



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

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA
CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN
LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021.**

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

Autores:

Antamba Valenzuela Bryan Fernando

Gómez Calvopiña Angel Francisco

Tutor:

Edgar Roberto Salazar Achig, Mgs

LATACUNGA – ECUADOR

2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **Antamba Valenzuela Bryan Fernando** y **Gómez Calvopiña Angel Francisco** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021”**, siendo el **Edgar Roberto Salazar Achig, Mgs** 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 investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
Antamba Valenzuela Bryan Fernando

C.C. 1003985734

.....
Gómez Calvopiña Angel Francisco

C.C. 0503982118

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021”, Antamba Valenzuela Bryan Fernando y Gómez Calvopiña Angel Francisco. De la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicotécnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la FACULTAD de CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Julio, 2021

Edgar Roberto Salazar Achig
Firmado digitalmente
por Edgar Roberto
Salazar Achig

.....
Edgar Roberto Salazar Achig, Mgs

C.C. 0502847619

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, el o los postulantes: Antamba Valenzuela Bryan Fernando y Gómez Calvopiña Angel Francisco con el título de Proyecto de titulación: “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

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

Latacunga, Julio 2021

Para constancia firman:



Firmado electrónicamente por:
**ROMMEL EUSEBIO
SUAREZ VINUEZA**

Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. MSc. Wilian Guamán
CC: 0603578956

Lector 2

Nombre: Ing. MSc. Rommel Suárez
CC: 1804165353

Lector 3

Nombre: Ing. MSc. Carlos Pacheco
CC: 0503072902

CERTIFICADO

CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A. CEDAL, en fiel cumplimiento a sus Principios Corporativos de Responsabilidad Social Empresarial y Aporte a la Comunidad, CERTIFICA: que ha autorizado a los Señores **ANTAMBA VALENZUELA BRYAN FERNANDO** portador de la C.C. No. **1003985734** y **GÓMEZ CALVOPIÑA ANGEL FRANCISCO** portador de la C.C. No. **0503982118** alumnos del Décimo Ciclo de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, para que realicen en la Compañía, el Proyecto de Titulación denominado "ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIDDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021"

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso de este documento dentro de los márgenes de la Ley.

Latacunga, junio 21 del 2021



Ing. Luis Soria S.
GERENTE DE PLANTA

g.l.

AGRADECIMIENTO

Nuestro más sincero agradecimiento y gratitud al Ing. Roberto Salazar por habernos guiado, compartiendo sus conocimientos, por ayudarnos y motivarnos a confiar en nosotros y en nuestras capacidades.

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, a nuestros padres, hermanos y familia, quienes nos han apoyado en toda circunstancia y han sido un pilar fundamental en nuestro desarrollo académico y personal.

Expresamos nuestro reconocimiento a la Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A. por brindarnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto investigativo de titulación, abriéndonos sus puertas y colaborando en todo cuanto fue necesario.

Agradecemos a todas las personas que nos brindaron su confianza y apoyo, a quienes creyeron en nosotros y nos motivaron para alcanzar nuestras metas.

Bryan y Francisco

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, por ser mi guía espiritual en este largo camino, gracias a él supere los momentos difíciles y me levante para culminar con éxito.

A mis padres, Hugo y Amparito, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado cumplir hoy anhelo más.

A mis hermanos, Danilo, Kevin, Nicole Y Francisco, por su cariño y apoyo incondicional, durante este proceso.

A todos quienes creen en mí...

Bryan Antamba

A mis padres, Patricio y Blanca por su confianza, esfuerzo, sacrificio y amor, porque sé que son la verdadera fuente de mis logros y capacidades.

A mis hermanos Pablo, Ana, Juan, Rebeca, quienes siempre han estado en los buenos y malos momentos, en quienes confié y he encontrado un ejemplo de superación y perseverancia.

A todas aquellas personas que representan para mí una razón directa o indirecta de estar donde me encuentro...

Francisco Gómez

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	i
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iii
CERTIFICADO.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xxii
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. EL PROBLEMA	3
2.1.1. Situación Problemática.....	3
2.1.2. Formulación del problema.....	4
2.2. BENEFICIARIOS	4
2.2.1. Beneficiarios directos	4
2.2.2. Beneficiarios indirectos	4
2.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
2.4. HIPÓTESIS	5
2.5. OBJETIVOS.....	5
2.5.1. Objetivo General	5
2.5.2. Objetivos específicos.....	5
2.6. SISTEMA DE TAREAS	6

3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
3.1.	IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	7
3.2.	EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	7
3.3.	ASPECTOS DE CALIDAD.....	7
3.3.1.	Nivel de Voltaje.....	8
3.3.2.	Perturbación rápida de voltaje.....	8
3.3.3.	Distorsión Anómica de Voltaje.....	9
3.3.4.	Desequilibrio de Voltaje.....	9
3.3.5.	Sag.....	10
3.3.6.	Swell.....	10
3.4.	TIPOS DE POTENCIAS.....	11
3.4.1.	Potencia activa.....	11
3.4.2.	Potencia reactiva.....	11
3.4.3.	Potencia aparente.....	12
3.5.	FACTOR DE POTENCIA.....	13
3.5.1.	Factor de potencia (REGULACIÓN No. CONELEC 004/01).....	13
3.5.2.	Cargos por bajo factor de potencia.....	13
3.6.	TIPOS DE CARGAS.....	14
3.6.1.	Cargas lineales.....	14
3.6.2.	Cargas no lineales.....	14
3.7.	RESONANCIA.....	15
3.7.1.	Frecuencia de Resonancia.....	16
3.8.	ARMÓNICOS.....	17
3.8.1.	Fuentes de armónicos.....	20
3.8.2.	Parámetros de los armónicos.....	20
3.8.2.1.	Orden de los armónicos.....	20
3.8.2.2.	Frecuencia.....	21
3.8.2.3.	Secuencia.....	21
3.8.3.	Distorsión armónica.....	21
3.8.4.	Tasa de distorsión individual.....	21
3.8.5.	Tasa de distorsión total.....	22

3.8.6.	Armónicos de Voltaje.....	22
3.8.7.	Armónicos de Corriente	22
3.9.	ESTÁNDAR IEEE 519 -2014.....	23
3.9.1.	Distorsión Total de Demanda.....	23
3.9.2.	Contenido armónico de corriente	23
3.9.2.1.	Límites.....	23
3.10.	SOLUCIONES PARA ATENUAR LAS PERTURBACIONES	24
3.10.1.	Filtros.....	25
3.10.2.	Filtros Pasivos	26
3.10.2.1.	Filtro Pasivo Sintonizado	27
3.10.3.	Filtros Activos	27
3.10.3.1.	Filtros activos de corriente armónica	27
3.10.4.	Reguladores de voltaje	28
3.10.5.	Mejoramiento del factor de potencia utilizando filtros	29
4.	MÉTODOS Y MATERIALES	30
4.1.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	30
4.1.1.	Método inductivo – deductivo.....	30
4.1.2.	Método analítico y sintético	30
4.2.	TIPOS DE INVESTIGACIÓN	30
4.2.1.	Investigación Bibliográfica	30
4.2.2.	Investigación Exploratoria	30
4.2.3.	Investigación Descriptiva.....	31
4.2.4.	Investigación Propositiva	31
4.3.	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	31
4.3.1.	Observación Directa y Participativa.....	31
4.3.2.	Instrumentos de Investigación.....	31
4.4.	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.	32
4.4.1.	Etapas 1.- Condiciones para analizar la carga	32
4.4.2.	Etapas 2.- Características mínimas del equipo	33
4.4.3.	Etapas 3.- Selección del analizador de redes	33
4.4.3.1.	Características	34

4.4.3.2.	Adquisición de Datos	35
4.4.4.	Etapa 4.- Forma de conexión del equipo para una red trifásica	35
4.4.5.	Etapa 5.- Lugar de instalación del analizador de redes	36
4.4.6.	Etapa 6.- Pruebas de funcionamiento del analizador de redes	37
4.4.7.	Etapa 7.- Frecuencias y características de la medición del analizador de redes	38
4.4.8.	Etapa 8.- Descarga de los datos del analizador de redes	39
4.4.9.	Etapa 9.- Definir las condiciones de diseño para la simulación	39
4.4.9.1.	EasyPower	40
4.4.10.	Etapa 10.- Seleccionar los parámetros de diseño para la simulación	40
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LA INDUSTRIA.....	41
5.1.1.	Descripción del área de estudio de la Industria	41
5.1.2.	Levantamiento de cargas	43
5.2.	ANÁLISIS DE RECOPIACIÓN DE DATOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES	44
5.2.1.	Análisis de calidad de energía de la industria “CEDAL S.A”	44
5.2.2.	Analizador de energía trifásico FLUKE 435 S - II	44
5.2.2.1.	Metodología para monitoreo	44
5.3.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS	45
5.3.1.	Variaciones de Voltaje	45
5.3.2.	Voltaje Nominal Fase – Neutro: 254 V.....	46
5.3.3.	Voltaje Nominal Fase – Fase: 440 V.....	48
5.3.4.	Análisis de la Corrientes de Línea.....	50
5.3.5.	Desequilibrio de Voltaje.....	52
5.3.6.	Desequilibrio de Corriente	53
5.3.7.	Factor de Potencia	54
5.4.	DEMANDA ELÉCTRICA DE ESTUDIO	56
5.4.1.	Demanda Eléctrica del Transformador 1.....	56
5.4.2.	Demanda Eléctrica del Transformador 2.....	56
5.4.3.	Demanda Eléctrica del Transformador 3.....	57
5.5.	ANÁLISIS DE POTENCIAS	58

5.6.	ENERGÍA CONSUMIDA	58
5.6.1.	Energía en el Transformador 1	58
5.6.2.	Energía en el Transformador 2.....	59
5.6.3.	Energía en el Transformador 3.....	59
5.7.	ARMÓNICOS DE VOLTAJE	60
5.7.1.	THD de Voltaje	60
5.7.2.	Armónicos Individuales de Voltajes	63
5.8.	ARMÓNICOS DE CORRIENTE	65
5.8.1.	TDD de Corriente.....	65
5.8.2.	TDD de Corriente del Transformador 1	66
5.8.3.	Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 1.....	68
5.8.4.	TDD de Corriente del Transformador 2	69
5.8.5.	Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 2.....	70
5.8.6.	TDD de Corriente del Transformador 3	72
5.9.	ANÁLISIS DE FLICKERS.....	74
5.9.1.	Transformador 1	74
5.9.2.	Transformador 2	75
5.9.3.	Transformador 3	76
5.9.4.	Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 3.....	77
5.10.	ANÁLISIS DE SAGS Y SWELLS.....	78
5.10.1.	Transformador 1	78
5.10.2.	Transformador 2	80
5.10.3.	Transformador 3	82
5.11.	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE EASY POWER.....	83
5.11.1.	Sistema inicial	83
5.11.2.	Comparación de resultados entre el Analizador de Redes y el Simulador EASY POWER.....	84
5.11.3.	Factor de Potencia	84
5.11.3.1.	Transformador 1	84
5.11.3.2.	Transformador 2	85
5.11.3.3.	Transformador 3	86
5.11.4.	Desniveles de Voltaje.....	87

5.11.4.1. Transformador 1	87
5.11.4.2. Transformador 2	88
5.11.4.3. Transformador 3	88
5.11.5. Desequilibrio de Corriente	88
5.11.5.1. Transformador 1	89
5.11.5.2. Transformador 2	89
5.11.5.3. Transformador 3	89
5.11.6. Cargabilidad de Transformadores	90
5.11.7. Cargabilidad de los Conductores.....	90
5.11.7.1. Transformador 1	91
5.11.7.2. Transformador 2	91
5.11.7.3. Transformador 3	92
5.11.8. Comparación de Armónicos de Voltaje	92
5.11.8.1. Transformador 1	93
5.11.8.2. Transformador 2	93
5.11.8.3. Transformador 3	94
5.11.9. Comparación de armónicos de Corriente.	95
5.11.9.1. Transformador 1	96
5.11.9.2. Transformador 2	97
5.11.9.3. Transformador 3	98
5.11.10. Cargabilidad de Transformadores	99
5.11.10.1. Transformador 1	99
5.11.10.2. Transformador 2	99
5.11.10.3. Transformador 3	99
5.12. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES PARA LAS PERTURBACIONES ELÉCTRICAS DEL SEGUNDO TRANSFORMADOR	100
5.12.1. Mitigación de Armónicos	100
5.12.1.1. Cálculo de KVAR efectivos (Qeff).....	100
5.12.1.2. Cálculo de la Reactancia efectiva del Filtro	100
5.12.1.3. Cálculo de la Reactancia Capacitiva	101
5.12.1.4. Cálculo de la Reactancia inductiva	101
5.12.1.5. Cálculo de la Resistencia del Filtro	102
5.12.1.6. Cálculo de la Impedancia del Filtro	102

5.12.1.7.Cálculo de los kVAR del Filtro	102
5.13. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DEL FILTRO	104
5.13.1. Factor de Potencia	104
5.13.1.1.Transformador 1	104
5.13.1.2.Transformador 2	105
5.13.1.3.Transformador 3	106
5.13.2. Armónicos de Voltaje.....	108
5.13.2.1.Transformador 1	108
5.13.2.2.Transformador 2	109
5.13.2.3.Transformador 3	110
5.13.3. Armónicos de Corriente	111
5.13.3.1.Transformador 1	111
5.13.3.2.Transformador 2	112
5.13.3.3.Transformador 3	113
5.14. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)....	114
5.14.1. Factibilidad Operativa	114
5.14.2. Factibilidad Económica.....	114
5.14.2.1.Presupuesto para la propuesta del proyecto	114
5.15. AHORRO ENERGÉTICO AL IMPLEMENTAR LAS SOLUCIONES PROPUESTAS	115
5.15.1. Cálculo de pérdidas de los Transformadores 1, 2 y 3	115
5.15.1.1.Cálculo de pérdidas totales.....	118
5.15.1.2.Cálculo de energía	118
5.15.1.3.Cálculo de pérdidas de Energía.....	118
5.15.1.4.Cálculo de costo por pérdidas	119
5.15.2. Penalización por bajo factor de potencia.....	120
5.15.2.1.Ahorro económico.....	120
5.15.3. Cálculo del TIR y TMAR.....	121
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
6.1. CONCLUSIONES.....	121
6.2. RECOMEDACIONES	123

7.	BIBLIOGRAFÍA.....	124
8.	ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Depresión de voltaje (Sag).....	10
Figura 2. Elevación de Voltaje (Swell).	11
Figura 3. Carga lineal	14
Figura 4. Carga no lineal.	15
Figura 5. Onda sin contenido armónico.....	17
Figura 6. Onda con contenido armónico.	18
Figura 7. Funcionamiento de un filtro pasivo.....	26
Figura 8. Filtro sintonizado.	27
Figura 9. Filtro activo de corriente armónica.	28
Figura 10. Supresor de sobretensiones multimodo conectado en paralelo.....	29
Figura 11. Método de selección del analizador de calidad eléctrica y energía.	32
Figura 12. Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II [21].	33
Figura 13. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico.....	36
Figura 14. Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico de bajo voltaje (Las flechas apuntan a la ubicación sugerida de las sondas.....	36
Figura 15. Instalación del analizador de red.....	37
Figura 16. Pruebas.	38
Figura 17. Software Power Log Software FLUKE.	39
Figura 18. Placa de datos del transformador de potencia trifásico de 600 kVA.	42
Figura 19. Diagrama de áreas de la empresa CEDAL S.A.....	42
Figura 20. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 1.....	46
Figura 21. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 2.....	47
Figura 22. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 3.....	47
Figura 23. Niveles de voltaje fase – fase en el transformador 1.....	48
Figura 24. Niveles de voltaje fase – fase en el transformador 2.....	49
Figura 25. Niveles de Voltaje fase – fase en el transformador 3.....	49
Figura 26. Niveles de corriente en el transformador 1.	50
Figura 27. Niveles de corriente en el transformador 2.	51
Figura 28. Niveles de corriente en el transformador 3.	51
Figura 29. Niveles de factor de potencia transformador 1.	54
Figura 30. Niveles de factor de potencia transformador 2.	55

Figura 31. Niveles de factor de potencia transformador 3.	55
Figura 32. Demanda media semanal del transformador 1.	56
Figura 33. Demanda media semanal del transformador 2.	57
Figura 34. Demanda media semanal del transformador 3.	57
Figura 35. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 1.	58
Figura 36. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 2.	59
Figura 37. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 3.	60
Figura 38. Nivel de THD de voltaje en el transformador 1.	61
Figura 39. Nivel de THD de voltaje en el transformador 2.	62
Figura 40. Nivel de THD de voltaje en el transformador 3.	62
Figura 41. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 1.	64
Figura 42. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 2.	64
Figura 43. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 3.	65
Figura 44. THD de corriente del transformador 1.	68
Figura 45. Número de armónicos de corriente en el transformador 1.	69
Figura 46. THD de corriente del transformador 2.	70
Figura 47. Número de armónicos de corriente en el transformador 2.	71
Figura 48. THD de corriente del transformador 3.	73
Figura 49. Curva individual y total de flickers en el transformador 1.	74
Figura 50. Curva individual y total de flickers en el transformador 2.	75
Figura 51. Curva individual y total de flickers en el transformador 3.	76
Figura 52. Número de armónicos de corriente en el transformador 3.	77
Figura 53. Curva de voltaje RMS del Transformador 1.	79
Figura 54. Curva de voltaje RMS del Transformador 2.	81
Figura 55. Curva de voltaje RMS del Transformador 3.	82
Figura 56. Simulación del sistema del transformador 2 en el software Easy Power.	84
Figura 57. Comparación de los niveles del factor de potencia, del transformador 1.	85
Figura 58. Comparación de los niveles del factor de potencia del transformador 2.	86
Figura 59. Comparación de los niveles del factor de potencia del transformador 3.	87
Figura 60. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 1.	93
Figura 61. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 2.	94
Figura 62. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 3.	95
Figura 63. Comparación de armónicos de corriente del transformador 1.	96

Figura 64. Comparación de armónicos de corriente del transformador 2.	97
Figura 65. Comparación de armónicos de corriente del transformador 3.	98
Figura 66. Diseño del filtro para mitigar armónico.	103
Figura 67. Configuración de parámetros del filtro en EASY POWER.	103
Figura 68. Simulación del sistema del transformador 2 con el filtro diseñado en el software EASY POWER.	104
Figura 69. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 1.	105
Figura 70. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 2.	106
Figura 71. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador. 3.	107
Figura 72. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 1.	108
Figura 73. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 2.	109
Figura 74. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 3.	110
Figura 75. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 1.	111
Figura 76. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 2.	112
Figura 77. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 3.	113

ÍDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites para el índice de nivel de voltaje.....	8
Tabla 2. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal).	9
Tabla 3. Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas según la clasificación de la IEC.....	19
Tabla 4. Orden de un armónico.	21
Tabla 5. Distorsión global en voltaje y corriente.	22
Tabla 6. Límites de Distorsión de Corriente.....	24
Tabla 7. Características del Transformador de Potencia.	41
Tabla 8. Carga instalada en el Transformador 2.....	43
Tabla 9. Límites nivel de voltaje.	45
Tabla 10. Niveles de voltaje fase – neutro, variación de voltaje por transformador.	46
Tabla 11. Rangos de voltaje fase – fase, variación de tensión por cada transformador.	48
Tabla 12. Niveles de corriente Línea en los tres transformadores.....	50
Tabla 13. Rangos permitidos de desequilibrio de voltaje.....	52
Tabla 14. Desequilibrio de voltaje.....	52
Tabla 15. Rangos permitidos de desequilibrio de corriente.	53
Tabla 16. Desequilibrio de Corriente.	53
Tabla 17. Factor de Potencia.	54
Tabla 18. Análisis de potencias de los tres transformadores.	58
Tabla 19. Niveles permitidos de armónicos de voltaje por la norma IEEE - 519.	60
Tabla 20. Taza de Distorsión Armónica de Voltaje en los tres transformadores.	61
Tabla 21. Armónicos individuales de voltaje en los tres transformadores.....	63
Tabla 22. Corrientes del Transformador 1.....	66
Tabla 23. Límites de distorsión de corriente.	67
Tabla 24. TDD de corriente del transformador 1.	67
Tabla 25. Anómicos individuales de corriente del transformador 1.....	68
Tabla 26. Corriente del transformador 2.	69
Tabla 27. TDD de Corriente del Transformador 2.	70
Tabla 28. Armónicos individuales de corriente del transformador 2.	71
Tabla 29. TDD de corriente del transformador 3.	72
Tabla 30. Límites de distorsión de corriente.	72
Tabla 31. TDD de corriente del transformador 3.	73

Tabla 32. Análisis de flickers en el transformador 1.....	74
Tabla 33. Análisis de flickers en el transformador 2.....	75
Tabla 34. Análisis de flickers en el transformador 3.....	76
Tabla 35. Armónicos individuales de corriente en el transformador 3.	77
Tabla 36. Valores típicos de perturbaciones.....	78
Tabla 37. Valores de Voltaje RMS del Transformador 1.....	79
Tabla 38. Valores de Voltaje RMS del Transformador 1.....	80
Tabla 39. Valores de Voltaje RMS del Transformador 2.....	80
Tabla 40. Valores de Voltaje RMS del Transformador 2.....	81
Tabla 41. Valores de Voltaje RMS del Transformador 3.....	82
Tabla 42. Valores de Voltaje RMS del Transformador 3.....	83
Tabla 43. Comparación del factor de potencia del transformador 1.	84
Tabla 44. Comparación del factor de potencia del transformador 2.	85
Tabla 45. Comparación del factor de potencia del transformador 3.	86
Tabla 46. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 1.	87
Tabla 47. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 2.	88
Tabla 48. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 3.	88
Tabla 49. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 1.....	89
Tabla 50. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 2.....	89
Tabla 51. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 3.....	90
Tabla 52. Cargabilidad de los transformadores.	90
Tabla 53. Sobrecarga de conductores en el transformador 1.....	91
Tabla 54. Sobrecarga de conductores en el transformador 2.....	92
Tabla 55. Sobrecarga de conductores en el transformador 3.....	92
Tabla 56. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 1.....	93
Tabla 57. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 2.....	94
Tabla 58. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 3.....	95
Tabla 59. Comparación de armónicos de corriente del transformador 1.....	96
Tabla 60. Comparación de armónicos de corriente del transformador 2.....	97
Tabla 61. Comparación de armónicos de corriente del transformador 3.....	98
Tabla 62. Cargabilidad en el transformador 1.	99
Tabla 63. Cargabilidad en el transformador 2.	99
Tabla 64. Cargabilidad en el transformador 3.	99

Tabla 65. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 1.	105
Tabla 66. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 2.	106
Tabla 67. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 3.	107
Tabla 68. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 1.....	108
Tabla 69. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 2.....	109
Tabla 70. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 3.....	110
Tabla 71. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 1.	111
Tabla 72. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 2.	112
Tabla 73. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 3.	113
Tabla 74. Presupuesto.....	114
Tabla 75. Pérdidas del transformador 1 sin Filtro.	115
Tabla 76. Pérdidas del transformador 2 sin filtro.	115
Tabla 77. Pérdidas del transformador 3 sin filtro.	116
Tabla 78. Pérdidas del transformador 1 con filtro.	116
Tabla 79. Pérdidas del transformador 3 con filtro.	117
Tabla 80. Pérdidas del transformador 3 con filtro.	117
Tabla 81. Pliego Tarifario.....	119
Tabla 82. Penalización anual por bajo factor de potencia.	120

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021”.

Autor/es: Antamba Valenzuela Bryan Fernando
Gómez Calvopiña Angel Francisco

RESUMEN

El presente estudio fue realizado en la Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A. industria ubicada en la ciudad de Latacunga y dedicada a la fabricación y comercialización de extrusiones de aluminio a nivel nacional e internacional. La intención de este proyecto es analizar la calidad de energía en el sistema de suministro eléctrico en el área de extrusión de la planta, mediante normativas nacionales e internacionales tales como la CONELEC 005/18, ARCERNNR 200/20 e IEEE std 519, IEEE std 1159. Este estudio cuenta con una revisión bibliográfica y de campo, que aportó un conocimiento significativo para el desarrollo del tema propuesto. Se registraron datos sobre parámetros eléctricos en los tres transformadores presentes en el área de extrusión con un analizador de redes FLUKE 435- SII, adicional a esto se elaboró el levantamiento de cargas y actualización de diagramas unifilares del sistema eléctrico, mismos que fueron utilizados posteriormente en las simulaciones realizadas en el programa EASY POWER a través del cual se pudo analizar las perturbaciones más significativas del sistema como son el bajo factor de potencia y los armónicos de voltaje y corriente. Problemáticas que son relevantes en la economía de una industria debido a que producen daño en maquinarias, elementos eléctricos y un pago excesivo en el consumo energético. Se han planteado métodos de mitigación de armónicos basados en el análisis de los datos obtenidos mediante el analizador y las simulaciones, mostrando la factibilidad y beneficios que presenta el proyecto, tanto económicos como técnicos.

Palabras clave: Perturbaciones eléctricas, Armónicos, factor de potencia, calidad de energía.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME: “STUDY OF ELECTRIC POWER QUALITY AT CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. LOCATED IN THE CITY OF LATACUNGA IN THE YEAR 2021”.

Authors: Antamba Valenzuela Bryan Fernando
Gómez Calvopiña Angel Francisco

ABSTRACT

The present study was carried out at Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A., an industry located in the city of Latacunga and dedicated to the manufacture and commercialization of aluminum extrusions at national and international level. The intention of this project is to analyze the power quality in the power supply system in the extrusion area of the plant, through national and international standards such as CONELEC 005/18, ARCERNNR 200/20 and IEEE std 519, IEEE std 1159. This study includes a bibliographic and field review, which provided significant knowledge for the development of the proposed topic. Data on electrical parameters in the three transformers present in the extrusion area were recorded with a FLUKE 435- SII network analyzer, in addition to this, the load survey and updating of single-line diagrams of the electrical system were elaborated, which were subsequently used in the simulations performed in the EASY POWER program through which the most significant disturbances of the system such as low power factor and voltage and current harmonics could be analyzed. These problems are relevant in the economy of an industry because they cause damage to machinery, electrical elements, and an excessive payment in energy consumption. Harmonic mitigation methods have been proposed based on the analysis of the data obtained through the analyzer and simulations, showing the feasibility and benefits of the project, both economic and technical.

Keywords: Electrical disturbances, harmonics, power factor, power quality.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés de la Carrera de Pedagogía de los Idiomas Nacionales y Extranjeros Ingles de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los Señores Egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS: ANTAMBA VALENZUELA BRYAN FERNANDO, GÓMEZ CALVOPIÑA ANGEL FRANCISCO**, cuyo título versa **“ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CORPORACIÓN ECUATORIANA DE ALUMINIO CEDAL S.A. UBICADA EN LA CIUDAD DE LATACUNGA EN EL AÑO 2021”** 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 certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, agosto del 2021

Atentamente,

Mg. José Ignacio Andrade M.
DOCENTE UTC
C.C. 0503101040



1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Estudio de la calidad de energía eléctrica en la Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A. ubicada en la ciudad de Latacunga en el año 2021.

Fecha de inicio:

Abril 2021.

Fecha de finalización:

Agosto 2021

Lugar de ejecución:

Provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga.

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas CIYA

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia

Equipo de Trabajo:

Tutor: Edgar Roberto Salazar Achig, Mgs

Estudiantes: Antamba Valenzuela Bryan Fernando

Gómez Calvopiña Ángel Francisco

Área de Conocimiento:

- Sistemas de control
- Maquinas Eléctricas
- Energías Renovables
- Electrónica de Potencia
- Sistemas Eléctricos de Potencia

Línea de investigación:

Energías Alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

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

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA

2.1.1. Situación Problemática

En la actualidad la mayoría de las industrias enfocadas en la producción de artículos y elementos con materia prima como el metal o el plástico se han centrado en la optimización de instalaciones, y el correcto funcionamiento del suministro de energía eléctrica a fin de evitar perturbaciones que puedan causar problemas de producción o avería en las maquinarias.

La Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A, es una industria dedicada a la fabricación y comercialización de extrusiones de aluminio tanto a nivel nacional como internacional, la energía consumida en la misma es constante debido a que el periodo de trabajo de la industria es de 24 horas los 7 días de la semana. Una de las áreas más importantes de la planta es la de extrusión, la cual está conformada por dos prensas y una sección de anodizado, en dicho sector se cuenta con varios motores, equipos que se establecen como cargas no lineales capaces de provocar perturbaciones en el sistema eléctrico.

En vista de la importancia del área de extrusión para la empresa, CEDAL S.A ha invertido en maquinaria nueva, tableros de control y transformadores de potencia para abastecer las cargas presentes en la misma, a fin de optimizar su sistema eléctrico y evitar paros en la producción que puedan repercutir en pérdidas de capital.

Al no contar la fábrica con las herramientas necesarias para analizar la calidad de energía, como analizadores de redes y programas de estudio de parámetros eléctricos se ha dejado de lado este tipo de estudio.

Debido que el área de extrusión de CEDAL S.A no cuenta con un análisis óptimo de calidad de energía es posible que existan una variedad de perturbaciones eléctricas como pueden ser corrientes armónicas, armónicos de voltaje, fugas de corrientes en la red de tierra, variaciones de voltaje, bajo factor de potencia, entre otras variables que pueden conllevar a interrupciones de producción o avería tanto de elementos eléctricos como de maquinaria.

Con el fin de evitar estos problemas es fundamental realizar un estudio de calidad de energía en el área de extrusión de la corporación CEDAL S.A. en el cual se identifique si existen perturbaciones, con lo cual se podrá plantear soluciones a los factores eléctricos perjudiciales, más relevantes, que puedan estar presentes en la red eléctrica.

2.1.2. Formulación del problema

Determinación de las perturbaciones que inciden en la calidad de energía en el área de extrusión de la corporación ecuatoriana de aluminio CEDAL S.A.

2.2. BENEFICIARIOS

2.2.1. Beneficiarios directos

La Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A. ubicada en la ciudad de Latacunga.

2.2.2. Beneficiarios indirectos

Personal encargado de análisis de calidad de energía en industrias de potencia.

2.3. JUSTIFICACIÓN

En 1974 se constituyó la Corporación Ecuatoriana de Aluminio CEDAL S.A. empresa de capital ecuatoriano, con el propósito de fabricar y comercializar extrusiones de aluminio para el mercado nacional e internacional. Inicia sus actividades productivas en el año 1976, enfocados al mercado interno con extrusiones de aluminio para uso arquitectónico. En el desarrollo de actividades, CEDAL S.A al igual que otras industrias ha implementado nueva maquinaria que favorece a su producción y al cumplimiento de parámetros de calidad dentro de un marco de cuidado ambiental y desarrollo social.

Con el objetivo de alcanzar niveles óptimos de producción CEDAL S.A. busca permanentemente el correcto funcionamiento de maquinaria, elementos eléctricos, y el sistema de alimentación de energía en general, para lo cual no solamente es necesario un control óptimo de los métodos de operación y mantenimiento sino también la identificación de parámetros eléctricos que puedan afectar el sistema eléctrico de la industria.

En el año 2019 en el área de extrusión de CEDAL S.A se presentó un pico de voltaje que provoco un arco eléctrico, dañando seriamente tableros de control y cortocircuitando 3 transformadores de potencia que abastecían de energía al área. Debido al evento fortuito y a la premura de la corporación ecuatoriana de aluminio por satisfacer sus índices de producción se reemplazaron los elementos eléctricos a la brevedad, motivo por el cual dicha área no cuenta con un análisis de calidad de energía.

El estudio de calidad de energía eléctrica en el área de extrusión permitirá conocer las variables significativas que puedan repercutir en el daño de equipos y maquinaria, además mediante

métodos de atenuación de los problemas eléctricos encontrados será posible prevenir ceses en la producción de extrusiones de aluminio que provoquen pérdidas económicas en la industria.

El método de análisis del presente estudio se basará en la recopilación de datos mediante la actualización y revisión de planos unifilares, donde se identificará la configuración del sistema interno de suministro de energía junto con las cargas que abastece. Se registrarán los parámetros eléctricos del área de extrusión a través de un analizador de redes determinando las perturbaciones presentes en la corporación para posteriormente simular el sistema eléctrico y plantear métodos de solución que logren atenuar los problemas más significativos.

2.4. HIPÓTESIS

El análisis de calidad de energía en el sistema eléctrico en el área de extrusión de CEDAL S.A permitirá conocer las perturbaciones eléctricas que inciden en la industria para plantear soluciones que atenúen las problemáticas energéticas significativas encontradas.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo General

Estudiar la calidad de energía en la corporación ecuatoriana de aluminio CEDAL S.A. ubicada en la ciudad de Latacunga en al año 2021.

2.5.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte referente al estudio de la calidad de la energía en las industrias.
- Analizar la calidad de energía en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A. mediante normativas nacionales e internacionales.
- Simular el sistema eléctrico en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A. mediante software.
- Plantear soluciones necesarias para atenuar las perturbaciones relevantes encontradas en el sistema eléctrico del área de extrusión de CEDAL S.A.

2.6. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e instrumentos
Revisar el estado del arte referente al estudio de la calidad de la energía en las industrias	Recopilación de datos mediante una investigación bibliográfica referente a calidad de energía eléctrica en las industrias	Se ha logrado obtener información pertinente referente a la calidad de energía	Técnica. – Investigación documental Instrumento. – Libros, papers, normativas y tesis
Analizar la calidad de energía en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A. mediante normativas nacionales e internacionales	Implementar el analizador de red en los puntos correspondientes	Se han obtenido todos los datos de los parámetros eléctricos correspondientes a al análisis de calidad de energía	Técnica. – Observación directa y participativa. Instrumento. – Fotografías y grabaciones
Simular el sistema eléctrico en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A. mediante software	Modelamiento del sistema del área de extrusión en un software	Se ha logrado obtener los gráficos y parámetros eléctricos del área de extrusión	Técnica. Investigación analítica, sintético. Instrumento. – Diagramas unifilares
Plantear soluciones necesarias para atenuar las perturbaciones relevantes encontradas en el sistema eléctrico del área de extrusión de CEDAL S.A.	Analizar los resultados de la simulación y los cálculos realizados con los datos del analizado	Se han obtenido los parámetros necesarios para plantear métodos de solución a las perturbaciones eléctricas	Técnica. – Prospectiva. Instrumento. – Bibliografía y simulación

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La calidad de la electricidad es una mejora en los eventos relacionados con fallas de voltaje, corriente o fluctuaciones de frecuencia que provocan daños en las máquinas conectadas al sistema eléctrico. El inconveniente de una falla en la red eléctrica se debe a que puede provocar la interrupción temporal de los procesos industriales relacionados con los altos costos de producción, lo que a su vez provoca cambios en el funcionamiento normal de la línea de fabricación donde el producto se ve afectado [1].

3.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética se refiere al consumo de energía de una manera inteligente atendiendo a una necesidad con la energía suficiente sin mal gastarla mejorando así los índices de contaminación y conservación del medio ambiente [2].

3.3. ASPECTOS DE CALIDAD

En el Ecuador la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (Regulación No. ARCERNNR - 002/20), tiene por objetivo establecer los indicadores, índices y límites de la calidad de servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.

La calidad del servicio de energía eléctrica será evaluada considerando los siguientes índices e indicadores:

- Calidad del Producto
- Calidad de Servicio Comercial
- Calidad de Servicio Técnico

La calidad del Producto tiene que ver con la forma de onda de voltaje proporcionada por el distribuidor y tiene las características de niveles de tensión, variaciones rápidas de tensión y armónicos. Mientras que la Calidad de Servicio Técnico coordina la continuidad de los servicios eléctricos y se caracteriza por la frecuencia y duración de los cortes de energía. Y la Calidad del Servicio Comercial se encarga de la regulación o control de las solicitudes y reclamamos de facturación y medición.

En el presente estudio se hará referencia únicamente a la Calidad del Producto de esta regulación, para lo cual se hace referencia a cada uno de los ítems establecidos por la regulación con respecto a la Calidad del Suministro Eléctrico de la Industria. En Regulación No. ARCERNR - 002/20, se hace referencia a que la Calidad del Producto abarca los siguientes puntos.

- Nivel de tensión
- Perturbaciones rápidas de tensión
- Distorsión armónica de voltaje
- Desequilibrio de voltaje

3.3.1. Nivel de Voltaje

Los rangos de voltaje admitidos son los siguientes:

Tabla 1. Límites para el índice de nivel de voltaje [3].

Nivel de voltaje	Rango admisible
Alto voltaje (Grupo 1 y Grupo 2)	± 5.0 %
Medio Voltaje	± 6.0 %
Bajo Voltaje	± 8.0 %

3.3.2. Perturbación rápida de voltaje

También conocida como Flicker, se estima por medio del índice de severidad por Flicker (Pst), tal como lo estipula la norma IEC 61000 – 4 - 15¹, el mismo que el mide las variaciones periódicas de amplitud de tensión a corto plazo realizando intervalos de medición de 10 minutos.

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (3.1)$$

Donde:

Pst: Índice de relevancia de flicker de mínima duración.

$P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} : Flicker expresado en niveles que sobrepasan el lapso de 0.1 %, 1 %, 3 %, 10 %, 50 % del intervalo de medición total.

El índice de severidad de flicker en el punto de medición no debe superar la unidad.

3.3.3. Distorsión Anómica de Voltaje

Los límites máximos de distorsión armónica de voltaje son los siguientes:

Tabla 2. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [3].

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

La distribuidora cumple con el factor de distorsión armónica individual de voltaje y con el factor de distorsión armónica total de voltaje en un punto de medición, cuando el 95 % o más de los valores registrados, en todas y cada una de las fases, en el período de evaluación de al menos siete (7) días continuos, son menores a los límites máximos establecidos [3].

3.3.4. Desequilibrio de Voltaje

Se determinará en un punto de la red de distribución de la siguiente forma:

$$\text{Desequilibrio de Voltaje} = \left| \frac{V^-}{V^+} \right| \times 100[\%] \quad (3.2)$$

Donde:

V^- : Componente de secuencia negativa de voltaje, estableciendo el promedio de registro de datos (cada 3 segundos) en un periodo de 10 minutos.

V^+ : Componente de secuencia positiva de voltaje, estableciendo el promedio de registro de datos (cada 3 segundos) en un periodo de 10 minutos.

Por lo tanto, el valor límite para el desequilibrio de voltaje en un punto de medición será de 2% para todos los niveles de voltaje.

3.3.5. Sag

Un hundimiento es una disminución en el voltaje rms entre 0,1 pu y 0,9 pu durante períodos de 0,5 ciclos a 1 min. Los valores típicos están entre 0,1 pu y 0,9 pu. Su Profundidad varia desde 10% hasta 100% del voltaje nominal. Desde el 90% lleva el nombre de micro-corte.

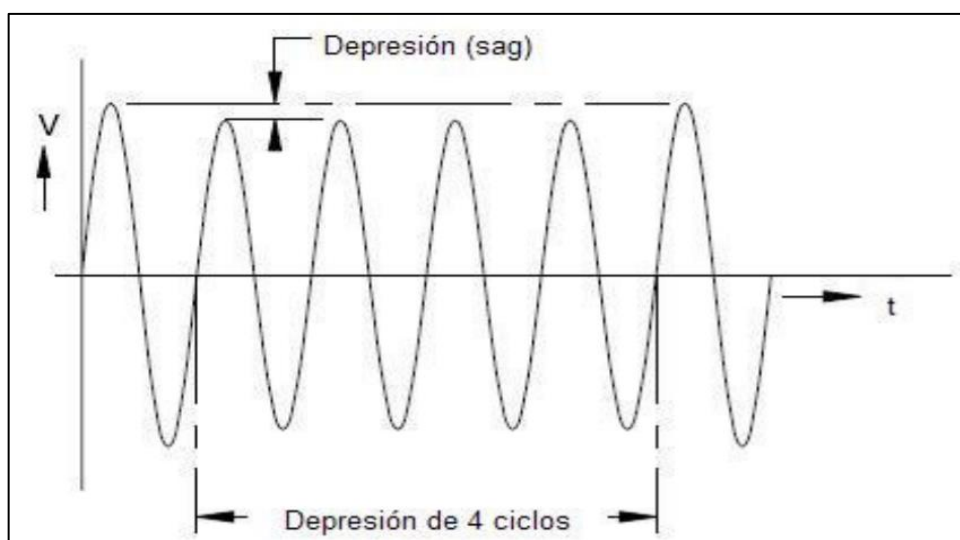


Figura 1. Depresión de voltaje (Sag).

3.3.6. Swell

Es un incremento en el voltaje rms por encima de 1,1 pu durante periodos de 0,5 ciclos a 1 min. Los valores característicos oscilan entre 1,1 pu y 1,2 pu. El tamaño del incremento también se describe por su voltaje restante y, por lo tanto, es mayor que 1.0 pu.

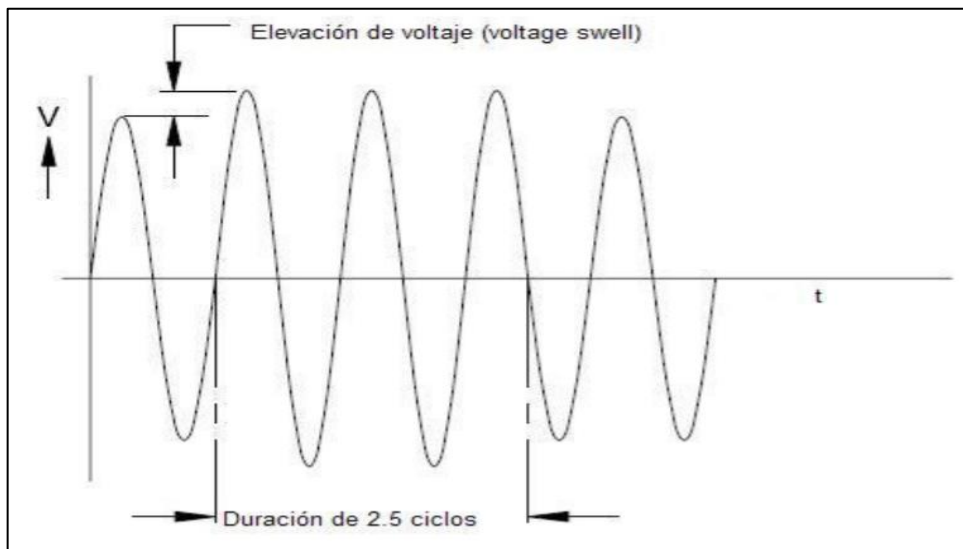


Figura 2. Elevación de Voltaje (Swell).

