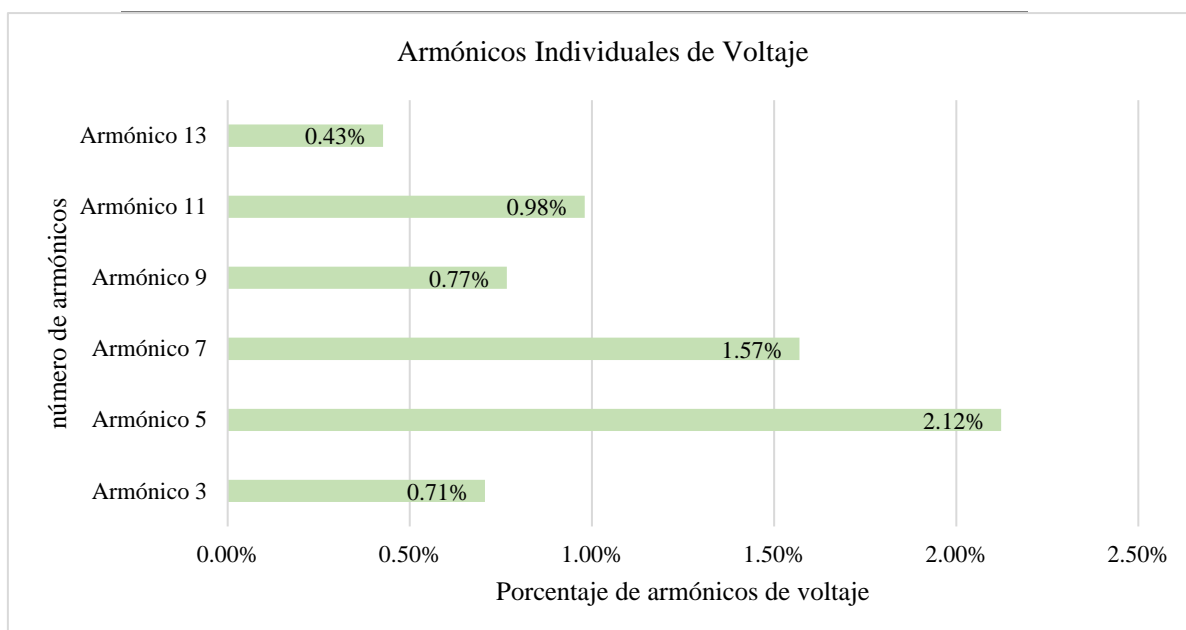


Figura 31. Armónicos individuales de voltaje del breaker 2.

La información de la Tabla 33 se presenta de manera más clara en la Figura 31, donde se destaca que el armónico 5 es el más relevante, con un nivel de distorsión del 2.12%.

5.2.9. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

La Tabla 34 y en la Figura 32, exhibe los porcentajes de los niveles de armónicos de voltaje individuales en el neutro. Se observa que, en general, hay una mayor presencia de armónicos individuales de tercer orden y sus múltiplos en el neutro. Estos valores fueron comparados con los estándares establecidos por la regulación IEEE 519. En el caso del transformador TRAF0_75 kVA en el breaker 1, se encontraron armónicos significativos, pero que no superan el 5 %, lo que sugiere que actualmente no hay un problema, aunque podría desarrollarse en el futuro.

Tabla 34. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 1.

Armónicos de voltaje			
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %	Referencia-IEEE 519	Observación
3	0.11	5.00 %	Cumple
5	0.11	5.00 %	Cumple
7	0.06	5.00 %	Cumple
9	0.07	5.00 %	Cumple
11	0.05	5.00 %	Cumple
13	0.03	5.00 %	Cumple

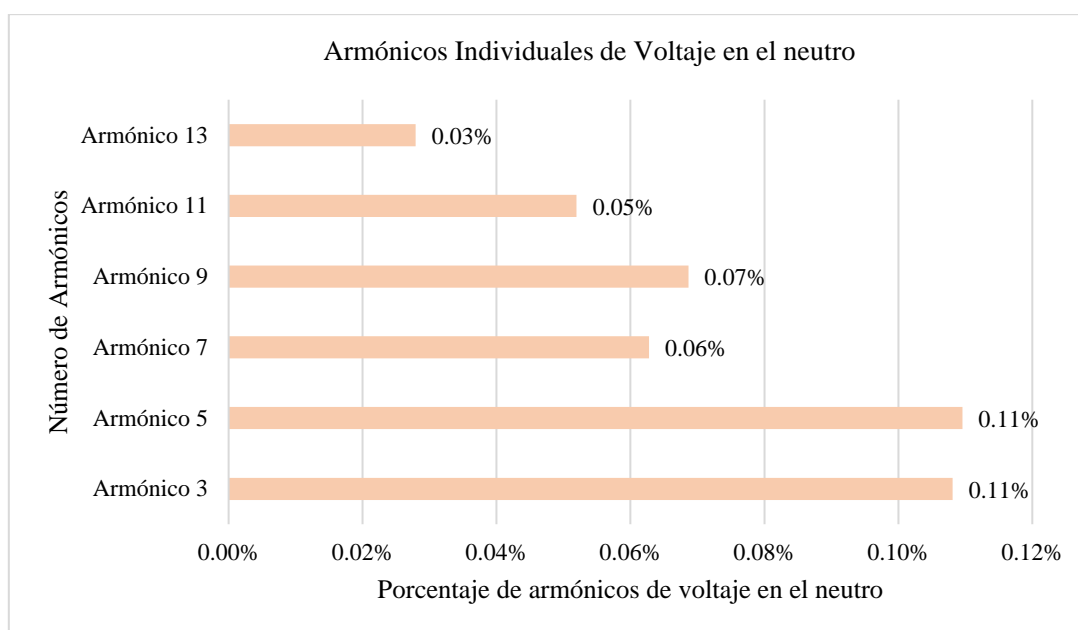


Figura 32. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 1.

- Breaker 2

Los armónicos en el neutro del TRAF0_75 kVA en el breaker 2 se presentan de manera muy similar, ya que comparten un punto de conexión común entre los neutros de los dos breakers mencionados anteriormente. Estos valores pueden observarse entre la Tabla 35 y en el Figura 33.

Tabla 35. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 2.

Armónicos de voltaje			
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %	Referencia-IEEE 519	Observación
3	0.49	5.00 %	Cumple
5	0.33	5.00 %	Cumple
7	3.28	5.00 %	Cumple
9	1.61	5.00 %	Cumple
11	0.59	5.00 %	Cumple
13	0.63	5.00 %	Cumple

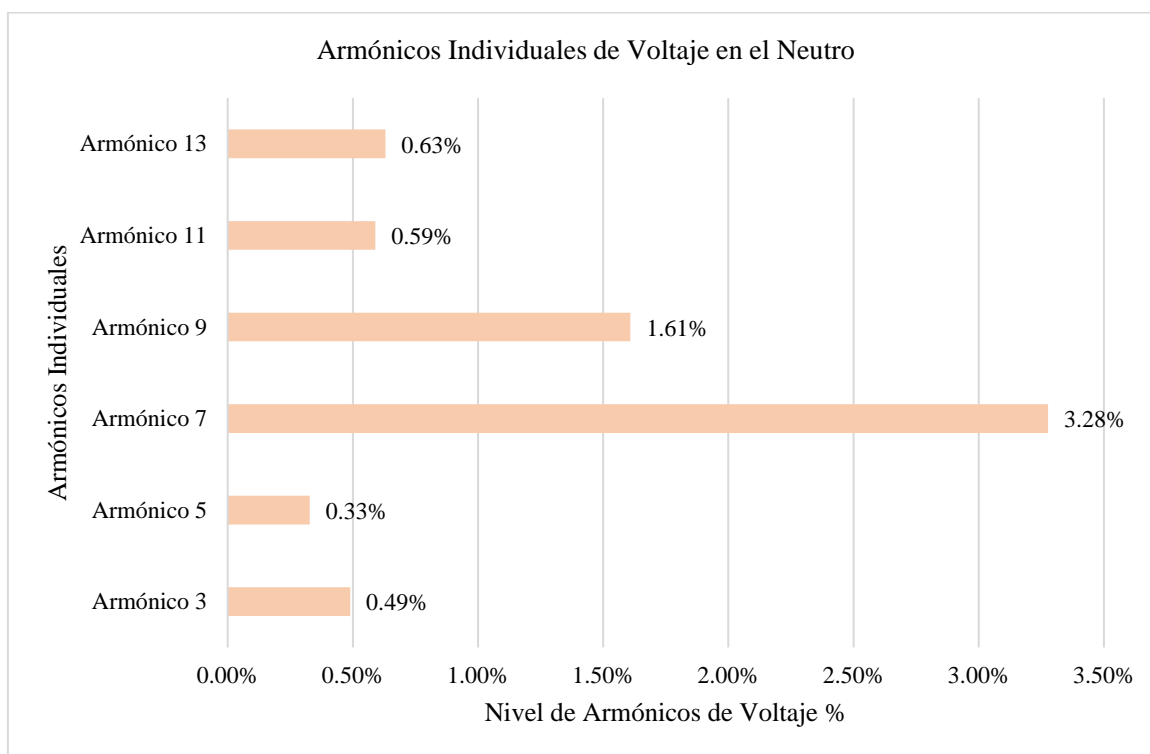


Figura 33. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 2.

5.2.10. 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.

$$\alpha = \frac{I_{CC}}{I_{Lpu}} \quad (9)$$

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 $X_{pu} = 2,7\%$. Se calcula utilizando la ecuación (10):

$$I_{cc} = \frac{1}{X_{pu}} \quad (10)$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0.027} \quad (11)$$

$$I_{CC} = 37.04 \text{ pu} \quad (12)$$

Para hacer esto, necesitamos calcular la corriente de línea y se utiliza la siguiente ecuación (13):

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} * V_{LL}} \quad (13)$$

$$I_L = \frac{75000VA}{\sqrt{3} * 220} \quad (14)$$

$$I_L = 196.82A \quad (15)$$

Para determinar el factor de distorsión requerido y los armónicos de corriente individuales, necesitamos calcular la corriente de línea por unidad con la ecuación (16).

$$I_{Lpu} = \frac{I_{fase}}{I_L} \quad (16)$$

- Breaker 1

En la Tabla 36, se proporcionan los valores correspondientes del breaker 1 que muestran la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu, con el propósito de calcular el THD de corriente.

Tabla 36. 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	0.027	37.040	0.270	137.860
L ₂	0.027	37.040	0.310	121.420
L ₃	0.027	37.040	0.280	130.190

La relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea, expresada como I_{cc}/I_{Lpu} , se sitúa dentro del intervalo de 100 a 1000, lo que indica un valor de THD correspondiente al 15%.

La normativa IEEE 519 establece los límites indicados en la Tabla 36 para este parámetro. Según la relación previamente calculada de I_{cc}/I_{Lpu} , está dentro del rango de 100 a 1000, lo que resulta en un valor de THD del 15%. Sin embargo, en la Tabla 37 y en la Figura 34, se observa que el nivel máximo de THD es del 91.89%, lo que indica la presencia de problemas de armónicos de corriente.

Tabla 37. Distorsión total de la demanda (TDD) del breaker 1.

Hora	Fecha	TDD	L_A %	L_B %	L_C %	TDD	Referencia IEEE 519	Observación
						Promedio %		
1:15	11/01/2024	Mínimo	2.91	2.41	2.13	2.48	15.00%	Dentro de la norma
		Promedio	5.50	4.08	3.51	4.36	15.00%	Dentro de la norma
04:55	08/01/2024	Máximo	113.24	100.25	62.19	91.89	15.00%	Fuera de la norma

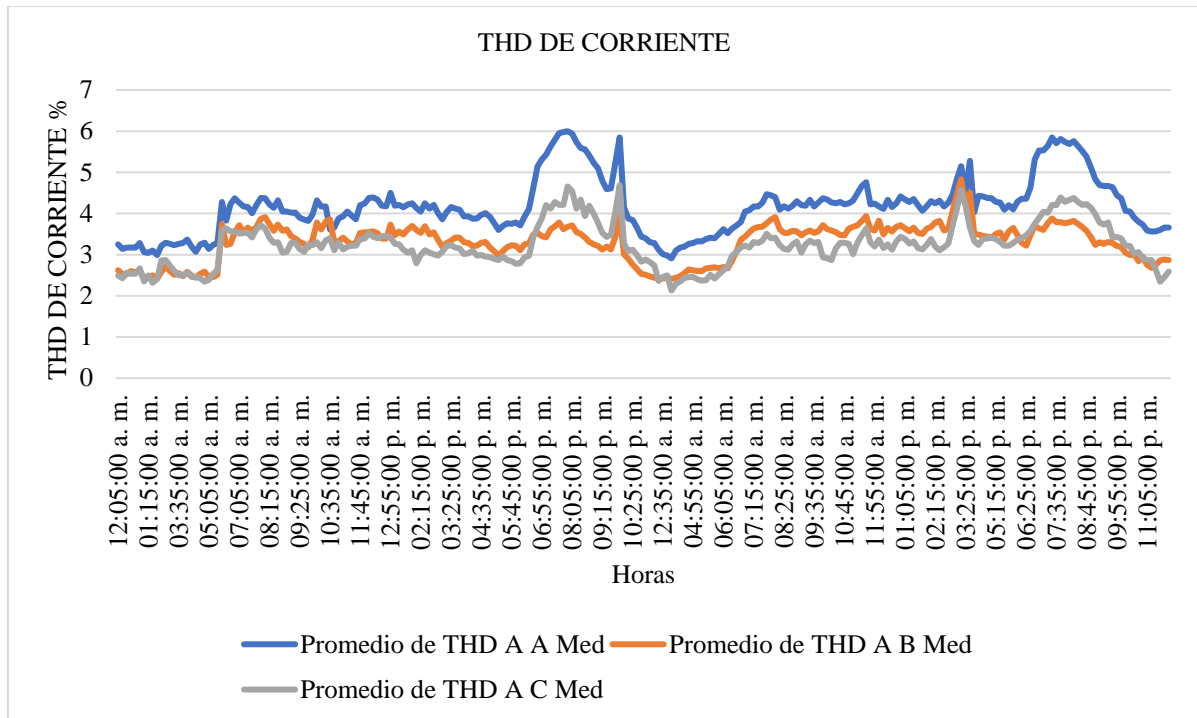


Figura 34. Nivel de la distorsión total de corriente breaker1.

- Breaker 2

En la Tabla 38, se indica los valores correspondientes del breaker 2 de la relación de la corriente de cortocircuito y la corriente de línea en pu del breaker 2, para determinar el THD de corriente.

Tabla 38. 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	0.027	37.040	0.170	211.880
L ₂	0.027	37.040	0.180	201.080
L ₃	0.027	37.040	0.170	220.770

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%.

La normativa IEEE 519 define los límites especificados en la Tabla 38 para este criterio. De acuerdo con la relación I_{cc}/I_{Lpu} calculada previamente, se encuentra dentro del intervalo de 100 a 1000, lo que resulta en un valor de THD del 15%. Sin embargo, en la Tabla 39 y en la Figura 35, se aprecia que el nivel máximo de THD es del 46.66%, lo que sugiere la existencia de problemas relacionados con armónicos de corriente.

Tabla 39. Distorsión total de la demanda (TDD) del breaker 2.

Hora	Fecha	TDD	L _A %	L _B %	L _C %	TDD	Referenci	Observación
						Promedio %	a IEEE 519	
12:24	19/01/2024	Mínimo	3.15	2.42	2.48	2.68	15.00%	Dentro de la norma
		Promedio	13.68	12.69	13.33	13.24	15.00%	Dentro de la norma
13:14	18/01/2024	Máximo	52.64	35.44	51.89	46.66	15.00%	Fuera de la norma

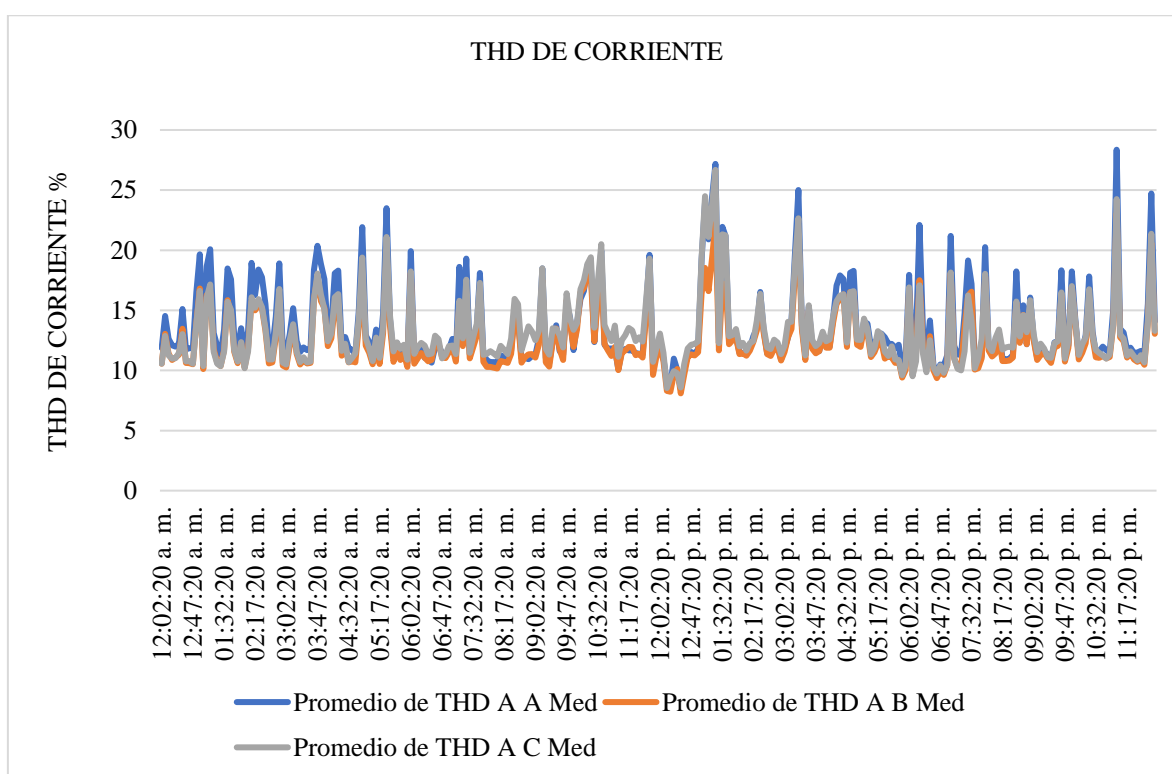


Figura 35. Nivel de la distorsión total de corriente breaker 2.

5.2.11. Distorsión individual de corriente del transformador de 75 kVA.

- Breaker 1

En la Tabla 40 y en la Figura 36, se muestra la regulación ARCERNNR y la normativa IEEE 519 especifican que los armónicos individuales de corriente dentro del rango de orden armónico de 3 a 11 deben cumplir con un límite de distorsión del 12%, mientras que aquellos en el orden armónico a partir del 11 deben cumplir con un límite del 5.50 %.

Tabla 40. Distorsión individual de corriente del breaker 1.

Nivel armónico	Total, de armónicos en %	Limite – IEEE 519	Observaciones
3	42.91%	12.00%	No cumple
5	32.24%	12.00%	No cumple
7	29.71%	12.00%	No cumple
9	27.88%	12.00%	No cumple
11	26.50%	5.50%	No cumple
13	25.36%	5.50%	No cumple

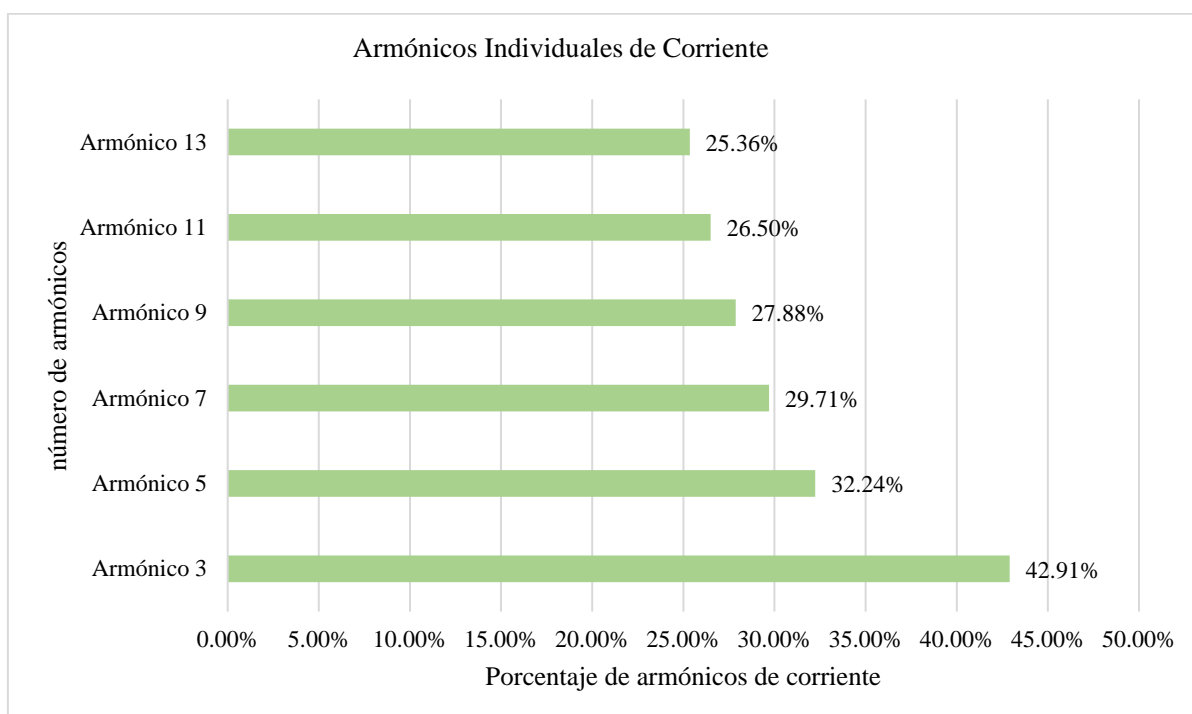


Figura 36. Porcentajes de armónicos de corriente individuales del breaker 1.

La armónica tercera de voltaje con un valor del 42.91%, la armónica quinta de voltaje con un valor de 32.24%, la armónica séptima con un valor de 29.71%, la armónica novena con un valor del 27.88%, la armónica decimoprimeras con un valor del 26.50%, la armónica decimotercera con un valor del 25.36%. De acuerdo a este análisis se observa que el armónico más elevado que presenta el transformador es armónico en el orden tercero y quinto 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.

- Breaker 2

Como se explicó previamente, para el análisis de los armónicos individuales se utilizarán porcentajes del 12 % y 5.5 % para los armónicos del 3 al 9 y del 11 al 16 respectivamente, considerando hasta el armónico décimo tercero en este caso. La Tabla 41 presenta en detalle los niveles porcentuales encontrados y proporciona las observaciones correspondientes.