3.4. TIPOS DE POTENCIAS

3.4.1. Potencia activa

La unidad de medida es el watt (W), se la conoce también como potencia efectiva o real, y se define como potencia útil, la misma que se transforma en trabajo para aprovechar la energía.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\phi) \quad (3.3)$$

Donde:

P: Potencia activa (W)

U: Tensión de la red

I: Corriente de fase

ϕ : Ángulo de desfase entre la tensión y corriente

3.4.2. Potencia reactiva

La unidad de medida se expresa en voltamperios reactivos (VAR), se la conoce también como potencia magnetizaste, se define como la potencia que no produce trabajo útil y aparece en los circuitos que tienen elementos reactivos, es decir, bobinas o condensadores.

La potencia reactiva se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \text{sen } \phi \quad (3.4)$$

Donde:

Q: Potencia reactiva (VAR)

U: Voltaje de la red (voltaje de línea)(entre fases)

I: Corriente de la línea

Sen ϕ : Valor seno del ángulo

3.4.3. Potencia aparente

La unidad de medida se expresa en voltamperios (VA), se la conoce también como potencia total, se define como la potencia útil cuando su Fp sea igual a 1 y se obtiene por la suma vectorial de las potencias activa y reactiva.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.5)$$

$$S = U \times I \quad (3.6)$$

$$S = \sqrt{3} \times U \times I \quad (3.7)$$

Donde:

S: Potencia Total (VA)

U: Voltaje de la red

I: Corriente de la línea

3.5. FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia se obtiene al dividir la potencia activa sobre la potencia aparente, esta es una relación que indica la cantidad de potencia que se convierte en trabajo [4].

Se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\cos \phi = \frac{P(W)}{S (VA)} = \frac{P(W)}{\sqrt{P(W)^2 + Q(VAR)^2}} \quad (3.8)$$

Donde:

cos ϕ : Factor de potencia

P: Potencia activa

Q: Potencia reactiva

S: Potencia Total

3.5.1. Factor de potencia (REGULACIÓN No. CONELEC 004/01)

Al referirse al factor de potencia se menciona que, si en el 5 % o más del transcurso de evaluación el valor del factor de potencia es inferior a los límites, el cliente está incumpliendo con el índice de calidad el cual es de 0.92.

Por tanto, las empresas eléctricas distribuidoras están en la obligación de realizar las mediciones de la calidad del producto, obtener datos, analizar y mantener registros de los valores relacionados con la calidad del producto y del servicio.

3.5.2. Cargos por bajo factor de potencia

Para los consumidores de la categoría general con medidas de potencia reactiva que registren un factor de potencia promedio mensual menor a 0.92, el distribuidor calculará los cargos establecidos en el decreto de tarifas de especificación y las tarifas ecuatorianas como cargos de factor de potencia bajo.

De esto se puede concluir que la penalización por bajo factor de potencia es igual al cargo mensual resultante de: demanda, consumo de energía, pérdidas de transformadores y comercialización, multiplicado por el factor.

$$B_{fp} = \left(\frac{0.92}{f_{pr}} \right) - 1 \quad (3.9)$$

Donde:

Bfp: Factor de penalización por bajo factor de potencia.

fpr: Factor de potencia registrado.

3.6. TIPOS DE CARGAS

3.6.1. Cargas lineales

Las cargas lineales son las que no cambian el tamaño de la impedancia durante el ciclo de voltaje. Es decir, si tenemos una corriente y voltaje de onda sinusoidal y calculamos para cada punto de la onda, tendremos el mismo valor de resistencia durante el período de medición [1].

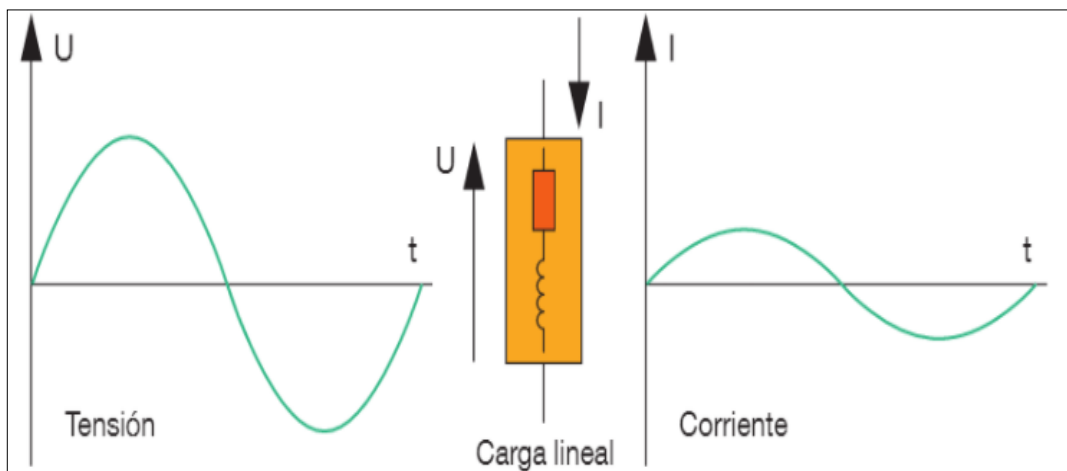


Figura 3. Carga lineal [5].

3.6.2. Cargas no lineales

Son aquellas en las que la impedancia cambia durante el ciclo de tensión, la onda sinusoidal no tiene el mismo tamaño o forma que la onda de voltaje sinusoidal durante el período de tiempo de medición [1].

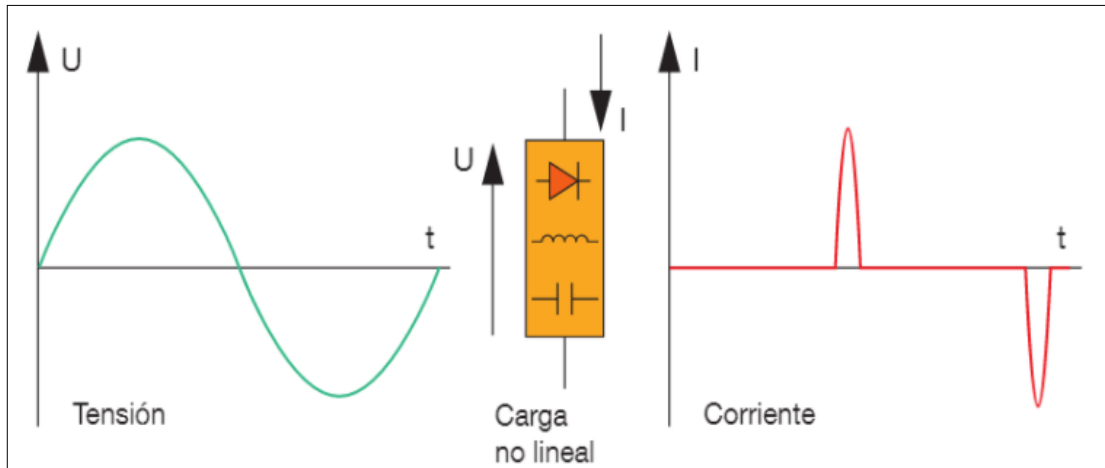


Figura 4. Carga no lineal [5].

3.7. RESONANCIA

La resonancia armónica es la conexión accidental de una señal de voltaje a una frecuencia armónica, se refiere a la condición en la que la magnitud de la variable obtiene el valor máximo posible, cuando el sistema recibe una señal de excitación cuya frecuencia es igual a la frecuencia natural del sistema físico, esto expone al equipo a sobrevoltajes o sobrecorrientes elevadas. Este suceso trae como consecuencia un aumento en el esfuerzo eléctrico de los equipos [6].

Este fenómeno se produce en el circuito que tiene elementos reactivos (bobinas y condensadores), y se producen cuando es recorrido por una corriente, a una frecuencia tal que se hace que la reactancia se anule. En el caso que estén L y C en serie, o se haga infinita si L y C están en paralelo [7].

$$X_c = X_l \quad (3.10)$$

Donde:

X_c : Reactancia Capacitiva

X_l : Reactancia Inductiva

3.7.1. Frecuencia de Resonancia

Para determinar la frecuencia de resonancia es de gran importancia comprender como será el correcto funcionamiento del modelo, por lo cual primero debemos basarnos en un plano fasorial.

$$X_L = L \times \omega_0 \quad (3.11)$$

$$X_C = \frac{1}{C \times \omega_0} \quad (3.12)$$

Donde:

X_C : Reactancia del condensador (Ω)

X_L : Reactancia del inductor (Ω)

ω_0 : Frecuencia angular de resonancia (rad/seg)

$$\omega_0 = 2\pi \times f_0 \quad (3.13)$$

La resonancia es un fenómeno que ocurre cuando (5) es igualado a (6). Será el punto máximo donde la tensión en el inductor aumentará mientras que la corriente que por el circula disminuye. Gracias a ello es posible aumentar la distancia entre emisor y receptor con la mayor eficiencia posible. Luego de igualar (5) con (6), sustituyendo en esa igualdad a (7) y realizando el acomodo pertinente puede ser deducida la siguiente expresión matemática [8].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C}} \quad (3.14)$$

Donde:

f_0 : Frecuencia de resonancia (Hz)

C : Reactancia del condensador (H)

L : Reactancia del inductor (F)

3.8. ARMÓNICOS

Los armónicos se pueden presentar en voltajes o corrientes y tienen una forma de onda sinusoidal que pose frecuencias que son múltiplos enteros de frecuencias industriales (denominada frecuencia fundamental; generalmente 50 Hz o 60 Hz). Los armónicos se combinan con el voltaje o la corriente fundamental y producen una distorsión de la forma de onda. La distorsión armónica es producida debido a las características de cargas no lineales de dispositivos. Estos dispositivos generalmente se pueden modelar como fuentes de corriente que inyectan corrientes armónicas en el sistema de energía.

Se produce una distorsión de voltaje ya que estas corrientes provocan caídas de voltaje no lineales en la impedancia del sistema. La distorsión armónica es una preocupación creciente para muchos clientes y para el sistema de energía en general debido a la creciente aplicación de equipos electrónicos de potencia [9].

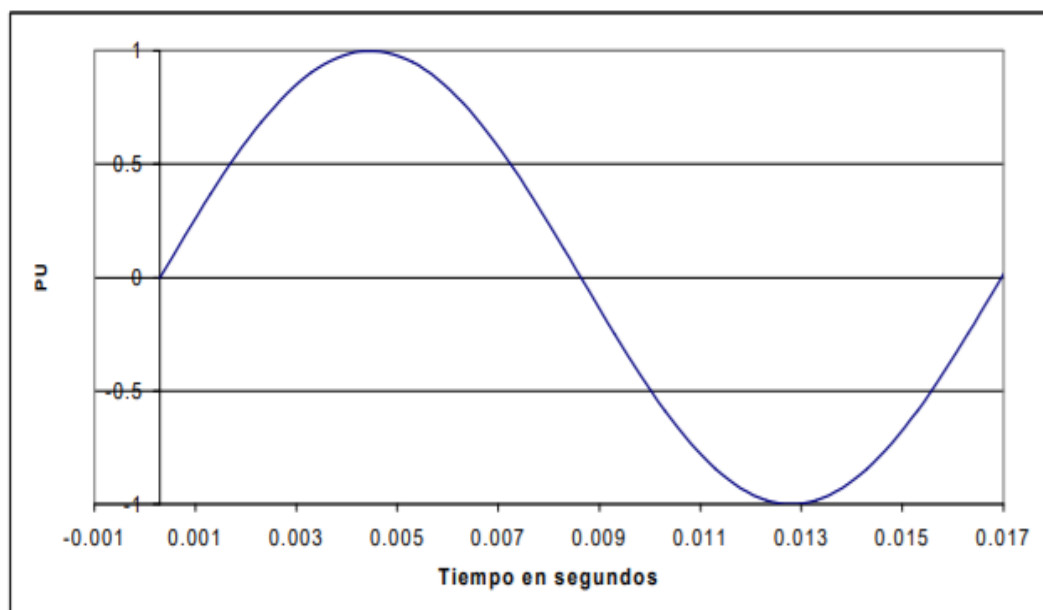


Figura 5. Onda sin contenido armónico [10].

Los niveles de distorsión armónica se pueden caracterizar por el espectro armónico completo con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual. También es común utilizar una sola cantidad, la Distorsión armónica total, como medida de la magnitud de la distorsión armónica. Las corrientes armónicas resultan del funcionamiento normal de dispositivos no lineales en el sistema de energía [9].

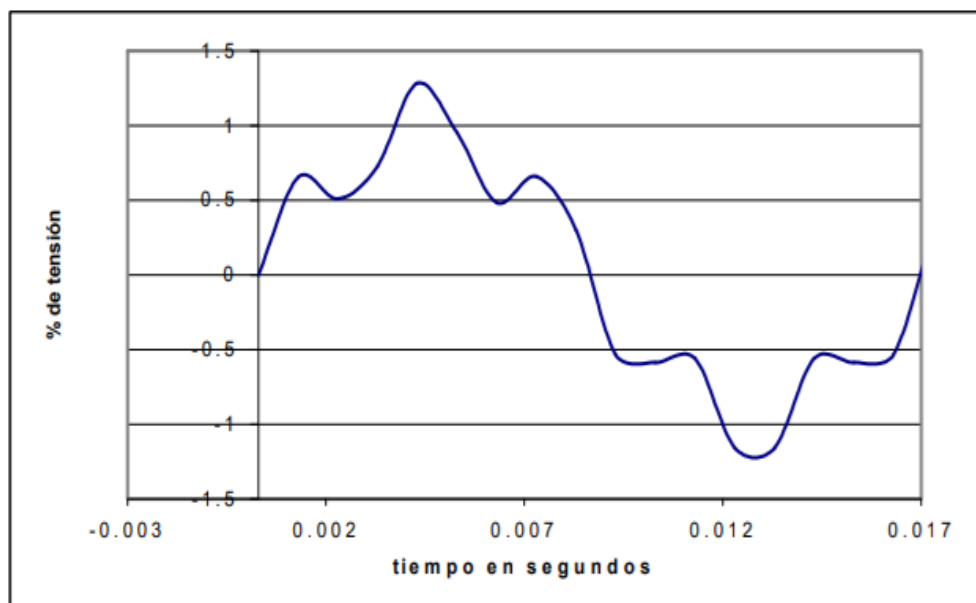


Figura 6. Onda con contenido armónico [10].

La creciente aplicación de equipos electrónicos que pueden causar perturbaciones electromagnéticas, o que pueden ser sensibles a estos fenómenos, ha aumentado el interés por la calidad de la energía en los últimos años.

Acompañando el aumento de los problemas operativos ha habido una variedad de intentos para describir los fenómenos. Desafortunadamente, diferentes segmentos de la comunidad de sistemas electrónicos y de energía han utilizado diferentes terminologías para describir eventos electromagnéticos. Esta práctica recomendada contiene algunos términos adicionales relacionados con la terminología IEC.

El término hundimiento se utiliza en la comunidad de la calidad de la energía para hacer referencia al término inmersión de la IEC. Así mismo, la categoría de alteraciones de corta duración se utiliza en referencia a caídas de voltaje e interrupciones cortas.

Tabla 3. Principales fenómenos que causan perturbaciones electromagnéticas según la clasificación de la IEC [9].

Grupo	Ejemplos de
Fenómenos conducidos de baja frecuencia	Armónicos, interarmónicos Sistemas de señales (portadora de línea eléctrica)
	Fluctuaciones de voltaje
	Caídas e interrupciones de voltaje
	Desequilibrio de voltaje
	Variaciones de frecuencia industrial
	Tensiones de baja frecuencia
	inducidas CC en redes CA
Fenómenos irradiados de baja frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
Fenómenos conducidos de alta frecuencia	Voltajes o corrientes de onda continúa inducida (CW)
	Transitorios unidireccionales
	Transitorios oscilatorios
Fenómenos irradiados de alta frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
	Ondas continuas
	Transitorios
Fenómenos de descarga electrostática (ESD)	-
Pulso electromagnético nuclear (NEMP)	-

Esta subcláusula proporciona descripciones más detalladas para cada una de las categorías de variación de la calidad de la energía presentadas. Estas descripciones proporcionan un historial de los términos que se utilizan actualmente para cada categoría. Se introducen las causas típicas de los fenómenos electromagnéticos en cada categoría.

Una de las principales razones para desarrollar las diferentes categorías de fenómenos electromagnéticos es que existen diferentes formas de resolver los problemas de calidad de la energía dependiendo de la variación que sea de interés (Ver Anexo A).

3.8.1. Fuentes de armónicos

Las principales fuentes de armónicos son:

- Hornos de arco y otros objetos con descarga de arco como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de tensión que de corriente, habitualmente están presentes todos los armónicos (2º, 3º, 4º, 5º, ...), pero predominan los impares con valores típicos en relación con el armónico fundamental:
 - 20 % del 3er armónico
 - 10 % del 5º
 - 6 % del 7º
 - 3 % del 9º
- Núcleos magnéticos en máquinas rotativas y transformadores que requieren una tercera corriente armónica para excitar el hierro.
- La corriente Inrush de los transformadores que produce el segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidades regulables usados para bombas ventiladores y controladores de procesos.
- Swiches sólidos que modulan corrientes de control, calor, intensidad de luz, etcétera.
- Fuentes del tipo controladas para maquinaria electrónica.
 - Rectificadores compuestos por diodos o tiristores para máquinas de soldadura, cargadores de baterías, etcétera.
 - Compensadores estáticos de potencia reactiva.
 - Estaciones en corriente directa de distribución en alto voltaje.
 - Inversores de AC a DC (convertidores).

3.8.2. Parámetros de los armónicos

Los parámetros de los armónicos son los siguientes:

3.8.2.1. Orden de los armónicos

Es la relación de la frecuencia del armónico y la fundamental, determina con qué frecuencia la frecuencia armónica excede la frecuencia fundamental.

Tabla 4. Orden de un armónico.

(Orden armónico)	Frecuencia de red	
	50 Hz	60 Hz
3	150 Hz	180 Hz
5	250 Hz	300 Hz
7	350 Hz	420 Hz
11	550 Hz	660 Hz

3.8.2.2. Frecuencia

Es el producto del número de orden del armónico y la frecuencia fundamental (60 Hz).

3.8.2.3. Secuencia

La secuencia puede ser positiva, negativa o cero.

3.8.3. Distorsión armónica

La distorsión armónica de corriente y de voltaje aparece principalmente en presencia de cargas de comportamiento no lineal presentes en el sistema. Las cargas no lineales son aquellas en las cuales la corriente no es proporcional a la del voltaje aplicado. La distorsión armónica es causada por varios dispositivos electrónicos utilizados en oficinas o en la industria, como, por ejemplo: fax, computadoras, impresoras, fotocopiadoras y variadores de velocidad. Estos dispositivos distorsionan la señal senoidal corriente y voltaje en los circuitos eléctricos, corrientes transitorias son producidas, algunas de las cuales contribuyen al incremento de la corriente que circula por el neutro en un sistema trifásico. La distorsión armónica total (THD) se mide en miliamperios y en ocasiones es expresada como un porcentaje de la corriente no distorsionada utilizada por el sistema de iluminación [11].

3.8.4. Tasa de distorsión individual

Se expresa en porcentaje y es la relación del valor eficaz de un armónico de tensión o corriente y el valor eficaz de la componente fundamental que le corresponde [12].

$$U_n(\%) = \frac{U_n}{U_1} * 100 \quad (3.15)$$

$$I_n(\%) = \frac{I_n}{I_1} * 100 \quad (3.16)$$

3.8.5. Tasa de distorsión total

Relación porcentual entre el valor efectivo de la tensión o corriente residual armónica y el valor efectivo correspondiente de la vibración fundamental. Para ello, se determina el factor de distorsión total, o THD [12].

Tabla 5. Distorsión global en voltaje y corriente [12].

Tasa de distorsión global en corriente THD I	Tasa de distorsión global en voltaje THD U
$\text{THD I (\%)} = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} * 100$	$\text{THD U (\%)} = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} * 100$

3.8.6. Armónicos de Voltaje

Los armónicos de tensión se generan entre la relación de la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de las fuentes del transformador de potencia, esto está determinado por la ley de OHM.

El sistema eléctrico puede ser una fuente indirecta de armónicos de tensión. Todas las cargas que comparten un transformador o rama con una carga con altos armónicos pueden verse afectadas por los armónicos de voltaje generados [12].

3.8.7. Armónicos de Corriente

Las cargas no lineales monofásicas son dispositivos que tienen fuentes de alimentación con condensadores y diodos que generan armónicos de corriente. Los diodos rectifican el voltaje de CA de entrada, luego se usa para cargar un condensador grande, que después de medio ciclo carga el valor máximo del voltaje de onda sinusoidal, de modo que el dispositivo electrónico extrae corriente de este voltaje de CC y alimenta el resto. esquemas. Este proceso se repite

varias veces, el condensador capta el pulso de corriente solo durante el pico de la onda; Si el voltaje es menor que el valor residual del condensador no consumirá corriente [13].

3.9. ESTÁNDAR IEEE 519 -2014

Esta normativa proporciona amplia información sobre las causas y efectos de las perturbaciones armónicas en sistemas eléctricos. La IEEE 519 tiene como objetivo limitar el contenido de armónicos en los sistemas energéticos de potencia. Separa y establece la máxima distorsión armónica de tensión (responsabilidad del proveedor de energía) y corriente (responsabilidad del cliente o consumidor de energía).

3.9.1. Distorsión Total de Demanda

El TDD es la distorsión de armónicos basados en el consumo máximo de corriente (componente base). Esta es una medida de distorsión de Corriente armónica total en el PCC (punto común de conexión) para toda la carga conectada.

$$\frac{I_{sc}}{I_{L1}} \quad (3.17)$$

La relación del cuadrado medio de la raíz del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y específicamente excluyendo interarmónicos, expresados como porcentaje de la corriente de demanda máxima. Se pueden incluir componentes armónicos de orden mayor a 50 cuando sea necesario [14].

3.9.2. Contenido armónico de corriente

El cálculo se realiza con base en índices que toman en cuenta el porcentaje de cada armónico en la onda de corriente y el valor TDD de la carga enlazada por los agentes en los puntos de conexión. A los efectos del presente Reglamento, se consideran los armónicos entre el segundo y el trigésimo armónico, incluidos los mismos [14].

3.9.2.1. Límites

Los valores límites de contenido armónico, de TDD y más procedimientos para aplicación de límites, se regirán a lo indicado en la guía IEEE 519 Control armónico. Una tabla con los límites señalados en esa guía se indica a continuación.

Tabla 6. Límites de Distorsión de Corriente [14].

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.5	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	0.7	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- Los armónicos pares están limitados al 25 % de los armónicos impares anteriores.
- Las presentes distorsiones dan como resultado una compensación de cd, por ejemplo, convertidores de media onda, no están permitidas.

Todos los sistemas de generación de energía tienen como límite estos valores de distorsión actuales independientemente de:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} \quad (3.18)$$

Dónde:

I_{sc} : corriente de cortocircuito máxima en punto de conexión común

I_L : corriente de carga de demanda máxima en el punto de conexión en condiciones de funcionamiento normal de carga.

3.10. SOLUCIONES PARA ATENUAR LAS PERTURBACIONES

Previo a aplicar la solución de armónicos, lo recomendable es analizar los armónicos presentes en el sistema de transmisión. No es lo mismo analizar un dispositivo individual o un punto específico de una instalación que examinar una red eléctrica industrial, ya que esto último es muy difícil. Ésta es una de las principales razones para ejecutar una simulación. Se recomienda

ejecutar una simulación que nos permita conocer la realidad de los fenómenos y las mejoras que se deben realizar, como filtros, etcétera[15].

Entre las cuales están:

- **Identificación y definición del problema:** se fundamenta en la recolección de información para saber el inconveniente real que existe y la manera de solucionarlo.
- **Medición de los armónicos en la instalación:** Una vez que se reconoce el problema, se registran los armónicos en las condiciones de funcionamiento de la instalación.
- **Diagnóstico preliminar estableciendo las posibles causas o motivos:** se realiza el análisis de las posibles causas de la anomalía. Se ensayan las posibles fuentes perturbadoras y su impacto.
- **Establecimiento de modelo del sistema del usuario:** sirve para representar las condiciones de funcionamiento real de la instalación. La simulación permite la conexión de cualquier equipo o dispositivo que se puede encontrar en la red, como son los filtros, generadores de armónicos, interruptores, etc. Se puede realizar la simulación de sistemas trifásicos sin necesidad del esquema unifilar.
- **Rodaje del modelo con las posibles soluciones correctoras:** permite aplicar las soluciones correctoras y así poder seleccionar las mejores soluciones técnicas para lograr la solución más adecuada desde el punto de visto técnico económico [15].

Una vez detectado el inconveniente que está presente en la red, se procederá a dar posibles soluciones que se adecuen según sea el caso. Entre las posibles soluciones para atenuar los armónicos tenemos las siguientes:

- Uso de dispositivos determinados en el sistema eléctrico de alimentación
- Modificación de la instalación.
- Instalación de Filtros para atenuación de Armónicos.

3.10.1. Filtros

La clasificación de los filtros puede presentarse de diferentes maneras, como la tecnología utilizada en la fabricación y la gama de frecuencias a tratar, pueden ser:

- Filtros Pasivos
- Filtros Activos

3.10.2. Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son un método efectivo para mitigar el problema de contaminación armónica. Estos son diseñados para proveer un camino de evacuación a los armónicos que más molestan en el sistema, los filtros más comunes son el filtro serie y el filtro paralelo. El filtro serie se caracteriza por producir una resonancia paralela y bloquear, pues tiene una alta impedancia a la frecuencia de sintonía. El reactor de alisado que se suele usar en los puentes rectificadores es un claro ejemplo. El filtro paralelo es caracterizado por una resonancia serie atrapando con ella la perturbación dado el bajo camino de impedancia que provoca. Un simple circuito LC es uno de los diseños más comunes en sistemas de potencia [16].

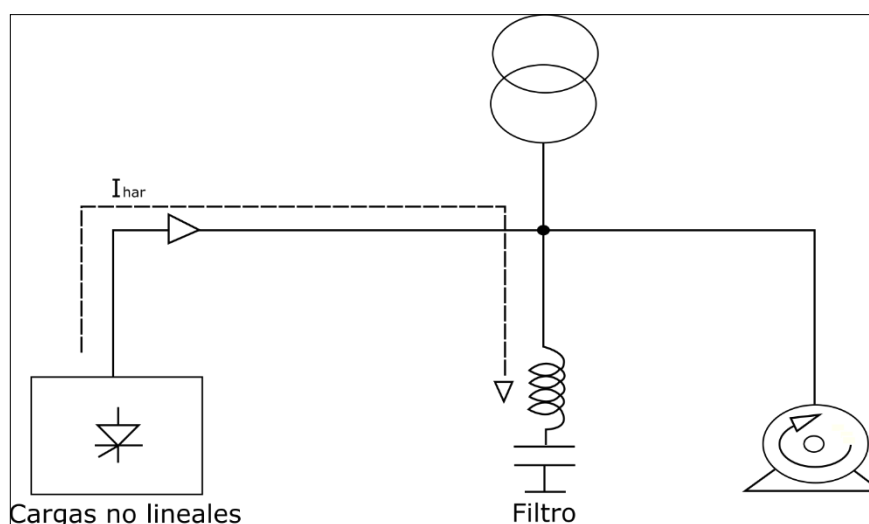


Figura 7. Funcionamiento de un filtro pasivo [15].

A diferencia de los filtros activos, los filtros pasivos tienen la ventaja de tener bajo coste, esto puede ocasionar algunos inconvenientes como:

- Debido a su selectividad, no compensan todo el rango armónico deseado. Se aplican solo a un orden de armónicos específico, mientras que los filtros activos sirven al rango de armónicos, que es una función de la frecuencia de conmutación de los elementos de filtro activos.
- La resonancia en serie entre el filtro y la impedancia de la fuente puede provocar la amplificación de voltajes armónicos.
- Un filtro pasivo puede causar resonancia en paralelo con la red eléctrica con amplificación de corrientes armónicas.

- Debido al componente óhmico, los filtros pasivos tienen el principal consumo, lo que provoca armónicos de voltaje.
- El número de secciones de filtro aumentará a medida que se eliminen más armónicos, lo que significa que los problemas anteriores aumentarán.
- Un filtro de absorción (que se usa comúnmente a escala industrial) se adapta a la configuración específica de la red y las condiciones de carga específicas. Por lo tanto, las cargas no se pueden eliminar de esta manera ni agregar a un grupo que se compensa de esta manera.

3.10.2.1. Filtro Pasivo Sintonizado

Se conectan en paralelo a la red de distribución general o para separar cargas para reducir los armónicos generados por cargas no lineales, además de proporcionar potencia reactiva principal para la compensación del factor de potencia. Si los filtros están instalados en el bus de distribución principal, su capacidad total consiste en grupos o pasos, y son controlados por contactores en un cierto estado de acuerdo con los requerimientos de potencia reactiva del sistema [11].

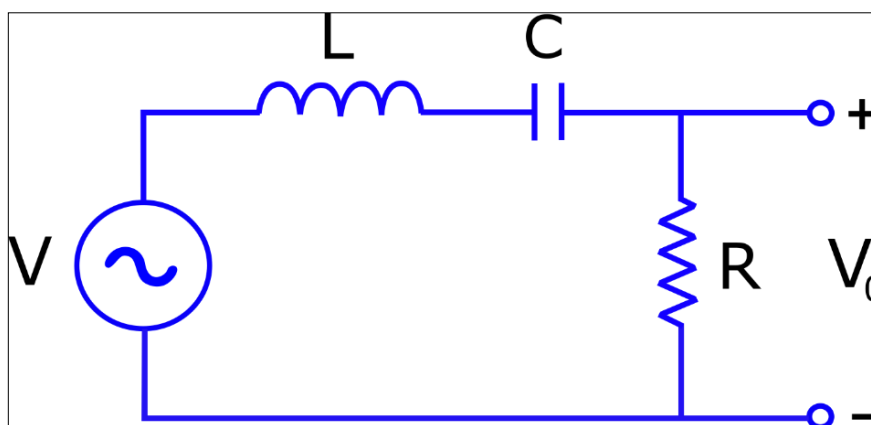


Figura 8. Filtro sintonizado.

3.10.3. Filtros Activos

3.10.3.1. Filtros activos de corriente armónica

Los filtros de corriente armónica activos son dispositivos electrónicos que detectan en tiempo real las corrientes de carga armónica e inyectan corrientes armónicas iguales y opuestas para cancelar las corrientes de carga armónica.

La figura 9 muestra una implementación típica de un filtro de corriente armónica activo. Los flujos de corriente armónica son generalmente flujos de corriente reactiva y requieren niveles mínimos de potencia real para cancelar. Ciertas implementaciones de filtros de corriente armónica activan, también pueden proporcionar corrientes reactivas de frecuencia fundamental para proporcionar una corrección total del factor de potencia. Los filtros activos de tamaño y diseño adecuados pueden corregir la distorsión actual a menos del 1 % de distorsión armónica total. Los filtros activos utilizan algo de energía para su funcionamiento y generalmente son menos eficientes que los filtros pasivos. Sin embargo, pueden adaptarse a las condiciones de carga cambiantes [17].

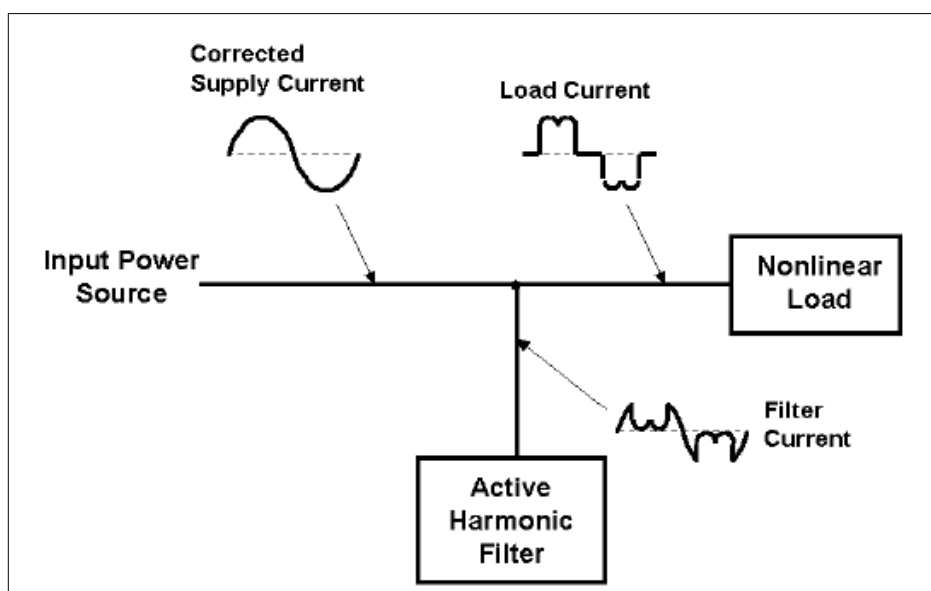


Figura 9. Filtro activo de corriente armónica [17].

3.10.4. Reguladores de voltaje

La mayoría de las perturbaciones de voltaje de baja frecuencia, excepto caídas o interrupciones muy profundas, se pueden manejar mediante la aplicación adecuada de un regulador de voltaje. En la actualidad, se utilizan varios tipos de reguladores de voltaje. Los transformadores de cambio de tomas ferresonantes y de estado sólido se utilizan hoy en día para cargas electrónicas, en lugar de los tipos electromecánicos de acción más lenta. Los primeros reguladores electromecánicos usaban un operador de motor que movía un grifo deslizante en un transformador. Estos reguladores de inducción siguen los cambios de voltaje que ocurren

durante el día o estacionalmente debido a la aplicación y remoción de la carga. Estas unidades no son adecuadas para proteger cargas electrónicas contra cambios rápidos de voltaje [17].

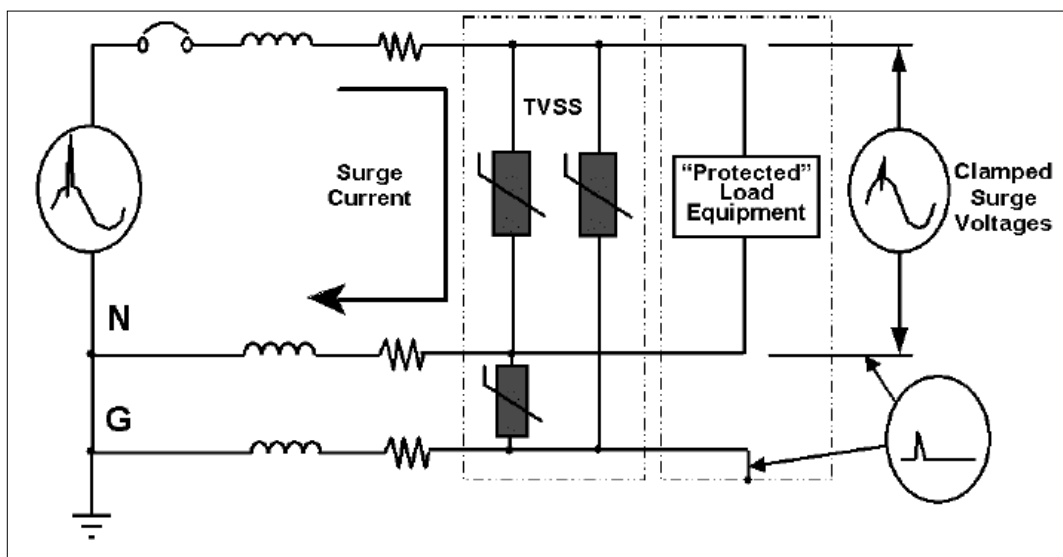


Figura 10. Supresor de sobretensiones multimodo conectado en paralelo [17].

3.10.5. Mejoramiento del factor de potencia utilizando filtros

En los sistemas eléctricos de industrias es común que existan cargas que consumen potencia reactiva, estas cargas pueden ser motores, transformadores y reactores, por cuanto el factor de potencia tiende a menguar y en dicho caso debería ser compensado.

Al instalar un filtro, para un sistema eléctrico, el capacitor presente en el mismo incrementa la impedancia fuente, formando una vía de mínima impedancia para corrientes armónicas. Además, inyecta potencia reactiva siendo capaz no solo de eliminar armónicos sino también de corregir el factor de potencia [18].

Cuando se compensa la potencia reactiva mediante bancos de capacitores en un sistema sin antes mitigar las corrientes armónicas, se corre el riesgo de que se produzcan casos de resonancia especialmente en paralelo.

La resonancia produce una distorsión en el voltaje de los capacitores y las sobre corrientes, la cual podría producir problemas en los condensadores, disminuyendo la vida útil de estos y por consiguiente del banco, esta circunstancia también provoca en ciertos casos que las protecciones del sistema actúen, conllevando paros generales de alimentación eléctrica [19].

4. MÉTODOS Y MATERIALES

4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de este tema investigativo se aplicó los siguientes métodos de investigación: el inductivo, deductivo, analítico y por último el método sintético.

4.1.1. Método inductivo – deductivo

Mediante el método inductivo – deductivo se logrará un análisis individual de la carga perteneciente a la maquinaria conectada al transformador de la planta CEDAL S.A, la carga en cuestión sería la prensa 1 para el transformador 1, la prensa 2 para el transformador 2 y la sección de compresores para el transformador 3. A través de este estudio se puede comprobar si el transformador puede abastecer toda la carga o si esta es superior a la producida, además se podrá verificar la capacidad soportada por los conductores.

El presente método analiza a detalle los equipos, instrumentos, y tópicos utilizados en el presente estudio, fundamental para desarrollar las conclusiones y recomendaciones al tema planteado.

4.1.2. Método analítico y sintético

La información sobre calidad de energía incluida en el marco teórico fue recopilada mediante la implementación del método analítico y sintético, indagando en fuentes bibliográficas y artículos científicos, en los cuales se pudo comparar enfoques y métodos de análisis, así como los procedimientos para el diseño de la simulación, la cual permite elaborar propuestas óptimas para solucionar el problema planteado en el tema.

4.2. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

4.2.1. Investigación Bibliográfica

La investigación se llevó a cabo mediante búsqueda bibliográfica en libros, revistas y artículos científicos, páginas webs y repositorios de universidades a nivel nacional e internacional, obteniendo así información de fuentes fiables que proporcionaron la teoría suficiente para sustentar el tema y los métodos de análisis empleados en la obtención de resultados.

4.2.2. Investigación Exploratoria

En esta investigación se efectuaron una serie de visitas a las instalaciones de la Planta CEDAL S.A en la ciudad de Latacunga, en las que se pudo realizar un levantamiento de cargas e

identificar la conexión y distribución del sistema eléctrico presente en el área de extrusión, mediante la recopilación de estos datos y características se actualizó el diagrama unifilar y estructural eléctrico de la industria.

4.2.3. Investigación Descriptiva

Esta investigación se utiliza para detallar información sobre las perturbaciones eléctricas presentes en la industria, así como los métodos necesarios para la atenuación de estas.

La investigación descriptiva también hizo posible plantear alternativas para mejorar la calidad de producto en relación con la eficiencia energética.

4.2.4. Investigación Propositiva

En la presente investigación se plantea métodos de solución a los problemas de calidad de energía existentes en el área de extrusión en CEDAL S.A, esto desde un enfoque técnico y económico.

4.3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

4.3.1. Observación Directa y Participativa

Mediante el uso de esta técnica se logró tener un contacto directo con la fábrica, así como con los encargados del área de mantenimiento quienes colaboraron en la identificación de los sectores con mayor perturbación eléctrica, permitiendo realizar un enfoque más acertado y específico sobre el análisis de la calidad de energía enfocado a las necesidades de CEDAL S.A.

4.3.2. Instrumentos de Investigación

Los instrumentos de investigación utilizados en el proyecto de investigación fueron:

- **Fotografías y Grabaciones:** Se realizaron fotografías y grabaciones de los procesos de producción en área de extrusión de la planta CEDAL S.A Latacunga a fin de documentar las cargas, maquinaria y elementos electromecánicos que puedan tener relación con las perturbaciones en el sistema eléctrico.
- **Diagramas unificables y fichas de registro** en los cuales se anotó las características de conductores, datos nominales de las maquinarias y elementos eléctricos.

4.4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.

Para la determinación de los parámetros eléctricos en el área de extrusión en la planta CEDAL S.A, se utilizará el analizador de calidad eléctrica y energía, el cual realizará el registro de potencia (kW) consumida cada 5 minutos permitiendo determinar las fluctuaciones de consumo y energía suministrada. El método para seleccionar y utilizar el analizador de calidad eléctrica y energía se muestra en la Figura 11.