Tabla 41. Distorsión individual de corriente del breaker 2.

Nivel armónico	Total, de armónicos en %	Limite – IEEE 519	Observaciones
3	21.95%	12.00%	No cumple
5	41.37%	12.00%	No cumple
7	33.24%	12.00%	No cumple
9	4.63%	12.00%	Cumple
11	17.53	5.50%	No cumple
13	12.81	5.50%	No cumple

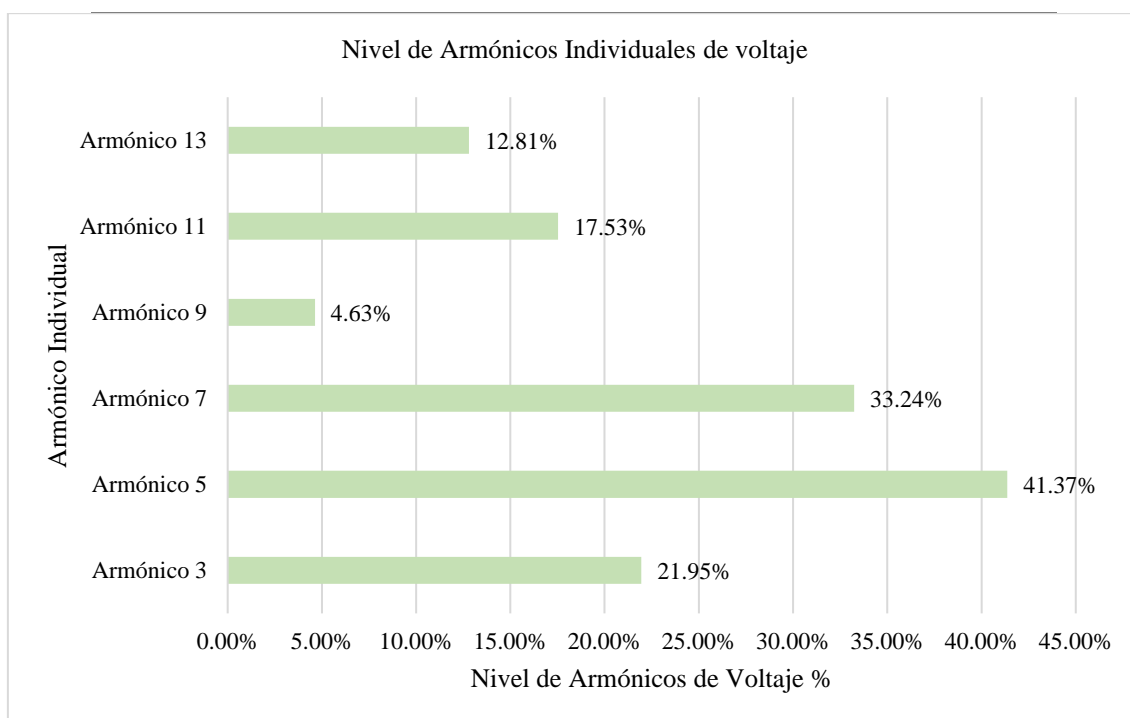


Figura 37. Porcentajes de armónicos de corriente individuales del breaker 2.

En la Figura 37 se muestra que la armónica tercera de voltaje con un valor del 21.95%, la armónica quinta de voltaje con un valor de 41.37%, la armónica séptima con un valor de 33.24%, la armónica novena con un valor del 4.63%, la armónica decimoprimer con un

valor del 17.53%, la armónica decimotercera con un valor del 12.81%. De acuerdo a este análisis se observa que el armónico más elevado que presenta el transformador es armónico en el orden quinto y séptimo 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.

5.2.12. Armónicos individuales de corriente en el neutro del transformador de 75 kVA

- Breaker 1

En la Tabla 42 y en la Figura 38, se evidencia que el tercer armónico de corriente con un valor del 3.62%, la armónica quinta con un valor de 2.51%, la armónica séptima con un valor del 1.73%, la armónica novena con un valor del 1.49%, la armónica decimoprimer con un valor del 1.32% y la armónica decimotercera con el 1.19%. De acuerdo a este análisis se observa que el transformador no presenta armónicos en el neutro.

Tabla 42. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 1.

Nivel de armónicos	Total, de armónicos %	Referencia IEEE 519	Observaciones
3	3.62	12.00%	Cumple
5	2.51	12.00%	Cumple
7	1.73	12.00%	Cumple
9	1.49	12.00%	Cumple
11	1.32	5.50%	Cumple
13	1.19	5.50%	Cumple

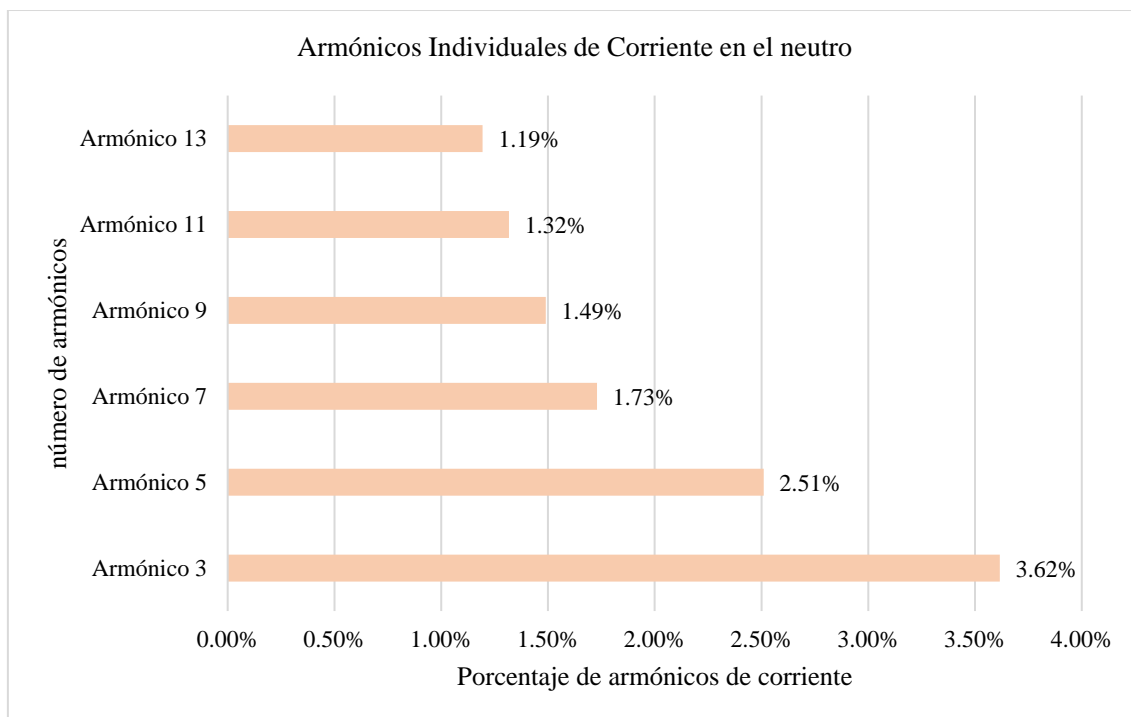


Figura 38. Porcentaje de armónicos de corriente en el neutro del breaker 1.

- Breaker 2

En la Tabla 43 y Figura 39, La armónica de corriente de tercer orden tiene un valor del 1.94 %, la quinta armónica tiene un valor de 1.16 %, la séptima armónica tiene un valor del 0.84%, la novena armónica tiene un valor del 0.76 %, la undécima armónica tiene un valor del 0.60 % y la decimotercera armónica tiene un valor del 0.46%. A partir de este análisis, se concluye que el transformador no exhibe armónicos en el neutro.

Tabla 43. Armónicos individuales de voltaje en el neutro del breaker 2.

Armónicos de voltaje			
Nivel de armónicos	Total, armónicos en %	Referencia-IEEE 519	Observación
3	1.94%	5.00%	Cumple
5	1.16%	5.00%	Cumple
7	0.84%	5.00%	Cumple
9	0.76%	5.00%	Cumple
11	0.60%	5.00%	Cumple
13	0.46%	5.00%	Cumple

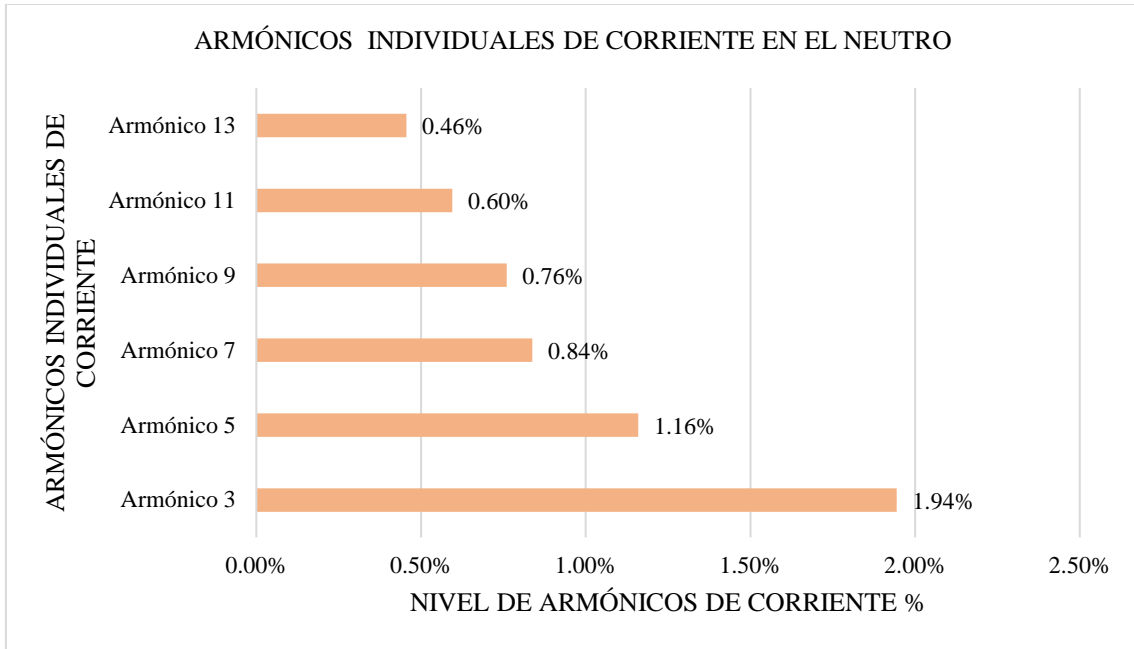


Figura 39. Porcentaje de armónicos de voltaje en el neutro del breaker 2.

5.2.13. Curva de la demanda

Se realizaron mediciones de potencia en la fábrica TOPAC utilizando el Analizador de Redes FLUKE 435-II a intervalos de 5 minutos, desde el 7 de enero de 2024 hasta el 20 de enero de 2024, siguiendo el procedimiento especificado en la Regulación ARCERNR 002/20. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 40.