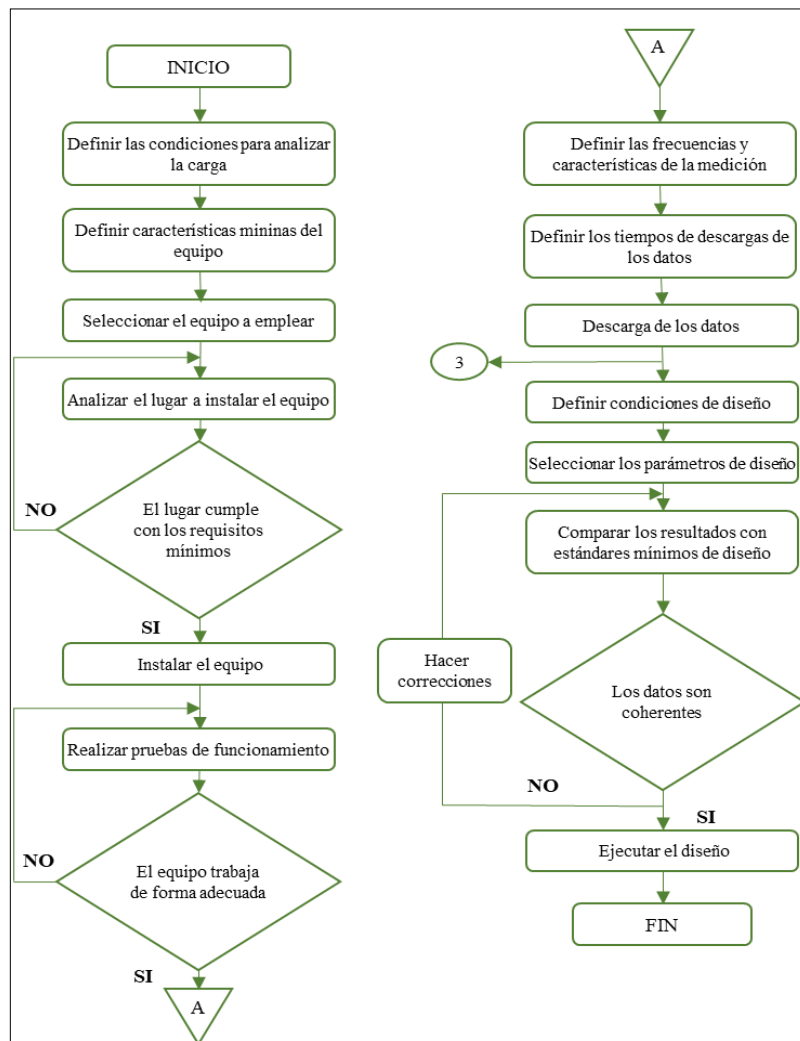


Figura 11. Método de selección del analizador de calidad eléctrica y energía [20].

4.4.1. Etapa 1.- Condiciones para analizar la carga

Según la normativa internacional IEEE std 519 el periodo de evaluación no debe ser inferior a siete días continuos por lo cual el analizador de calidad eléctrica y energía realizara el registro de parámetros eléctricos por una semana.

4.4.2. Etapa 2.- Características mínimas del equipo

Como se estipula en la regulación IEEE std 1159, la medición de parámetros el equipo debe medir y registrar las siguientes variables:

- Intensidad
- Voltaje
- Potencia de la carga
- Armónicas de voltaje y de corriente
- Desbalance de voltaje

EL equipo también deberá permitir registrar estos parámetros en una red trifásica de cuatro hilos ya que esa es la conexión existente en los transformadores del área de extrusión en la planta CEDAL S.A Latacunga.

4.4.3. Etapa 3.- Selección del analizador de redes

En la evaluación de energía y parámetros eléctricos presentes en el área de extrusión en la planta CEDAL S.A se utilizó el equipo analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II, como se muestra en la Figura 12. El equipo fue instalado en todas las fases de los bornes del transformador, las mediciones se efectuaron en los transformadores 1, 2 y 3 de 600 kVA correspondientes a la prensa 1, 2 y sección de compresores respectivamente. Los parámetros obtenidos fueron potencia activa (P), reactiva (Q), aparente (S), voltaje (V), corriente (I), frecuencia (f) y factor de potencia (FP) de la red perteneciente a la planta en donde se realizó el análisis.



Figura 12. Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II [21].

4.4.3.1. Características

- Estudio avanzado del estado de la calidad eléctrica.
- Calculadora de pérdida de energía.
- Máxima categoría de seguridad.
- Registro de la energía eléctrica y de los parámetros pertinentes de hasta un mes y medio.
- Supervisión de demanda máxima referente a potencia en periodos medios definidos con base en las necesidades del usuario.
- Comprobaciones de consumo de energía para evidenciar las ventajas aportadas por las mejoras realizadas.
- Mejora de la fiabilidad gracias a la captura de fluctuaciones de tensión debidas a la conexión y desconexión de una gran carga.
- Fácil confirmación de la configuración del instrumento mediante la visualización en color de las formas de onda y tendencia.
- Medida de las tres fases y el neutro gracias a las cuatro sondas flexibles incluidas.
- Visualización de gráficos y generación de informes gracias al software PowerLog.

La elección del instrumento de medida (analizador de carga) para el proyecto, se basó en los siguientes criterios:

- **Calidad:** El analizador se ha diseñado y probado conforme a la norma EN61010 - 1 2a edición (2001), para instrumentos con requisitos de seguridad para equipos eléctricos de medida, control de las medidas y uso en laboratorio, Clase III, Grado 2 de contaminación.
- **Memoria:** Tarjeta de memoria SD de 8 GB para almacenar datos de medida
- **Interfaz:** Interfaz USB y un cable (tipo de conector: "USB mini - B") para establecer un enlace de comunicaciones con un ordenador personal. comunicación RS - 232 con la opción GPS430.
- **Velocidad de muestreo:** La velocidad de muestreo para la detección de transitorios es de 200 kS/s.
- **Frecuencia de línea:** 50 Hz o 60 Hz, seleccionable por el usuario, con sincronización automática.
- **Alimentación eléctrica:** Batería recargable de iones de litio incorporada que puede alimentarlo durante más de 7 horas.

4.4.3.2. Adquisición de Datos

Como se alude en la norma IEEE Std 1159, dado que la ocurrencia de una alteración de la calidad de la energía es altamente impredecible, los monitores de la calidad de la energía deben registrar y procesar los datos continuamente para mejorar el tiempo de registro. Los datos no se pueden guardar en cada ciclo para cada parámetro indefinidamente.

Las señales transitorias de alta frecuencia se pueden capturar utilizando detectores de pico doble de respuesta rápida, ventana estrecha, reiniciables o, por lo general, convertidores de analógico a la digital de alta velocidad.

A partir de estas muestras sin procesar y valores rms, se calculan muchos parámetros adicionales en cada ciclo o en cada X ms ventana, dependiendo del parámetro.

Por ejemplo, el voltaje generalmente se mide ciclo por ciclo, donde X sería 16,66 ms para 60 Hz. Para las mediciones de armónicos, esta ventana suele ser de 200 ms. Estos parámetros incluyen los parámetros de potencia y energía, además de parámetros armónicos.

La velocidad de muestreo para la detección de transitorios del analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II es de 200 kS/s en frecuencia de 60 Hz, cumpliendo los estándares para la adquisición de datos [9].

4.4.4. Etapa 4.- Forma de conexión del equipo para una red trifásica

El analizador de redes posee 4 entradas BNC las cuales corresponden a pinzas amperimétricas y 5 entradas de tipo banana adicionales para voltajes. En un sistema trifásico, las conexiones se realizan como se muestra en la Figura 13.

Las pinzas amperimétricas van alrededor de los conductores de fase A (Línea 1), B (Línea 2), C (Línea 3) y N (El neutro). Estas pinzas tienen marcas que indican la correcta polaridad, estas son representadas por flechas.

Para la conexión de los voltajes se inicia por la tierra y posteriormente en sucesión, Neutro, Línea 1, Línea 2 y Línea 3.

Se debe comprobar siempre dos veces las conexiones y que las pinzas amperimétricas estén cerradas por completo y fijadas de una manera firme alrededor de las fases.

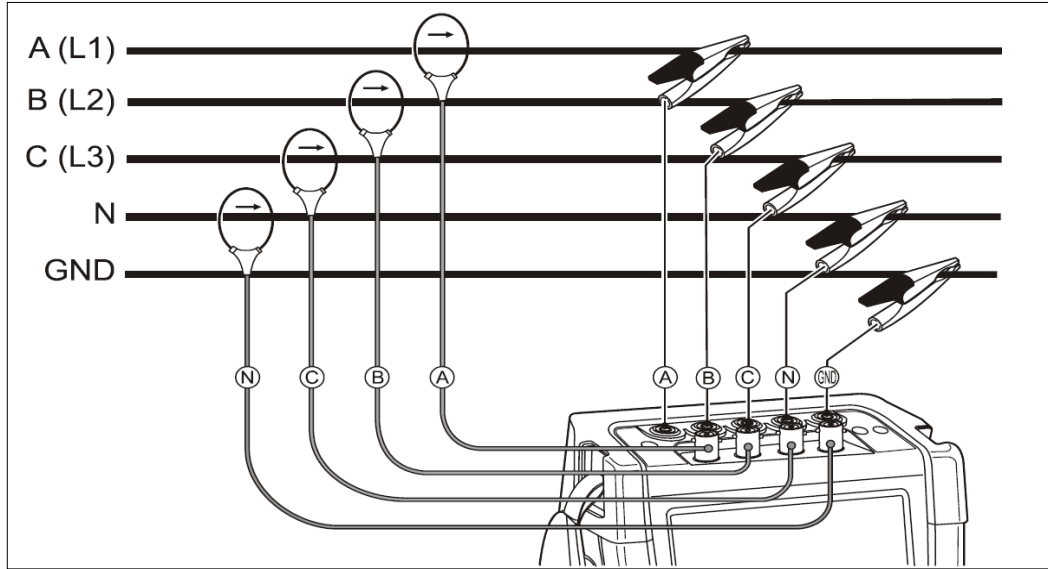


Figura 13. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico [22].

4.4.5. Etapa 5.- Lugar de instalación del analizador de redes

Para investigar la calidad general del suministro a una instalación, el monitor debe colocarse en el secundario del transformador de entrada de servicio principal. El monitor registra la calidad de la energía suministrada a la instalación, así como el efecto de las principales cargas dentro de la instalación [9].

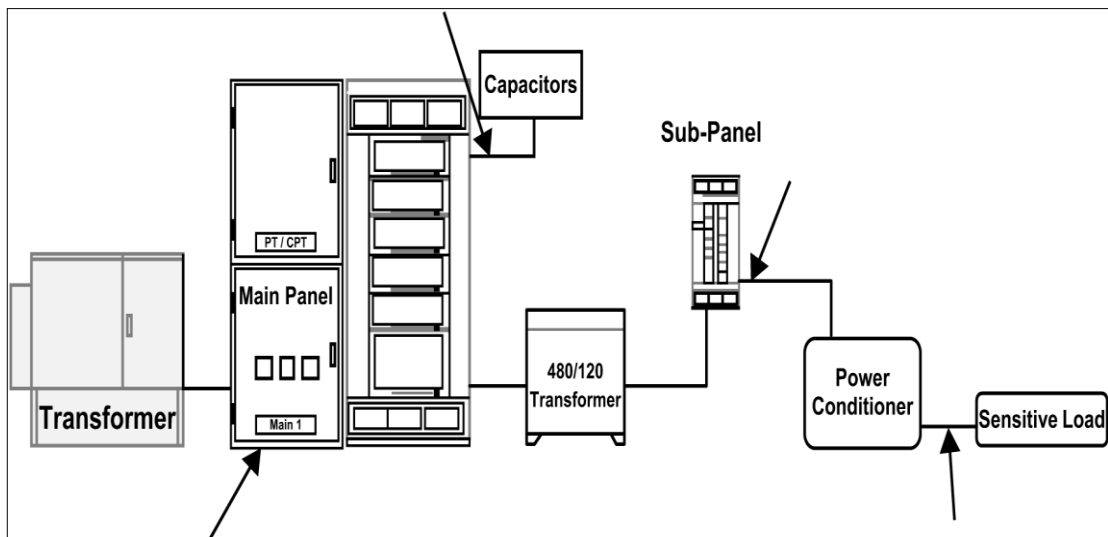


Figura 14. Ubicaciones de monitoreo sugeridas en un sistema típico de bajo voltaje (Las flechas apuntan a la ubicación sugerida de las sondas) [9].

Para obtener los valores mínimos, máximos y promedios de los principales parámetros eléctricos en los días de medición, se procedió a instalar el analizador de redes en el secundario del transformador de entrada de servicio principal para cada uno de los tres transformadores del área de extrusión, como se establece en la normativa IEEE std 1159. La conexión fue realizada para un sistema trifásico en el cuarto de transformadores de la planta CEDAL S.A, el equipo instalado se muestra en la Figura 15.



(a) Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435-II – Transformador 1 (600 kVA).



(b) Conexión de las pinzas a las fases de alimentación.

Figura 15. Instalación del analizador de red.

El analizador debe colocarse de forma segura para que no haya posibilidad de que el instrumento se mueva o las conexiones se aflojen, este no debe dejarse donde el calor, la humedad o el polvo excesivos puedan dañar el equipo o poner en peligro el proceso de recopilación de datos [9].

4.4.6. Etapa 6.- Pruebas de funcionamiento del analizador de redes

Para evitar que el analizador de redes registre datos incorrectos es preciso contar con un equipo que se encuentre calibrado (Ver Anexo H), siendo pertinente un certificado avalado por un instituto de calibración y ensayo, al conectar el equipo, antes de iniciar con la adquisición de datos, se comprueba los parámetros de potencia, voltaje y corriente correspondiente a la línea uno (L1), línea dos (L2), línea tres (L2) y N (neutro), también se revisa el desfase de los voltajes comprobando así el estado correcto de la conexión del equipo en el transformador (Ver figura 16).



(b) Desfase de los voltajes.



(a) Parámetros de potencia de la L1, L2, L3 y N de medición del analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II.

Figura 16. Pruebas.

4.4.7. Etapa 7.- Frecuencias y características de la medición del analizador de redes

En la etapa 1 se menciona las condiciones de análisis de parámetros eléctricos según la normativa internacional IEEE std 519 en la cual se menciona que la medición, registro y almacenamiento de los valores en cada punto seleccionado se efectuará durante un período de evaluación no inferior a siete días continuos, en intervalos de 10 minutos.

En relación con estas estipulaciones la frecuencia de registro de datos se estableció en siete días con un intervalo de medición de 5 minutos, este periodo se consideró oportuno para el análisis.

El período de análisis del primer transformador (Transformador 1) correspondiente a la sección de la prensa 1 del área de extrusión va desde las 19:00:00 pm del 14 de junio hasta las 9:55:00 am del 21 de junio del 2021, el segundo transformador (Transformador 2) correspondiente a la sección de la prensa 2 del área de extrusión desde las 14:00:00 pm del 23 de junio hasta las 13:55:00 pm del 29 de junio del 2021 y el registro de datos en el tercer transformador (Transformador 3) correspondiente a la sección de compresores del área de extrusión va desde

las 14:00:00 pm del 05 de julio hasta las 13:55:00 am del 12 de julio del 2021. La frecuencia de los datos queda determinada por lo mencionado anteriormente.

4.4.8. Etapa 8.- Descarga de los datos del analizador de redes

Después del registro de las mediciones mediante el analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica FLUKE 435 - II, se transfiere los datos al computador, esto se realiza a través del software Power Log de FLUKE (Ver Figura 17), también se pueden obtener los datos mediante la tarjeta SD la cual se retirará del equipo y se conectará al ordenador. Los resultados de los parámetros eléctricos se pueden obtener durante cualquier día y hora del período total de medición. La sabana de datos del período de análisis se selecciona y se exporta en formato (.csv) extensión perteneciente al programa de cálculo Excel.

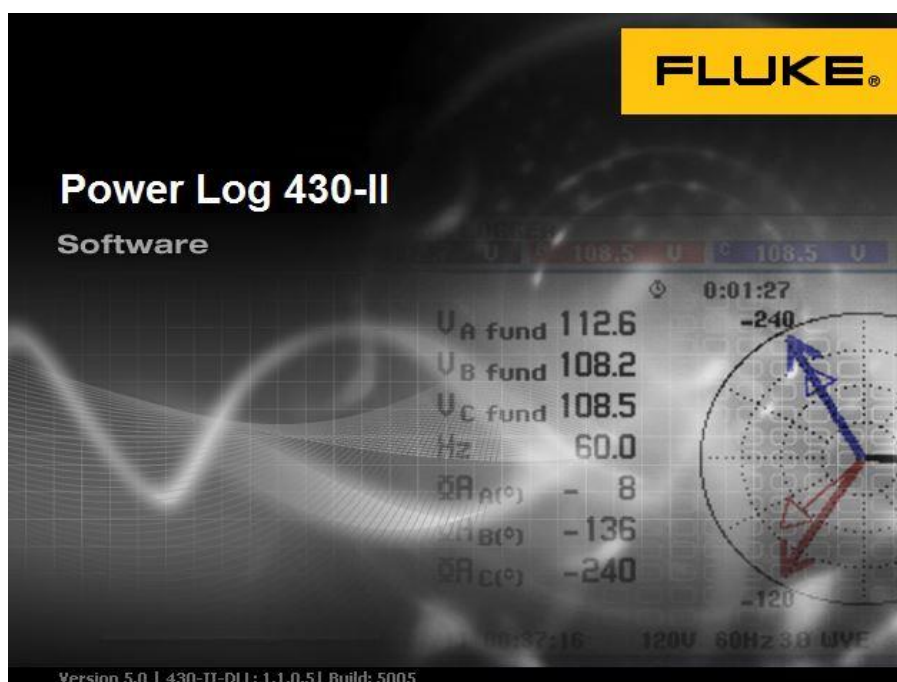


Figura 17. Software Power Log Software FLUKE [22].

4.4.9. Etapa 9.- Definir las condiciones de diseño para la simulación

Las condiciones necesarias que debe presentar el software para el diseño son:

- Permitir el modelamiento preciso de un sistema eléctrico de potencia industrial con variedad de elementos eléctricos y cargas.
- Coordinación de dispositivos de protección y base de datos bajo el control interactivo gráfico de diagramas unifilares.

- Interfaz interactiva y fácil de utilizar diseñada para el análisis eficiente y preciso de sistemas de potencia.
- Análisis de parámetros y perturbaciones eléctricas.

Con base en las condiciones requeridas para el diseño el software elegido es EasyPower

4.4.9.1. EasyPower

EasyPower es una herramienta de ingeniería asistida por computadora para el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia industriales, servicios eléctricos y comerciales, integra completamente las funciones de cortocircuito, flujo de potencia, coordinación de dispositivos de protección.

EasyPower permite trabajar directamente desde el diagrama unifilar, tiene una interfaz amigable con el usuario y sencilla de utilizar, creada en favor del estudio óptimo y detallado sistemas de potencia [23].

4.4.10. Etapa 10.- Seleccionar los parámetros de diseño para la simulación

Mediante los datos obtenidos del sistema eléctrico de CEDAL S.A. se procede a ingresarlos en el software seleccionado para la simulación.

Los parámetros considerados para el diseño son:

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

Parámetros eléctricos

- Frecuencia
- Voltaje
- Intensidad
- Potencia

Estos datos se ingresan en el software de simulación para determinar cuáles son las perturbaciones en el sistema eléctrico y posteriormente plantear las soluciones adecuadas que mejoren la calidad de energía eléctrica en la industria de potencia.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. DESCRIPCIÓN DE LA INDUSTRIA

La corporación ecuatoriana de aluminio CEDAL S.A. se dedica a fabricar y comercializar extrusiones de aluminio a nivel nacional e internacional. La planta está ubicada en la ciudad de Latacunga y cuenta con 3 áreas de producción las cuales son fundición, extrusión y anodizado. CEDAL S.A es abastecida de energía por la empresa eléctrica provincial Cotopaxi ELEPCO S.A. y es alimentada por una línea de media tensión de 13.8 kV teniendo a su servicio 8 transformadores con una capacidad instalada total de 4.95 MVA.

De la línea de media tensión de 13.8 kV se derivan tres ramales independientes para cada una de las áreas mencionadas anteriormente (Ver Anexo B).

5.1.1. Descripción del área de estudio de la Industria

El área de extrusión cuenta con 3 transformadores de potencia de 600 kVA con un nivel de voltaje de 440 V y 220 V, cada uno de los transformadores abastece una sección en específico. La alimentación consta de tres conductores por fase, cada fase esta provista por 2 cables del tipo TW 500 MCM para 600 V, y el neutro por un cable TW de 400 MCM.

Tabla 7. Características del Transformador de Potencia.

Fabricación:	ECUATRAN
Norma:	IEEE C.57.12
Voltaje alta tensión:	13.8 kV
Voltaje baja tensión:	440 V
Conexión:	DYn5
Nivel de aislamiento primario / secundario	95 / 30
Potencia:	600 kVA
Frecuencia:	60 Hz
Impedancia %:	2.8

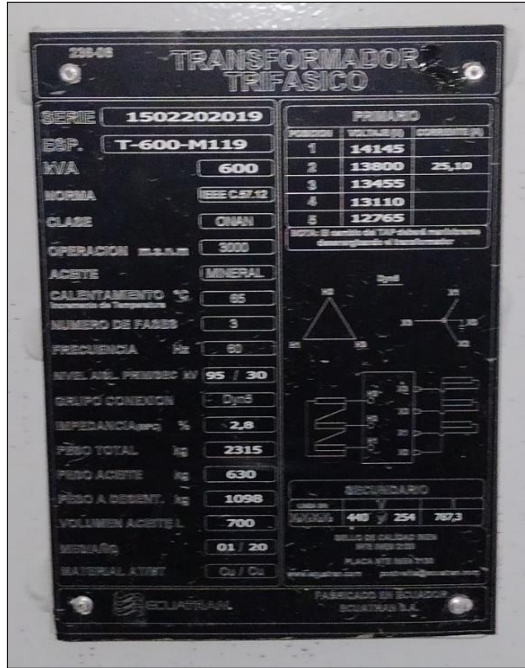


Figura 18. Placa de datos del transformador de potencia trifásico de 600 kVA.

Los transformadores de potencia 1, 2 y 3 alimentan a las secciones de prensa 1, prensa 2 y compresores, respectivamente. El área de extrusión funciona las 24 horas del día, los 7 días de la semana parando intermitentemente la producción cada 6 meses para el mantenimiento de maquinaria, la conexión de los tableros de control hacia los motores es a través de cables THWN de calibre 4/0.

A continuación, se puede observar el diagrama del área en estudio, la misma está ubicada entre el área de anodizado y fundición (Figura 19).

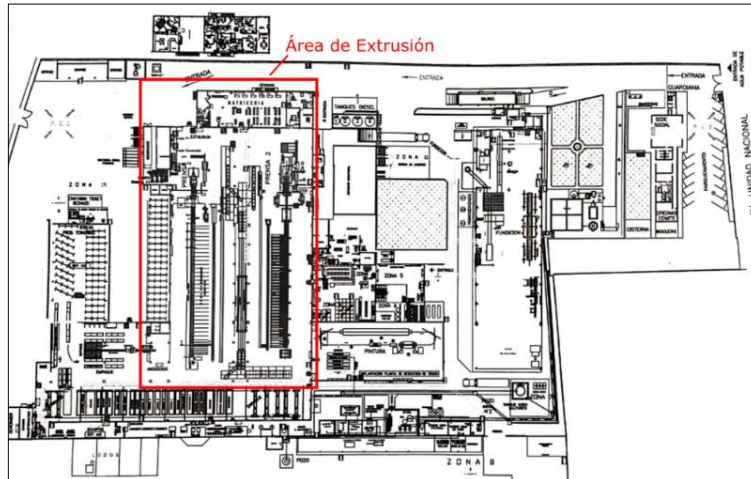


Figura 19. Diagrama de áreas de la empresa CEDAL S.A.

5.1.2. Levantamiento de cargas

Realizar el levantamiento de cargas es parte fundamental en el desarrollo del presente proyecto puesto que, mediante el mismo podemos obtener los valores de las potencias: activa, reactiva y aparente (Ver Anexo C).

Tabla 8. Carga instalada en el Transformador 2.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSION TRANSFORMADOR 2		
Ítem	Máquina	POTENCIA ACTIVA (KW)
1	Arrancador Electrónico #1	70.47
2	Arrancador Electrónico #2	70.47
3	Cizalla	14.09
4	Horno TKF y mesa de Enfriamiento	7.05
5	Horno de Matrices	14.09
6	Ventiladores	2.35
7	Horno de Lingotes	14.09
8	Bomba de Sellamiento	7.05
9	Supercarga	4.23
10	Resistencia de Container	0.47
11	OTG	1.41
12	Cadena de Perfil	2.35
13	Toma de Vela	0.70
14	Mantenimiento	4.23
15	Doble Puller	2.35
16	Transformador de Control	18.79
17	Doble Puller P2	0.47
18	Sierra de Vaiven	1.88
19	Taladro	0.94
20	Esmeril Grande	1.41
21	Esmeril Pequeño	0.70
22	Tomacorrientes	0.47
23	Tomacorrientes	0.47
24	Suelda	2.35
25	Torno	4.70
26	Fresadora	0.47
27	Tecele	0.47
28	Nitrurado	4.70
29	Quincy Grande	25.84
30	Quincy Pequeño	23.49
TOTAL (KW)		302.55

5.2. ANÁLISIS DE RECOPIACIÓN DE DATOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE REDES

5.2.1. Análisis de calidad de energía de la industria “CEDAL S.A”

De acuerdo con la regulación IEEE 1159 se procede a realizar el análisis de los siguientes parámetros eléctricos, para los tres transformadores en estudio:

- Voltaje de Fase – Fase y Voltaje de Fase – Neutro
- Desniveles de Voltaje
- Corrientes de Línea
- Desequilibrio de Voltaje y Desequilibrio de Corriente
- Factor de Potencia
- Potencia Activa
- Potencia Aparente
- Potencia Reactiva
- Energía Consumida
- Distorsión Armónica Total de Corriente y de Voltaje
- Armónicos Individuales de Corriente y de Voltaje
- Análisis de Flickers
- Sags y Swells
- Equipo Utilizado

5.2.2. Analizador de energía trifásico FLUKE 435 S - II

5.2.2.1. Metodología para monitoreo

Para la realización del presente estudio se hizo uso de un equipo trifásico marca FLUKE 435 serie II. La red de alimentación en la que se realizó el análisis cuenta con tres transformadores de capacidad de 600 kVA, el equipo fue conectado en bornes de baja tensión de cada uno de los transformadores, los niveles de voltaje presente en el sistema son de 440 / 220 V.

El periodo de medición fue de 7 días continuos, tomando muestras cada 5 minutos, para un análisis profundo de cada parámetro.

5.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS

5.3.1. Variaciones de Voltaje

La tensión de fase nominal (440 V) y la de fase neutro (254 V) se utilizan como referencias en el análisis del nivel de voltaje. La calidad de nivel de voltaje en un punto del sistema de distribución se determinará con el siguiente índice.

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 \text{ [%]} \quad (5.1)$$

Donde:

ΔV_k : Cambio de la tensión de alimentación de la tensión nominal en el punto k

V_k : Suministro de tensión en el punto k, con un promedio de 10 minutos de registro de datos (cada 3 segundos)

V_N : Tensión nominal en el punto k

La regulación ARCERNR 002/20 establece que no se cumple con los niveles de voltaje cuando más del 5 % de los datos tomados están sobre el porcentaje establecido.

La Industria “CEDAL S.A” corresponde al nivel de bajo voltaje, debido a esto su nivel de voltaje no debe superar el $\pm 8 \%$.

Tabla 9. Límites nivel de voltaje [3].

Nivel de Tensión	Tolerancia
Alta Tensión (Grupo 1 y Grupo 2)	$\pm 5\%$
Media Tensión	$\pm 6\%$
Baja Tensión	$\pm 8\%$

A continuación, se analiza tanto el voltaje de punto neutro (254 V) como el nivel de voltaje de fase (440 V), son niveles de voltaje industrial y se comparan con los niveles establecidos por la regulación, este análisis se realiza por cada transformador.

5.3.2. Voltaje Nominal Fase – Neutro: 254 V

De acuerdo con la tabla 10, se puede verificar que el sistema eléctrico no presenta variaciones de voltaje, estas se encuentran dentro de las de las tolerancias ($\pm 8\%$) en cada uno de los transformadores, esto significa que la maquinaria existente en la Industria está operando al voltaje ideal para los cuales fueron diseñados.

Tabla 10. Niveles de voltaje fase – neutro, variación de voltaje por transformador.

	V_{A-N}	V_{B-N}	V_{C-N}	% de Variación de Voltaje		Norma ARCERNR 002/20
				Máximo	Mínimo	
Transformador 1	253,84	253,66	254,54	3,72	0,23	Si Cumple
Transformador 2	254,59	253,45	253,64	3,17	0,22	Si Cumple
Transformador 3	238,56	239,76	238,43	3,12	0,14	Si Cumple

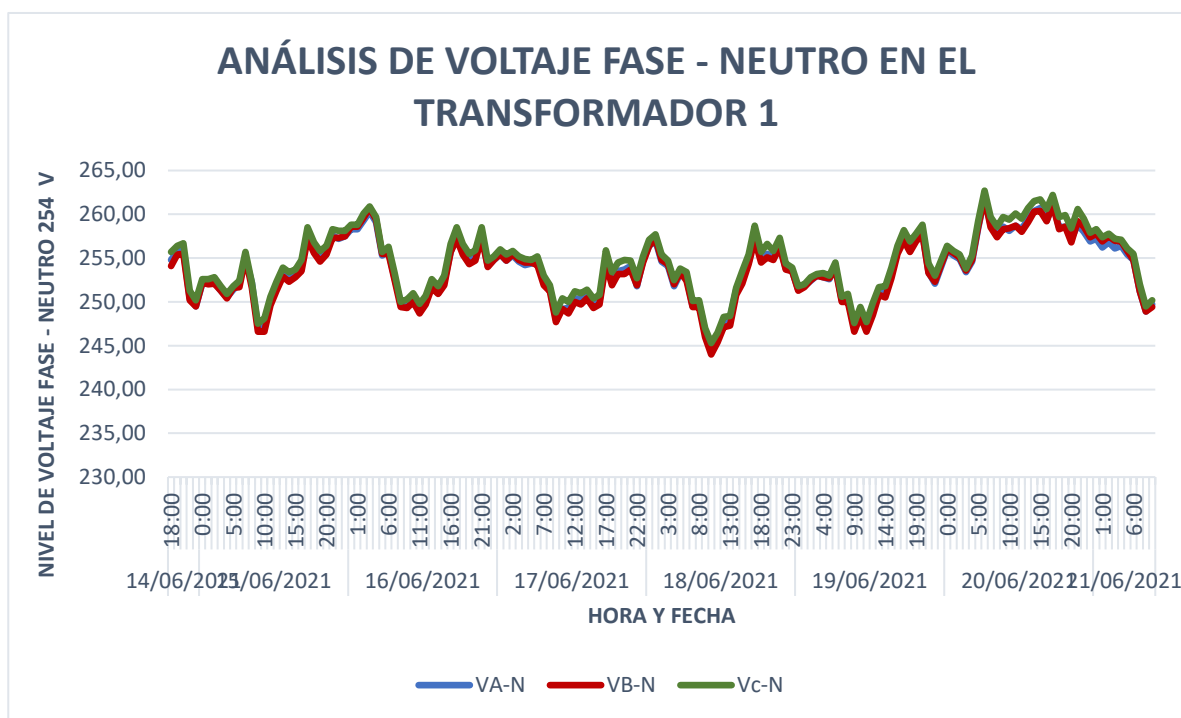


Figura 20. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 1.

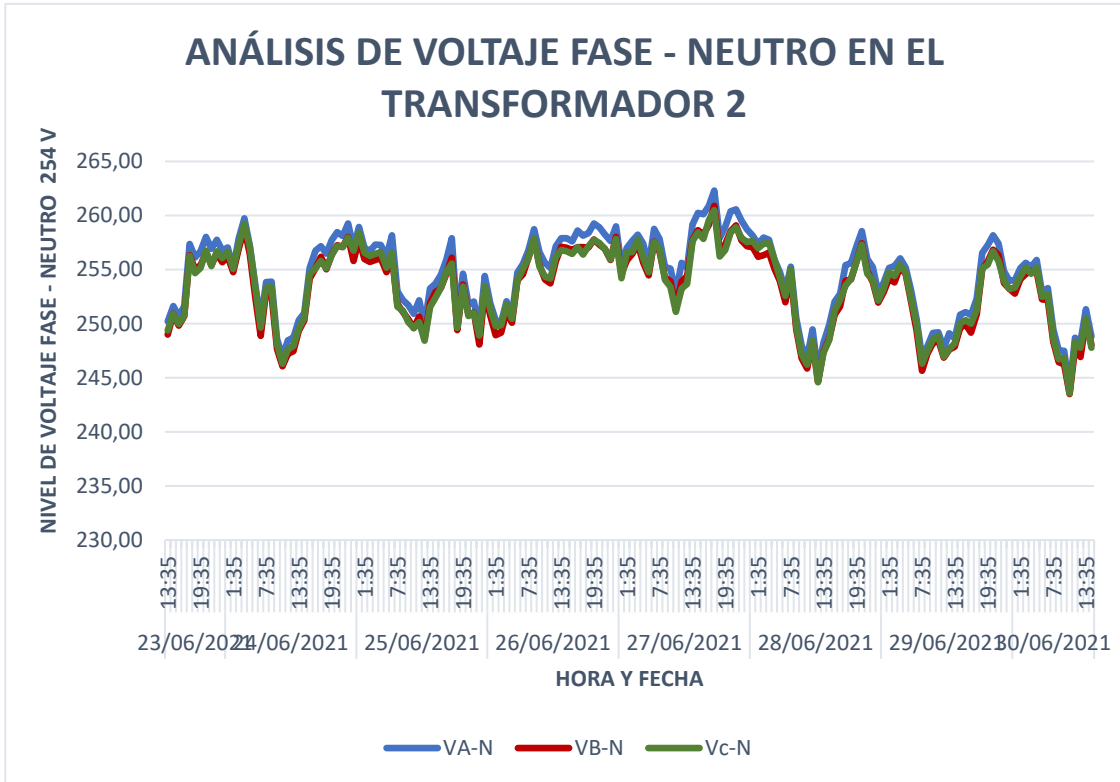


Figura 21. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 2.

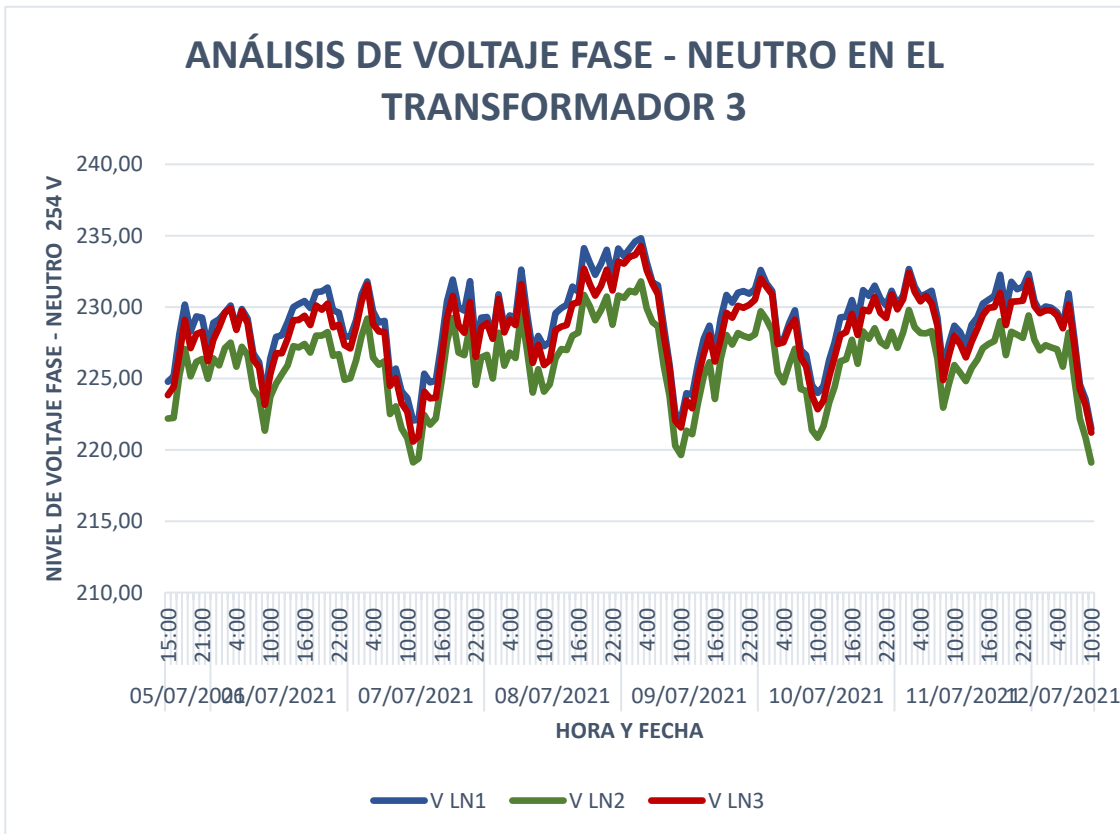


Figura 22. Niveles de voltaje fase – neutro en el transformador 3.

5.3.3. Voltaje Nominal Fase – Fase: 440 V

De acuerdo con la tabla 11, se puede verificar que el sistema eléctrico en el nivel de voltaje fase – fase (440 V) no presenta variaciones de voltaje, estas se encuentran dentro de las de las tolerancias ($\pm 8\%$) en cada uno de los transformadores, por lo tanto, se concluye que el voltaje no sufre de variaciones que perturben al funcionamiento de la maquinaria.

Tabla 11. Rangos de voltaje fase – fase, variación de tensión por cada transformador.

	V _{A-B}	V _{B-C}	V _{C-A}	% de Variación de Voltaje		Norma ARCERNNR 002/20
				Máximo	Mínimo	
Transformador 1	439,12	440,40	440,47	3,70	0,22	Si Cumple
Transformador 2	440,96	438,99	439,32	3,16	0,23	Si Cumple
Transformador 3	415,93	411,87	418,64	3,11	0,16	Si Cumple

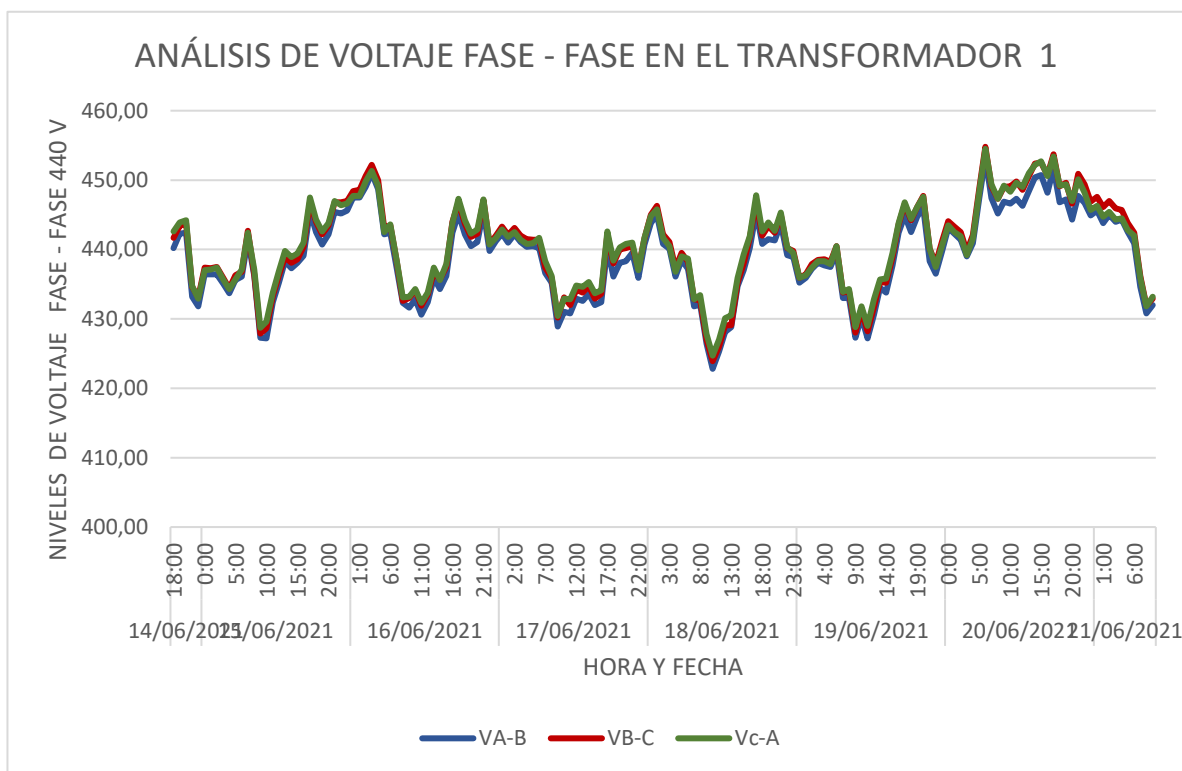


Figura 23. Niveles de voltaje fase – fase en el transformador 1.

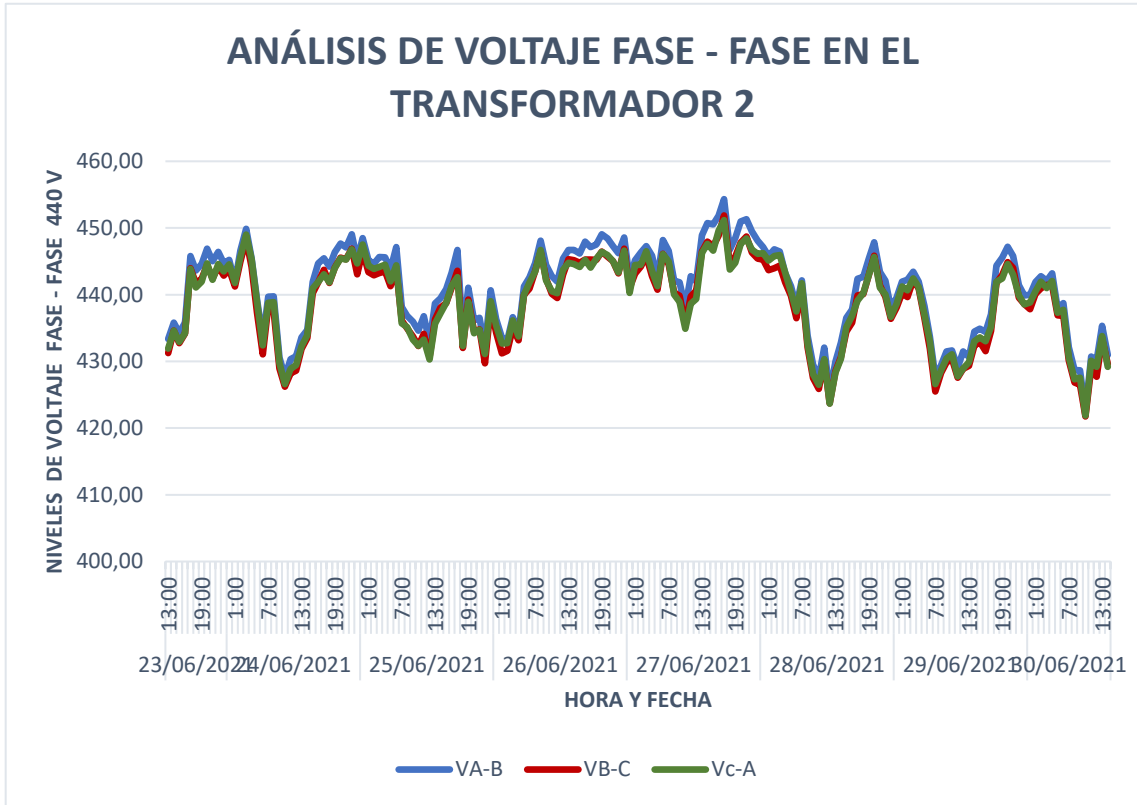


Figura 24. Niveles de voltaje fase – fase en el transformador 2.

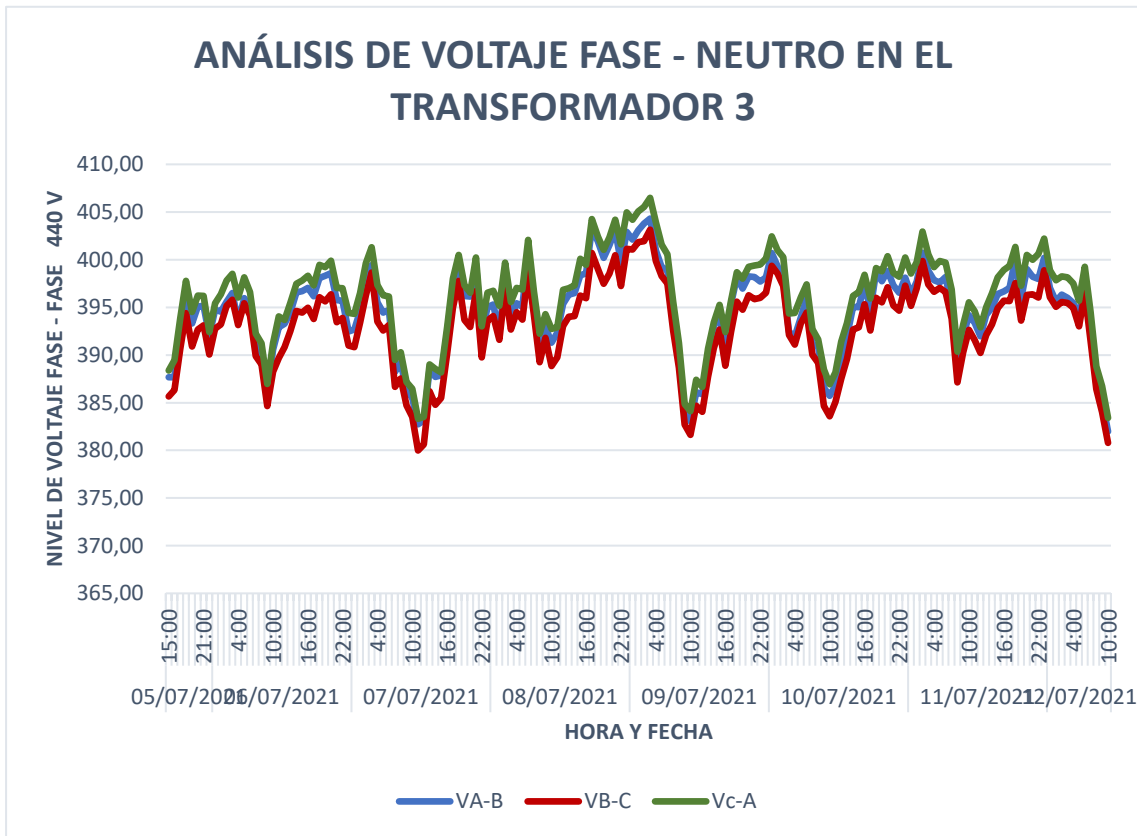


Figura 25. Niveles de Voltaje fase – fase en el transformador 3.

5.3.4. Análisis de la Corrientes de Línea

De acuerdo con la tabla 12, se puede visualizar que el transformador 1 presenta un valor promedio aproximado de 867,02 amperios en periodos de trabajo normal. La figura 24 muestra picos de corriente hasta de 624 Amperios.

En el transformador 2, el valor promedio de la corriente es de 595,10 amperios en los periodos normales, mientras que la figura 25 muestra picos de corriente máxima hasta de 747,67 Amperios.

En el transformador 3, el valor promedio de la corriente es de 733,94 amperios en periodos normales de trabajo. En la figura 26 muestra picos de corriente máxima hasta de 433,00 amperios los mismos que pueden deberse al arranque de equipos o maquinaria.

Tabla 12. Niveles de corriente Línea en los tres transformadores.

	I_{A-N}	I_{B-N}	I_{C-N}	I_N
Transformador 1	281,02	287,79	298,2	17,6
Transformador 2	212,03	196,72	186,40	4,30
Transformador 3	238,67	244,48	250,80	8,80

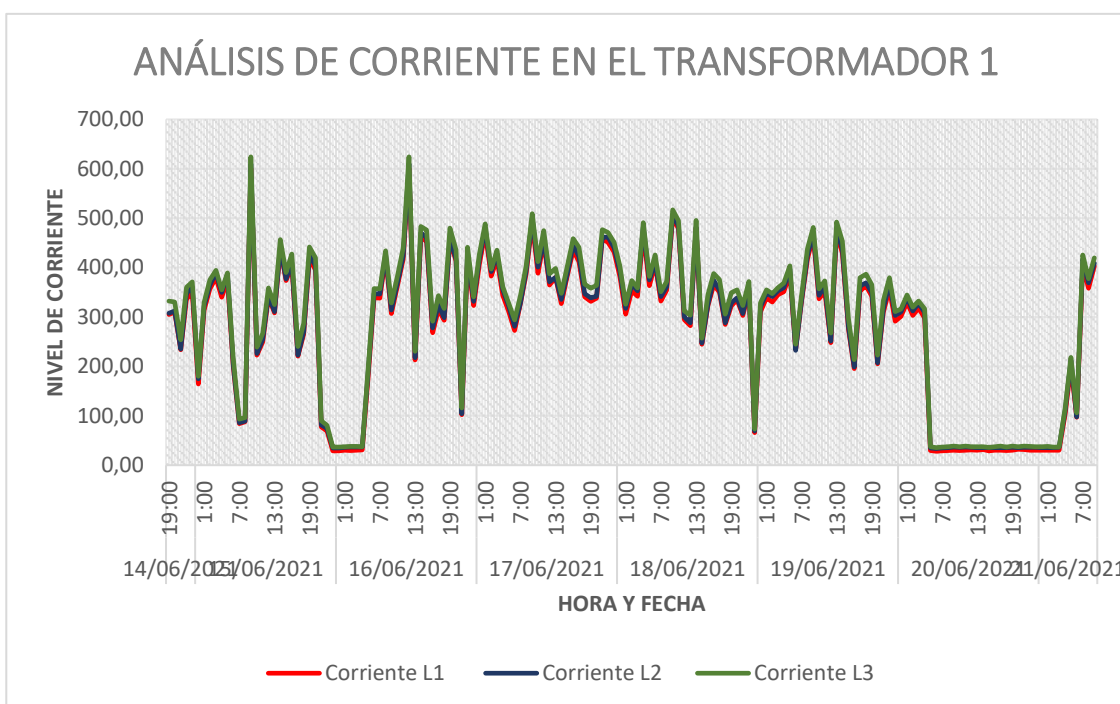


Figura 26. Niveles de corriente en el transformador 1.

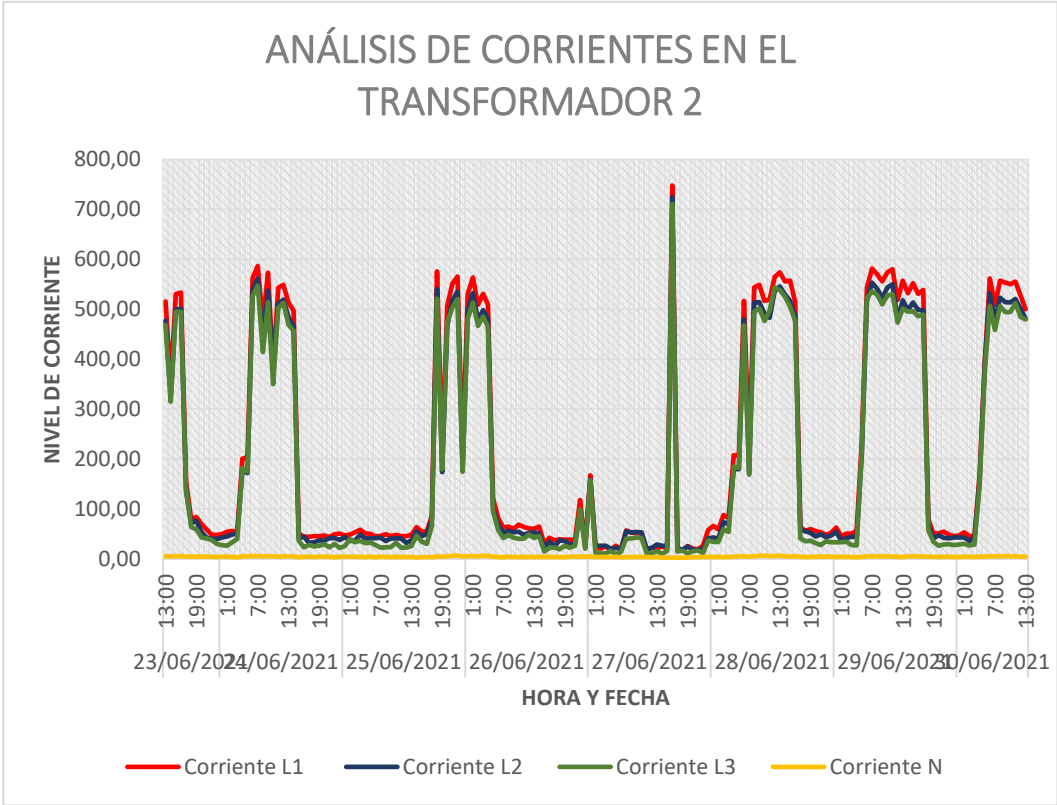


Figura 27. Niveles de corriente en el transformador 2.

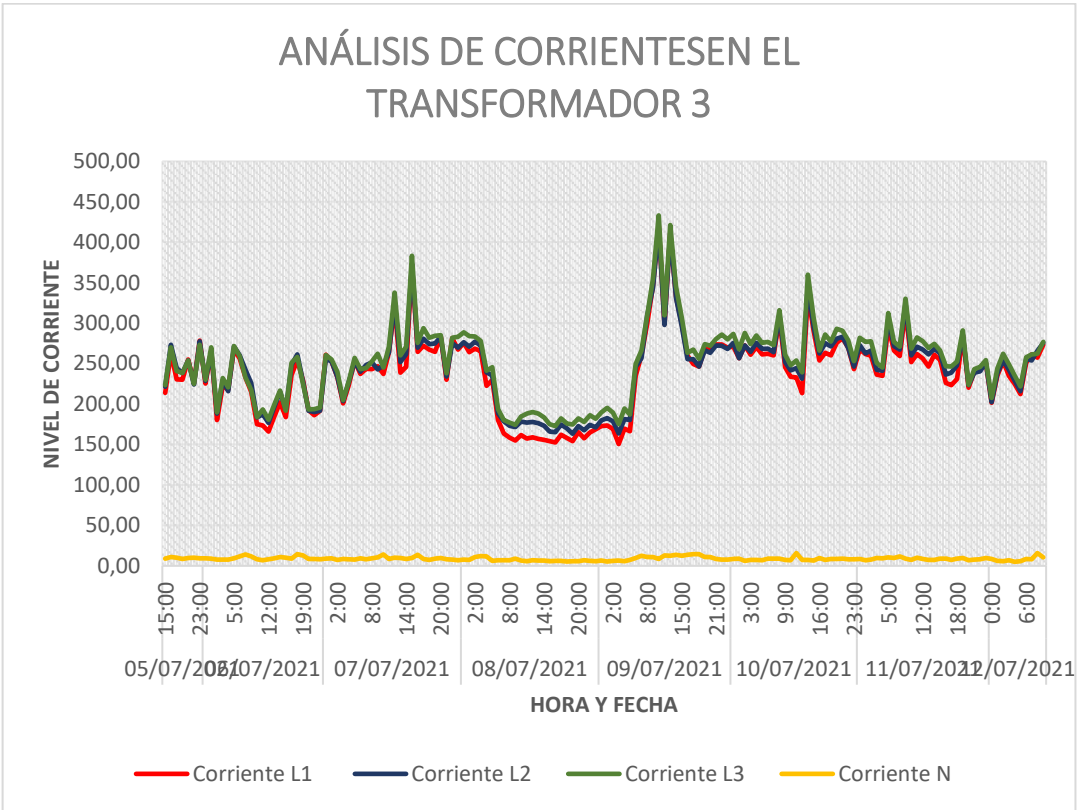


Figura 28. Niveles de corriente en el transformador 3.

5.3.5. Desequilibrio de Voltaje

Para el cálculo del desequilibrio de voltaje se utiliza la siguiente formula:

$$D \% = \frac{V_{\max} - V_{\text{med}}}{V_{\text{med}}} \times 100\% \quad (5.2)$$

De acuerdo con la normativa IEEE Std 1159, el rango permitido que se puede obtener en el desequilibrio de voltaje es el que se indica en la tabla 13.

Tabla 13. Rangos permitidos de desequilibrio de voltaje.

Categoría	Voltaje típico magnitud
Desequilibrio de Voltaje	0,5 – 5%

Mediante el cálculo aplicado para cada uno de los transformadores se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 14. Desequilibrio de voltaje.

	Desequilibrio (% D)	IEEE Std 1159
Transformador 1	0,11%	Cumple
Transformador 2	0,27%	Cumple
Transformador 3	0,78%	Cumple

De acuerdo con la tabla 14 se puede concluir que el sistema eléctrico de los tres transformadores del área extrusión no presenta desequilibrios de voltaje, cuyos valores se encuentran dentro del rango nominal establecido por la regulación.

5.3.6. Desequilibrio de Corriente

Para el cálculo del desequilibrio de voltaje se utiliza la siguiente formula:

$$D \% = \frac{I_{\max} - I_{\text{med}}}{I_{\text{med}}} \times 100\% \quad (5.3)$$

De acuerdo con la normativa IEEE Std 1159, el rango permitido que se puede obtener en el desequilibrio de voltaje es el que se indica en la tabla 15.

Tabla 15. Rangos permitidos de desequilibrio de corriente.

Categoría	Corriente típico magnitud
Desequilibrio de Voltaje	1,0 – 3,0%

Mediante el cálculo aplicado para cada uno de los transformadores se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 16. Desequilibrio de Corriente.

	Desequilibrio (%D)	IEEE Std 1159
Transformador 1	1,18%	Cumple
Transformador 2	2,88%	Cumple
Transformador 3	2,51%	Cumple

De acuerdo con la tabla 16, se puede concluir que el sistema eléctrico de los tres transformadores no presenta desequilibrios de corriente, concluyendo que la red eléctrica del área de extrusión no se encuentra desequilibrada.

5.3.7. Factor de Potencia

De acuerdo con la Codificación de Reglamentos de Tarifas, en el Artículo 27 se indica que los clientes deben registrar un factor de potencia promedio mensual igual a 0.92. Los datos obtenidos en el periodo de medición son los que se indican en la tabla 17.

Tabla 17. Factor de Potencia.

	Fp Línea A	Fp Línea B	Fp Línea C	Fp Total	Observación
Transformador 1	0,88	0,89	0,88	0,89	No cumple
Transformador 2	0,90	0,87	0,86	0,90	No cumple
Transformador 3	0,85	0,89	0,87	0,87	No cumple

De acuerdo con la tabla mencionada se puede concluir que de los tres transformadores de estudio ninguno cumple con el factor de potencia establecido por la codificación. En mención a lo expuesto anteriormente el sistema eléctrico de la Industria “CEDAL S.A”, si cuenta con penalización por bajo factor de potencia.

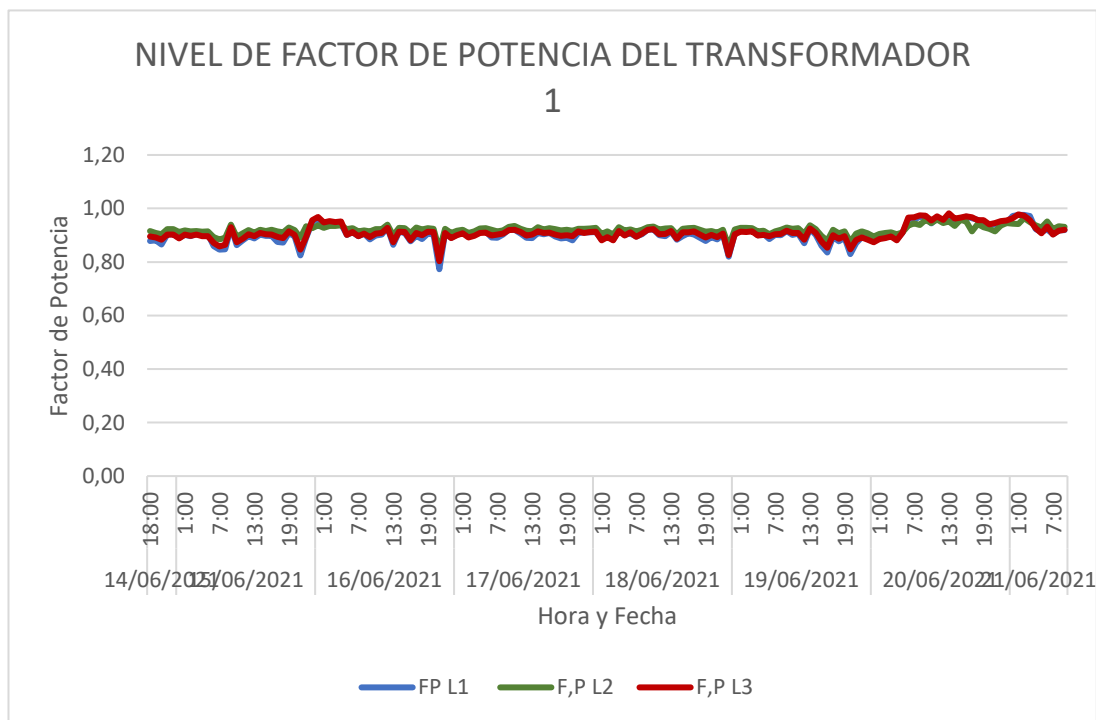


Figura 29. Niveles de factor de potencia transformador 1.

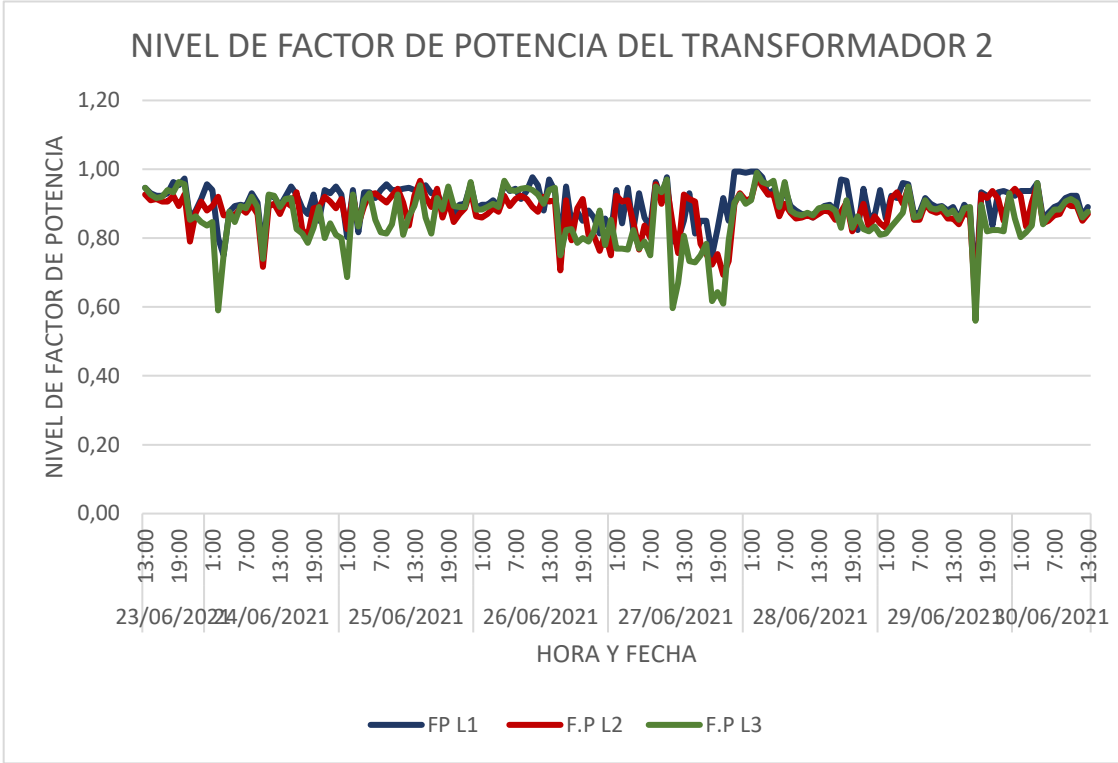


Figura 30. Niveles de factor de potencia transformador 2.

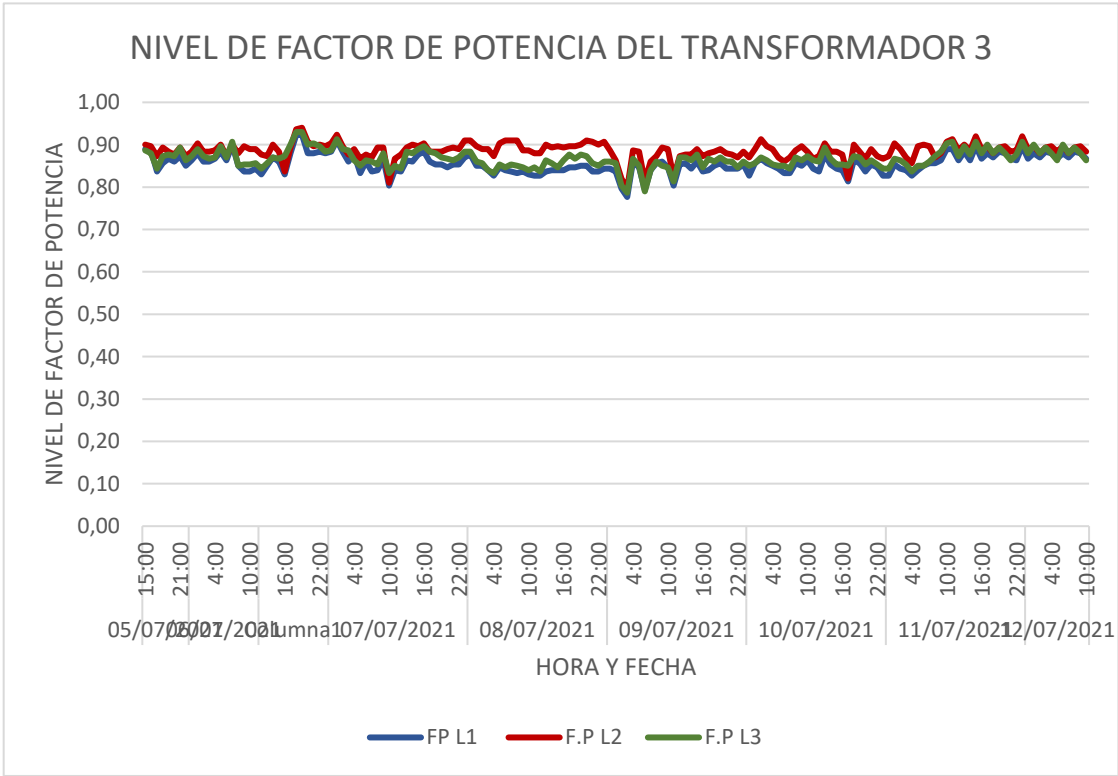


Figura 31. Niveles de factor de potencia transformador 3.

5.4. DEMANDA ELÉCTRICA DE ESTUDIO

Las mediciones de potencia en el área de estudio, se las efectuó cada cinco minutos con el analizador de redes Fluke 435 serie II, este análisis se realiza para cada uno de los tres transformadores.

5.4.1. Demanda Eléctrica del Transformador 1

La figura 32, muestra el comportamiento de la demanda del transformador 1, en la cual se puede observar que el martes tiene mayor actividad de producción, con una potencia máxima de 365,23 kW a las 09:00 de la mañana, mientras que el día con menor consumo es el domingo con una potencia mínima de 25,01 a las 5:00 de la mañana.

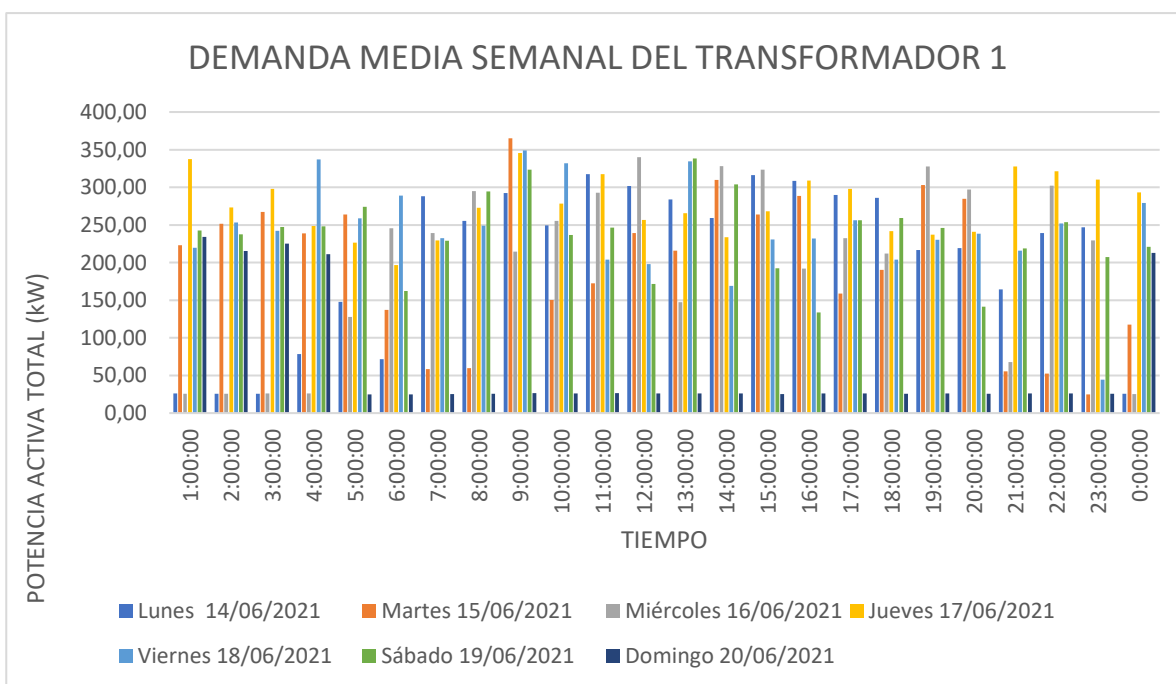


Figura 32. Demanda media semanal del transformador 1.

5.4.2. Demanda Eléctrica del Transformador 2

La figura 33, muestra el comportamiento de la demanda del transformador 2, se puede apreciar que el lunes tiene mayor actividad de producción, con una potencia máxima de 294,30 kW a las 16:00 de la tarde, mientras que el día con menor consumo, es el domingo con una potencia mínima de 6,10 a las 21:00 de la noche.

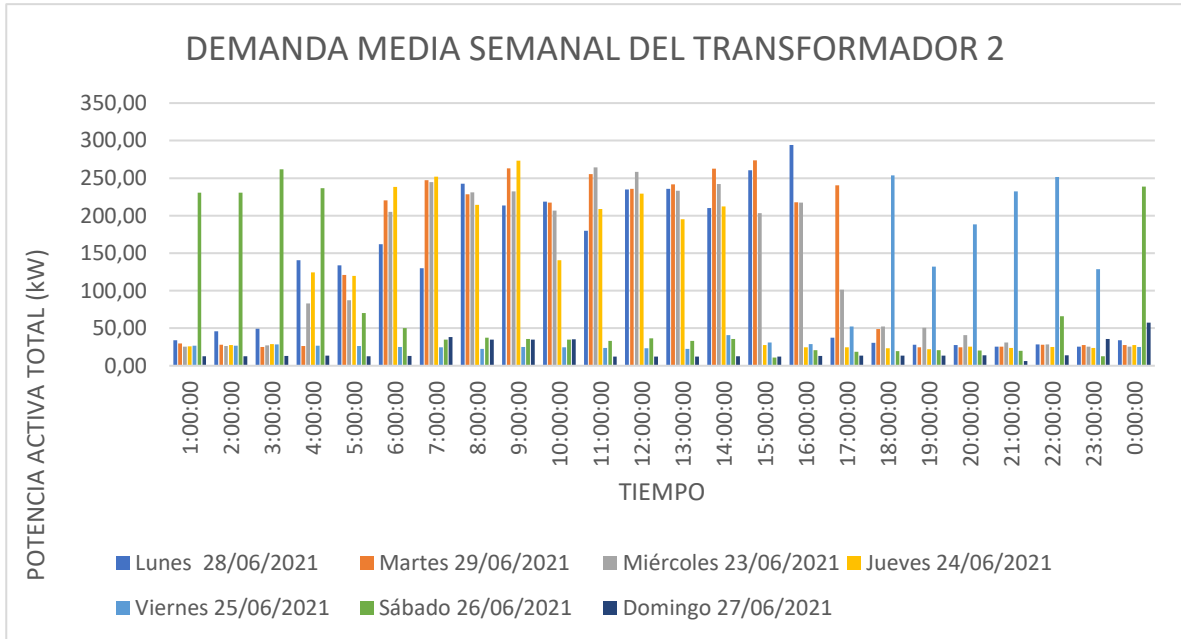


Figura 33. Demanda media semanal del transformador 2.

5.4.3. Demanda Eléctrica del Transformador 3

La figura 34, muestra el comportamiento de la demanda del transformador 3, se puede apreciar que el viernes tiene mayor actividad de producción, con una potencia máxima de 221,34 kW a las 10:00 de la mañana, mientras que el día con menor consumo es el domingo con una potencia mínima de 90,87 a las 16:00 de la tarde.

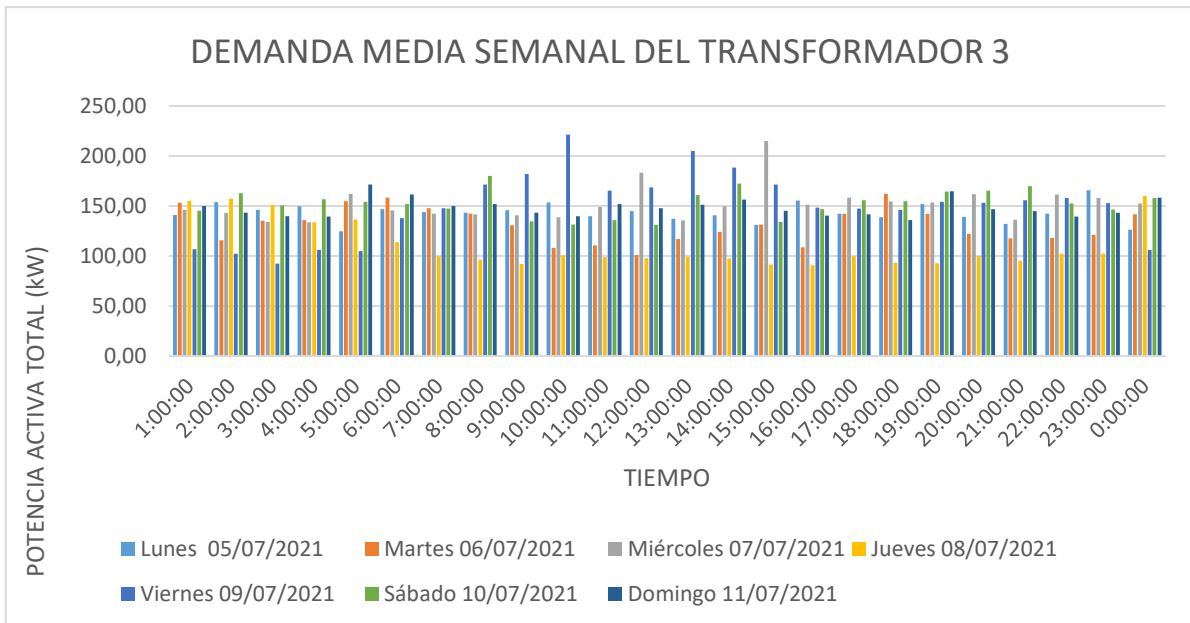


Figura 34. Demanda media semanal del transformador 3.

5.5. ANÁLISIS DE POTENCIAS

En la tabla 18, se indica la potencia activa, aparente y reactiva de cada uno de los transformadores donde se puede visualizar que de acuerdo con los kVA consumidos cada transformador de estudio no se encuentra sobrecargado.

Tabla 18. Análisis de potencias de los tres transformadores.

	Potencia Activa (kW)	Potencia Aparente (kVA)	Potencia Reactiva (kVAR)
Transformador 1	365,23	381,97	108,31
Transformador 2	294,30	304,60	104,80
Transformador 3	221,34	260,20	132,68

5.6. ENERGÍA CONSUMIDA

5.6.1. Energía en el Transformador 1

Como se observa en la figura 35, el área bajo la curva representa la energía eléctrica total que consume el usuario, que en este caso es la industria “CEDAL S.A” y está dado en kWh.

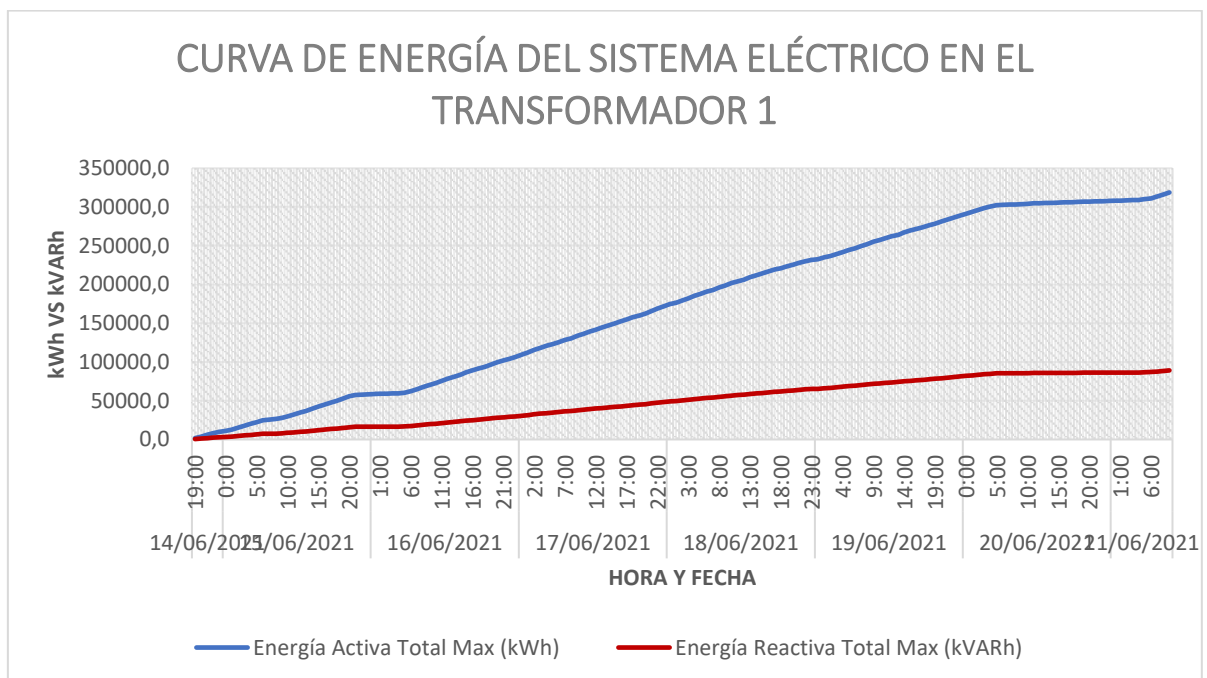


Figura 35. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 1.

La demanda total de energía eléctrica activa en el transformador 1 es de 318601,4 kWh y la energía eléctrica reactiva es de 89084,03 kVAR para un mejor entendimiento en el grafico se puede visualizar el comportamiento del consumo de la energía eléctrica.

5.6.2. Energía en el Transformador 2

La demanda total de energía eléctrica activa en el transformador 2, es de 16112 kWh y la energía eléctrica reactiva es de 3543 kVAR, para un mejor entendimiento en la figura 36, se puede visualizar el comportamiento del consumo de la energía eléctrica.

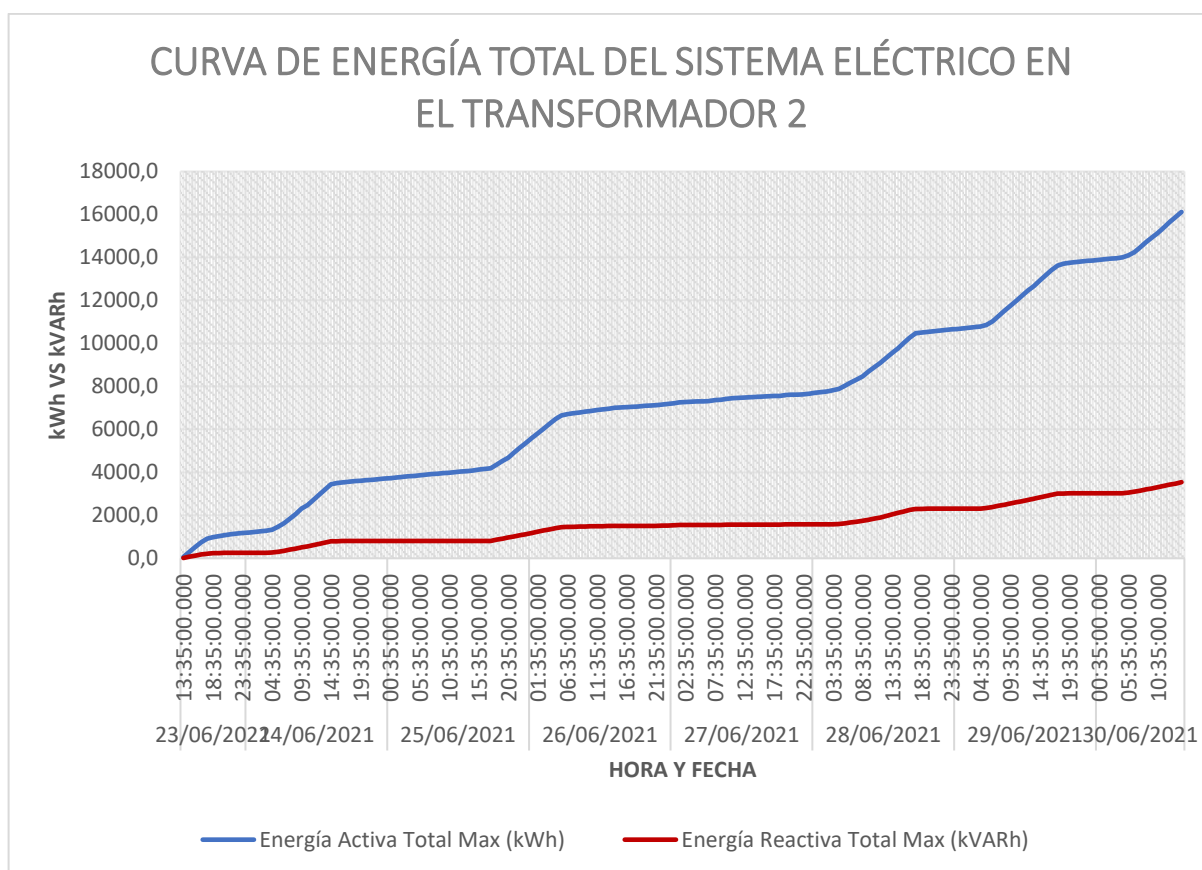


Figura 36. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 2.

5.6.3. Energía en el Transformador 3

La demanda total de energía eléctrica Activa en el transformador 3, es de 23033,88 kWh y la energía eléctrica Reactiva es de 12823,46 kVAR para un mejor entendimiento en la figura 35, se puede visualizar el comportamiento del consumo de energía eléctrica.