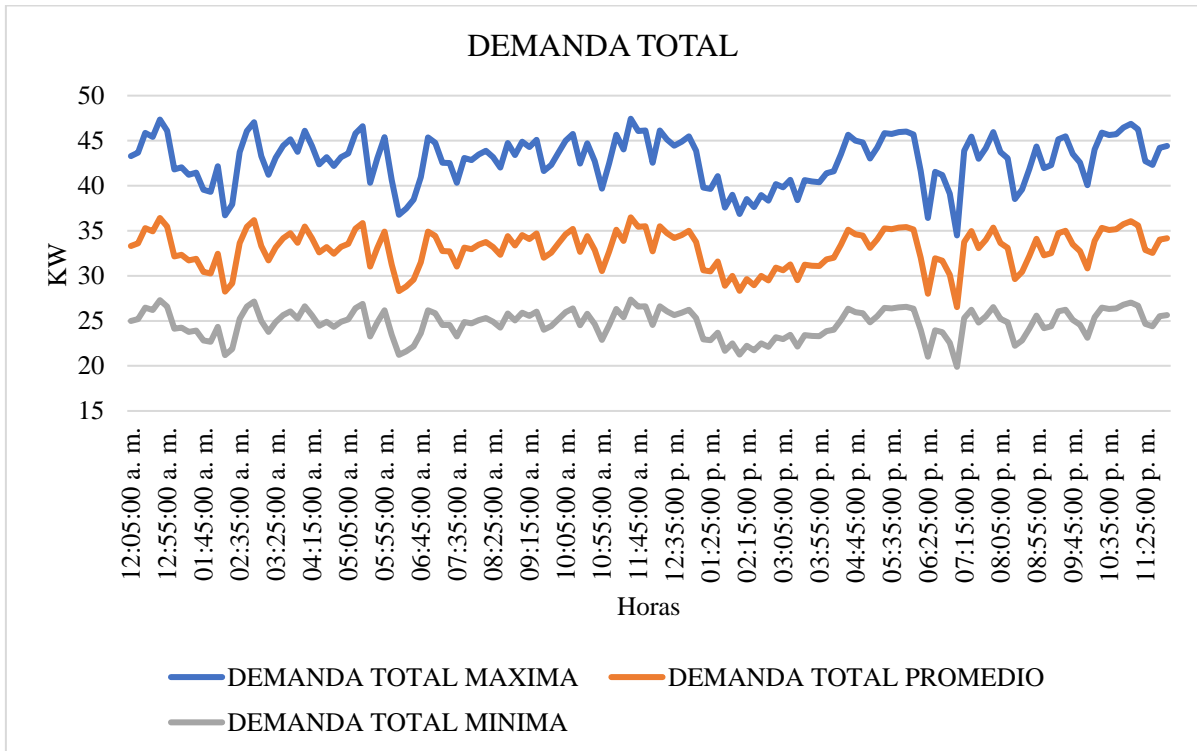


Figura 40. Curva de la demanda de la empresa TOPAC.

En la Figura 40 se observa la curva de demanda en el transformador durante un día de producción. Se destaca que, en este día específico, la actividad productiva alcanzó su punto máximo con una potencia de 47.44 kW. Este pico se atribuye a que las máquinas operaron a su capacidad máxima para cumplir con una alta demanda de producción, necesaria para satisfacer los pedidos recibidos.

Durante los períodos de producción moderada, cuando los pedidos de cubetas disminuyen, se observa una potencia media de 36.49 kW. Esta reducción en la demanda permite a la fábrica operar de manera más eficiente, ajustando su producción a los requerimientos del mercado.

Por otro lado, en los momentos en que la demanda de pedidos es baja, la fábrica alcanza una potencia mínima de 27.36 kW. Durante estos períodos de baja actividad, la empresa aprovecha para realizar el mantenimiento necesario en las máquinas, asegurando así su buen funcionamiento y preparándolas para futuros incrementos en la producción.

5.2.14. Energía consumida

En la fábrica Topac, dedicada a la producción de cubetas de huevos, se ha analizado el consumo energético del mes de enero. Según la Figura 41, el consumo total registrado en la factura real es de 21,228.24 kWh. En contraste, el promedio de energía consumida calculado a partir de los datos obtenidos durante el mismo período es de 20,569.87 kWh. Esta discrepancia resulta en un error relativo del 3.10%, el cual es considerado aceptable dentro del margen de error establecido para este tipo de análisis.

El bajo margen de error observado indica que el análisis de calidad de energía es funcional y fiable. La precisión en los datos promedio en comparación con la medición real valida la metodología empleada para la evaluación del consumo energético. Esta consistencia en los datos refuerza la confiabilidad de las mediciones y del análisis, confirmando que el enfoque utilizado es adecuado para la investigación en curso y proporciona una base sólida para futuras evaluaciones energéticas.

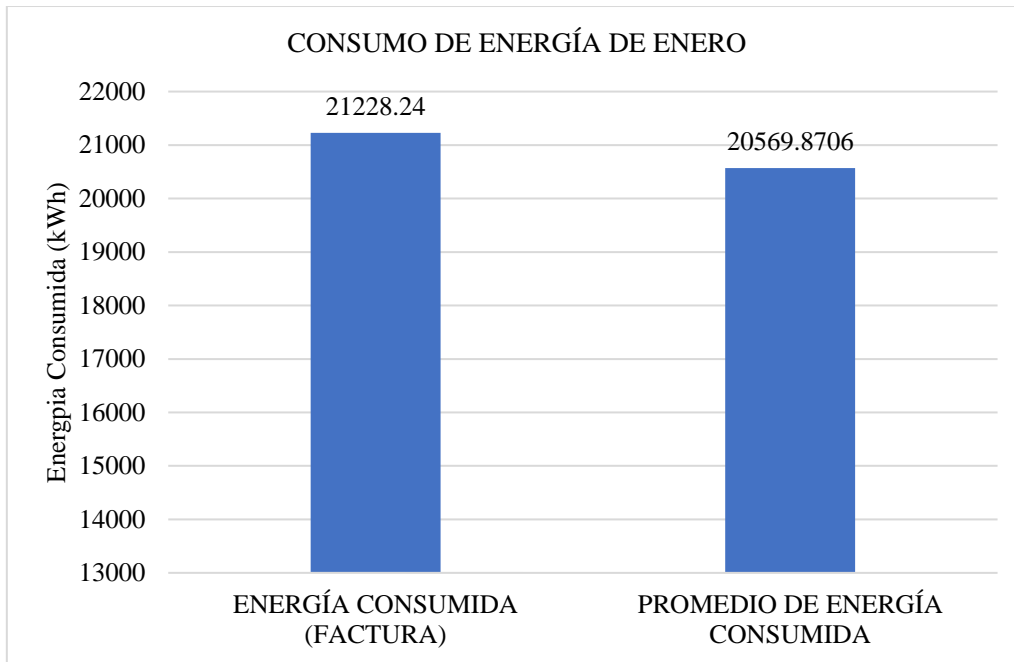


Figura 41. Consumo de energía de enero.

5.3. SIMULACIONES DEL SISTEMA EN ETAP 19.0.1

5.3.1. Levantamiento de carga y mediciones

En la Tabla 44 y Tabla 45, lo primero que se debe considerar para realizar la simulación de la industria, es el levantamiento de carga, en el cual se especifican todos los equipos que conforman la industria tales como transformadores, motores, conductores, es decir todos los equipos con todas las especificaciones técnicas necesarias para poder realizar una modelación lo más cercana a la realidad, ya que esto ayudaría a conocer el estado real de la industria. El levantamiento de carga se muestra en la siguiente tabla donde la coloración roja indica los equipos conectados al breaker 2 de 250A, mientras que la otra coloración indica que equipos están conectados al breaker 1 de 100A.

Tabla 44. Levantamiento de carga de TOPAC breaker1.

EQUIPOS ELÉCTRICOS BREAKER 1									
Equipo	Nombre	Potencia (hp)	Factor de servicio	Conexión motor	Corriente (a)	Cable concéntrico 3x awg	Breakers abb 3x (a)	Contactores ac-3 (kw)	Relés térmicos siemens (a)
Maquina	MBTF 3-4	5.364	1.250	Δ	18.500	3x12AWG	3x25	VARIADOR V8 (4kW/25A/220V)	
Bombapulpa	MPUL	4.020	1.250	Y	13.500	3x12AWG	3x20	20A	11-16A
Motor mix	MMIX	4.020	1.250	Y	13.500	3x12AWG	3x20	20A	11-16A
Motor bomba de vacío	MBV	29.500	1.250	Δ	92.300	3x4AWG	3x100	95A	80-100A
Motor bomba agua 1	MBA	10.060	1.250	Δ	33.100	3x10AWG	3x40	40A	23-28A
Motor bomba agua 2	MBA2	2.010	1.250	Y	12.500	3x12AWG	3x50	20 A	
Motor lavador	ML	4.020	1.250	Y	13.500	3x12AWG	3x50	-	
Motor compresor	MCOM2	10.060	1.250	Y		3x10AWG	3x40		
Motor mix pequeño	MIXP	0.990	1.250	Y	6.300	3x12AWG	3x16		
Motor duchas	MDU	2.010	1.250	Y		3x12AWG	3x16		

Tabla 45. Levantamiento de carga de TOPAC breaker 2.

EQUIPOS ELÉCTRICOS BREAKER 2									
Equipo	Nombre	Potencia(hp)	Factor de servicio	Conexión motor	Corriente (a)	Cable concéntrico 3x awg	Breakers abb 3x (a)	Contactores ac-3 (kw)	Relés térmicos siemens (a)
Hydropulper	MH	154.217	1.250	Δ	37.500	3x10AWG	3x50	40A	23-28A
Motor banda t	MBT	536.408	1.150	Y	16.400	3x12AWG	3x20	VARIADOR (4kW/25A/220V)	
Motor ventilador 1	MV1	100.577	1.150	Δ	30.400	3x10AWG	3x40	40A	23-28A
Motor ventilador 2	MV2	100.577	1.150	Δ	30.400	3x10AWG	3x40	40A	23-28A
Motor quemador	MQ105	201.153	1.250	Δ	9.600	3x12AWG	3x16	SI TIENE	SI TIENE
Luminarias		1.100	1.250			3x12AWG	3x16		
Tomacorrientes		0.200	1.250			3x12AWG	3x20		

En base al levantamiento de carga se observa que la potencia instalada en TOPAC excede la capacidad del transformador en el hipotético caso que estas estuvieran operando a plena carga, sin embargo, en base al estudio de calidad de energía realizado con el analizador de redes eléctricas Fluke se logró determinar que a pesar de tener el levantamiento de carga correcto todos los motores tienen un factor de demanda bajo por lo cual sus demandas de corriente son bajas. En la Tabla 46 y Tabla 47, se especifica los niveles de corriente medidos en cada motor de la fábrica TOPAC y una relación a comparación de su corriente nominal.

Tabla 46. Comparación de corrientes nominales y reales consumidas breaker 1.

BREAKER 1			
EQUIPO	NOMBRE	Corriente consumida(A)	Corriente (A)
Maquina	MBTF 3-4	8.00	18.50
Bombapulpa	MPUL	5.30	13.50
Motor mix	MMIX	6.00	13.50
Motor bomba de vacio	MBV	45.30	92.30
Motor bomba agua 1	MBA	6.80	33.10
Motor bomba agua 2	MBA2	2.80	12.50
Motor lavador	ML	5.20	13.50
Motor compresor	MCOM2	5.40	13.90
Motor mix pequeño	MIXP	1.40	6.30
Duchas	MDU	6.10	6.10

Tabla 47. Comparación de corrientes nominales y reales consumidas breaker 2.

BREAKER 2			
EQUIPO	NOMBRE	Corriente consumida(A)	Corriente (A)
Hydropulper	MH	35.00	37.50
Motor banda	MBT	8.00	16.40
Motor ventilador 1	MV1	5.40	30.40
Motor ventilador 2	MV2	5.40	30.40
Motor quemador	MQ105	2.70	9.60
Luminarias	LUCES	2.10	2.10
Tomacorrientes	TOMAS	0.51	1.00

Por lo general la corriente en vacío (I_0) de los motores posee una pequeña fracción de la corriente a plena carga que por lo general ronda entre el 20% y 40% de la corriente a plena carga y en esta industria se logró observar que ninguno de los motores está a plena carga por lo cual se logra tener consumos de corriente bajos, dichos niveles de corriente no están afectando al transformador porque la corriente nominal del transformador se calcula con la ecuación (17):

$$I_{trafo} = \frac{Sn}{\sqrt{3} * V_{LL}} \quad (17)$$

$$I_{trafo} = \frac{75 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 220V} \quad (18)$$

$$I_{trafo} = 196.82 \text{ A} \quad (19)$$

La corriente nominal del transformador calculada es muy superior a la consumida por la empresa TOPAC por lo cual el transformador no está en peligro de daño o mala operación. Estos datos son validades tanto con los resultados obtenidos por el analizador de redes y también por los datos obtenidos medidos en los conductores de cada motor con una pinza amperimétrica true RMS.

Para realizar una correcta simulación en ETAP se debe considerar muchos parámetros, tales como:

- Factor de demanda
- El tipo de modelo de los motores de inducción
- La inercia del motor, matrimonio y carga
- Tipo de carga de los motores
- Tipo de arrancadores

- Tipos de cargas estáticas, etc.

Para poder asemejar la modelación a la realidad se tomaron datos aproximados en los apartados de los cuales no se posee datos. Esto ayudo a que la simulación reflejara el estado eléctrico el cual terminó siendo un reflejo de los datos medidos por el analizador de redes, confirmando los resultados ya antes estudiados.

Una vez que se tiene toda la información de la simulación a la mano se procede a armar el sistema en ETAP el cual está distribuido en dos secciones que las definen los breakers de 100A y 250A como se muestran en la Figura 42 , Figura 43 y Figura 44:

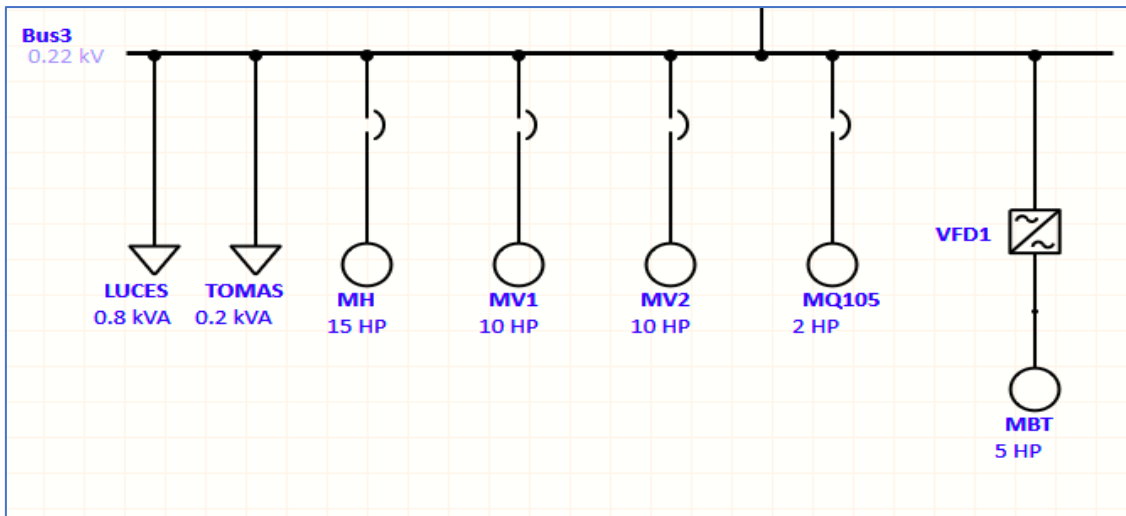


Figura 42. Equipos asociados al breaker de 100A.

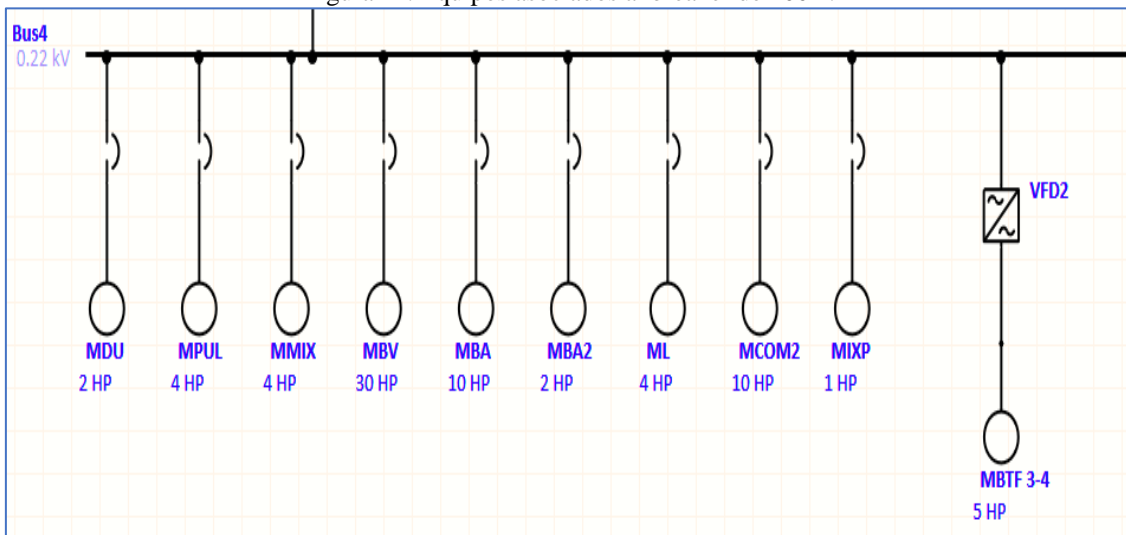


Figura 43. Equipos asociados al breaker de 250A.

Toda la industria esta alimentada por un transformador de 75kVA el cual alimenta a los dos breakers.

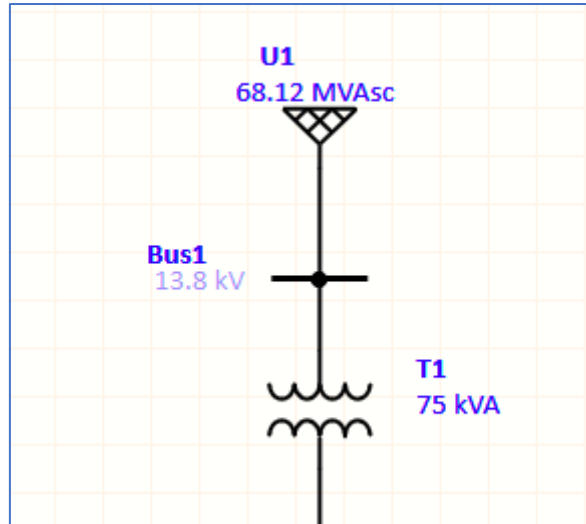


Figura 44. Transformador de la industria TOPAC.

5.3.2. Parámetros utilizados para la simulación

5.3.2.1. Red equivalente

El primer elemento en ser modelado es la red equivalente, ya que es uno de los elementos más importantes porque de esta red se extraen los datos que se utilizan en las industrias para el dimensionamiento de las protecciones eléctricas, es por eso que este dato se lo solicita a la empresa distribuidora de energía eléctrica a fin de tener un modelado más cercano a la realidad.

Los datos utilizados para esta red se basaron en datos entregados por el dueño de la fábrica que antes fueron utilizados para el dimensionamiento de las protecciones, estos datos que se solicitan son las potencias y corrientes de cortocircuito en el punto en donde se va a conectar la industria. Los datos que se utilizaron para esta red se encuentran en la Tabla 48:

Tabla 48. Potencias y corriente de cortocircuito en el punto de conexión de TOPAC.

I_{kss} (kA)	S_{kss} (MVA)	I_p (kA)	$R1$ (Ohm)	$R2$ (Ohm)	$R0$ (Ohm)	$X0$ (Ohm)
2.962	68.120	7.280	1.588	4.651	N/A	N/A
2.343	31.150	5.747	1.558	4.651	2.878	8.333

5.3.2.2. Transformador de 75 kVA

Este equipo se modeló con los datos de placa obtenidos en el transformador existente en la industria de la marca ECUATRAN, los cuales se pueden observar a continuación en la Tabla 49.

Tabla 49. Datos del transformador de la industria TOPAC.

Potencia Aparente	75kVA
Niveles de voltaje	13.8kV/220V
Impedancia	2.7%
Frecuencia	60Hz
Tipo de conexión	Dyn5
Refrigeración	ONAN

Los demás equipos como motores, conductores, iluminación, tomacorrientes y arrancadores suaves se modelaron con base a los datos recabados en el levantamiento de carga y a las medidas tomadas en sitio. Los factores de demanda de cada equipo se encuentran en la Tabla 50 y Tabla 51:

Tabla 50. Factores de demanda de los equipos de la fábrica TOPAC breaker 1.

BREAKER 1		
EQUIPO	NOMBRE	Factor de demanda [%]
Maquina	MBTF 3-4	50
Bombapulpa	MPUL	40
Motor mix	MMIX	40
Motor bomba de vacío	MBV	60
Motor bomba agua 1	MBA	20
Motor bomba agua 2	MBA2	38
Motor lavador	ML	45
Motor compresor	MCOM2	20
Motor mix pequeño	MIXP	70
Motor duchas	MDU	100

Tabla 51. Factores de demanda de los equipos de la fábrica TOPAC breaker 2.

BREAKER 2		
EQUIPO	NOMBRE	Factor de demanda [%]
Hydropulper	MH	100
Motor banda t	MBT	50
Motor ventilador 1	MV1	20
Motor ventilador 2	MV2	20
Motor quemador	MQ105	45
Luminarias	LUCES	100
Tomacorrientes	TOMAS	100

Como se logra observar, la mayoría de motores no tiene una carga ni cerca a la nominal conectadas a los ejes, es por esa razón que se explica que el transformador este soportando de forma correcta la demanda.

5.3.3. Resultados de la simulación

Con el sistema ya establecido tanto en topología como parametrización se realizó a realizar un flujo inicial con el objetivo de verificar que no exista una mala parametrización y el resultado fue optimo, este resultado se puede observar en anexos. Después de haber realizado el flujo se analizó el estudio de los equipos y motores en estado transitorio con el fin de poder observar el comportamiento de los parámetros eléctricos tales como:

- Voltaje en los breakers y en el lado de baja del transformador
- Corriente demandada por la fábrica TOPAC
- Potencias activa, reactiva y aparente
- Factor de potencia

Con todos estos parámetros se analizará la coincidencia con los resultados del estudio de calidad de energía.

Para realizar la simulación se hizo un arranque progresivo de los equipos cada 15 segundos, es decir que cada 15 segundos se fue conectando una carga, empezando por los equipos del breaker de 100A, lo cual se puede observar en la Figura 45 la secuencia de eventos mostrada en la ventana de ETAP.