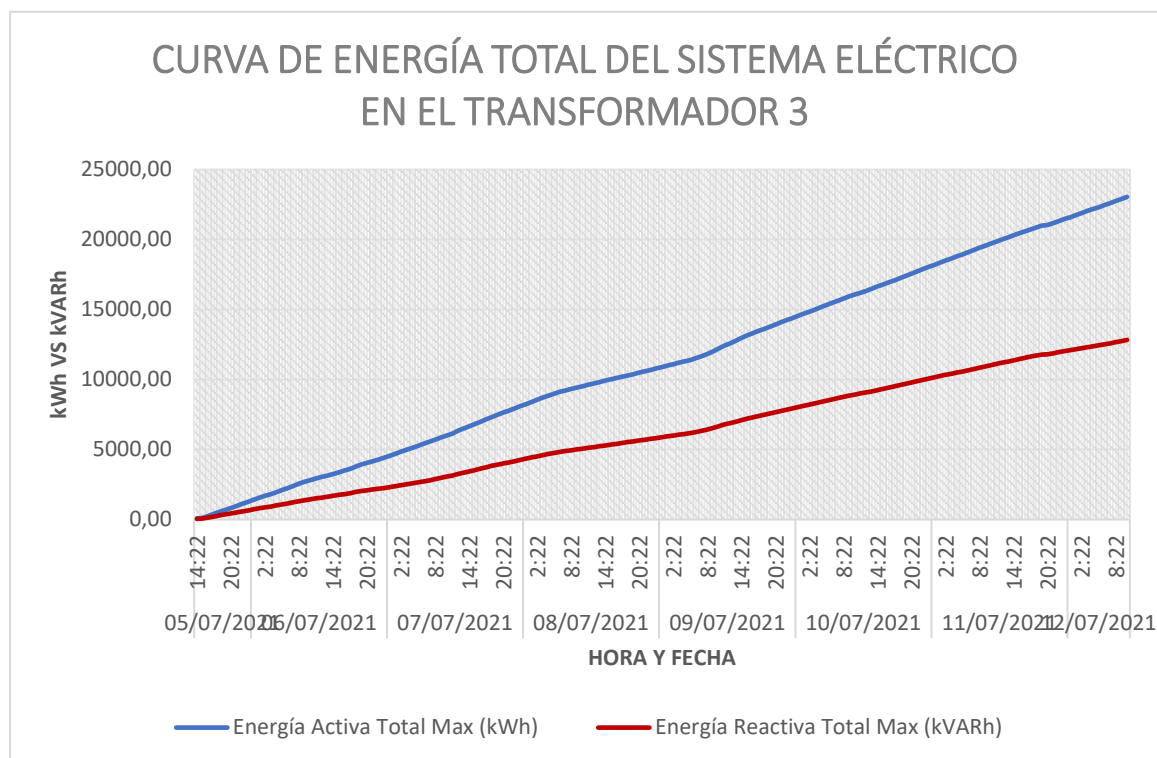


Figura 37. Curva de energía del sistema eléctrico en el transformador 3.

5.7. ARMÓNICOS DE VOLTAJE

5.7.1. THD de Voltaje

Para determinar si la industria tiene presencia de armónicos de voltaje, hay que analizar el nivel de THD de voltaje que tiene la industria.

De acuerdo con la regulación IEEE - 519, el nivel del voltaje de la industria corresponde a $V \leq 1.0 \text{ kV}$, por lo tanto, el valor establecido del THD de voltaje está por debajo del 8 %.

Tabla 19. Niveles permitidos de armónicos de voltaje por la norma IEEE - 519 [14].

Voltaje de bus V en Pcc	Individual Armónico (%)	Armónico Total distorsión THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ Kv} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ Kv} < V$	1.0	1.5

De acuerdo con los datos registrados por el analizador de energía, se obtiene los siguientes resultados que se detallan en la tabla 20.

Tabla 20. Taza de Distorsión Armónica de Voltaje en los tres transformadores.

	THD V_A	THD V_B	THD V_C	THD DE VOLTAJE TOTAL	IEEE 519
Transformador 1	2,99	2,99	3,00	2,99	Cumple
Transformador 2	1,35	1,36	1,31	1,34	Cumple
Transformador 3	1,11	1,10	1,03	1,08	Cumple

Como se puede visualizar en la tabla anterior que el sistema eléctrico presenta un THD de voltaje que no exceda a la norma ya que se encuentra por debajo del 8 %, por lo tanto, se puede concluir que no existe armónicos individuales de voltaje.

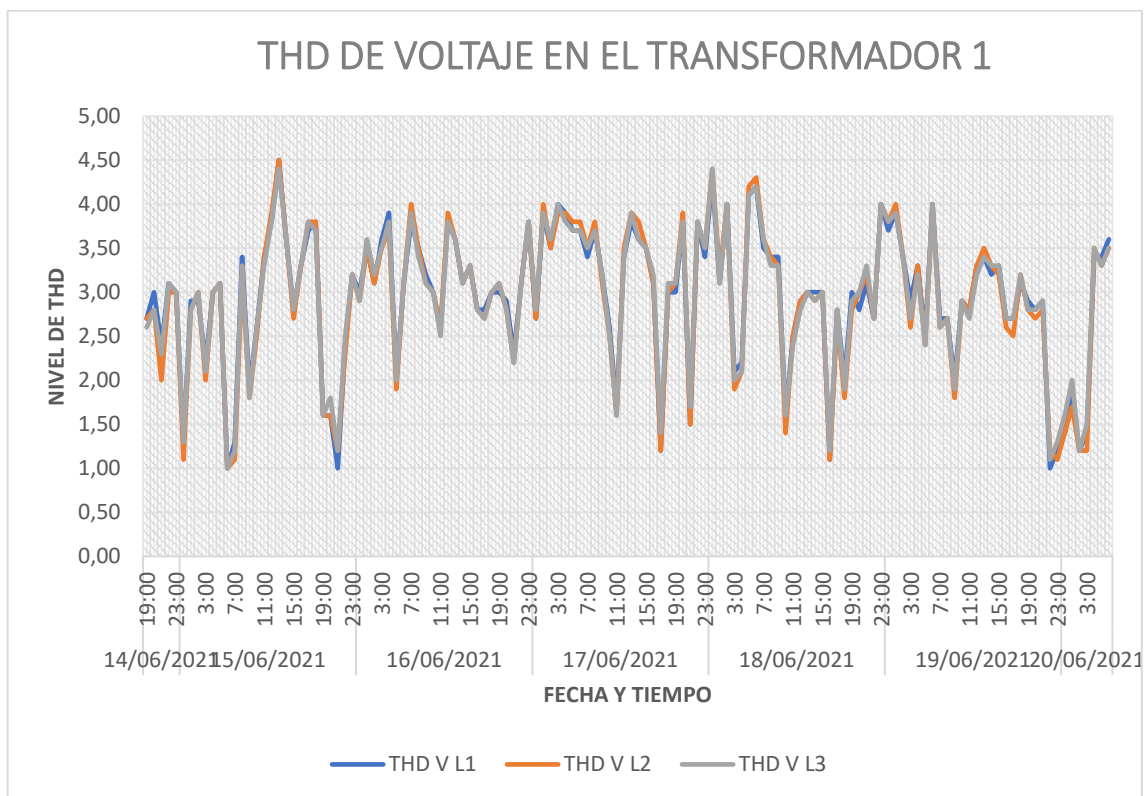


Figura 38. Nivel de THD de voltaje en el transformador 1.

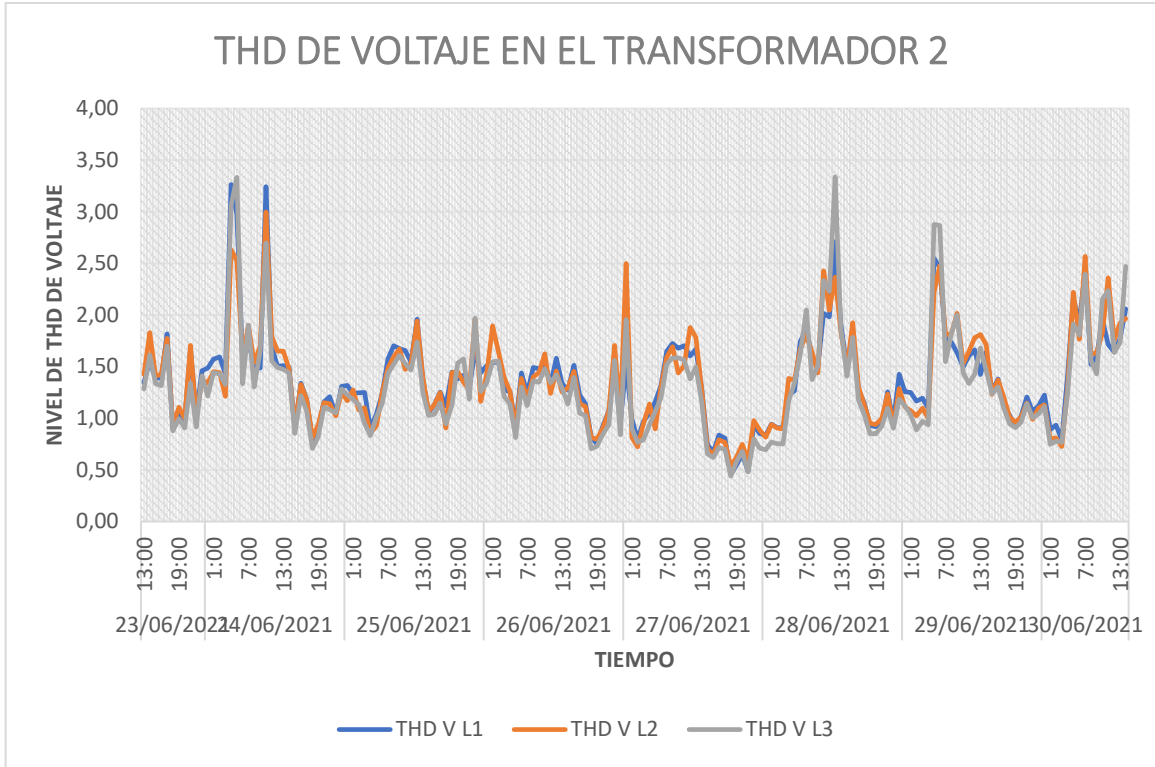


Figura 39. Nivel de THD de voltaje en el transformador 2.

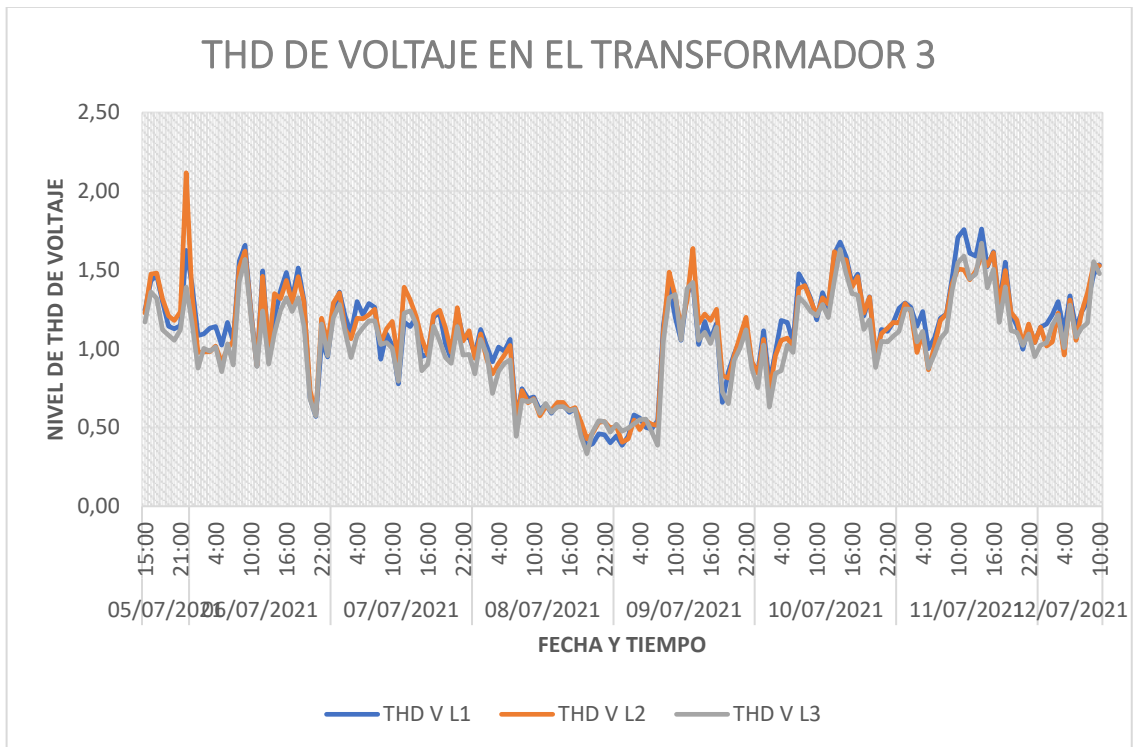


Figura 40. Nivel de THD de voltaje en el transformador 3.

5.7.2. Armónicos Individuales de Voltajes

Se analiza si el sistema eléctrico presenta armónicos de voltaje, basándose la regulación IEEE-519 y se determina si estos valores cumplen con lo establecido por la regulación.

De acuerdo con la regulación internacional los armónicos individuales de voltaje deben estar por debajo del 5 %.

Tabla 21. Armónicos individuales de voltaje en los tres transformadores.

	Nivel de Referencia	Transformador 1	Transformador 2	Transformador 3	IEEE 519
Armónico 3	5%	0,09%	0,44%	4,24%	Cumple
Armónico 5	5%	4,14%	2,22%	2,38%	Cumple
Armónico 7	5%	2,27%	1,67%	1,26%	Cumple
Armónico 9	5%	0,30%	0,36%	0,44%	Cumple
Armónico 11	5%	1,69%	1,41%	1,04%	Cumple

De acuerdo con la tabla 21, se puede visualizar que no existe la presencia de armónicos individuales de voltaje en los tres transformadores cuyos valores cumplen los rangos dispuestos por la normativa.

De acuerdo con la figura 41, se observa que el armónico más elevado que presenta el transformador 1 es el quinto armónico con 4,14 %, el mismo que está por debajo del 5 % impuesto por la norma.

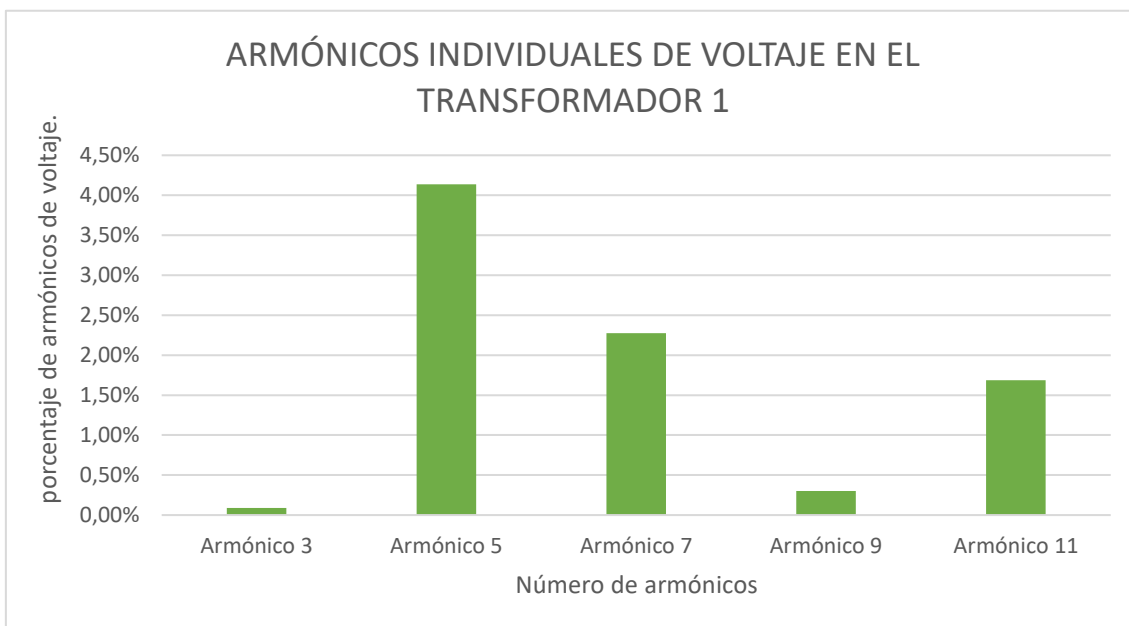


Figura 41. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 1.

De acuerdo con la figura 42, se observa que el armónico más elevado que presenta el transformador 2 es el quinto armónico con 2,22 %, el mismo que está por debajo del 5 % impuesto por la norma.

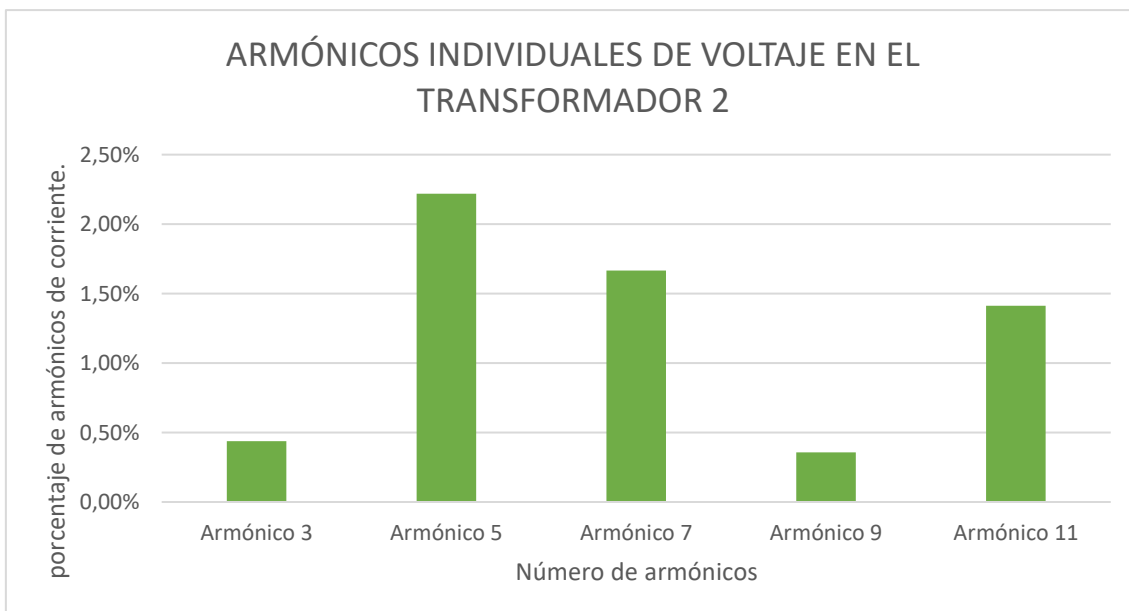


Figura 42. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 2.

De acuerdo con la figura 43, se observa que el armónico más elevado que presenta el transformador 3 es el quinto armónico con 4,24 %, el mismo que está por debajo del 5 % impuesto por la norma.

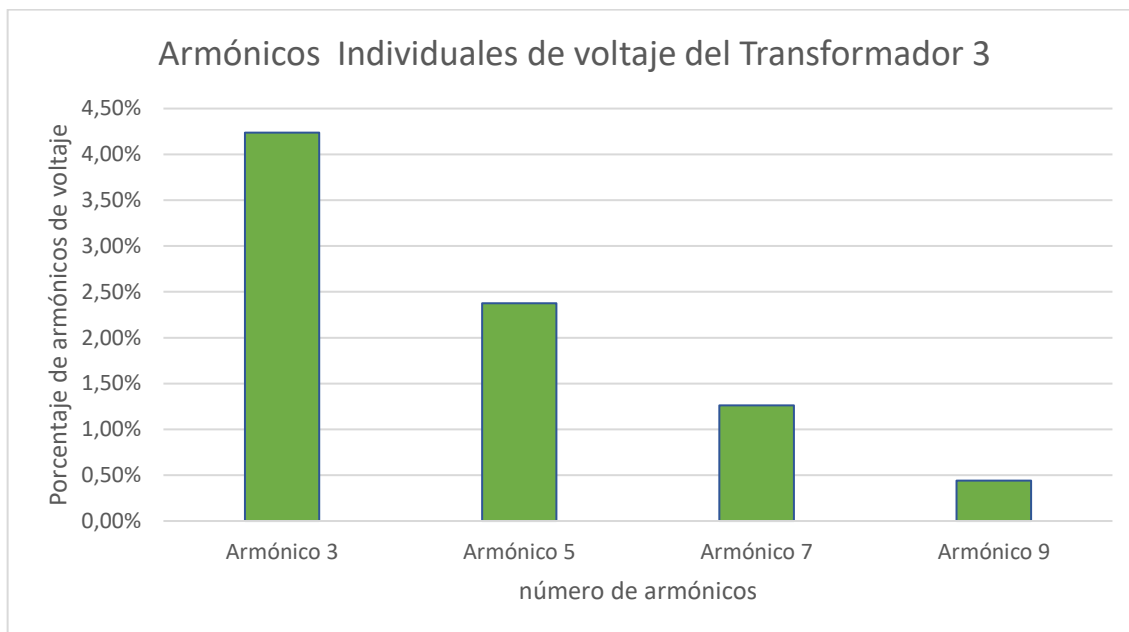


Figura 43. Nivel de armónicos de voltaje individuales en el transformador 3.

5.8. ARMÓNICOS DE CORRIENTE

5.8.1. TDD de Corriente

La distorsión total de la demanda TDD es la distorsión armónica basada en la máxima corriente de demanda (componente fundamental). Es una medida de la distorsión armónica total de la corriente en el PCC (punto de conexión común) para la carga total conectada.

De acuerdo con 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, así:

$$\alpha = \frac{I_{cc}}{I_{Lpu}} \quad (5.4)$$

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se necesita saber el valor de la reactancia en por unidad, dato que viene dado en la placa de datos que es igual a $X_{pu} = 2,8 \%$. La corriente de cortocircuito viene dada por la siguiente fórmula:

$$I_L = \frac{1}{X_{pu}} \quad (5.5)$$

$$I_{cc} = \frac{1}{0,028} \quad (5.6)$$

$$I_{cc} = 35,71 \text{ A} \quad (5.7)$$

Se debe calcular la corriente de línea para esto se utilizará la siguiente fórmula:

$$I_L = \frac{S}{V * \sqrt{3}} \quad (5.8)$$

$$I_L = \frac{600000 \text{ VA}}{140V * \sqrt{3}} \quad (5.9)$$

$$I_L = 787,30 \text{ A} \quad (5.10)$$

Estos datos calculados son los mismos para los tres transformadores, ya que presentan la misma potencia. Se debe calcular la Corriente de Línea por unidad para determinar la Taza de Distorsión de la Demanda y los armónicos individuales de Corriente.

5.8.2. TDD de Corriente del Transformador 1

Tabla 22. Corrientes del Transformador 1.

FASES	X _{pu}	I _{cc} (A)	I línea (pu)	I _{cc} /I línea pu
I ₁	0,028	35,71	0,76	46,79
I ₂	0,028	35,71	0,77	46,09
I ₃	0,028	35,71	0,79	45,06

De acuerdo con la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea $\frac{I_{cc}}{I_{Lpu}}$ está dentro del rango $20 < 50$, lo que corresponde un valor de TDD correspondiente al 8% tal como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23. Límites de distorsión de corriente [14].

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I_L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.5	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	0.7	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Donde:
 I_{sc} =máxima corriente de cortocircuito en el PCC
 I_L =máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC

De acuerdo con los datos registrados por el analizador de energía, se obtiene los siguientes resultados de TDD que se detallan en la tabla 24.

Tabla 24. TDD de corriente del transformador 1.

TDD CORRIENTE	TDD PROMEDIO	TDD IA	TDD IB	TDD IC	NIVELES DE REFERENCIA A	IEEE 519
TDD Promedio	20,36%	21,15%	19,90%	20,01	8%	No cumple

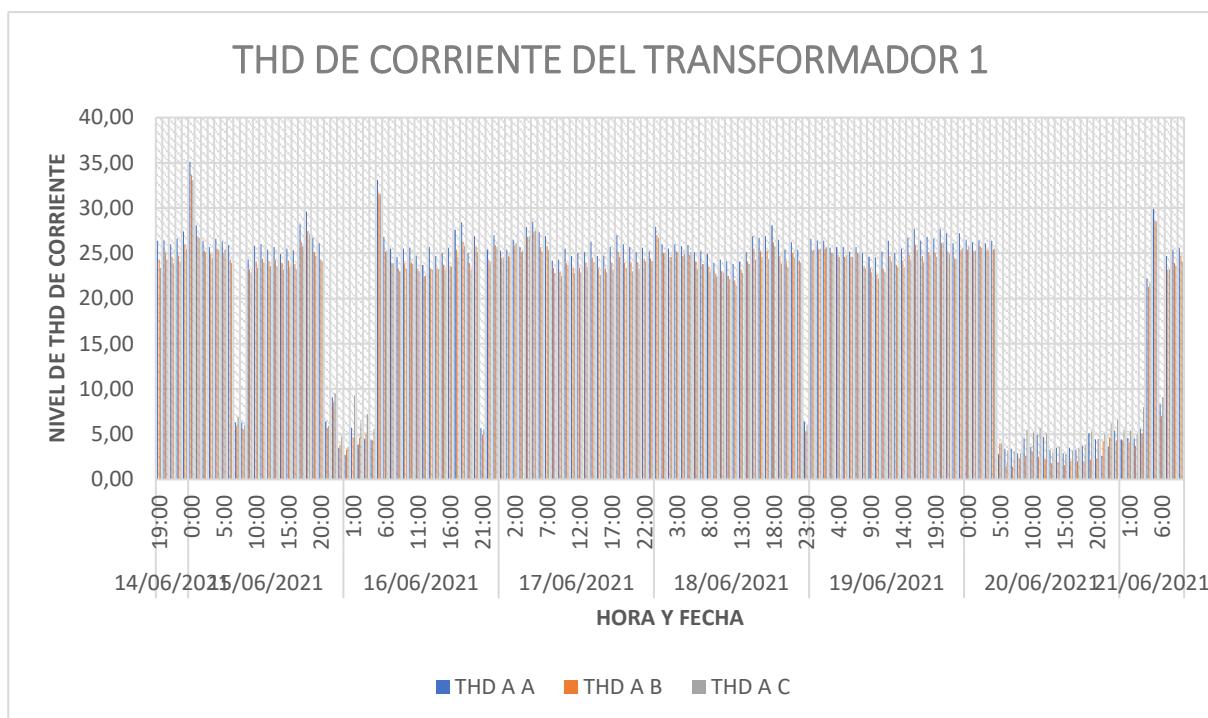


Figura 44. THD de corriente del transformador 1.

El límite del TDD de corriente de las tres líneas está en promedio del 20.38 %, el mismo que esta fuera del rango establecido por la regulación, eso indica que si hay la presencia de corriente en las fases.

5.8.3. Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 1

De acuerdo con la regulación internacional los armónicos individuales de Corriente deben estar por debajo del 7 % los armónicos que sean menores al orden 11 y por debajo del 3.5 % para los armónicos que sean mayores que el orden 11.

Tabla 25. Anómicos individuales de corriente del transformador 1.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE		IEEE - 519	OBSERVACIONES
Número de Armónicos	TOTAL DE ARMÓNICOS	Rangos Establecidos	
Armónico 3	13,94%	7,00%	No Cumple
Armónico 5	18,22%	7,00%	No Cumple
Armónico 7	8,15%	7,00%	Cumple
Armónico 9	10,39%	7,00%	Cumple
Armónico 11	13,78%	3,50%	No Cumple

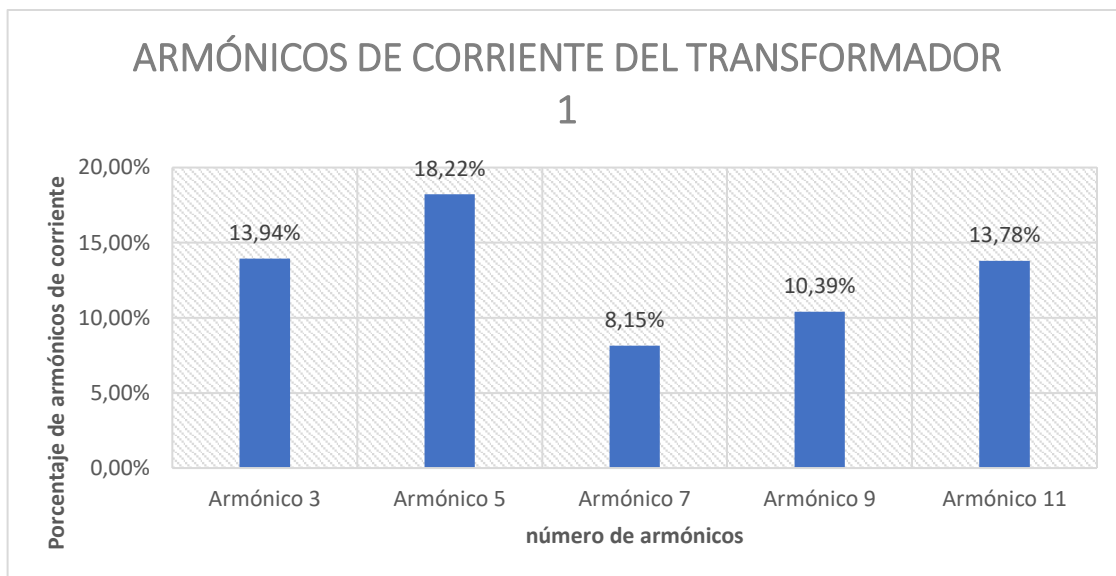


Figura 45. Número de armónicos de corriente en el transformador 1.

De acuerdo con los datos analizados, se puede determinar que el transformador 1, tiene armónicos de corriente con mayor porcentaje el armónico quinto con un valor del 18,22 %.

5.8.4. TDD de Corriente del Transformador 2

Tabla 26. Corriente del transformador 2.

FASES	Xpu	Icc(A)	I línea(pu)	Icc/I línea p.u
I ₁	0,028	35,71	0,95	37,61
I ₂	0,028	35,71	0,92	38,80
I ₃	0,028	35,71	0,90	39,55

De acuerdo con la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea $\frac{I_{cc}}{I_{Lpu}}$ está dentro del rango $20 < 50$, lo que corresponde un valor de TDD correspondiente al 8 %, tal como lo estipula norma en la tabla 23.

De acuerdo con los datos registrados por el analizador de energía, se obtiene los siguientes resultados de TDD que se detallan en la tabla 27.

Tabla 27. TDD de Corriente del Transformador 2.

TDD CORRIENTE	TDD PROMEDIO	TDD Ia	TDD Ib	TDD Ic	NIVELES DE REFERENCIA	IEEE 519
TDD Promedio	18,39%	21,76%	30,09%	20,01	8%	No cumple

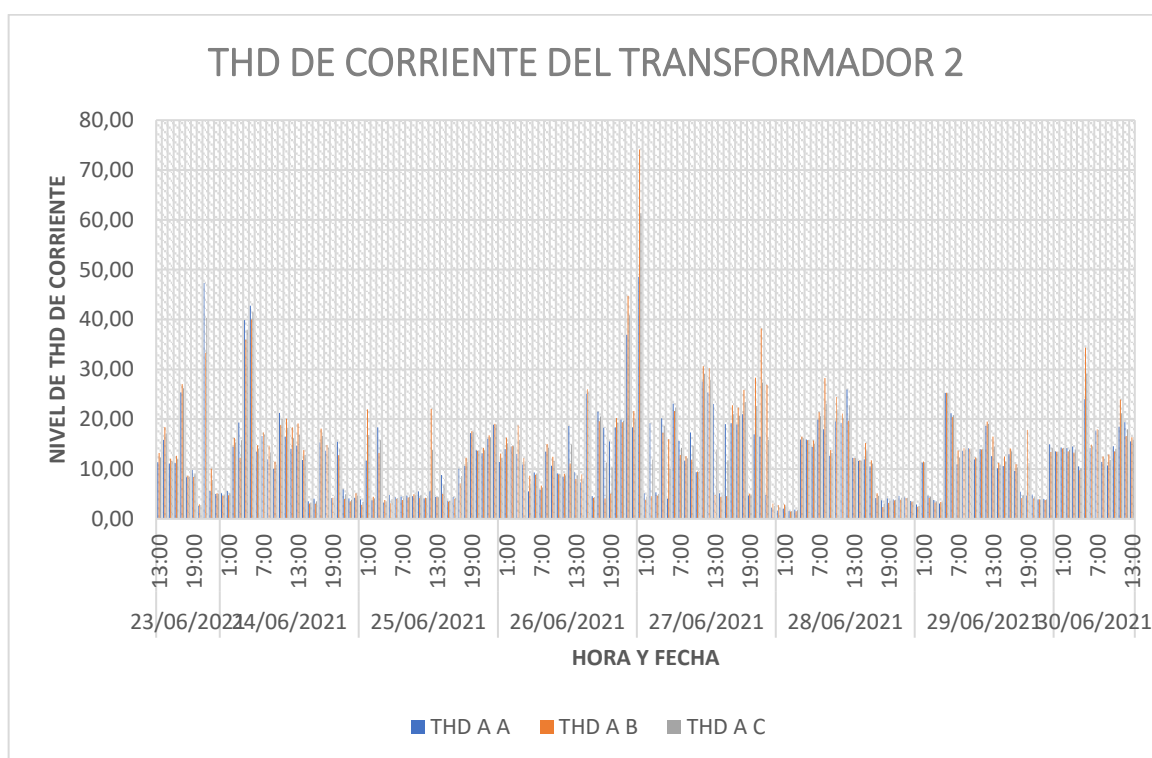


Figura 46. THD de corriente del transformador 2.

El límite de TDD de corriente de las tres líneas están en un promedio del 18,39 %, el mismo que está fuera de los rangos estipulados por la regulación, eso indica que existe la presencia de armónicos de corriente en las fases.

5.8.5. Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 2

De acuerdo con la regulación internacional los armónicos individuales de corriente deben estar por debajo del 7 % los armónicos que sean menores al orden 11 y por debajo del 3.5 % para los armónicos que sean mayores que el orden 11.

La tabla 28, representa el valor total de los armónicos de corriente. De acuerdo con los datos tabulados obtuvimos los siguientes resultados.

Tabla 28. Armónicos individuales de corriente del transformador 2.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE		IEEE - 519	OBSERVACIONES
Número de Armónicos	TOTAL DE ARMÓNICOS	Rangos Establecidos	
Armónico 3	3,01%	7,00%	Cumple
Armónico 5	19,41%	7,00%	No Cumple
Armónico 7	23,06%	7,00%	No Cumple
Armónico 9	13,31%	7,00%	No Cumple
Armónico 11	19,94%	3,50%	No Cumple

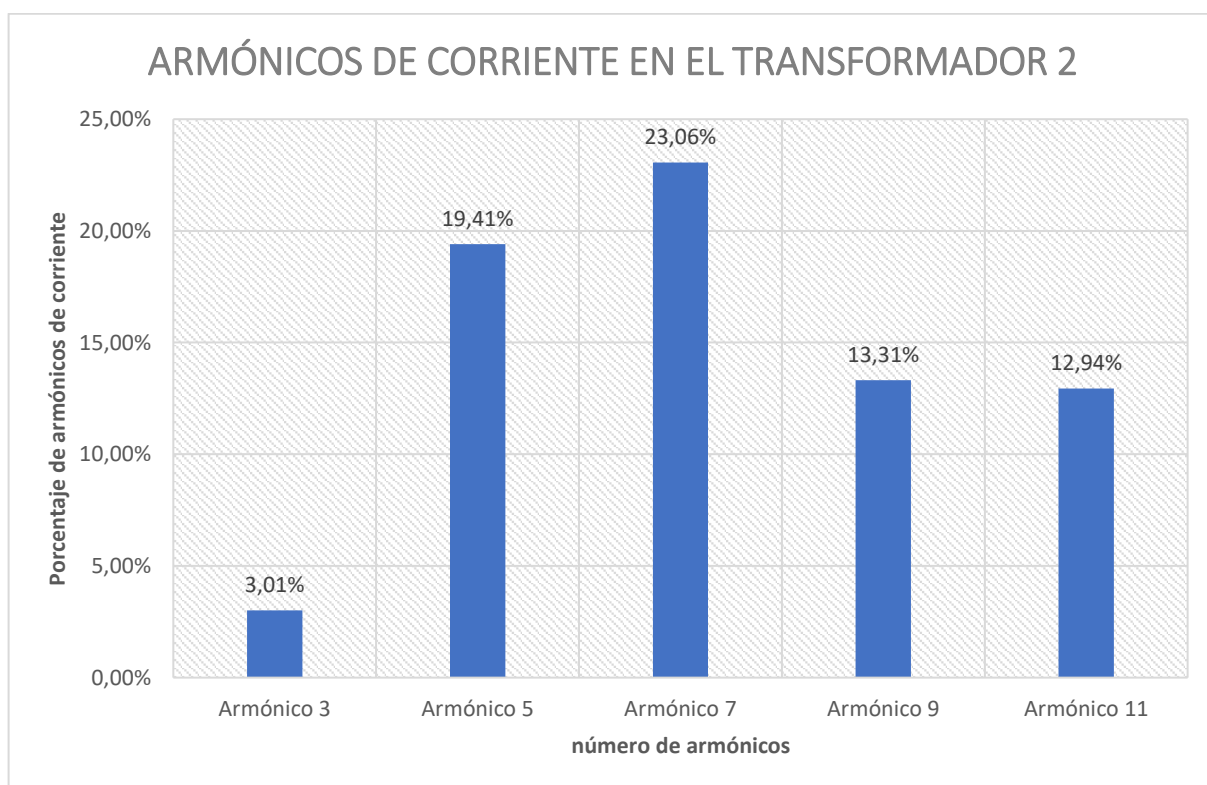


Figura 47. Número de armónicos de corriente en el transformador 2.

De acuerdo con los datos analizados, se puede determinar que el transformador 2, tiene armónicos de corriente con mayor porcentaje el armónico séptimo con un valor de 23,06 %.

5.8.6. TDD de Corriente del Transformador 3

Tabla 29. TDD de corriente del transformador 3.

FASES	Xpu	Icc(A)	I línea (pu)	Icc/I línea pu
I ₁	0,028	35,71	0,53	66,87
I ₂	0,028	35,71	0,53	67,06
I ₃	0,028	35,71	0,55	64,93

De acuerdo con la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de línea $\frac{I_{cc}}{I_{Lpu}}$ está dentro del rango $50 < 100$, lo que corresponde un valor de TDD correspondiente al 12%, tal como lo estipula la norma en la tabla 30.

Tabla 30. Límites de distorsión de corriente [14].

Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución en General (desde 120 V hasta 69.000 V)						
Máxima Distorsión de Corriente Armónica en Porcentaje de I _L						
Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
$\frac{I_{sc}}{I_L}$	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.5	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	0.7	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Donde:

I_{sc}=máxima corriente de cortocircuito en el PCC
 I_L=máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC

De acuerdo con los datos registrados por el analizador de energía, se obtiene los siguientes resultados de TDD que se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 31. TDD de corriente del transformador 3.

TDD CORRIENTE	TDD PROMEDIO	TDD Ia	TDD Ib	TDD Ic	NIVELES DE REFERENCIA	IEEE 519
TDD Promedio	18,34%	12,21%	12,65%	30,17%	12%	No cumple

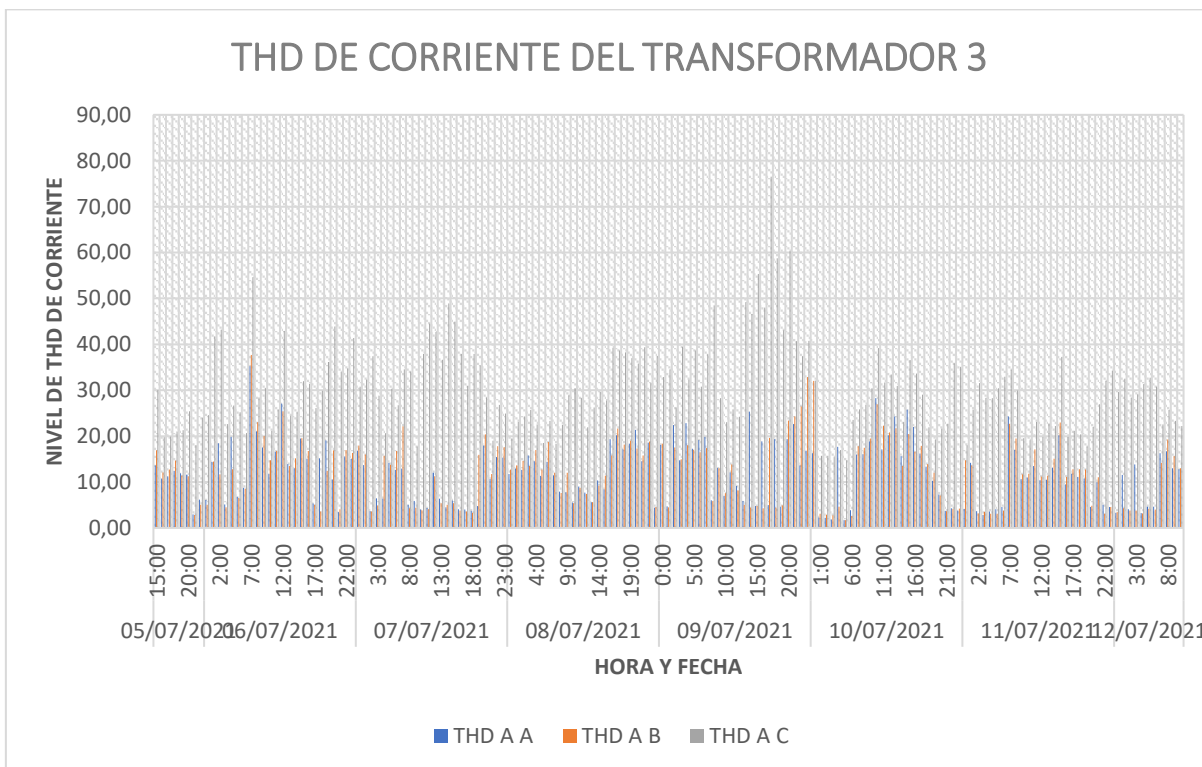


Figura 48. THD de corriente del transformador 3.

El límite de TDD de corriente de las tres líneas está en promedio del 18.34 %, el mismo que está fuera de los rangos establecidos por la regulación, eso indica que si existe presencia de armónicos de corriente en las fases.