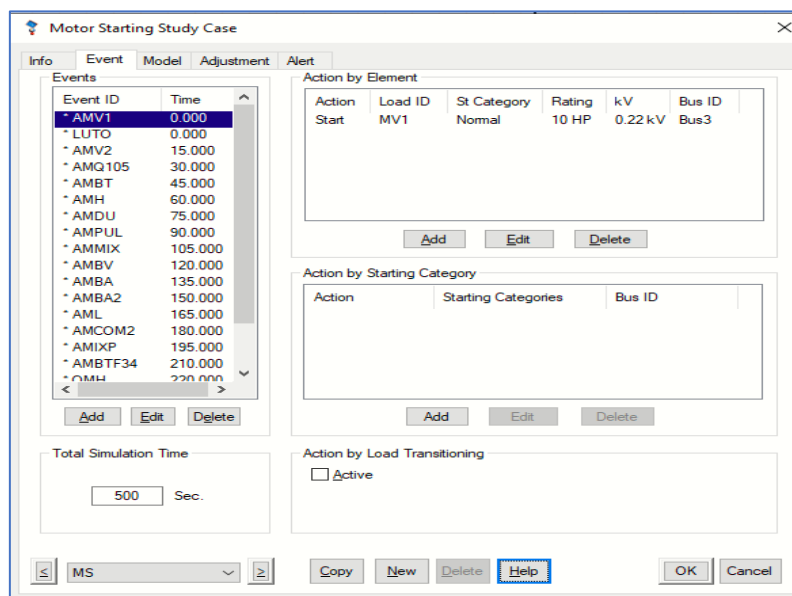


Figura 45. Secuencia de eventos de los equipos.

De todos los equipos instalados en la industria TOPAC, existen equipos que constantemente están en paro y marcha, siendo el más influyente el motor MH (Hidropulper), que es uno de los que más demanda corriente del transformador, este equipo para aproximadamente cada tres horas por 15 o 20 minutos, y también cuando existen cambios de moldes hay una gran variedad de equipo que dejan de operar, por lo cual existirán picos y caída de voltaje consecuentes y sin ningún tipo de patrón, es decir que las caídas de voltaje y consumos de corriente elevados pueden darse en cualquier momento, esto ya que las maquinas se paran de acuerdo a la necesidad que se tenga en la fábrica.

Una vez que se tiene los eventos de arranque y parada de los equipos de la fábrica se procede a realizar la simulación, obteniendo los siguientes resultados:

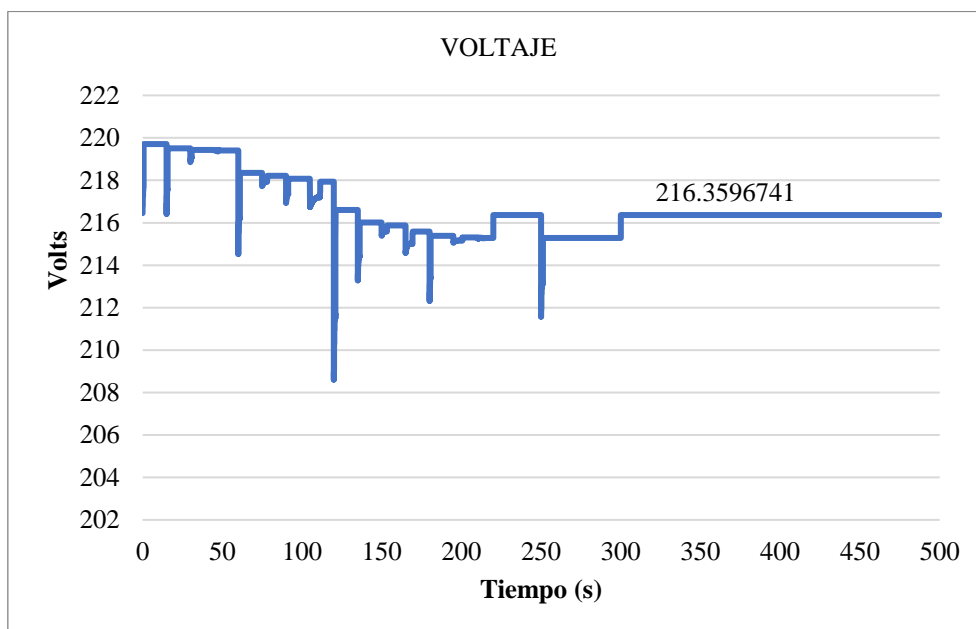


Figura 46. Voltaje en la barra del secundario del transformador.

En la Figura 46, el voltaje conforme se va incrementando carga comienza a decaer teniendo valores de voltaje en que rondan el 98% del valor nominal lo cual equivale a 216.35 V, esto depende de los equipos que estén operando simultáneamente. Este valor es muy parecido al valor de potencia activa obtenido mediante el analizador de redes, lo cual es un buen indicador de que lo que se simuló, se lo hizo correctamente.

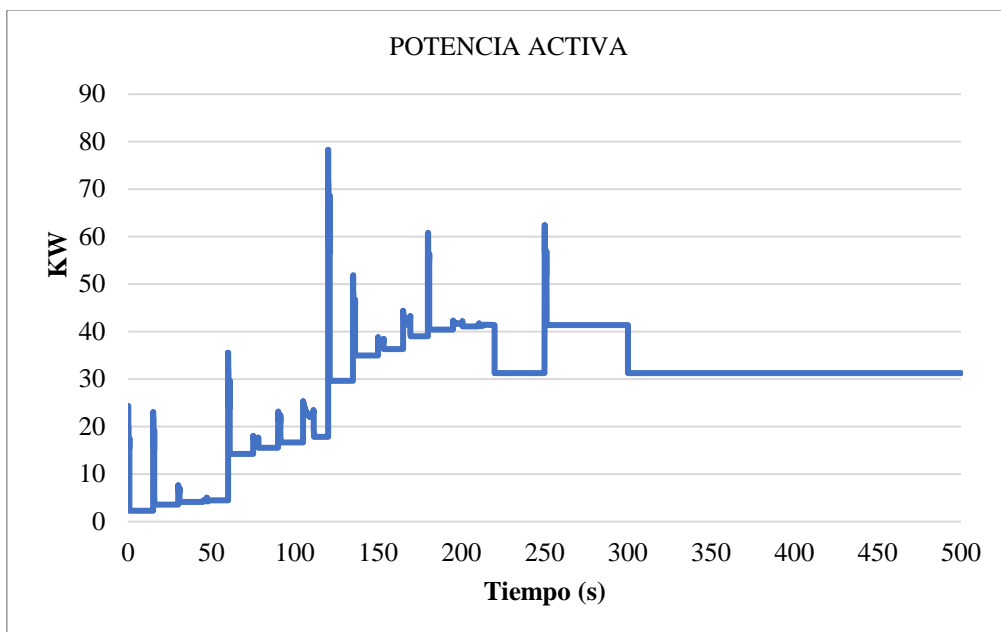


Figura 47. Potencia activa consumida del transformador.

En la Figura 47 se ve el escalonamiento de la potencia activa, esto se debe a que cada 15 segundos se va metiendo carga por ende cada 15 segundos para potencia activa va a ir incrementándose, excepción de cuando se quita carga.

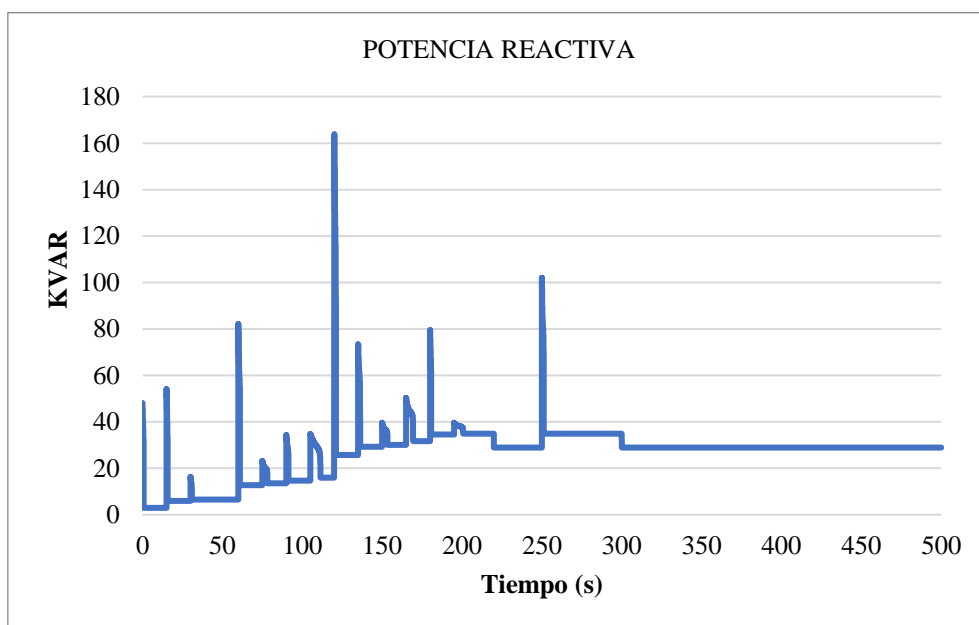


Figura 48. Potencia reactiva consumida del transformador.

En la Figura 48 la potencia reactiva se logra observar que tiene un valor elevado si es que se lo compara con la potencia activa, lo cual se traduce en un bajo factor de potencia, este dato se observará más adelante.

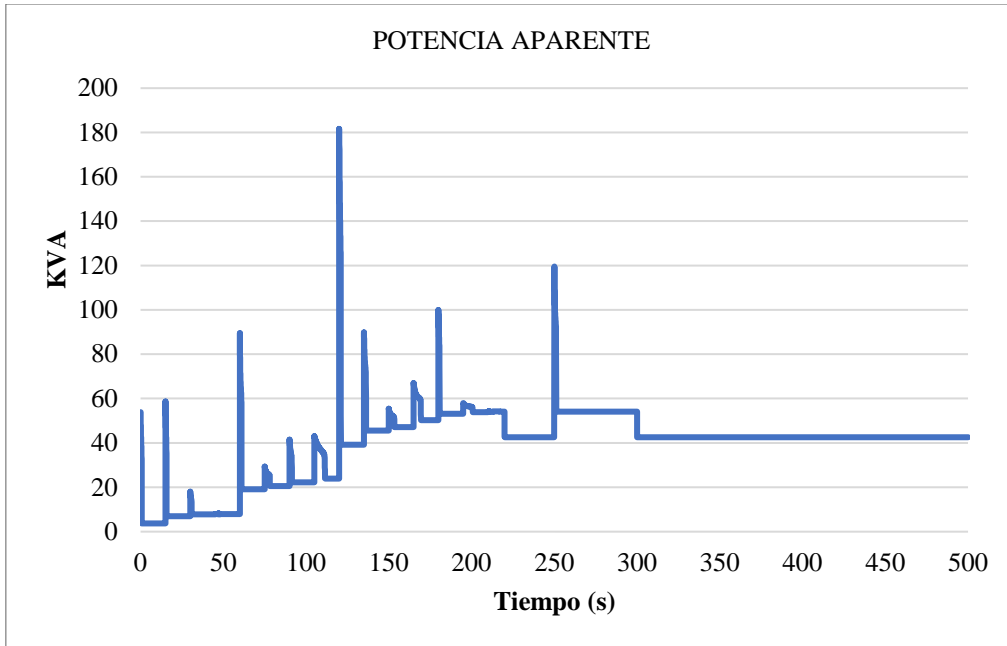


Figura 49. Potencia aparente consumida del transformador.

En la Figura 49 se observa que no es un valor muy alejado de la potencia activa y reactiva, lo cual es un consumo bajo para el transformador que posee TOPAC.

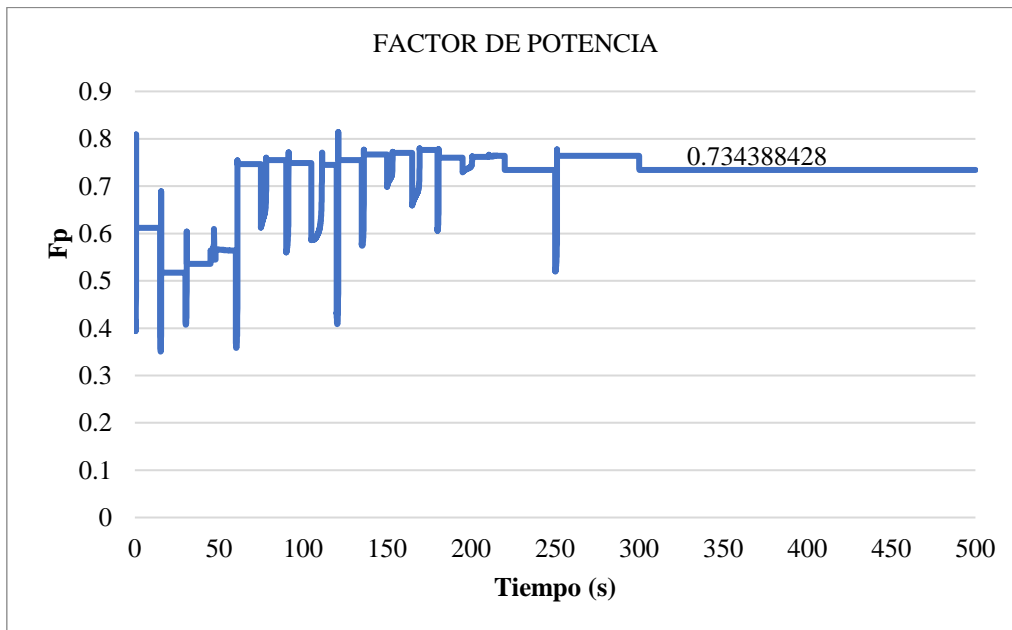


Figura 50. Factor de potencia de la industria.

En la Figura 50 se muestra que este dato es uno de los más importantes, debido a que la normativa eléctrica penaliza a los consumidores cuando no se tiene un buen factor de potencia. Esta penalización es económica y en ciertos casos de reincidencia la penalización es considerable. Un bajo factor de potencia quiere decir que se está consumiendo más corriente de la que se debe, Es por esa razón el motivo de la penalización. Este factor está dentro de los rangos de valores que se tomaron por el

analizador de redes, dichos valores están entre 0.7 y 0.8, mientras que la normativa dice que el mínimo valor permitido es de 0.92, por lo cual existe una razón más para reconfirmar que el analizador tomó datos correctos.

5.3.4. Solución a la problemática presentada en TOPAC

Es muy común que para corregir el bajo factor de potencia de las industrias se instalen bancos de capacitores, pero siempre es bueno considerar más opciones, no obstante, la problemática de la fábrica TOPAC se centra en dos aspectos importantes que son:

- Bajo factor de potencia
- Caídas de voltaje

Resulta que para ambas problemáticas un banco de capacitores tendría un doble beneficio y es por esa razón que se debe implementar.

Para el cálculo del banco de capacitores se debe tener el valor de potencias activas y reactivas para definir cuál debería ser la capacidad del banco usando el triángulo de potencias.

Los datos máximos de potencias aproximadamente son:

- Potencia activa máxima: 40kW
- Potencia reactiva máxima: 30 kvar

El factor de potencia promedio actual es:

$$FP = 0.750 \text{ (Analizador de redes)} \quad (20)$$

$$FP = 0.732 \text{ (Simulación)} \quad (21)$$

El cálculo del banco de capacitores se basa en el factor de potencia requerido mínimo, pero es aconsejable tener un pequeño margen, así que se optara por conseguir un factor de potencia de 0.97.

Por ende, calculamos los ángulos con el arco-cosenos del factor de potencia actual y al que deseamos llegar, los cuales se encuentran en las ecuaciones (22) y (23).

$$ACOS(0.75) = 41.40^\circ \quad (22)$$

$$ACOS(0.97) = 14.07^\circ \quad (23)$$

Para el cálculo del banco de capacitores se utilizó la ecuación (24), se reemplazó los valores obtenidos, dando como resultado una compensación de establecida de 25 Kvar.

$$Q_{\text{Total}} = P_{\text{activa}} * (\text{TAN}(\theta_1) - \text{TAN}(\theta_2)) \quad (24)$$

$$Q_{\text{Total}} = 40000 * (\text{TAN}(41.40^\circ) - \text{TAN}(14.07^\circ)) \quad (25)$$

$$Q_{\text{Total}} = 25.20 \cong 25 \text{ Kvar} \quad (26)$$

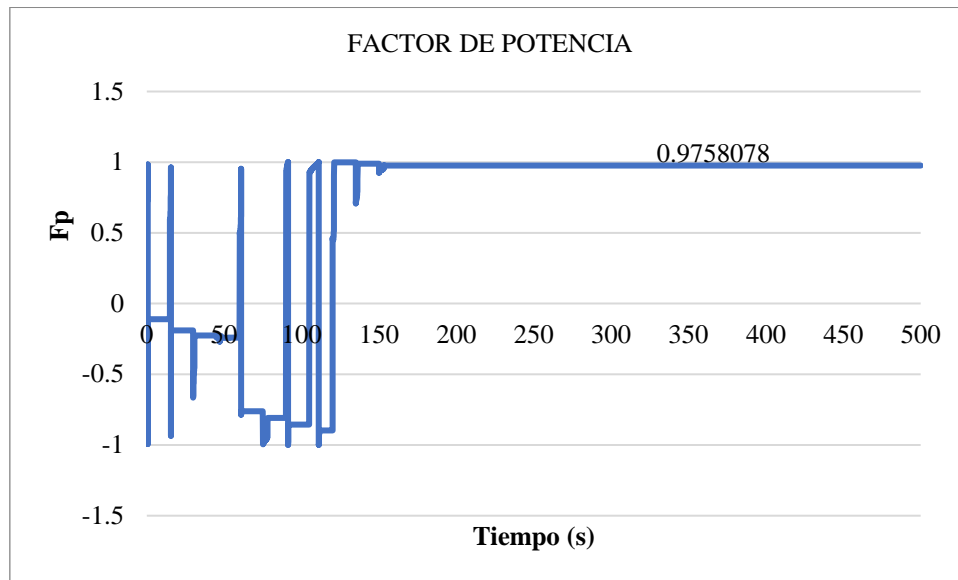


Figura 51. Factor de potencia de la industria después de ingresar los bancos de capacitores.

En la Figura 51, al ubicar el banco de capacitores en la industria, se observa que el factor de potencia se corrige instantáneamente cuando se tiene toda la maquinaria operando. Sin embargo, también se observa que, con baja carga, el factor de potencia entra en áreas negativas. Por ende, se utilizó un banco de capacitores con activación automática, los cuales solo ingresan cuando los valores de factor de potencia caigan por debajo de 0.92.

El banco de capacitores está configurado en cuatro pasos, de los cuales cinco son de 5 kVAr. Estos pasos entran en funcionamiento de manera escalonada, tanto cuando la empresa opera a plena capacidad con todas sus máquinas activas, como cuando algunas máquinas dejan de estar activas. La activación automática de los capacitores permite una corrección precisa del factor de potencia, adaptándose dinámicamente a las variaciones en la carga. Esto evita la sobrecorrección y los factores de potencia negativos, optimizando así la eficiencia energética y la estabilidad operativa de la instalación industrial. La capacidad de ajuste fino proporcionada por los diferentes pasos de kVAr garantiza que solo se suministre la cantidad necesaria de potencia reactiva en cada

momento, mejorando la calidad de la energía y reduciendo las pérdidas eléctricas en el sistema.

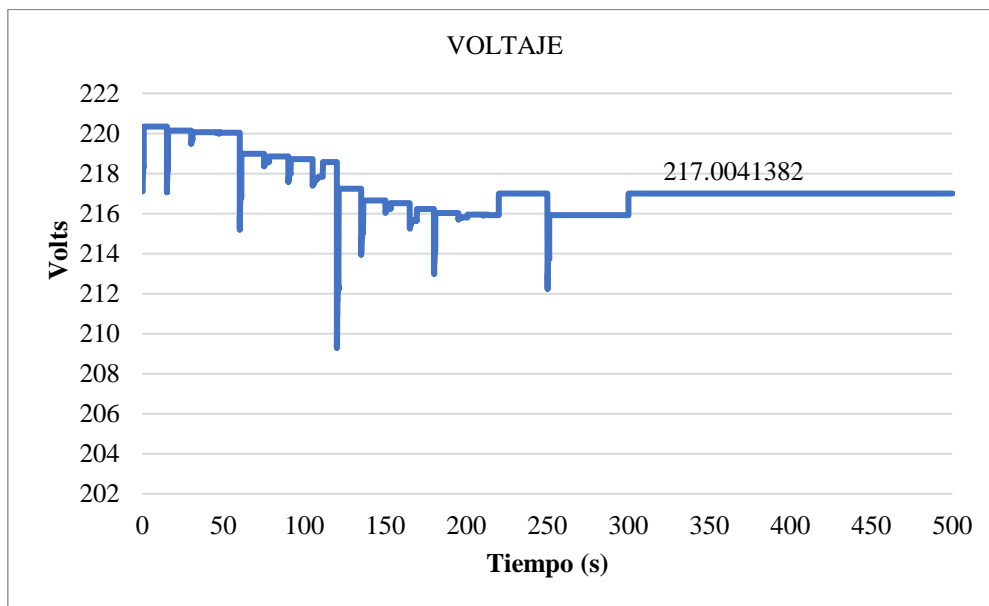


Figura 52. Nivel de voltaje en la industria después de ingresar los bancos de capacitores.

En la Figura 52 se observa una mejora en los perfiles de voltaje de la fábrica manteniéndolos en un rango del 98.15%.

6. ANÁLISIS FINANCIERO

Para realizar el análisis financiero es necesario tener en cuenta cuales son los flujos de dinero que no son aprovechados de la fábrica, estos son en kwh de energía perdidos por pérdidas de tipo I^2R , pérdidas por parada de máquinas en mal funcionamiento debido a la mala calidad del suministro eléctrico, pero la afección que más flujo de dinero le resta a la fábrica TOPAC son las pérdidas de dinero por multa debido al bajo factor de potencia.

6.1. CÁLCULO DE PENALIZACIÓN POR BAJO FACTOR DE POTENCIA.

A continuación, se presenta la ecuación (27) y (28) de penalización por bajo factor de potencia estipulado en el pliego tarifario establecido en el año 2022 por la ARCERNNR para factores de potencia menores a 0.92.

$$P_{BFP} = B_{FP} * FSPEE_i \quad (27)$$

$$B_{FP} = \frac{0.92}{FP_r} - 1 \quad (28)$$

Donde:

P_{BFP} : Penalización por bajo factor de potencia

B_{FP} : Factor de penalización

FP_r : Factor de potencia registrado o calculado

$FSPEE_i$: Factura por servicio público de energía eléctrica inicial [13].

Para determinar el valor económico se utiliza el valor de factor de potencia que se tiene que es de un valor de 0.8 inductivo y el valor nominal reemplazando en la ecuación (29).

$$B_{FP} = \frac{0.92}{0.75} - 1 = 0.226 \quad (29)$$

$$P_{BFP} = 0.226 * \$2,007.790 = \$455.100 \quad (30)$$

Pagarían mensualmente un valor aproximado de \$386.95 a la empresa eléctrica ELEPCO por penalización.

Se tiene que el banco de capacitores que se necesita debe ser de 17 kvar con operación automática, lo cual posee un valor desglosado de:

6.2. ESTUDIO Y VIABILIDAD DE LA INVERSIÓN

En la Tabla 52, se detallan los materiales y cantidades necesarios para implementar el banco de capacitores automático, junto con los precios de cada material. El costo total de la inversión asciende a \$3,438.50.