5.9. ANÁLISIS DE FLICKERS

Otra de las perturbaciones a analizar en la calidad de energía es la presencia de flickers en el sistema eléctrico. La regulación que establece el nivel normal de flickers en el sistema eléctrico es la ARCERNNR 002/20 que indica que los flickers no debe superar a la unidad.

El análisis se realiza por transformadores, indicando sus puntos máximos, tal como se indica a continuación:

5.9.1. Transformador 1

Tabla 32. Análisis de flickers en el transformador 1.

Fecha	Hora	Flicker	Pst AN	Pst BN	Pst CN	TOTAL	ARCERNNR 002/20
20/06/2021	20:35	Flicker Mínimo	0,02	0,01	0,02	0,05	Cumple con la regulación
14/06/2021	10:10	Flicker Máximo	0,12	0,14	0,14	0,40	Cumple con la regulación

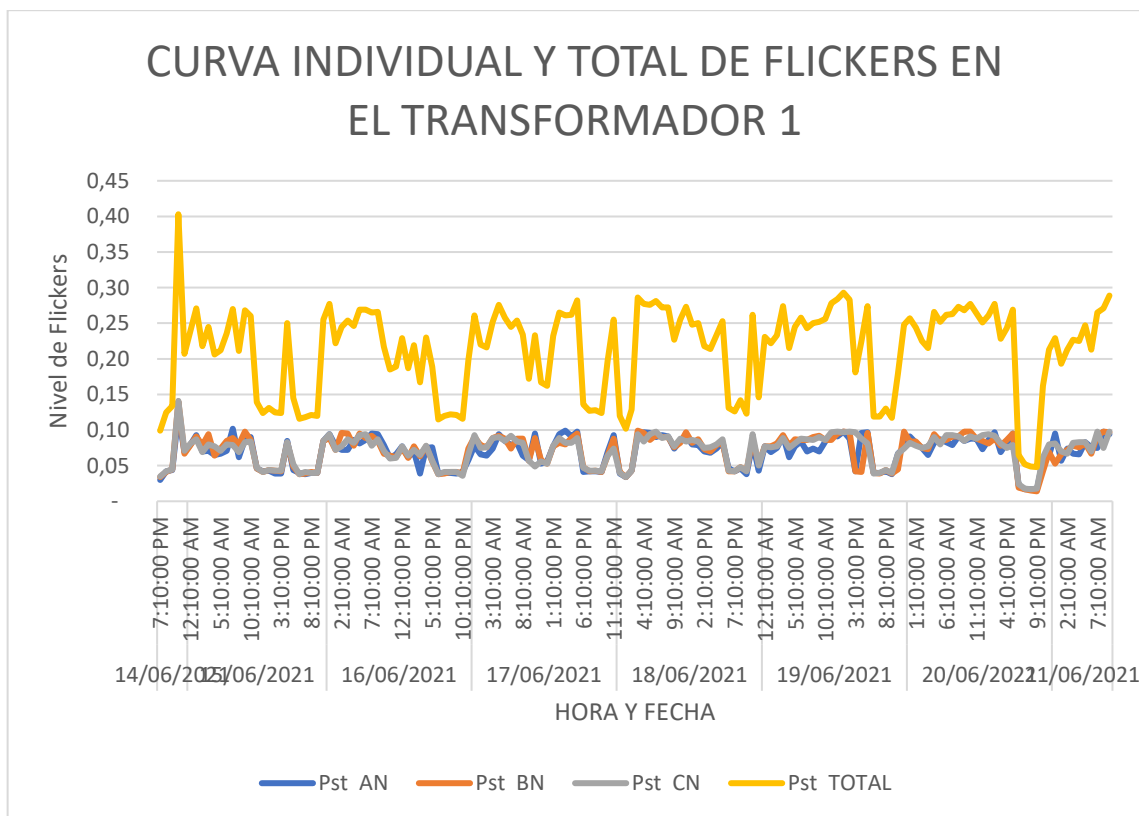


Figura 49. Curva individual y total de flickers en el transformador 1.

De acuerdo con los datos tabulados, se puede determinar que el valor máximo total de flicker es de 0,40. Por lo tanto el transformador 1 no presenta flickers.

5.9.2. Transformador 2

Tabla 33. Análisis de flickers en el transformador 2.

Fecha	Hora	Flicker	Pst AN	Pst BN	Pst CN	TOTAL	ARCERNR 002/20
27/06/2021	18:40	Flicker Mínimo	0,01	0,01	0,01	0,03	Cumple con la regulación
26/06/2021	22:15	Flicker Máximo	0,22	0,22	0,23	0,67	Cumple con la regulación

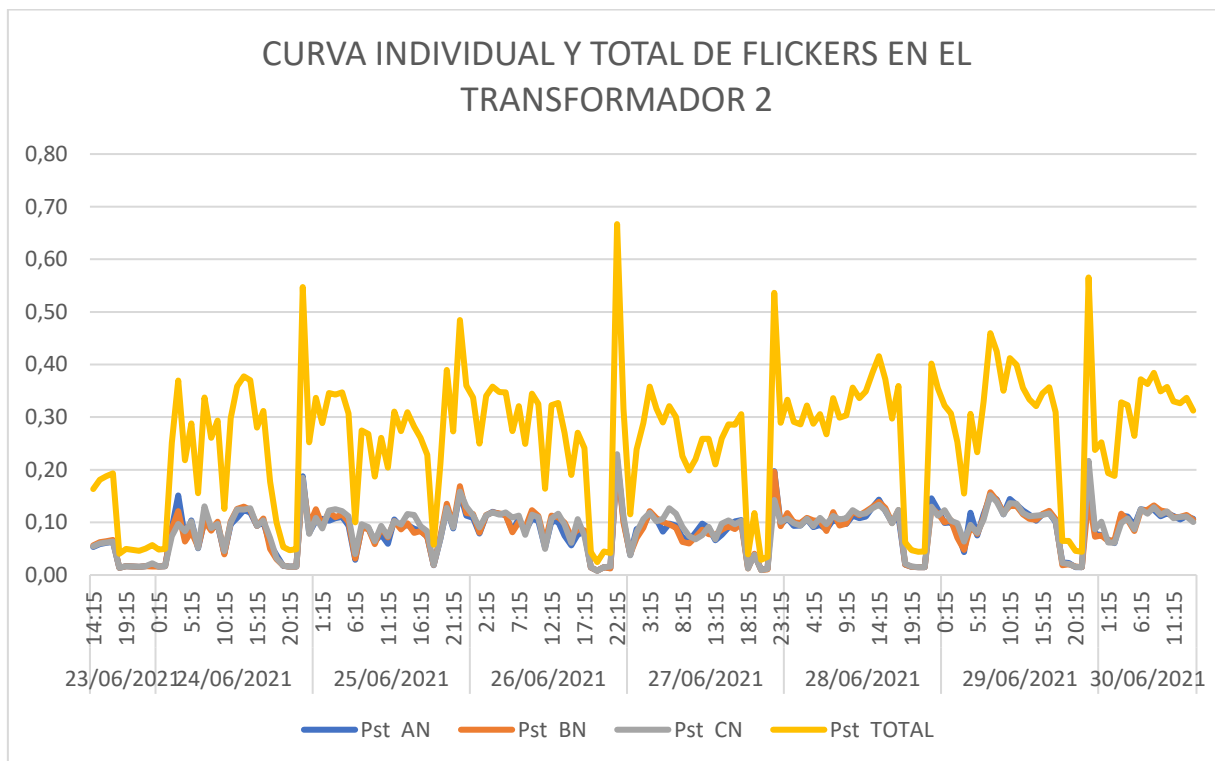


Figura 50. Curva individual y total de flickers en el transformador 2.

El valor máximo de los flickers en el transformador 2 es de 0,67 dicho valor se encuentra dentro de la unidad que dicta la regulación, por lo tanto, el transformador 2, no presenta flickers.

5.9.3. Transformador 3

Tabla 34. Análisis de flickers en el transformador 3.

Fecha	Hora	Flicker	Pst AN	Pst BN	Pst CN	TOTAL	ARCERNR 002/20
27/06/2021	18:40	Flicker Mínimo	0,03	0,04	0,11	0,18	Cumple con la regulación
26/06/2021	22:15	Flicker Máximo	1,23	1,18	1,18	3,59	No Cumple con la regulación

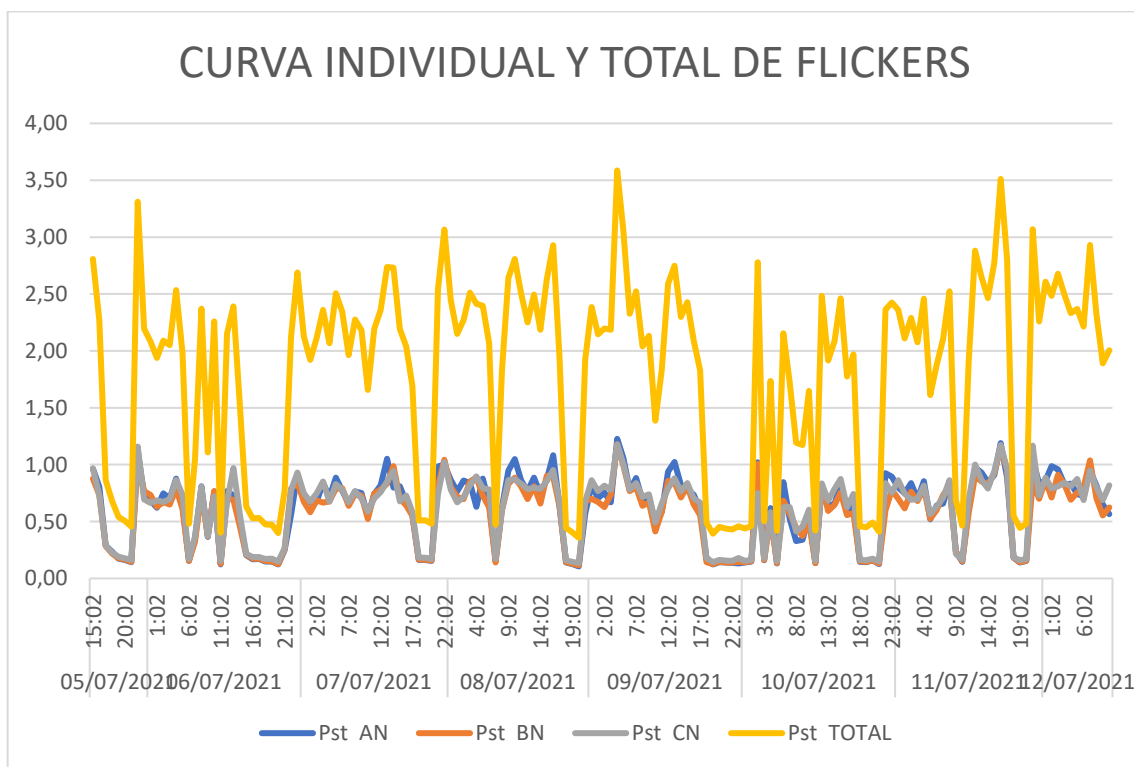


Figura 51. Curva individual y total de flickers en el transformador 3.

En el transformador 3, se puede determinar que el flicker máximo total es de 3,59 el mismo que se encuentra sobre la unidad que señala la norma. Por lo tanto, el transformador 3 presenta flickers. Es recomendable realizar los cambios necesarios para contrarrestar los flickers, como el cambio de luminarias más eficientes.

5.9.4. Armónicos Individuales de Corriente del Transformador 3

De acuerdo con la regulación internacional los armónicos individuales de corriente deben estar por debajo del 10 % los armónicos que sean menores al orden 11 y por debajo del 4.5 % para los armónicos que sean mayores que el orden 11.

La tabla 35, representa el valor total de los armónicos de corriente. De acuerdo con los datos tabulados obtuvimos los siguientes resultados.

Tabla 35. Armónicos individuales de corriente en el transformador 3.

ARMÓNICOS DE CORRIENTE		IEEE - 519	OBSERVACIONES
Número de Armónicos	TOTAL DE ARMÓNICOS	Rangos Establecidos	
Armónico 3	17,93%	10,0%	No Cumple
Armónico 5	10,73%	10,0%	No Cumple
Armónico 7	8,05%	10,0%	No Cumple
Armónico 9	4,71%	10,0%	Cumple
Armónico 11	6,03%	4,5%	No Cumple

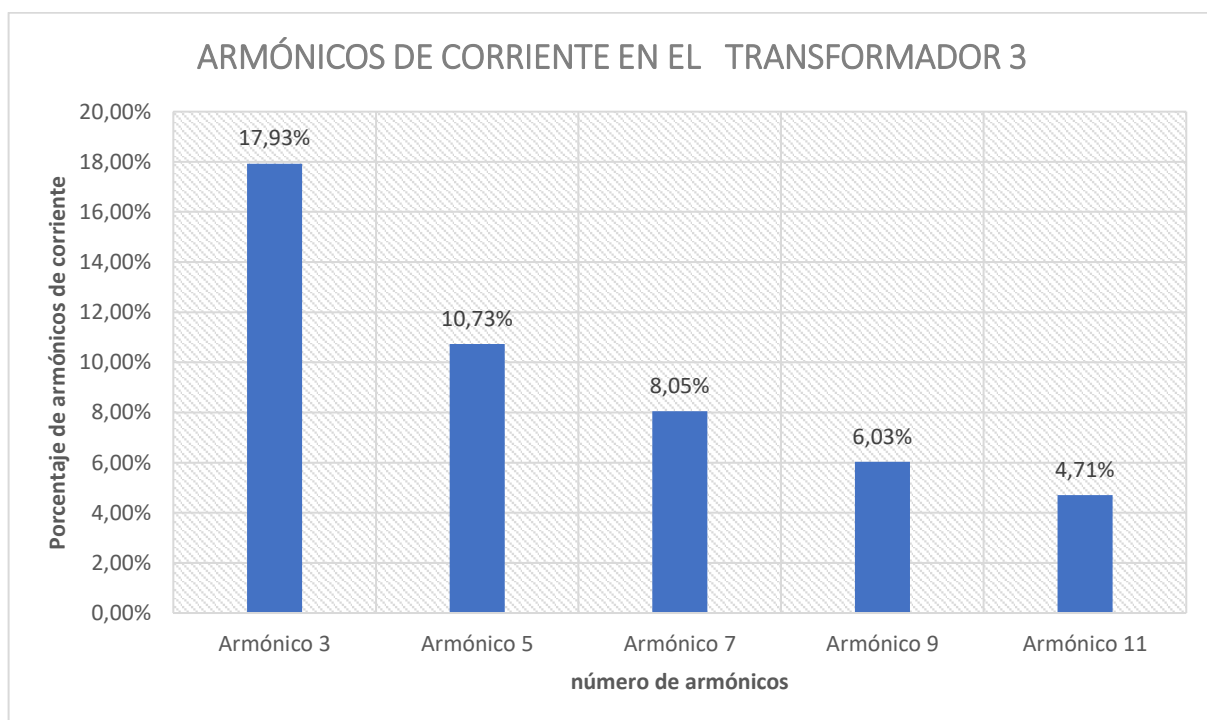


Figura 52. Número de armónicos de corriente en el transformador 3.

De acuerdo con los datos analizados, se puede determinar que el transformador 3, tiene armónicos de corriente con mayor porcentaje el armónico tercero con un porcentaje del 17,93 %.

5.10. ANÁLISIS DE SAGS Y SWELLS

Para el análisis de la calidad de energía eléctrica, se debe analizar los sags (depressiones) que son breves caídas del voltaje que aparece en el sistema eléctrico de forma ocasional a valores comprendido entre 0,1 pu y 0.9 pu.

Otro de los parámetros a analizar son los swells (elevaciones), que representan el incremento en el valor RMS del voltaje, con una duración entre medio ciclo y un minuto, los valores típicos son 1.1 pu a 1.8 pu.

Tanto las depressiones como las elevaciones de voltaje están asociadas comúnmente con las condiciones de falla de las instalaciones eléctricas. Por lo expuesto anteriormente es necesario realizar el análisis de estos parámetros eléctricos para determinar si la red eléctrica del área de extrusión no presenta estos problemas. Estos análisis se hacen por cada transformador.

La norma que determina el nivel de cumplimiento de las perturbaciones es la IEEE 1159 std, dichos niveles se indica en la tabla 36.

Tabla 36. Valores típicos de perturbaciones.

Perturbaciones	Duración típica	Magnitud típica de Voltaje
Sag	0.5 – 30 cycles	0,1 – 0,9
Swell	0.5 – 30 cycles	1,1 – 1,2

5.10.1. Transformador 1

En el transformador 1, se obtiene los datos RMS del voltaje, con sus valores mínimos y máximos por línea así se puede determinar sus variaciones y concluir si existen swells y sags.

En la tabla 37, se presenta los valores de voltaje rms, para así poder determinar si las dos variaciones cumplen la normativa.

Tabla 37. Valores de Voltaje RMS del Transformador 1

	Línea A	Línea B	Línea C
V_{max}	231,77	231,85	231,90
V_{min}	230,88	230,93	230,98

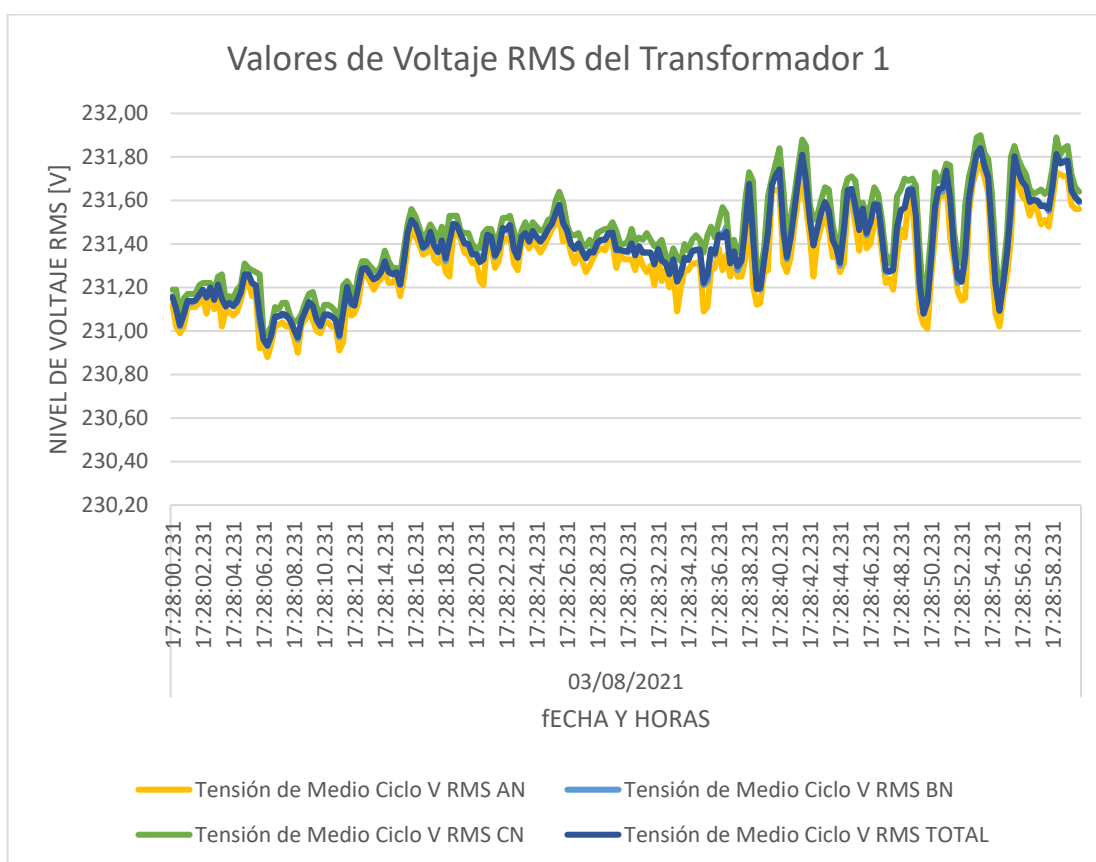


Figura 53. Curva de voltaje RMS del Transformador 1.

En la tabla 38, se representa las variaciones Sag y Swell, para así poder deducir si cumple o no con los niveles indicados por las normas.

Tabla 38. Valores de Voltaje RMS del Transformador 1.

	Valor de Variación	Referencia de Sag	Observaciones	Referencia de Swell	Observaciones
Línea A	0,89	0,1 – 0,9	Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea B	0,92	0,1 – 0,9	No Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea C	0,92	0,1 – 0,9	No Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple

Se puede verificar la presencia de Sags en la línea B y la línea C, mientras que los Swells existen en las tres líneas. Por lo que es necesario colocar dispositivos que mantenga el voltaje en su valor nominal.

5.10.2. Transformador 2

Para el transformador 2, se realiza el mismo procedimiento utilizando los datos del voltaje RMS y determinando sus valores mínimos y máximos.

En la tabla 4 se presenta los valores de voltaje rms, para así poder determinar las variaciones entre líneas.

Tabla 39. Valores de Voltaje RMS del Transformador 2.

	Línea A	Línea B	Línea C
V_{max}	233,66	233,67	233,68
V_{min}	234,68	234,69	234,70

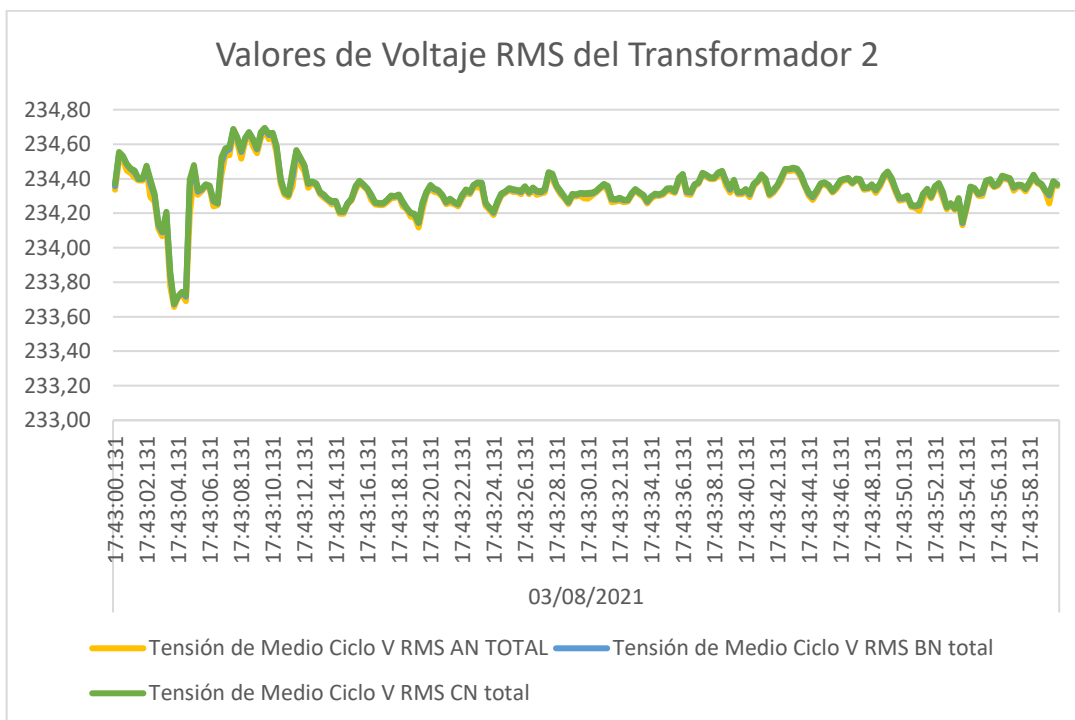


Figura 54. Curva de voltaje RMS del Transformador 2.

En la tabla 40, se representa las variaciones de Sag y Swell, para así poder deducir si cumple o no con los niveles indicados por las normas.

Tabla 40. Valores de Voltaje RMS del Transformador 2.

	Valor de Variación	Referencia de Sag	Observaciones	Referencia de Swell	Observaciones
Línea A	0,1	0,1 – 0,9	Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea B	0,1	0,1 – 0,9	Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea C	0,2	0,1 – 0,9	Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple

En el sistema eléctrico del transformador 2, se analiza que no existe la presencia de Sags en las tres líneas, mientras que los Swells existen en las tres líneas, es necesario corregir este error.

5.10.3. Transformador 3

Para la red eléctrica del transformador 3 se toma los valores RMS de voltaje como lo indica la regulación, presentando sus valores mínimos y máximos.

En la tabla 41, se presenta los valores de voltaje rms por cada línea y así visualizar las variaciones entre líneas.

Tabla 41. Valores de Voltaje RMS del Transformador 3.

	Línea A	Línea B	Línea C
V_{max}	229,75	229,79	229,87
V_{min}	230,78	230,87	230,94

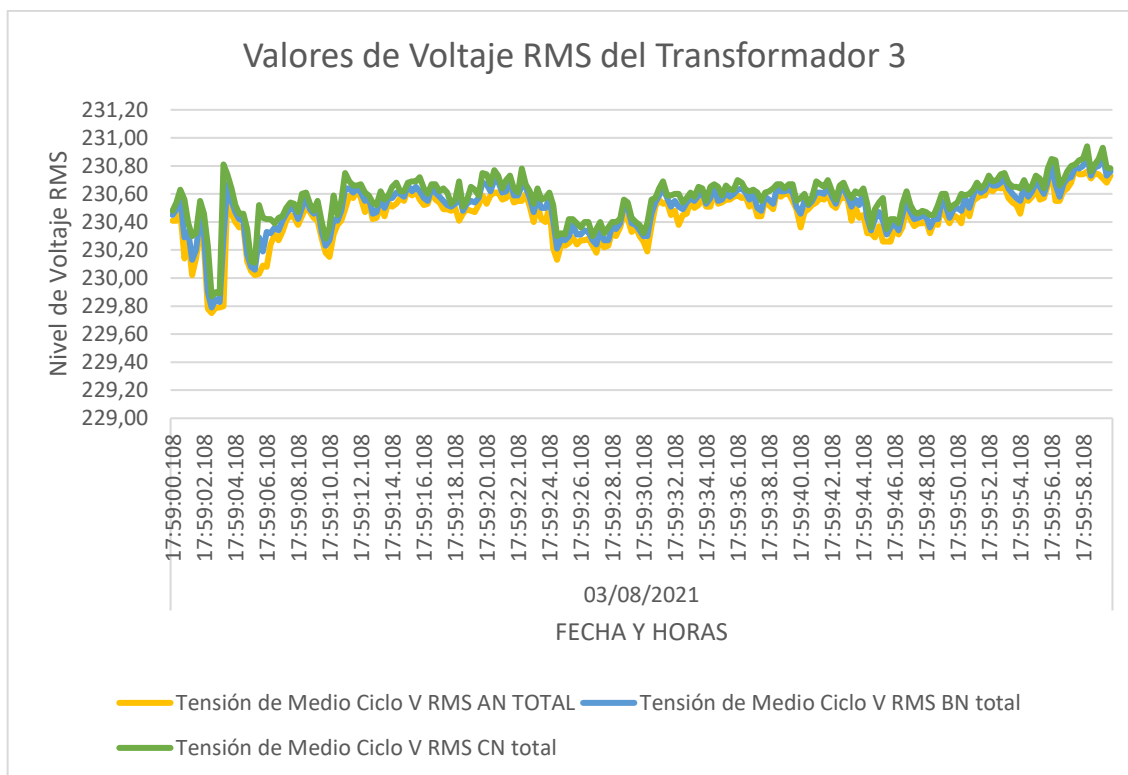


Figura 55. Curva de voltaje RMS del Transformador 3.

En la tabla 42, se compara los valores de variación de voltaje para determinar si estos presentan sags o swells.

Tabla 42. Valores de Voltaje RMS del Transformador 3.

	Valor de Variación	Referencia de Sag	Observaciones	Referencia de Swell	Observaciones
Línea A	1,03	0,1 – 0,9	No Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea B	1,08	0,1 – 0,9	No Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple
Línea C	1,07	0,1 – 0,9	No Cumple	1,1 – 1,2	No Cumple

En el sistema eléctrico del transformador 3 se puede verificar que los sags y los swells se presentan en las tres líneas, por lo tanto, es necesario una corrección mediante dispositivos como los UPS para evitar estas perturbaciones y evitar subidas o descensos bruscos que puedan provocar el daño parcial o permanente de equipos.

5.11. SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE EASY POWER

5.11.1. Sistema inicial

Después de recopilar los datos correspondientes a los transformadores, cargas, conductores, y distancias presentes en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A, se modela el sistema a través del software EASY POWER.

Los parámetros ingresados para la simulación del segundo transformador son los siguientes:

- Transformador de e 13.8 kV a 440 V de 600 kVA, conductor del tipo TW 500 MCM, en el neutro cable TW de 400 MCM.
- Cargas instaladas y potencias (Ver tabla 10), conductores THWN de calibre 4/0.

Una vez modelado el sistema y configurado los parámetros iniciales se procede a simular y posteriormente indagar los resultados a fin de encontrar sobrecargas, ya sea en el transformador o en los conductores y las perturbaciones presentes en el sistema. La metodología para el diseño

de las simulaciones de los 3 transformadores en análisis sigue el proceso antes escrito (Ver Anexo D).

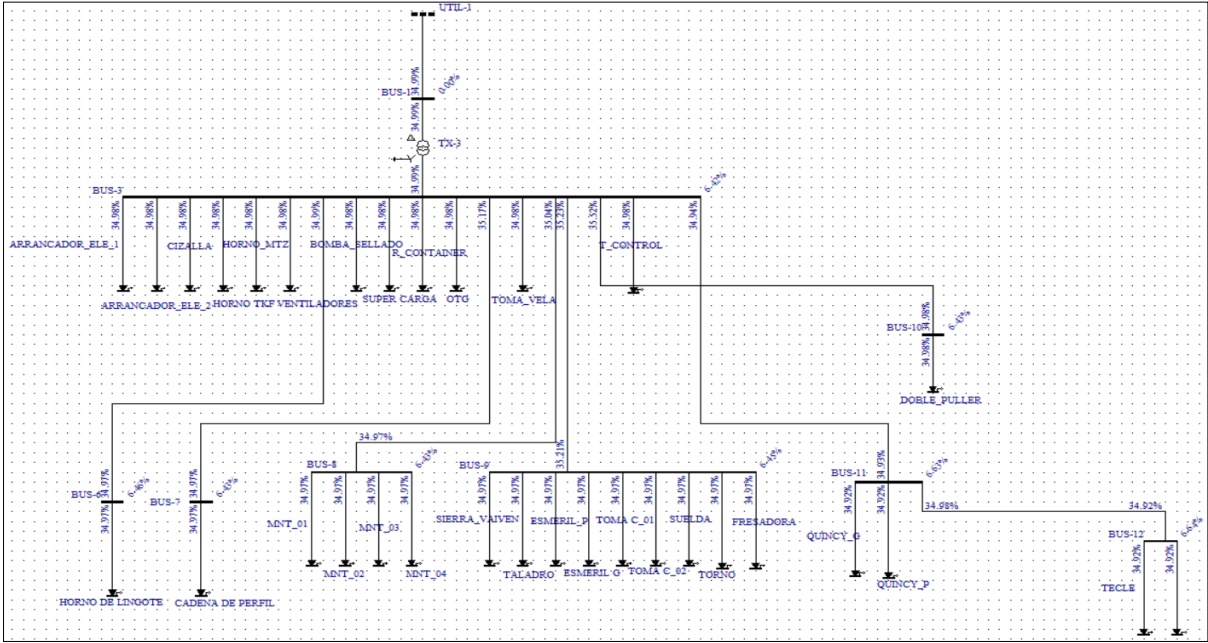


Figura 56. Simulación del sistema del transformador 2 en el software Easy Power.

5.11.2. Comparación de resultados entre el Analizador de Redes y el Simulador EASY POWER

5.11.3. Factor de Potencia

5.11.3.1. Transformador 1

Se realiza una comparación entre el factor de potencia del analizador y en el software Easy Power, cuyos valores se indican en la tabla 43.

Tabla 43. Comparación del factor de potencia del transformador 1.

	Analizador de Redes	Software Easy Power
Factor de Potencia del Sistema	0,89	0,88

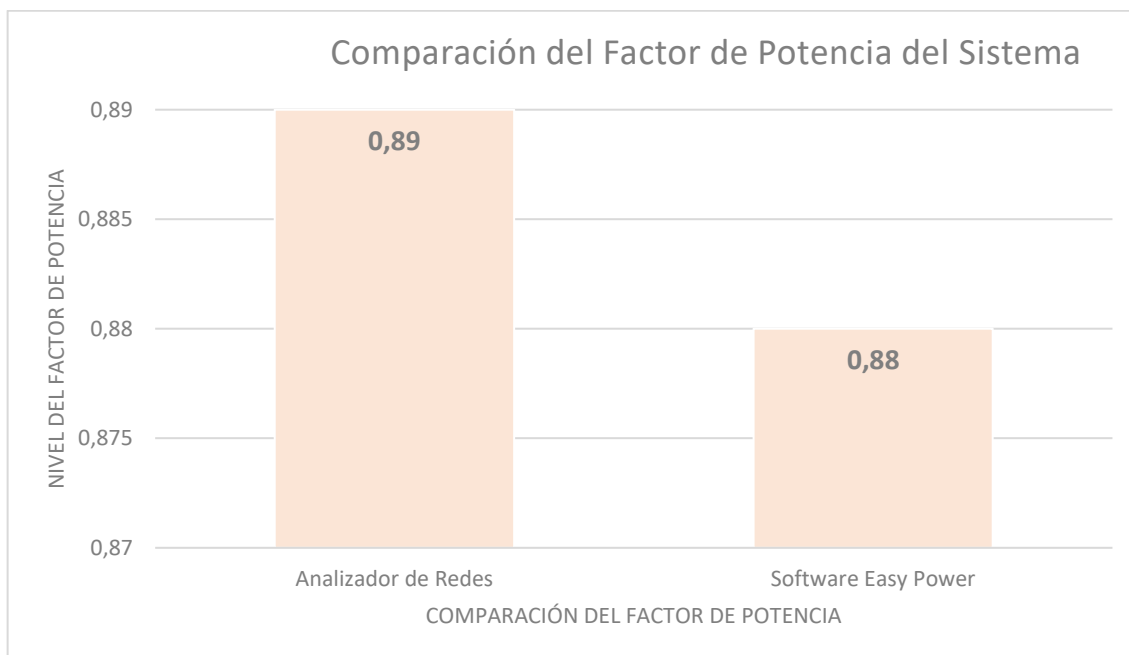


Figura 57. Comparación de los niveles del factor de potencia, del transformador 1.

De acuerdo con la Figura 57, se puede determinar que el factor de potencia se encuentra por debajo del 0,92 estipulado por el pliego tarifario. La diferencia entre los dos valores es menor al 5 %.

5.11.3.2. Transformador 2

En la comparación del factor de potencia del analizador y en el software Easy Power para el transformador 2, cuyos valores se indican en la tabla 44.

Tabla 44. Comparación del factor de potencia del transformador 2.

	Analizador de Redes	Software Easy Power
Factor de Potencia del Sistema	0,90	0,89

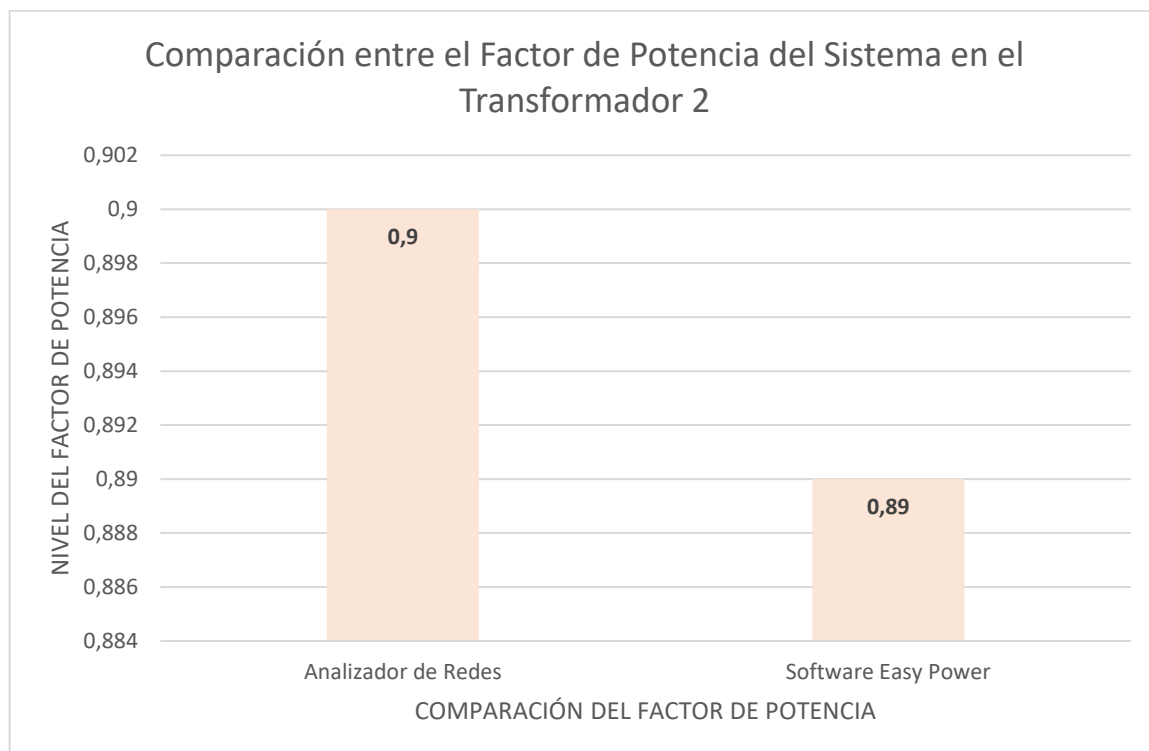


Figura 58. Comparación de los niveles del factor de potencia del transformador 2.

Se puede evidenciar que el factor de potencia se encuentra por debajo del 0,92 estipulado por el pliego tarifario. La diferencia entre los dos valores es menor al 5 %.

5.11.3.3. Transformador 3

Se realiza una comparación entre el factor de potencia del analizador y en el software Easy Power para el transformador 3, cuyos valores se indican en la tabla 45.

Tabla 45. Comparación del factor de potencia del transformador 3.

	Analizador de Redes	Software Easy Power
Factor de Potencia del Sistema	0,87	0,86

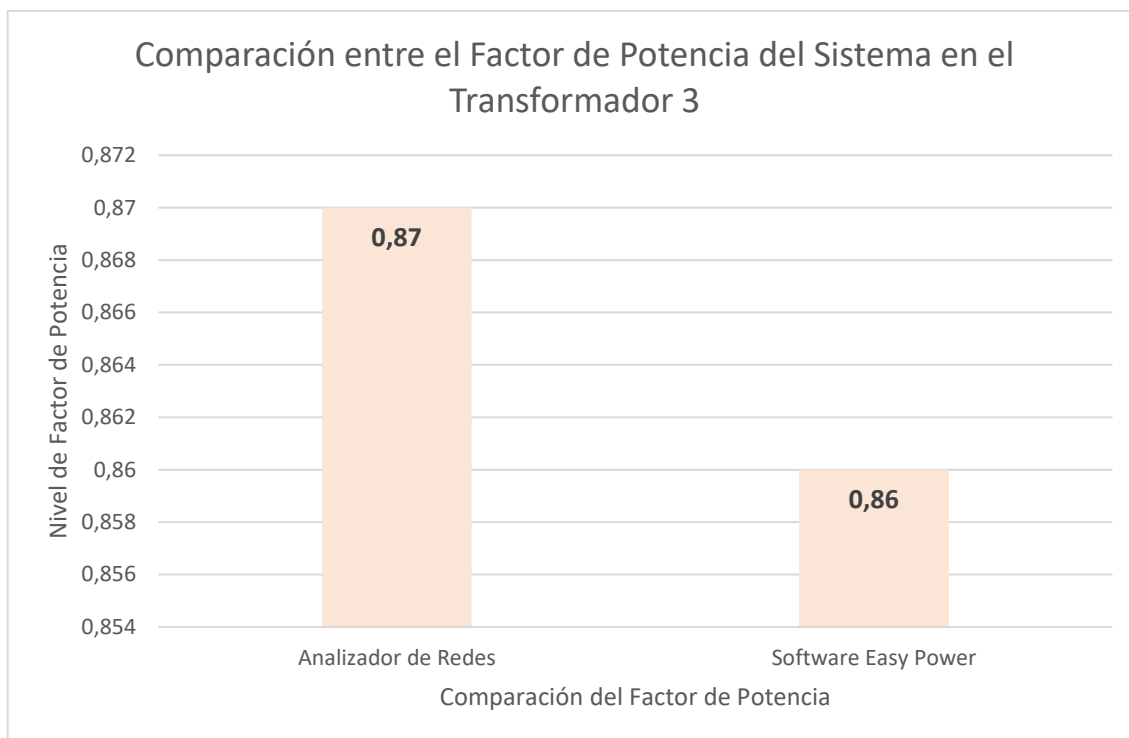


Figura 59. Comparación de los niveles del factor de potencia del transformador 3.

Según la Figura 59, se indica que el factor de potencia se encuentra por debajo del 0.92 estipulado por el Pliego Tarifario. La diferencia entre los dos valores es menor al 5 %.

5.11.4. Desniveles de Voltaje

De acuerdo con la regulación ARCERNNR 002/20, se determina que los desniveles de voltaje deben estar por debajo del 8 %. Por lo tanto, se realiza la comparación entre el porcentaje obtenido por el analizador de datos y el resultante del software.

5.11.4.1. Transformador 1

De acuerdo con la tabla 46, se concluye que los dos resultados obtenidos se encuentran dentro del 8 % estipulado por la normativa. El sistema eléctrico del transformador 2, no presenta desniveles de voltaje.