Tabla 52. Tabla de costo del banco automático de capacitores de 25 kvar SUMELEC [18].

Descripción	Cantidad	Precio unitario [\$]	Precio total [\$]
Analizador de red	1	400.00	400.00
Caja	1	130.00	130.00
TCs	3	30.00	90.00
Botellas capacitor 5 kvar	5	72.00	360.00
Caja metálica aislada	1	160.00	160.00
Breaker tres polos caja moldeada 40A	1	80.00	80.00
Contactador capacitivo	4	60.00	240.00
Protecciones y alimentación -bobinas contactores	1	170.00	170.00
Cableado	1	60.00	60.00
Ingeniería de diseño	1	1,000.00	1,000.00
Mano de Obra	1	300.00	300.00
SUBTOTAL			2,990.00
IVA 15%			448.50
TOTAL			3,438.50

El valor de la inversión es de un total de \$3,438.50

Para poder calcular si la inversión es rentable se debe definir dos conceptos fundamentales denominados el VAN y el TIR.

- Valor Actual Neto (VAN): Es una medida que dice que tal rentable es invertir en un determinado proyecto, considera el flujo de efectivo de la vida útil del

proyecto, la tasa de descuento, inversión inicial y periodo de tiempo dado en años y se calcula con la ecuación (31).

- Tasa de Interés de Retorno (TIR): Es un valor porcentual también conocido como la tasa de descuento con la que el VAN se hace igual a cero [19].

$$VAN = -D_0 + \frac{FC_1}{(1+k)^1} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \frac{FC_3}{(1+k)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n} > 0 \quad (31)$$

Donde:

D_0 : Inversión en el año cero

FC_1 : Flujo de caja

k : Tasa de interés de retorno

n : Duración de la inversión

Para el caso de TOPAC se considera que opere de manera indefinida, pero para el caso actual se definirá un año de periodo para el estudio financiero, en el cual se detallan los valores de energía de la factura, el valor de las multas, la inversión y valor actual como se muestra en la Tabla 53.

Tabla 53. Estudio financiero del TIR y VAN en un año de estudio.

MES		FLUJO DE CAJA	MULTA	SERVICIO ELÉCTRICO	VALOR ACTUAL
jul-23	1	2004.88	454.44	2459.32	2270.84
ago-23	2	2010.46	455.70	2466.16	2102.64
sep-23	3	2269.12	514.33	2783.45	2191.28
oct-23	4	2126.17	481.93	2608.1	1895.88
nov-23	5	1990.34	451.14	2441.48	1638.75
dic-23	6	1902.21	431.17	2333.38	1446.15
ene-24	7	2007.79	455.10	2462.89	1409.44
feb-24	8	2515.23	570.12	3085.35	1630.33
mar-24	9	2540.24	575.79	3116.03	1520.36
abr-24	10	2599.60	589.24	3188.84	1436.64
may-24	11	2540.24	575.79	3116.03	1296.25
jun-24	12	2848.80	645.73	3494.53	1342.29

Para fines de inversión la tasa se definió en un valor de 8.37% [20], esto debido al tipo de compra realizada, ya que se espera que se recupere de forma pronta la inversión realizada para el banco de capacitores, por lo tanto, en la Tabla 54, tenemos los resultados de los indicadores financieros.

Tabla 54. VAN y TIR resultante de la inversión en el banco de capacitores.

INDICADORES FINANCIEROS	
VAN	\$13,013.28
TIR	60%

El VAN es de \$13,013.28 y la TIR 60% esto indica que la inversión es segura y que la recuperación de la inversión es rápida y generará ahorro para la empresa TOPAC.

Tabla 55. Tiempo de recuperación de la inversión.

MES	INVERSIÓN	PENDIENTE A RECUPERAR
0	-3438.50	-3438.50
1	454.44	-2984.06
2	455.70	-2528.36
3	514.33	-2014.02
4	481.93	-1532.09
5	451.14	-1080.95
6	431.17	-649.78
7	455.10	-194.68
8	570.12	375.44
9	575.79	
10	589.24	
11	575.79	
12	645.73	
PRI	7 MESES	20 DIAS

En la Tabla 55 se espera recuperar la inversión en un lapso de tiempo de 7 meses con 20 días y a partir de este tiempo los valores que se pagan en multa se verán reflejados con un gasto menos, es decir, la empresa tendrá un ahorro disponible para inversión o reserva económica.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A través del análisis exhaustivo de la bibliografía actual sobre el estado del arte y las normativas nacionales e internacionales relativas a la calidad de la energía en el sector industrial revela una comprensión profunda y actualizada de los estándares aplicables. Este estudio ha permitido identificar y evaluar los principales índices que determinan la calidad de la energía, en los cuales tenemos para nivel de bajo voltaje es de $\pm 8\%$, THD de voltaje y corriente $\pm 8\%$, armónicos de voltaje y corriente de $\pm 5\%$, TDD es de $\pm 15\%$, potencia activa, reactiva y aparente del $\pm 5\%$, y el factor de potencia es 0.92 fp. La investigación subraya la necesidad crítica de aplicar metodologías adecuadas para la detección y mitigación de problemas, que puede incidir significativamente en la eficiencia operativa y en los costos de las industrias. El cumplimiento riguroso de estas normativas es esencial para la mejora continua en la calidad de la energía y para la optimización de los recursos energéticos en el ámbito industrial.
- La evaluación de las variables de calidad de energía en el sistema eléctrico de la empresa TOPAC ha revelado que varios índices no cumplen con los requisitos establecidos por la norma IEEE-519 y ARCERNNR 002/20. En particular, se identifican deficiencias en el factor de potencia, los niveles de voltaje, la potencia, los armónicos en corriente y los armónicos de voltaje. A pesar de que los índices de THD (Total Harmonic Distortion) para corriente, voltaje y TDD (Total Demand Distortion) cumplen con las normativas, las áreas de deficiencia requieren atención inmediata. Para abordar estos problemas, se propuso la implementación de un banco de capacitores automático que no solo corregirá el factor de potencia, sino que también mejorará la estabilidad del sistema eléctrico al mitigar perturbaciones. Esta solución permitirá a la empresa cumplir con las normativas vigentes, evitar penalizaciones y mejorar la eficiencia energética y la seguridad operativa del personal.
- Mediante la simulación en el software ETAP 19.0.1, se corroboraron los resultados emitidos por el analizador de redes donde las variables de calidad de energía de acuerdo con la norma IEEE 519 y ARCERNNR 002/20, ha puesto de manifiesto varias áreas de incumplimiento, particularmente en el factor de potencia, que actualmente se encuentra en 0,75, así como en los niveles de armónicos. Para remediar estas deficiencias y garantizar el cumplimiento

normativo, se ha propuesto la instalación de un banco de condensadores automático. Este banco está compuesto por cinco pasos de 5 kVAr cada uno y alcanzando un total de 25 kVAr. Con la implementación de esta solución, se prevé una mejora significativa en el factor de potencia, elevándolo de 0,75 a 0,97. Esta mejora no solo permitirá reducir las penalizaciones asociadas con un bajo factor de potencia, sino que también optimizará la eficiencia energética del sistema y garantizará una mayor estabilidad y rendimiento operativo, cumpliendo así con los requisitos de calidad de energía establecidos.

- A través del análisis económico detallado, se determinó que la inversión necesaria para la implementación de un banco de capacitores automático abordaría eficazmente la problemática de la empresa TOPAC. El estudio reveló que el bajo factor de potencia de la empresa, penalizado por ELEPCO S.A., generaba costos adicionales mensuales de \$454.44. La solución propuesta, que consiste en un banco de capacitores automático con una inversión de \$3438.50, se estimó que se recuperaría en un plazo de 7 meses y 20 días.
- La implementación de un banco de capacitores automático es una solución eficiente para la empresa TOPAC, ya que corrige el bajo factor de potencia penalizado por ELEPCO S.A., que generaba costos adicionales mensuales. Con una inversión de \$3438.50, el análisis económico reflejó un TIR del 60% y un VAN de \$13,013.38.
- Para la empresa TOPAC, se ha identificado que los picos de corriente durante el arranque directo de motores representan un desafío significativo, ya que pueden causar fluctuaciones en el suministro eléctrico y afectar la estabilidad de la red. Para mitigar estos picos de corriente, se recomienda la implementación de variadores de frecuencia (VFDs). Los VFDs controlan la velocidad de los motores eléctricos ajustando la frecuencia y el voltaje de la energía suministrada, permitiendo un arranque suave y gradual que reduce significativamente los picos de corriente. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que la instalación de VFDs puede introducir el riesgo de resonancia en el sistema. Para evitar este problema, se debe realizar un análisis detallado de las frecuencias naturales del sistema y ajustar la configuración del VFD para operar fuera de las frecuencias críticas. Además, la instalación de filtros de línea puede ayudar a mitigar cualquier posible resonancia y asegurar un funcionamiento estable y eficiente de los motores.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TOSCANO, «TOSCANO,» 2005. [En línea]. Available: <https://toscano.es/2023/02/09/sobretensiones-transitorias/#:~:text=Qu%C3%A9%20son%20las%20sobretensiones%20transitorias&text=Puede%20provocar%20graves%20deterioros%20y,impulso%20mediante%20dispositivos%20de%20protecci%C3%B3n..> [Último acceso: Mayo 2024].
- [2] E. C. S. Castaño, CALIDAD DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, Manizales-Colombia, 2003.
- [3] A. Penagos, Magnitudes Eléctricas, 2008.
- [4] G. A. Mazur, «Fluke Corporation,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/informacion/blog/electrica/que-es-la-frecuencia#:~:text=Dicho%20de%20otra%20forma%2C%20la,a%201%20ciclo%20por%20segundo..> [Último acceso: 04 2024].
- [5] S. R. CASTAÑO, Redes de Distribución de Energía, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [6] M. T. A. Kusko, POWER QUALITY in ELECTRICAL SYSTEMS, Unites States: Mac Graw Hill, 2007.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Standards 519 and 1159, IEEE JOURNAL, 2022.
- [8] AESoluciones, Los efectos de los armonicos y sus soluciones, 2018.
- [9] DELTA EU, Fuentes conmutadas "SMPS" (Switched Mode Power Supplies), 2018.
- [10] CONELEC, CALIDAD DEL SERVICIO ELECTRICO DE DISTRIBUCION, Quito, 2001.
- [11] International Electrotechnical Commission, Compatibilidad electromagnética y Límites para las emisiones de corriente armónica, 2017.

- [12] IEEE 1159, Práctica recomendada por IEEE para monitorear la calidad de la energía eléctrica, 1995.
- [13] ARCERNNR, «Penalización por bajo factor de potencia,» *PLIEGO TARIFARIO 2022*, vol. II, p. 20, 2022.
- [14] SUMICALI, Localizador de circuitos de CA con probador de salida GFCI Klein Tools ET310, COLOMBIA, 2022.
- [15] FLUKE, Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke, 2015.
- [16] FLUKE, POWERLOG FLUKE, 2015.
- [17] ETAP , ETAP 19.0.1, 2020.
- [18] lerqué, «webo-AGENCIA DIGITAL,» SUMELEC, [En línea]. Available: <https://sumelec.net/>. [Último acceso: 03 Agosto 2024].
- [19] C. Castillo, «Cesar Castillo López,» vol. 1, pp. 2-3, 2019.
- [20] BANCO CENTRAL DEL ECUADOR, «Indicadores Económicos,» bce, Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.bce.fin.ec/index.php/informacioneconomica/sector>. [Último acceso: 28 Julio 08].