Tabla 46. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 1.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Voltaje (ΔV_k)	3,72%	2,75%	Cumple

5.11.4.2. Transformador 2

De acuerdo con la tabla 47, se concluye que los dos resultados obtenidos por el analizador de redes y el software no tienen una variación elevada por tanto el sistema no presenta variaciones de voltaje.

Tabla 47. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 2.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Voltaje (ΔV_k)	3,32%	2,55%	Cumple

5.11.4.3. Transformador 3

En la tabla 48, se puede verificar que el desnivel de voltaje se encuentra dentro del 8%. El nivel de voltaje de la red eléctrica del transformador 3 se encuentra sin variaciones en el voltaje.

Tabla 48. Comparación de los desniveles de voltaje del transformador 3.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Voltaje (ΔV_k)	3,34%	2,59%	Cumple

5.11.5. Desequilibrio de Corriente

El desnivel de corriente es producido cuando en las tres fases del sistema eléctrico no circula la misma corriente, este problema puede ocasionar sobrecalentamiento de motores, conductores e incluso disparar protecciones eléctricas.

Según lo descrito anteriormente es necesario realizar el análisis del desequilibrio de corriente en los tres transformadores con el fin de garantizar el funcionamiento correcto de los equipos de la industria. De acuerdo con la norma IEEE Std – 519 el rango en el que debe estar el desequilibrio de Corriente está entre el 1 % al 3 %.

5.11.5.1. Transformador 1

De acuerdo con la tabla 49, se concluye que los resultados obtenidos en el analizador de redes y en el software Easy Power se encuentran por debajo del rango estipulado por la normativa. El sistema eléctrico del transformador 2, no presenta desniveles de corriente.

Tabla 49. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 1.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Corriente (ΔI_k)	1,18%	1,22%	Cumple

5.11.5.2. Transformador 2

De acuerdo con la tabla 50, se determina que el desnivel de corriente en el transformador 2, se encuentra dentro del nivel que recomienda la regulación, por lo tanto, no presenta desequilibrios de corriente.

Tabla 50. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 2.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Corriente (ΔI_k)	2,88%	2,92%	Cumple

5.11.5.3. Transformador 3

Se analiza los desequilibrios de corriente en el Transformador 3, cuyo valor promedio tanto en el analizador de redes como en el Software Easy Power. El sistema eléctrico del transformador 3, no presenta desniveles de corriente.

Tabla 51. Comparación de los desniveles de corriente del transformador 3.

	Analizador de Redes	Software Easy Power	Observaciones
Desniveles de Corriente (ΔI_k)	2,51%	2,55%	Cumple

5.11.6. Cargabilidad de Transformadores

Se realiza el análisis de la cargabilidad de los transformadores en la sección de obstrucción y así poder comprobar que los mismos no se encuentren trabajando sobre su capacidad nominal.

En la tabla 52, se indica la sobrecarga de los tres transformadores, donde se concluye que no están sobrecargados.

Tabla 52. Cargabilidad de los transformadores.

	Porcentaje de Carga del Transformador [%]	Reserva del Transformador [%]	Observaciones
Transformador 1	39,90	60,10	Cumple
Transformador 2	55,20	44,80	Cumple
Transformador 3	42,70	57,30	Cumple

5.11.7. Cargabilidad de los Conductores

Otro de los parámetros que se debe analizar es la cargabilidad de los conductores. La sobrecarga de conductores puede ocasionar daños térmicos por efecto Joule, ocasionando el deterioro de estos. En la tabla 53, se señala la cargabilidad de los conductores de cada uno de los alimentadores.

5.11.7.1. Transformador 1

En la tabla 53, se puede visualizar la sobrecarga de conductores, de acuerdo con los reportes del Easy Power se concluye que los conductores del alimentador 1, no se encuentra sobrecargado.

Tabla 53. Sobrecarga de conductores en el transformador 1.

	Porcentaje de Carga del Conductor [%]	Reserva del Conductor [%]	Observaciones
Línea 1	13,40	86,60	Cumple
Línea 2	8,10	91,90	Cumple
Línea 3	50,30	49,70	Cumple
Línea 4	8,10	91,90	Cumple
Línea 5	12,30	87,70	Cumple
Línea 6	46,60	53,40	Cumple
Línea 7	0,1	99,90	Cumple
Línea 8	0,3	99,70	Cumple
Línea 9	5,9	94,10	Cumple
Línea 10	0,8	99,2	Cumple
Línea 11	2,8	97,2	Cumple
Línea 12	12,6	87,40	Cumple
Línea 13	13,1	86,90	Cumple
Línea 14	0,1	99,30	Cumple

5.11.7.2. Transformador 2

En la tabla 54, se indica la sobrecarga de conductores, en base a los reportes del Easy Power donde se concluye que los conductores del alimentador 2, no se encuentran sobrecargados.

Tabla 54. Sobrecarga de conductores en el transformador 2.

	Porcentaje de Carga del Conductor [%]	Reserva del Conductor [%]	Observaciones
Línea 1	2,8	97,2	Cumple
Línea 2	0,1	99,9	Cumple
Línea 3	11,5	88,5	Cumple
Línea 4	2,6	97,4	Cumple
Línea 5	0,5	99,5	Cumple
Línea 6	0,9	99,1	Cumple
Línea 7	1,1	98,9	Cumple

5.11.7.3. Transformador 3

En la tabla 55, se analiza la sobrecarga de los conductores instalados en el alimentador 3, concluyendo que no existe sobrecarga en los conductores conectados en este alimentador.

Tabla 55. Sobrecarga de conductores en el transformador 3.

	Porcentaje de Carga del Conductor [%]	Reserva del Conductor [%]	Observaciones
Línea 1	48,80	51,20	Cumple
Línea 2	16,80	83,20	Cumple
Línea 3	2,20	97,80	Cumple
Línea 4	29,80	70,20	Cumple

5.11.8. Comparación de Armónicos de Voltaje

A continuación, se realiza la comparación entre los armónicos de voltaje del sistema, para ver la similitud entre los resultados obtenidos por el analizador de redes y el software Easy Power.

5.11.8.1. Transformador 1

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 1, no presenta armónicos de voltaje.

Tabla 56. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 1.

Armónicos de Voltaje	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	0,09%	0,13%	CUMPLE
5	4,14%	5,23%	CUMPLE
7	2,27%	3,45%	CUMPLE
9	0,30%	0,80%	CUMPLE
11	1,69%	2,25%	CUMPLE

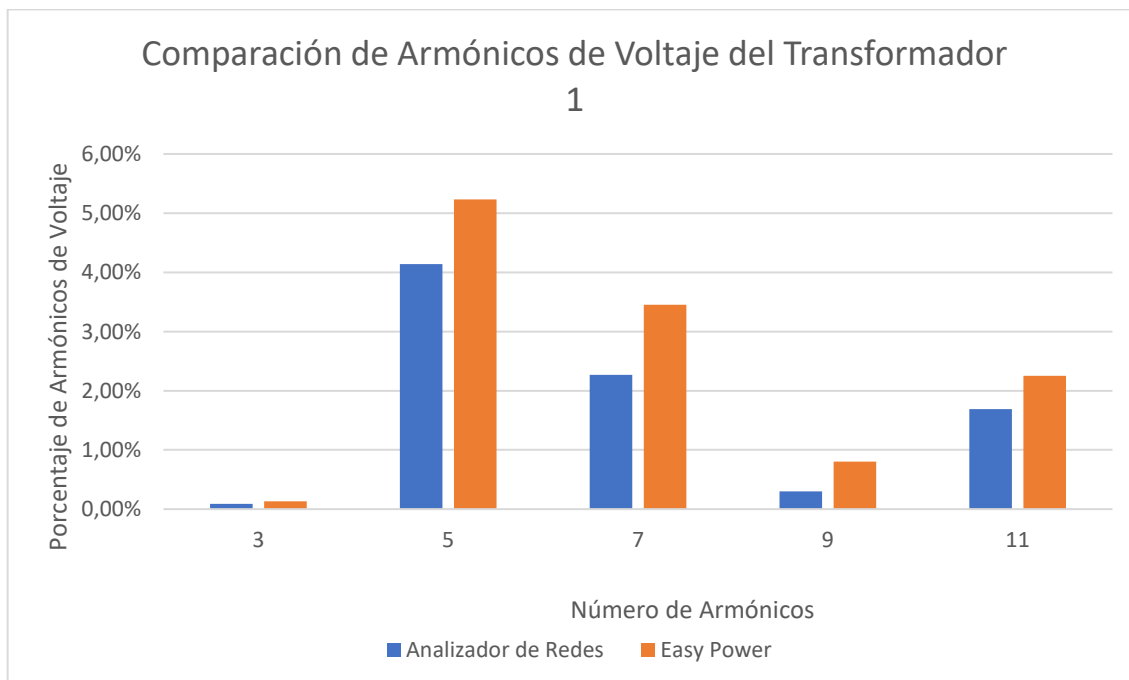


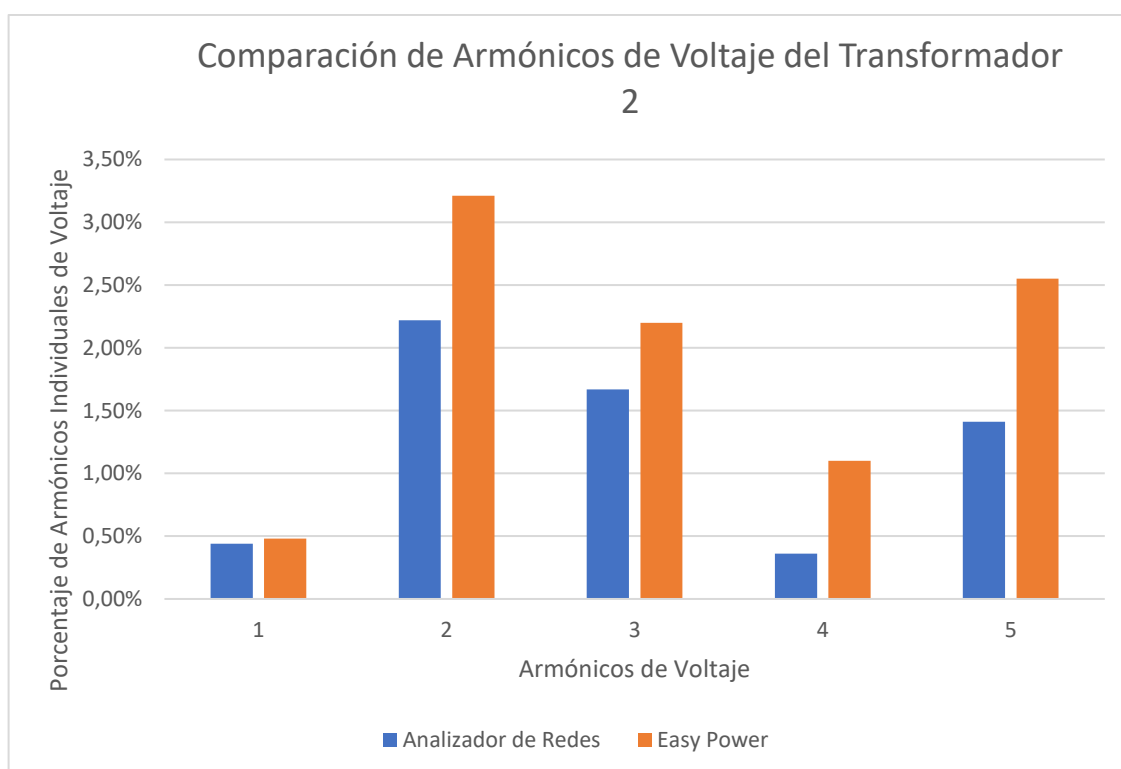
Figura 60. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 1.

5.11.8.2. Transformador 2

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 2 no presenta armónicos de voltaje.

Tabla 57. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 2.

Armónicos de Voltaje	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	0,44%	0,48%	CUMPLE
5	2,22%	3,21%	CUMPLE
7	1,67%	2,20%	CUMPLE
9	0,36%	1,10%	CUMPLE
11	1,41%	2,55%	CUMPLE

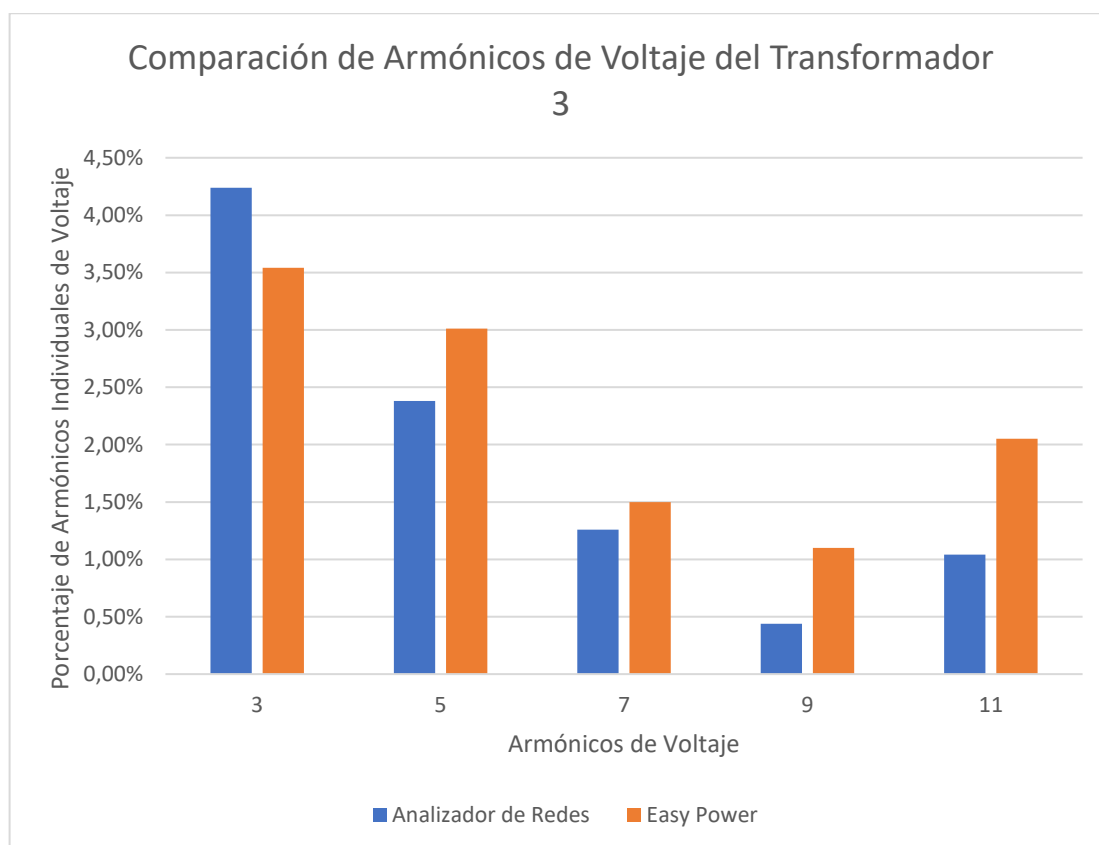
**Figura 61.** Comparación de armónicos de voltaje del transformador 2.

5.11.8.3. Transformador 3

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 4 no presenta armónicos de voltaje.

Tabla 58. Comparación de armónicos de voltaje del transformador 3.

Armónicos de Voltaje	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	4,24%	3,54%	CUMPLE
5	2,38%	3,01%	CUMPLE
7	1,26%	1,50%	CUMPLE
9	0,44%	1,10%	CUMPLE
11	1,04%	2,05%	CUMPLE

**Figura 62.** Comparación de armónicos de voltaje del transformador 3.

5.11.9. Comparación de armónicos de Corriente.

A continuación, se realiza la comparación entre los armónicos de corriente del sistema, para ver la similitud entre los resultados obtenidos por el analizador de redes y el software Easy Power.

5.11.9.1. Transformador 1

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 1 presenta armónicos de corriente. El armónico que presenta mayor porcentaje es el quinto armónico.

Tabla 59. Comparación de armónicos de corriente del transformador 1.

Armónicos de Corriente	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	14,63%	13,94%	NO CUMPLE
5	19,14%	18,22%	NO CUMPLE
7	8,56%	8,15%	NO CUMPLE
9	10,91%	10,39%	NO CUMPLE
11	14,47%	13,78%	NO CUMPLE

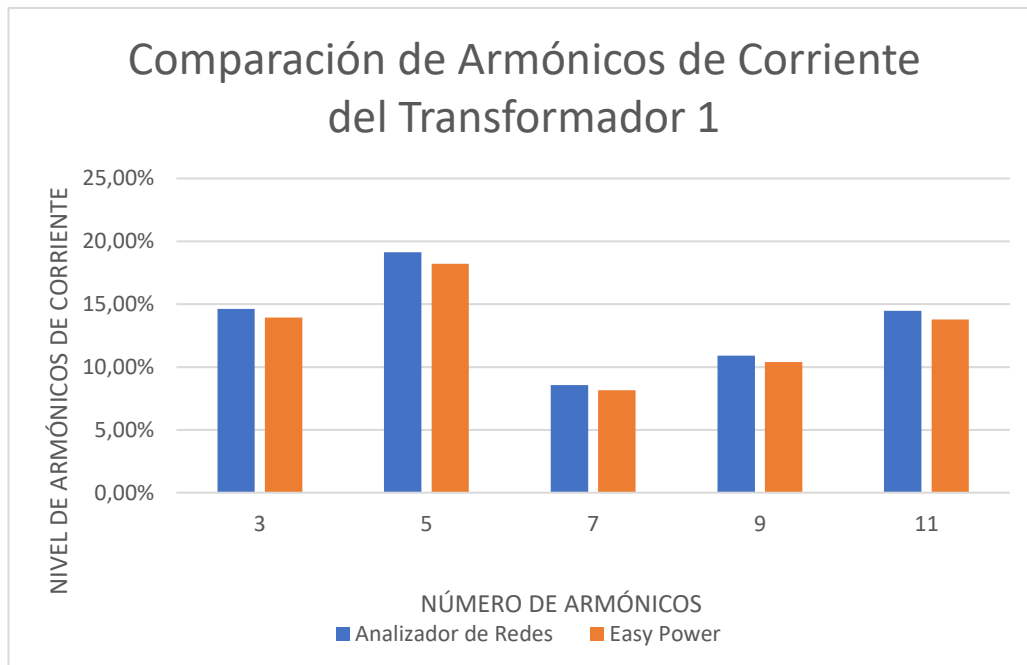


Figura 63. Comparación de armónicos de corriente del transformador 1.

5.11.9.2. Transformador 2

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 2, si presenta armónicos de corriente. El número de armónico que presenta mayor porcentaje de armónico en dicho transformador es el séptimo.

Tabla 60. Comparación de armónicos de corriente del transformador 2.

Armónicos de Corriente	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	3,01%	2,86%	CUMPLE
5	19,41%	18,44%	NO CUMPLE
7	23,06%	21,91%	NO CUMPLE
9	13,31%	12,64%	NO CUMPLE
11	12,94%	12,30%	NO CUMPLE

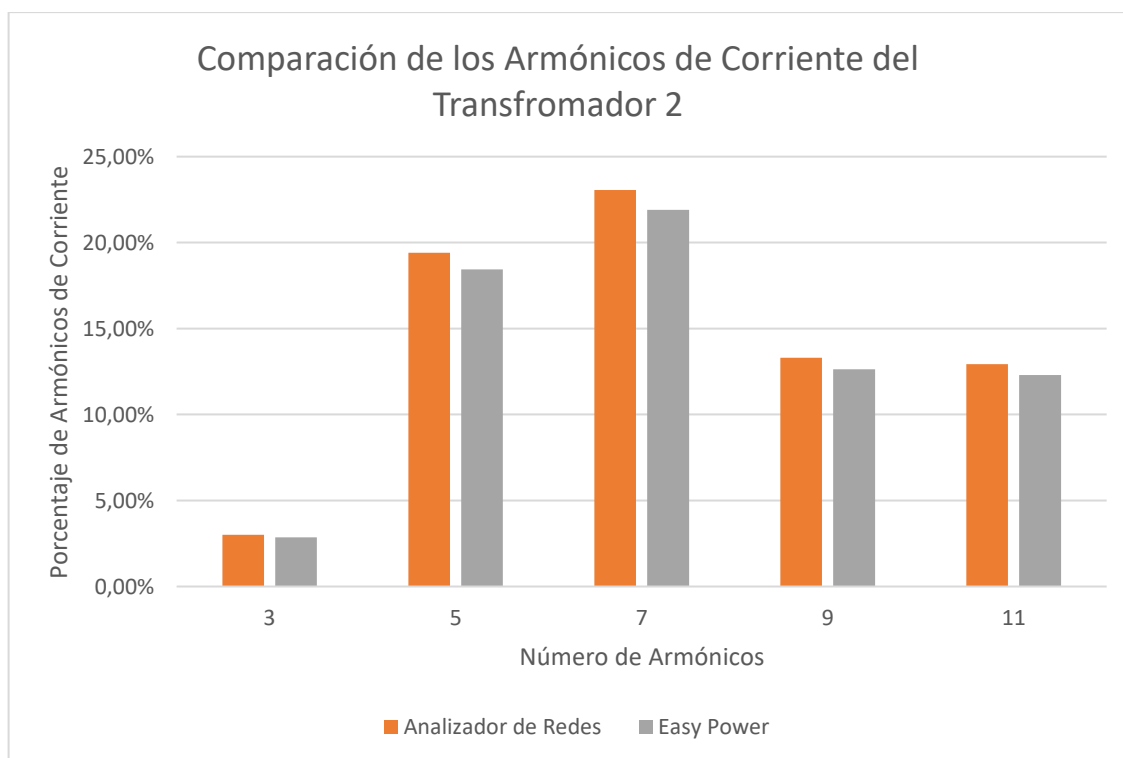


Figura 64. Comparación de armónicos de corriente del transformador 2.

5.11.9.3. Transformador 3

De acuerdo con la comparación entre los resultados del analizador de datos y el Easy Power, se concluye que el transformador 3, si presenta armónicos de corriente.

Tabla 61. Comparación de armónicos de corriente del transformador 3.

Armónicos de Voltaje	Analizador de Redes	Easy Power	Normativa
3	17,93%	18,82%	CUMPLE
5	10,73%	11,27%	CUMPLE
7	8,05%	8,46%	CUMPLE
9	4,71%	4,95%	CUMPLE
11	6,03%	6,33%	CUMPLE

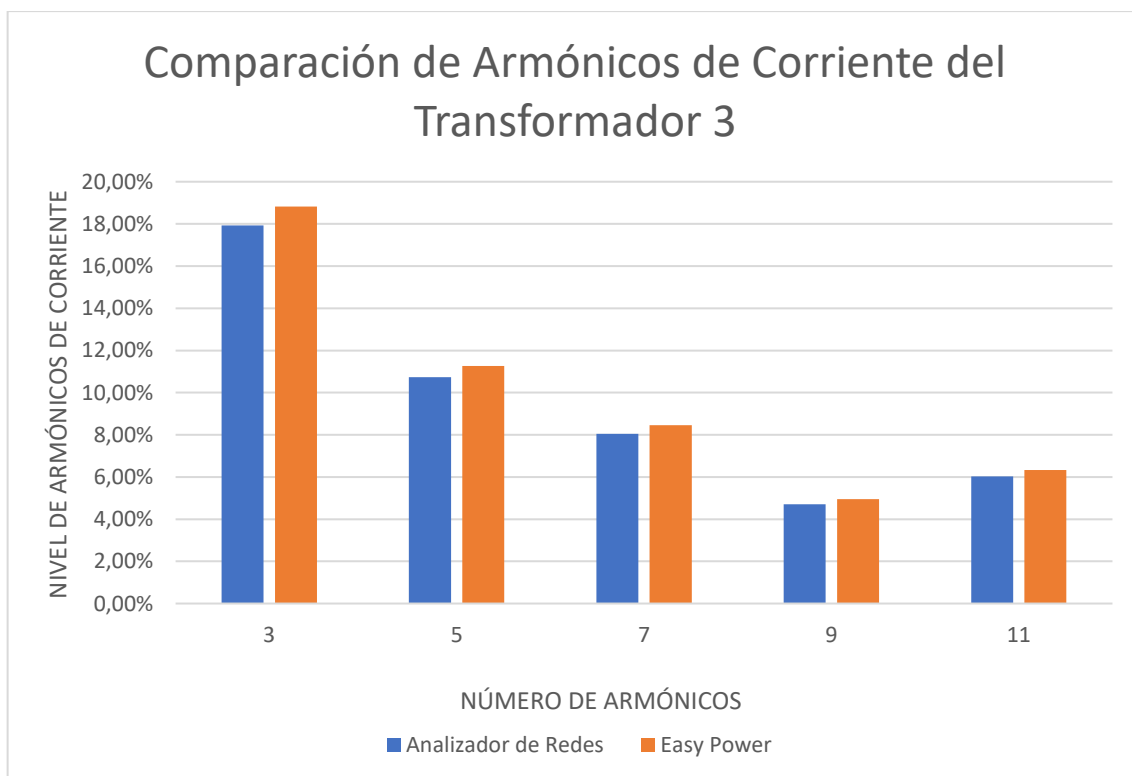


Figura 65. Comparación de armónicos de corriente del transformador 3.

5.11.10. Cargabilidad de Transformadores

Mediante el software Easy Power permite el estudio de la cargabilidad de los tres transformadores y así evaluar su comportamiento.

5.11.10.1. Transformador 1

De acuerdo con la tabla 62, se puede observar que el transformador 1 se encuentra cargado a un 68, 80% y cuenta con una reserva del 31,2 %.

Tabla 62. Cargabilidad en el transformador 1.

	Porcentaje de Carga	Porcentaje de Reserva
Transformador 1	68,8%	31,2%

5.11.10.2. Transformador 2

De acuerdo con la tabla 63, se puede observar que el transformador 1 se encuentra cargado a un 68, 80 % y cuenta con una reserva del 31,2 %, por lo tanto, el transformador no está sobrecargado.

Tabla 63. Cargabilidad en el transformador 2.

	Porcentaje de Carga	Porcentaje de Reserva
Transformador 2	68,80%	31,2%

5.11.10.3. Transformador 3

De acuerdo con la tabla 64, se puede observar que el transformador 1 se encuentra cargado a un 42,7 % y cuenta con una reserva del 57,30 %, por lo tanto, el transformador no está sobrecargado.

Tabla 64. Cargabilidad en el transformador 3.

	Porcentaje de Carga	Porcentaje de Reserva
Transformador 2	42,7%	57,30%

5.12. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES PARA LAS PERTURBACIONES ELÉCTRICAS DEL SEGUNDO TRANSFORMADOR

5.12.1. Mitigación de Armónicos

Calculo y dimensionamiento de filtro para atenuación de armónicos en el transformador 2.

Potencia consumida en la Carga = **294.3 kW**

Voltaje L-L = **440W**

$$f_{p1}=0.90 \qquad \theta_1 = \cos^{-1}(0.90) = 25.84 \qquad (5.11)$$

$$f_{p2}=0.92 \qquad \theta_2 = \cos^{-1}(0.95) = 23.07 \qquad (5.12)$$

5.12.1.1. Cálculo de KVAR efectivos (Q_{eff}).

$$Q_{\text{eff}}=P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \qquad (5.13)$$

$$Q_{\text{eff}}=294.3 (\tan (25.84) - \tan (23.07)) \qquad (5.14)$$

$$Q_{\text{eff}}=17.16 \text{ kVAR} \qquad (5.15)$$

5.12.1.2. Cálculo de la Reactancia efectiva del Filtro

$$X_{\text{eff}} = \frac{(V_{\text{ll sist}})^2}{Q_{\text{eff}}} \qquad (5.16)$$

$$X_{\text{eff}} = \frac{(440 \text{ v})^2}{17.16 \times 10^3} \qquad (5.17)$$

$$X_{\text{eff}} = 11.279 \ \Omega \text{ x fase} \qquad (5.18)$$

$$h = \frac{f \text{ armónico}}{f \text{ fundamental}} \qquad (5.19)$$

$$h = \frac{420}{60} ; h=7 ; \quad 7*6\%=0.42 ; \quad 7-0.3=6.58 \quad (5.20)$$

5.12.1.3. Cálculo de la Reactancia Capacitiva

$$X_c = \frac{(hx0.6)^2}{(hx0.6)^2 - 1} * X_{eff} \quad (5.21)$$

$$X_c = \frac{(6.58)^2}{(6.58)^2 - 1} * 11.279 \quad (5.22)$$

$$X_c = 11.546 \, \Omega \quad (5.23)$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (5.24)$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 11.546} \quad (5.25)$$

$$C = 229.748 \, \mu\text{F} \quad (5.26)$$

En relevancia a los cálculos realizados se ha indagado que es necesario elegir un capacitor de valor comercial de 300uF.

5.12.1.4. Cálculo de la Reactancia inductiva

$$X_l = \frac{X_c}{h^2} \quad (5.27)$$

$$X_l = \frac{11.546}{7^2} \quad (5.28)$$

$$X_l = \frac{11.546}{49} \quad (5.29)$$

$$X_l = 0.2356 \, \Omega \quad (5.30)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot 60} \quad (5.31)$$

$$L = \frac{0.2356\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 60} \quad (5.32)$$

$$L = 0.6250 \text{ mH} \quad (5.33)$$

5.12.1.5. Cálculo de la Resistencia del Filtro

$$R = \frac{X_l \cdot h \cdot 0.6}{Q_f} \quad (5.34)$$

$$R = \frac{0.2356\Omega \cdot 6.58}{20} \quad (5.35)$$

$$R = 77.521\Omega \quad (5.36)$$

5.12.1.6. Cálculo de la Impedancia del Filtro

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (5.37)$$

$$Z = 77.521 \Omega + j \left(2 \times \pi \times 60 \times 0.6250 \times 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 229.748 \times 10^{-9}} \right) \quad (5.38)$$

$$Z = 0.0775 - j 11.3099 \quad (5.39)$$

5.12.1.7. Cálculo de los kVAR del Filtro

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{V_i^2 I - I}{X_c - X_l} \quad (5.40)$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{(440)^2}{11.546 - 0.2356} \quad (5.41)$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = 0.0171 \text{ MVA} \quad (5.42)$$

Con base en los cálculos realizados se puede dimensionar un filtro adecuado que cumpla con las especificaciones necesarias. Los cálculos pertinentes al transformador 2 y 3 se encuentran en la sección de anexos (Ver Anexos E, F). El diseño debe ser comprobado mediante simulación para lo cual se ingresarán los siguientes parámetros para el caso del transformador 2:

Inductor = $0.0775 + j 11.546 \Omega$

Capacidad en MVAR = 0.0171 MVAR

Voltaje de línea a línea = 0.44 kV

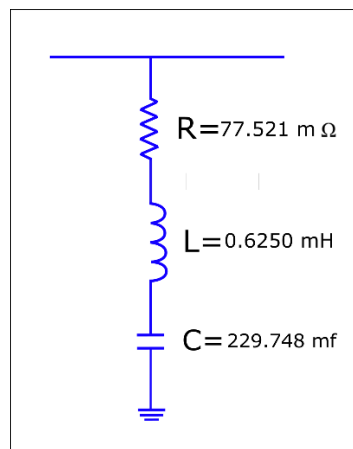


Figura 66. Diseño del filtro para mitigar armónico.

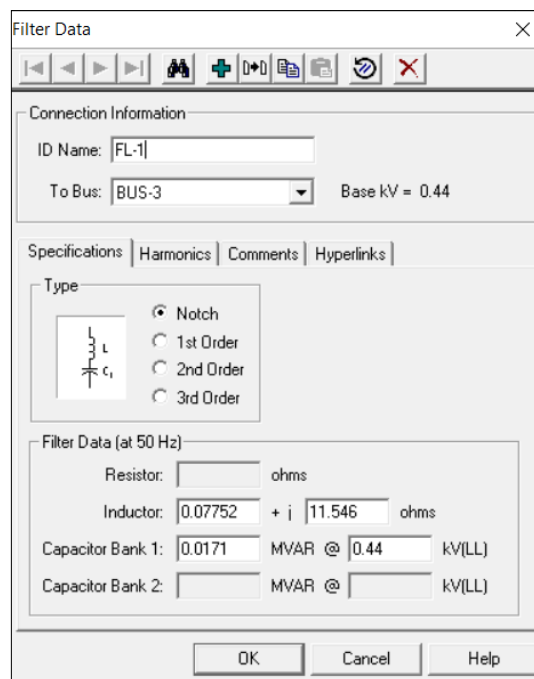


Figura 67. Configuración de parámetros del filtro en EASY POWER.

Posterior al diseño del filtro y la configuración de parámetros se procede a simular el sistema (Ver Anexo E,F) y comprobar el estado de las perturbaciones significativas que fueron encontradas por el analizador de redes.

Las perturbaciones analizadas después de la implementación del filtro corresponden a factor de potencia, armónicos de voltaje, armónicos de corriente.

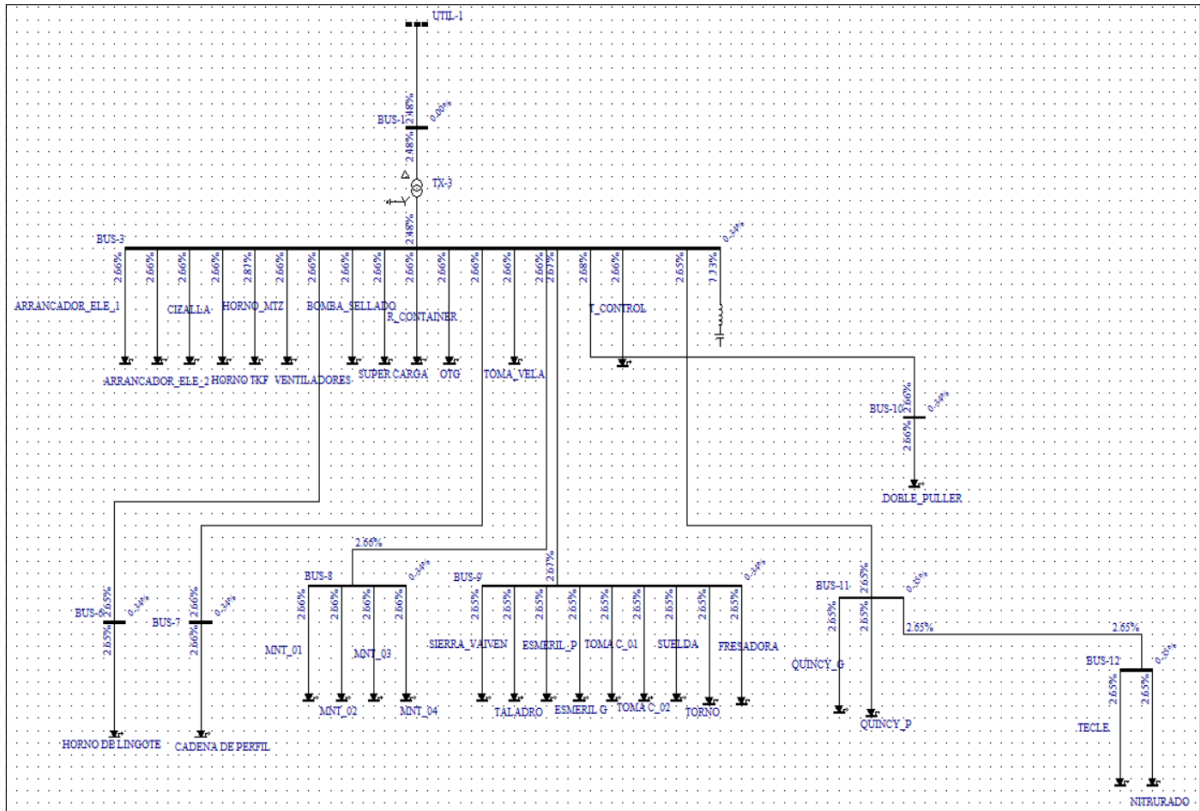


Figura 68. Simulación del sistema del transformador 2 con el filtro diseñado en el software EASY POWER.

5.13. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DEL FILTRO

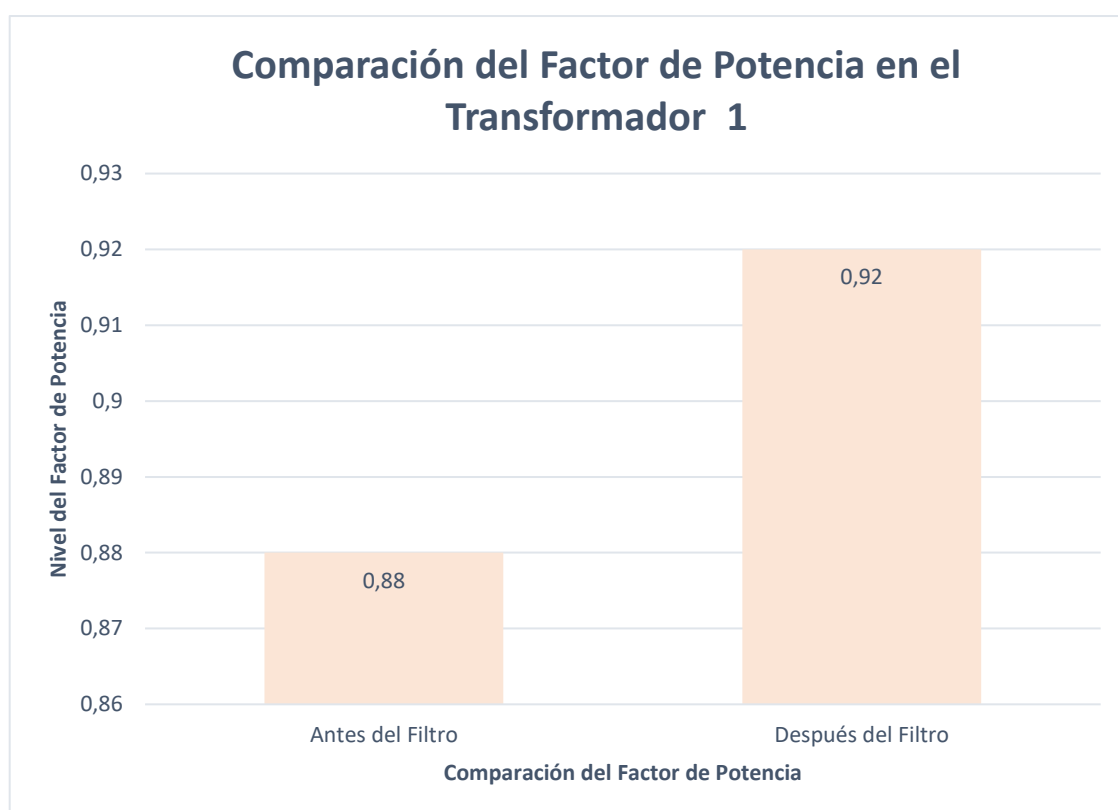
5.13.1. Factor de Potencia

5.13.1.1. Transformador 1

Se realiza una comparación entre el factor de potencia antes y después del filtro sus valores se indican en la tabla 65.

Tabla 65. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 1.

	Antes del Filtro	Después del Filtro
Factor de Potencia del Sistema	0,88	0,92

**Figura 69.** Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 1.

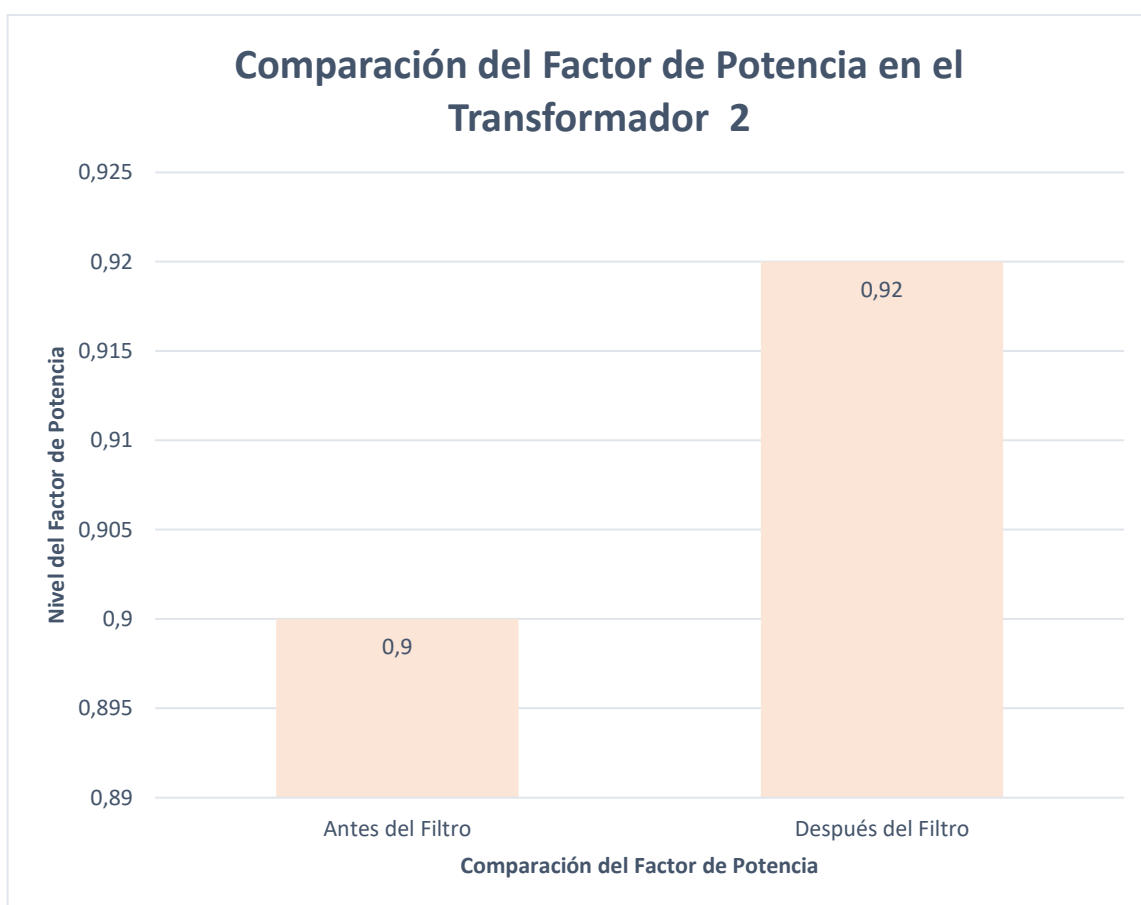
De acuerdo con la Figura 69, se puede determinar que el factor de antes del filtro se encuentra por debajo del 0,92. Una vez colocado el filtro el valor del factor de potencia sube a 0,92.

5.13.1.2. Transformador 2

De acuerdo con la tabla 66, se puede observar que el factor de potencia del sistema sin el filtro incumple la normativa. Después de colocar el filtro, a través de la simulación se puede ver un incremento del factor de potencia total.

Tabla 66. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 2.

	Antes del Filtro	Después del Filtro
Factor de Potencia del Sistema	0,90	0,92

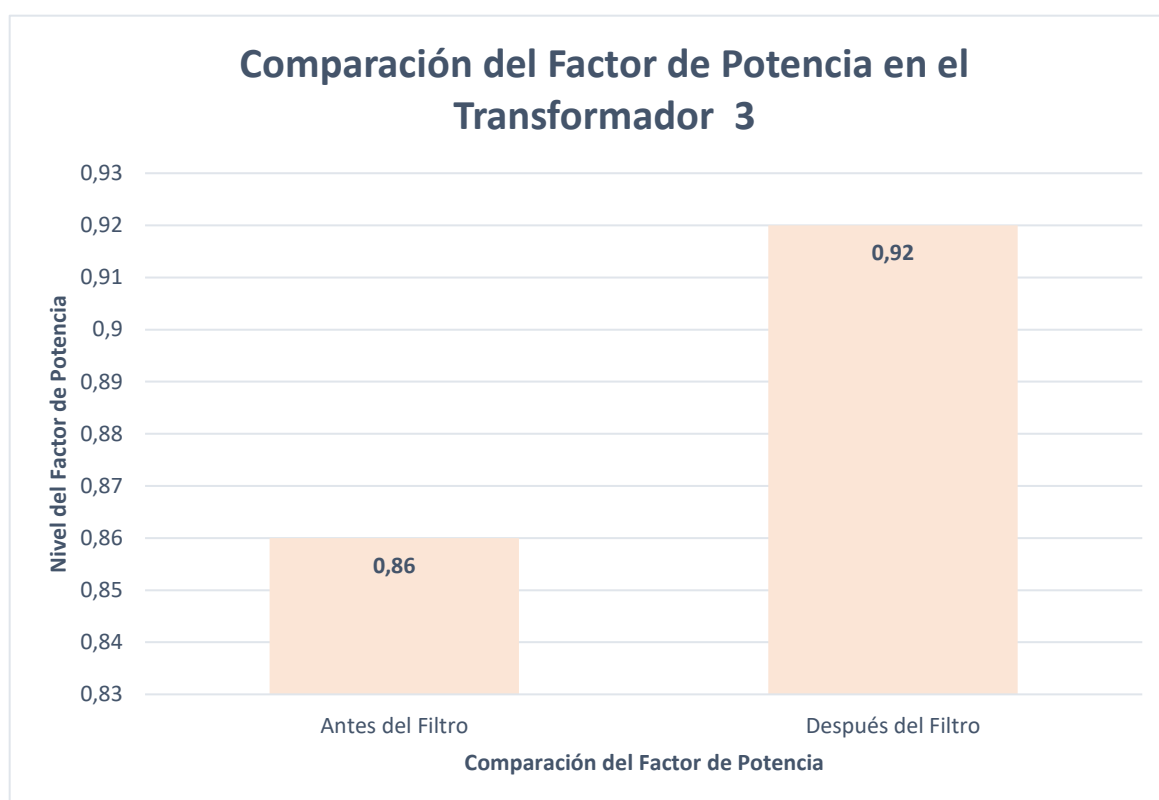
**Figura 70.** Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 2.

5.13.1.3. Transformador 3

Para el transformador 3 se analiza el factor de potencia antes y después del filtro, donde se observa que el factor de potencia después de la instalación del filtro se eleva cumpliendo la normativa.

Tabla 67. Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador 3.

	Antes del Filtro	Después del Filtro
Factor de Potencia del Sistema	0,86	0,92

**Figura 71.** Comparación del factor de potencia antes y después del filtro para el transformador.

Como se evidencia, el factor de potencia en los tres transformadores se elevó después de la implementación de los filtros, concluyendo que este elemento es capaz de mejorar el factor de potencia por lo cual se necesitaría un análisis posterior a la incorporación de los filtros al sistema eléctrico con el fin de llevar estos parámetros al nivel deseado.

5.13.2. Armónicos de Voltaje

5.13.2.1. Transformador 1

Antes de colocar el filtro no existe la presencia de armónicos de voltaje. Después de calcular el filtro, se observa que el valor de los armónicos de voltaje disminuye aún más.

Tabla 68. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 1.

Armónicos de Voltaje	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	0,13%	0,09%
5	5,23%	2,15%
7	3,45%	1,30%
9	0,80%	0,20%
11	2,25%	1,30%

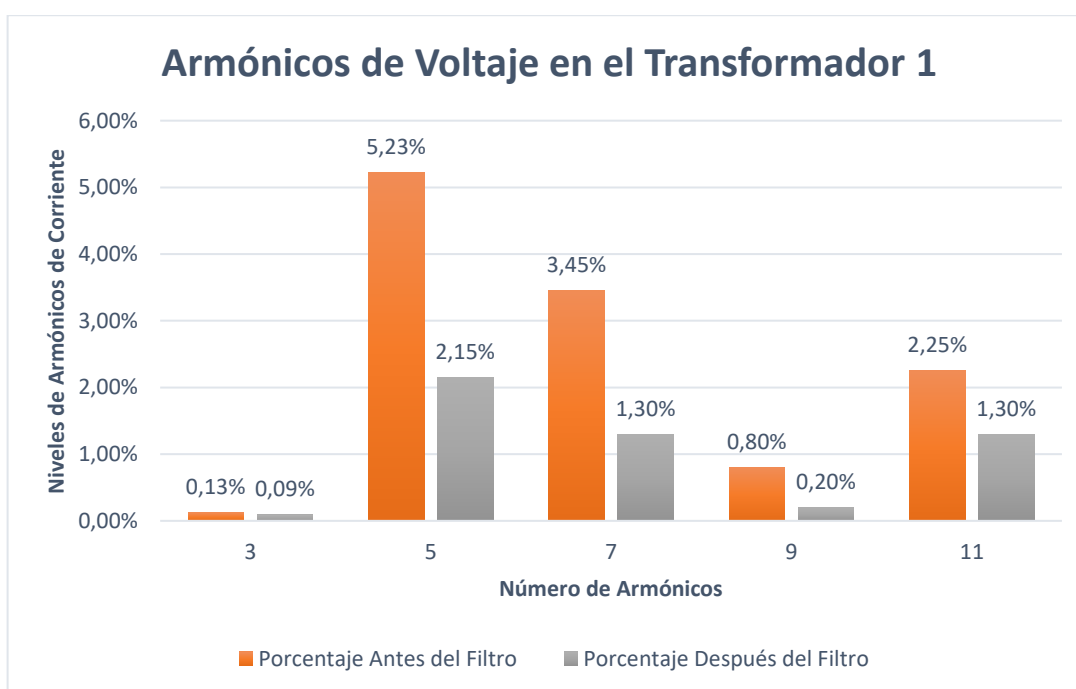


Figura 72. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 1.

5.13.2.2. Transformador 2

Al realizar el respectivo cálculo del filtro para el transformador 2, se coloca en la simulación obteniendo armónicos de corriente individuales dentro de la normativa.

Tabla 69. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 2.

Armónicos de Voltaje	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	2,86%	1,03%
5	18,44%	3,20%
7	21,91%	5,90%
9	12,64%	2,14%
11	12,30%	1,80%

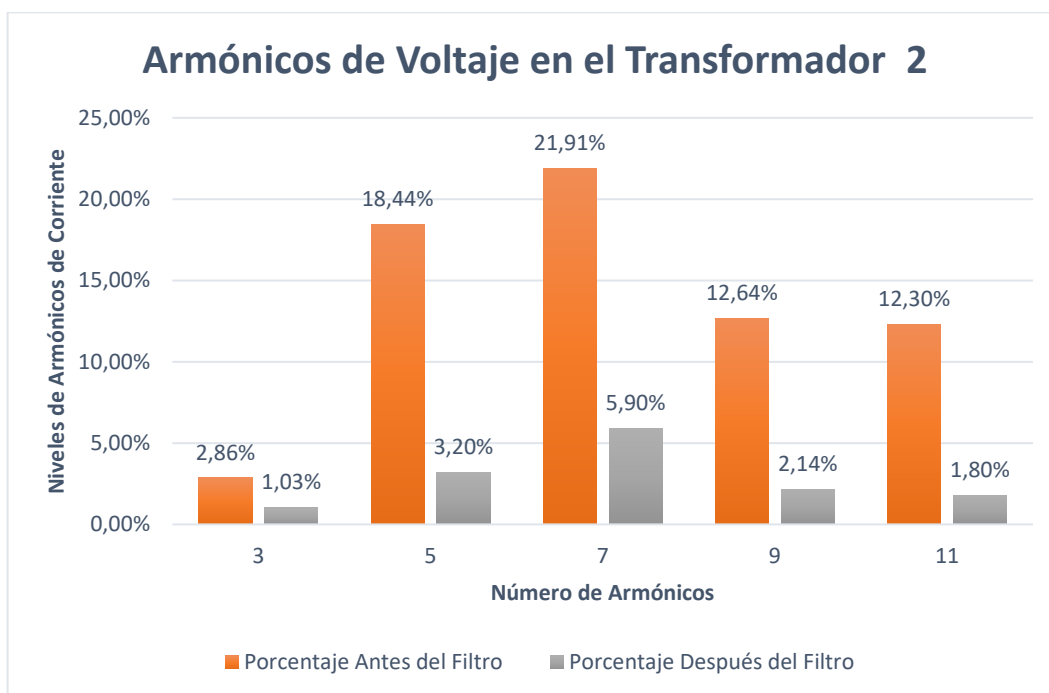


Figura 73. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 2.

5.13.2.3. Transformador 3

Luego de calcular el filtro para la reducción del armónico de voltaje se puede visualizar que el porcentaje de los armónicos se reducen en un porcentaje mayor, por lo que asegura y garantiza la seguridad de los equipos.

Tabla 70. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 3.

Armónicos de Voltaje	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	3,54%	1,03%
5	3,01%	1,00%
7	1,50%	1,03%
9	1,10%	0,75%
11	2,05%	0,50%

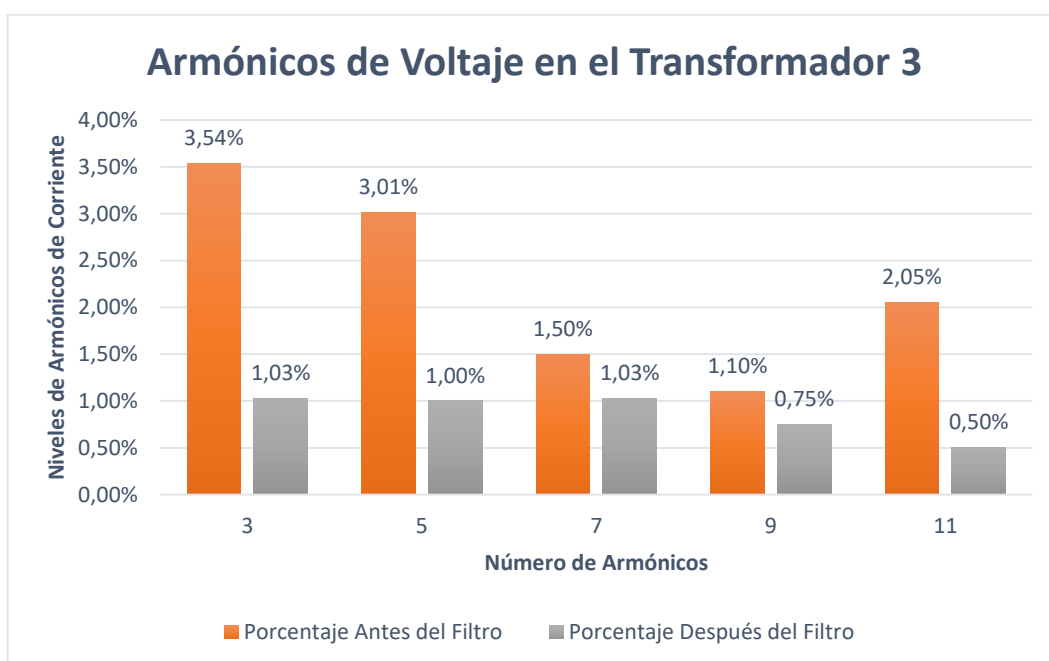


Figura 74. Armónicos de voltaje antes y después del filtro en el transformador 3.

5.13.3. Armónicos de Corriente

5.13.3.1. Transformador 1

Una vez colocado el filtro, se observa que los armónicos de corriente del transformador 1, no presenta armónicos de corriente, cumpliendo con la normativa IEEE- 519.

Tabla 71. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 1.

Armónicos de Corriente	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	13,94%	2,73%
5	18,22%	6,11%
7	8,15%	0,73%
9	10,39%	5,93%
11	13,78%	2,01%

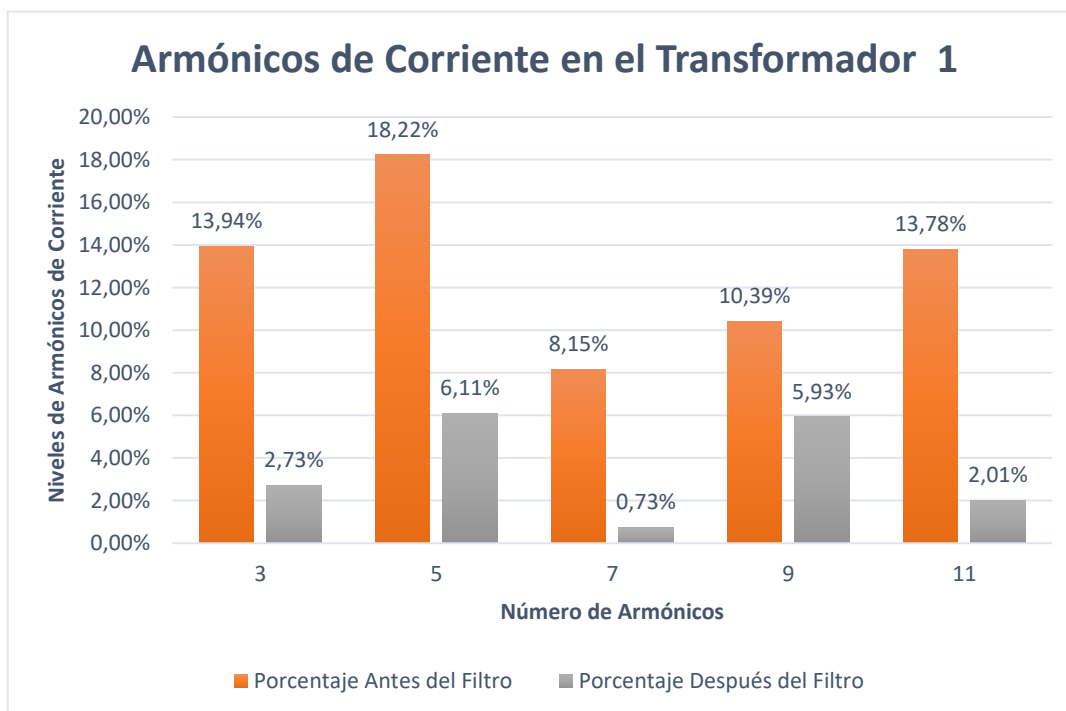


Figura 75. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 1.

5.13.3.2. Transformador 2

Al realizar el respectivo cálculo del filtro para el transformador 2, se coloca en la simulación obteniendo armónicos de corriente individuales dentro de la normativa.

Tabla 72. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 2.

Armónicos de Corriente	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	2,86%	1,25%
5	18,44%	3,43%
7	21,91%	5,91%
9	12,64%	2,64%
11	12,30%	1,30%

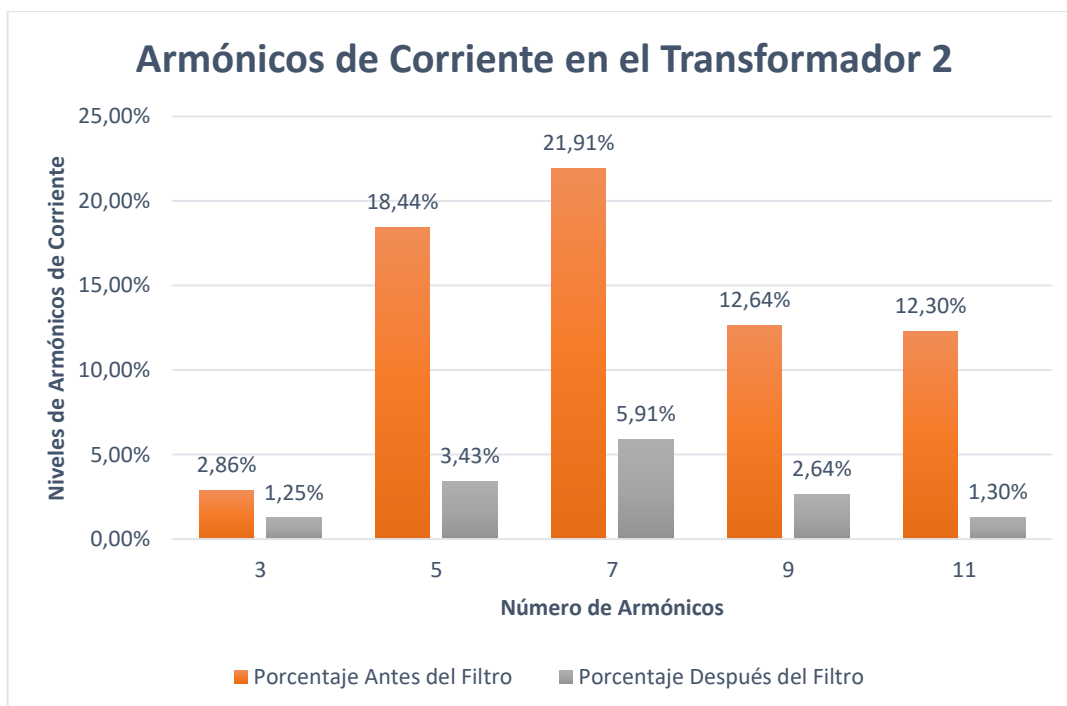


Figura 76. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 2.

5.13.3.3. Transformador 3

Después de realizar los cálculos para el filtro, se puede observar que el valor de armónicos de Corriente se encuentra dentro de la normativa. Por lo que se comprueba los beneficios de colocar un filtro.

Tabla 73. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 3.

Armónicos de Corriente	Porcentaje Antes del Filtro	Porcentaje Después del Filtro
3	18,82%	6,53%
5	11,27%	4,03%
7	8,46%	4,56%
9	4,95%	3,91%
11	6,33%	2,47%

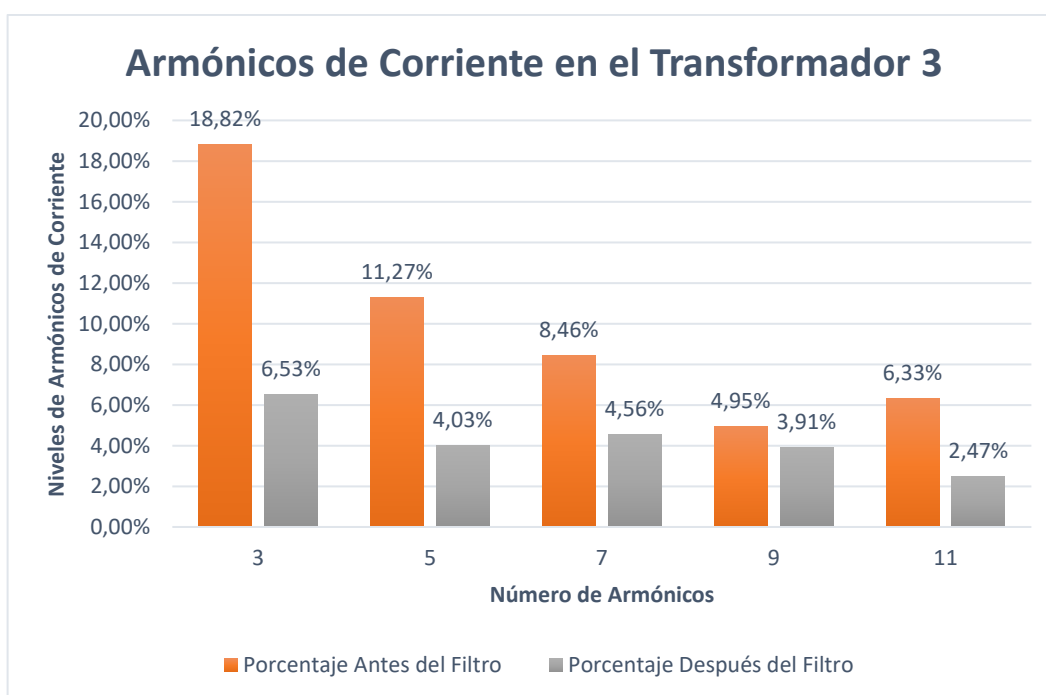


Figura 77. Armónicos de corriente antes y después del filtro en el transformador 3.

5.14. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES O ECONÓMICOS)**5.14.1. Factibilidad Operativa**

La factibilidad operativa del presente estudio es viable para la industria ya que con la corrección de las perturbaciones eléctricas la maquinaria extenderá su tiempo de vida útil y se reducirá las fallas debido a parámetros eléctricos optimizando procesos de mantenimiento y operación.

5.14.2. Factibilidad Económica

La producción es la parte más importante de toda industria, con la inversión económica en métodos de solución para perturbaciones eléctricas se evitarán daños en los elementos presentes en la fábrica, daños en maquinaria e interrupciones en la fabricación de extrusiones de aluminio, aumentando la confiabilidad del sistema y reduciendo gastos por mantenimiento. Además, la implementación de las propuestas planteadas disminuirá el pago por consumo energético representando un beneficio notable para la economía de la empresa.

5.14.2.1. Presupuesto para la propuesta del proyecto**Tabla 74.** Presupuesto.

ÍTEM	EQUIPO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Filtro electrónico de paso bajo-pasivo-de armónico FN 3410	3	\$5.200,00	\$15.600,00
2	Instalación	3	\$700	\$2.100,00
3	Mantenimiento	3	\$300	\$900,00
SUB TOTAL				\$ 18600,00
IVA 12%				\$2232,00
TOTAL				\$ 20832,00

5.15. AHORRO ENERGÉTICO AL IMPLEMENTAR LAS SOLUCIONES PROPUESTAS

5.15.1. Cálculo de pérdidas de los Transformadores 1, 2 y 3

Tabla 75. Pérdidas del transformador 1 sin filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.002	0.008
BUS-2	0.440	BUS-6	0.440	0.000	0.000
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.000	0.000
BUS-2	0.440	BUS-11	0.220	0.000	0.000
BUS-2	0.440	BUS-4	0.220	0.000	0.002
BUS-3	0.440	BUS-5	0.200	0.000	0.000
BUS-4	0.220	BUS-9	0.220	0.000	0.000
BUS-6	0.440	BUS-7	0.440	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-18	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_EMPAQUE	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-19	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-22	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-20	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_LUCES	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-10	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_ESTE	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-16	0.220	0.000	0.000
BUS-20	0.220	BUS-21	0.220	0.000	0.000
ST_ESTE	0.220	BUS-15	0.220	0.000	0.000
Total System Losses				0.002	0.010

Tabla 76. Pérdidas del transformador 2 sin filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-3	0.440	0.001	0.005
BUS-3	0.440	BUS-9	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-10	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-11	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-6	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-7	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-8	0.440	0.000	0.000
BUS-11	0.440	BUS-12	0.440	0.000	0.000
Total Syste Losses				0.001	0.005

Tabla 77. Pérdidas del transformador 3 sin filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.001	0.003
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-7	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-6	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-5	0.440	0.000	0.000
Total System Losses				0.001	0.003

Promedio de pérdidas iniciales = 0.002 MW

Tabla 78. Pérdidas del transformador 1 con filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.002	0.022
BUS-2	0.440	BUS-9	0.220	0.000	0.000
BUS-2	0.440	BUS-6	0.440	0.000	0.000
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.000	0.000
BUS-6	0.440	BUS-7	0.440	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-18	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_EMPAQUE	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-19	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-22	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-20	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_LUCES	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-10	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	ST_ESTE	0.220	0.000	0.000
BUS-9	0.220	BUS-16	0.220	0.000	0.000
BUS-20	0.220	BUS-21	0.220	0.000	0.000
ST_ESTE	0.220	BUS-15	0.220	0.000	0.000
Total System Losses				0.002	0.022

Tabla 79. Pérdidas del transformador 3 con filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-3	0.440	0.0005	0.013
BUS-3	0.440	BUS-9	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-10	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-11	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-6	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-7	0.440	0.000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-8	0.440	0.000	0.000
BUS-11	0.440	BUS-12	0.440	0.000	0.000
Total System Losses				0.0005	0.013

Tabla 80. Pérdidas del transformador 3 con filtro.

From Bus		To Bus		Losses	
Name	Base kV	Name	Base kV	MW	MVAR
BUS-1	13.800	BUS-2	0.440	0.0005	0.003
BUS-2	0.440	BUS-3	0.440	0.0000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-7	0.440	0.0000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-6	0.440	0.0000	0.000
BUS-3	0.440	BUS-5	0.440	0.0000	0.000
Total System Losses				0.0005	0.003

Promedio de pérdidas finales = 0.0015

$$0.002 \times 10^6 \times \frac{1\text{KW}}{1000\text{W}} = 2\text{kW} \quad (5.43)$$

$$0.0015 \times 10^6 \times \frac{1\text{KW}}{1000\text{W}} = 1.5\text{kW} \quad (5.44)$$

5.15.1.1. Cálculo de pérdidas totales

$$P_t = 2\text{kW} - 1.5\text{kW} \quad (5.45)$$

$$P_t = 0.5 \text{ kW} \quad (5.46)$$

5.15.1.2. Cálculo de energía

$$(EH) = \frac{\text{Energía total consumida en un periodo (kWh)}}{\text{Carga máxima (kW)}} \quad (5.47)$$

$$\text{Carga máxima} = 294.3 \text{ kW} + 221.34 \text{ kW}$$

$$\text{Carga máxima promedio} = 257.82 \text{ kW}$$

$$\text{Energía total consumidas en un periodo (kWh)} = 16112 \text{ kWh} + 23033 \text{ kWh}$$

$$\text{Energía promedio total consumidas en un periodo} = 19572.5 \text{ kWh}$$

$$(EH) = \frac{19572.5 \text{ kWh}}{257.82 \text{ kW}} \quad (5.48)$$

$$(EH) = 75.915 \text{ h} \quad (5.49)$$

5.15.1.3. Cálculo de pérdidas de Energía

$$P_{\text{loss}} = \text{Pérdidas totales en kWh} \times \text{semanas} \times \text{horas} \quad (5.50)$$

$$P_{\text{loss}} = 0.5 \text{ kWh} \times 4 \times 75.915 \text{ h} \quad (5.51)$$

$$P_{\text{loss}} = 151.83 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \quad (5.52)$$

Tabla 81. Pliego Tarifario.

RANDO DE CONSUMO	DEMANDA (USD/Kw-mes)	ENERGÍA (USD/kWh)	COMERCIALIZACIÓN (USD/consumidor)
NIVEL DE VOLTAJE	BAJO VOLTAJE CON DEMANDA		
	COMERCIALES		1,414
	4,790	0,090	
	INDUSTRIALES		
	4,790	0,080	
	ENTIDADES OFICIALES, ESCENARIOS DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,790	0,080	
	BOMBEO AGUA		
	4,790	0,070	
NIVEL DE VOLTAJE	BAJO VOLTAJE CON DEMANDA HORARIA		
	COMERCIALES		1,414
	4,790	0,090	
08:00 hasta 22:00 horas		0,072	
22:00 hasta 08:00 horas			
	INDUSTRIALES		
	4,790	0,065	
08:00 hasta 22:00 horas		0,069	
22:00 hasta 08:00 horas			
	E. OFICIALES, ESC. DEPORTIVOS SERVICIO COMUNITARIO Y ABONADOS ESPECIALES		
	4,790	0,080	
08:00 hasta 22:00 horas		0,066	
22:00 hasta 08:00 horas			
	BOMBEO AGUA		
	4,790	0,070	
08:00 hasta 22:00 horas		0,056	
22:00 hasta 08:00 horas			

5.15.1.4. Cálculo de costo por pérdidas

$$151.83 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \times 0.090 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \quad (5.53)$$

$$13.66 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \quad (5.54)$$

$$163.97 \frac{\text{USD}}{\text{año}} \quad (5.55)$$

5.15.2. Penalización por bajo factor de potencia

La tabla 75, muestra en valor que debe pagar cada mes la Industria CEDAL S.A por Bfp.

Tabla 82. Penalización anual por bajo factor de potencia.

MES	VALOR CONSUMO PAGADO	PENALIZACIÓN DE FP	CONSUMO SIN PENALIZACIÓN
ENERO	\$ 56113,41	\$ 5232,32	\$ 50881,09
FEBRERO	\$ 57454,06	\$ 5357,65	\$ 52096,41
MARZO	\$ 56113,40	\$ 5232,63	\$ 50880,77
ABRIL	\$ 57454,05	\$ 5357,65	\$ 52096,40
MAYO	\$ 53544,59	\$ 4993,09	\$ 48.51,50
JUNIO	\$ 58327,94	\$ 5439,14	\$ 52888,80
JULIO	\$ 53754,53	\$ 5012,67	\$ 48741,86
AGOSTO	\$ 63965,28	\$ 5964,83	\$ 58000,45
SEPTIEMBRE	\$ 54716,59	\$ 5102,38	\$ 49614,21
OCTUBRE	\$ 56113,41	\$ 5232,63	\$ 50880,78
NOVIEMBRE	\$ 57454,06	\$ 5357,65	\$ 52096,41
DICIEMBRE	\$ 53544,60	\$ 4993,09	\$ 48551,51
MULTA ANUAL			\$ 50880,93

5.15.2.1. Ahorro económico

Costo por pérdidas anual + Mutas anual por bajo factor de potencia (5.56)

$$163.97 + 12720.23 \frac{\text{USD}}{\text{año}} \quad (5.57)$$

$$12884.205 \frac{\text{USD}}{\text{año}} \quad (5.58)$$

5.15.3. Cálculo del TIR y TMAR

Inversión del Proyecto = 20832 USD

Ahorro económico por Bfp = 12884.205 $\frac{\text{USD}}{\text{año}}$

Instalación de los equipos = 2100 USD

Mantenimiento = 900 USD

Tasa de inflación del 0.9%

Mediante las variables antes mencionadas es posible calcular el TIR y TMAR como parte del análisis económico (Ver Anexo G), siendo los valores obtenidos los siguientes:

TIR: 58,65%

TMAR: 23259,95

Tiempo de recuperación: 2 años

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**6.1. CONCLUSIONES**

- La calidad de energía en las industrias se centra en el análisis de perturbaciones que puedan afectar al sistema eléctrico de alimentación ya sea en variación de corriente, voltaje o frecuencia. Dichas variaciones pueden producir armónicos, bajo factor de potencia y desequilibrios que son capaces de deteriorar elementos eléctricos como transformadores, conductores y maquinarias, las interrupciones de producción debido a estos deterioros repercuten en pérdidas de capital significando declives económicos para las empresas que presentan este tipo de problema.
- El análisis de la calidad de energía en el área de extrusión de la planta CEDAL S.A fue realizada mediante las normas nacionales ARCERNNR 002/20 y la regulación CONELEC 004/01. Por su parte las normativas internacionales utilizadas fueron la IEEE std 519 y la IEEE std 1159 en las cuales se hace referencia a los métodos de estudio de energía y los niveles admisibles de perturbaciones en sistemas eléctricos industriales, sin embargo, las plantas de producción en Ecuador prefieren regirse a

normas nacionales principalmente por el nivel de tolerancia que presentan estas en relación con alteraciones en los sistemas eléctricos.

- En la simulación del análisis de calidad de energía del transformador 1 de 600kV, que alimenta la sección de la prensa 1 en extrusión se pudo comprobar que este y los conductores que abastecen de energía a la maquinaria no están sobrecargados, además se identificó que existe una presencia notable del armónico de corriente tipo cinco. El factor de potencia es de 0.89 por lo que está debajo de lo deseado. Por su parte el análisis de datos y escenarios planteados mediante el programa EASY POWER para el caso pertinente al segundo transformador dio como resultado que al igual que el primero no existe una sobrecarga en este, ni en sus conductores, sin embargo, hay presencia del armónico de corriente tipo 7 y un factor de potencia de 0.90 el cual no es el óptimo para una industria de potencia.

El tercer transformador no presenta una sobrecarga, principalmente porque este es el elemento que menos carga instalada tiene, por su parte al ser los conductores que abastecen la maquinaria del tipo THWN de calibre 4/0 tampoco presentan una sobrecarga en la simulación. Las perturbaciones notables encontradas en el transformador 3 son el armónico de corriente tipo 3, un flicker máximo de 3.59 y factor de potencia de 0.87. En el caso de los tres transformadores se detectó presencia de sags y swells.

- Al presentar los tres transformadores analizados, perturbaciones significativas, como armónicos de voltaje y de corriente, además de un bajo factor de potencia se ha concluido que es necesario la implementación de un filtro de atenuación para los tres casos, el filtro comercial más adecuado es el “Filtro electrónico de paso bajo-pasivo-de armónico FN 3410” el cual cumple los requisitos de diseño para la carga instalada, alimentación y voltaje presentes en el área de extrusión. La mitigación de armónicos mejorará el desempeño del sistema eléctrico de la planta, reduciendo las perturbaciones derivadas de esta problemática y elevando el factor de potencia.

6.2. RECOMEDACIONES

- No es aconsejable dimensionar un banco de capacitores sin mitigar primero las perturbaciones correspondientes a armónicos de voltajes y de corriente, esto se debe a que al instalar filtros el factor de potencia tiende a subir, siendo necesario realizar un nuevo análisis de calidad para obtener nuevos parámetros y dimensionar bancos de capacitores óptimos que mejoren el factor de potencia de la industria.
- Para la recopilación de datos es necesario utilizar equipos como analizadores de redes que se encuentren calibrados ya que los datos deben ser fiables para un correcto estudio de calidad de energía, es necesario verificar que el tiempo de la última calibración del equipo a utilizar no sea mayor a un año.
- Para la conexión del analizador de redes se debe tomar especial énfasis en los puntos determinados por normativa para la recopilación de datos, además es importante establecer un periodo de registro que permita obtener la cantidad necesaria de valores para un análisis de energía más significativo.
- En la corroboración de resultados mediante simulación es fundamental establecer todas las cargas, distancias y calibres de conductores, se recomienda también que en la comparación de datos medidos por el analizador de redes con los simulados. no exista un porcentaje de error mayor al 5 %, esto con el fin de representar el sistema de la manera más precisa posible, obteniendo así conclusiones fiables tanto en los métodos de solución de perturbaciones como en el estado del sistema eléctrico.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Hilder y D. Lozada, Análisis de la Calidad de Energía en la Industria Alimenticia, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [2] D. Romo y D. Morales, «Eficiencia Energética en la Universidad Católica sede Azogues un enfoque de implementación técnico – económico basado en energía solar,» *Revista Técnica Energía*, vol. 17, n° 2, pp. 44-54, 2021.
- [3] ARCERNNR, «EL DIRECTORIO DE LA AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ENERGÍA Y RECURSOS HUMANOS NO RENOVABLES,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf>.
- [4] E. Gomez, Análisis técnico y económico de corrección del factor de potencia del sistema eléctrico trifásico en 220V, del hospital IV Victor Lazarte Echeagaray - Trujillo, Universidad César Vallejo , 2013.
- [5] P. Frank, «¿Qué son los armónicos y como nos afectan?,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/>.
- [6] J. Dayana y C. Barrera, METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA EL ANALISIS DE FENOMENOS DE RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2021.
- [7] A. Guerra, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA INALÁMBRICA, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2019.
- [8] B. Rodríguez, Transferencia inalámbrica de energía mediante acoplamiento magnético inductivo resonante, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2019.
- [9] Norma IEEE 1159-2019, Práctica recomendada por IEEE para monitorear la calidad de energía eléctrica, Comité de Distribución Y transmisión, 2009.
- [10] J. D. Arcila, «ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,» 2016. [En línea]. Available: http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.

- [11] C. Murillo y K. Paucar, ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LA ILUMINACIÓN LED DE SISTEMAS DE ALUMBRADO PÚBLICO EN LA CIUDAD DE AMBATO Av. LUIS ANÍBAL GRANJA SECTOR HUACHI CHICO, Universidad técnica de Cotopaxi, 2019.
- [12] J. Serra, «Guía técnica de eficiencia energética,» 2009. [En línea]. Available: https://circuitor.com/docs/GUIA_EEE_SP-LR.pdf.
- [13] J. Camacho, ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA INDUSTRIAL INDUCUERDAS, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo , 2015.
- [14] IEEE, «Práctica recomendada IEEE y REquisitos para el control armónico en Sistemas de energía eléctrica,» 2014. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/pdf-ieee-std-519-2014-espaolpdf_compress%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/pdf-ieee-std-519-2014-espaolpdf_compress%20(1).pdf).
- [15] L. Mieles y A. Molina, ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO, DE LA EMPRESA PROVEFRUT EN EL CANTÓN LATACUNGA DE ELEPCO S.A, PARA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA, Universidad Técnica de Cotopaxi , 2019.
- [16] S. Castaño y E. Cano, Calidad del Servicio de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia , 2016.
- [17] I. S. 1100-2005, Páctica recomendada por IEEE para alimentación y puesta a tierra de equipo electrónico, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc, 2005.
- [18] G. Elecond, «Banco de capacitores | Necesidad en el uso de reactores de desintonía en banco de capacitores en baja tensión,» *Revista Ingeniería Eléctrica*, nº 365, pp. 2-6, 2019.
- [19] E. Aguado y R. Bravo, EFECTOS CAUSADOS POR LOS ARMÓNICOS EN BANCOS DE CONDENSADORES, Corporación Universitaria Autónoma de Occidente División de Ingenierías Programa de Ingeniería Eléctrica Santiago de Cali, 1995.
- [20] E. Salazar, Monitoreo de la carga y la radiacion solar para el diseño de una sistema fotovoltaico en la casa N° 10 del barrio Maria de la ciudad de Latacunga, Universidad Técnica de Cotopaxi, 2015.

- [21] FLuke, «Calidad Eléctrica,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/434-435#>.
- [22] Fluke, «Calidad Eléctrica,» 2012. [En línea]. Available: <https://docs.rs-online.com/2119/0900766b815db111.pdf>.
- [23] L. EasyPower, «Help Easypower,» 2016. [En línea]. Available: http://help.easypower.com/ezp_sp/9.7/Content/01_EasyPower/Introduction.htm.
- [24] ARCONEL, «PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN, Periodo: Enero – Diciembre 2020,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/resoluciones-pliegos-tarifarios/>.

8. ANEXOS

Anexo A. Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos del sistema de energía (ver nota).

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típico
1.0 Transitorios 1.1 Impulsivo 1.1.1 Nanosegundo 1.1.2 Microsegundos 1.1.3 milisegundos 1.2 Oscilatorio 1.2.1 Baja frecuencia 1.2.2 Frecuencia media 1.2.3 Alta frecuencia	5 ns aumento 1 μs aumento 0,1 ms aumento <5 kHz 5-500 kHz 0,5-5 MHz	<50 ns 50 ns - 1 ms > 1 ms 0,3-50 ms 20 μs 5 μs	 0-4 pu ^a 0-8 pu 0-4 pu
2.0 Variaciones de la raíz cuadrada media (rms) de corta duración 2.1 Instantáneo 2.1.1 Pandeo 2.1.2 Oleaje 2.2 Momentáneo 2.2.1 Interrupción 2.2.2 Pandeo 2.2.3 Oleaje 2.3 Temporal 2.3.1 Interrupción 2.3.2 Pandeo 2.3.3 Oleaje		0,5-30 ciclos 0,5-30 ciclos 0,5 ciclos - 3 s 30 ciclos - 3 s 30 ciclos - 3 s > 3 s - 1 min > 3 s - 1 min > 3 s - 1 min	0,1-0,9 pu 1,1-1,8 pu <0,1 pu 0,1-0,9 pu 1,1-1,4 pu <0,1 pu 0,1-0,9 pu 1,1-1,2 pu
3.0 Variaciones rms de larga duración 3.1 Interrupción sostenida 3.2 Subtensiones 3.3 Sobretensiones 3.4 Sobrecarga de corriente		> 1 min > 1 min > 1 min > 1 min	0,0 pu 0,8-0,9 pu 1,1-1,2 pu
4.0 Desequilibrio 4.1 Voltaje 4.2 Corriente		estado estable estado estable	0,5-5% 1,0-3,0%
5.0 distorsión de la forma de onda 5.1 Desplazamiento de CC 5.2 Armónicos 5.3 Interarmónicos 5.4 Muecas 5.5 Ruido	0-9 kHz 0-9 kHz banda ancha	estado estable estado estable estado estable estado estable estado estable	0-0,1% 0-20% 0-2%
6.0 Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	intermitente	0,1-7% 0,2-2 P B
7.0 Variaciones de frecuencia de energía		<10 s	± 0,10 Hz
NOTA: estos términos y categorías se aplican a las mediciones de la calidad de la energía y no deben confundirse con términos similares definidos en IEEE Std 1366™ -2012 [B30] y otras normas, prácticas recomendadas y guías relacionadas con la confiabilidad.			

Anexo B. Diagramas unifilares de la Industria.

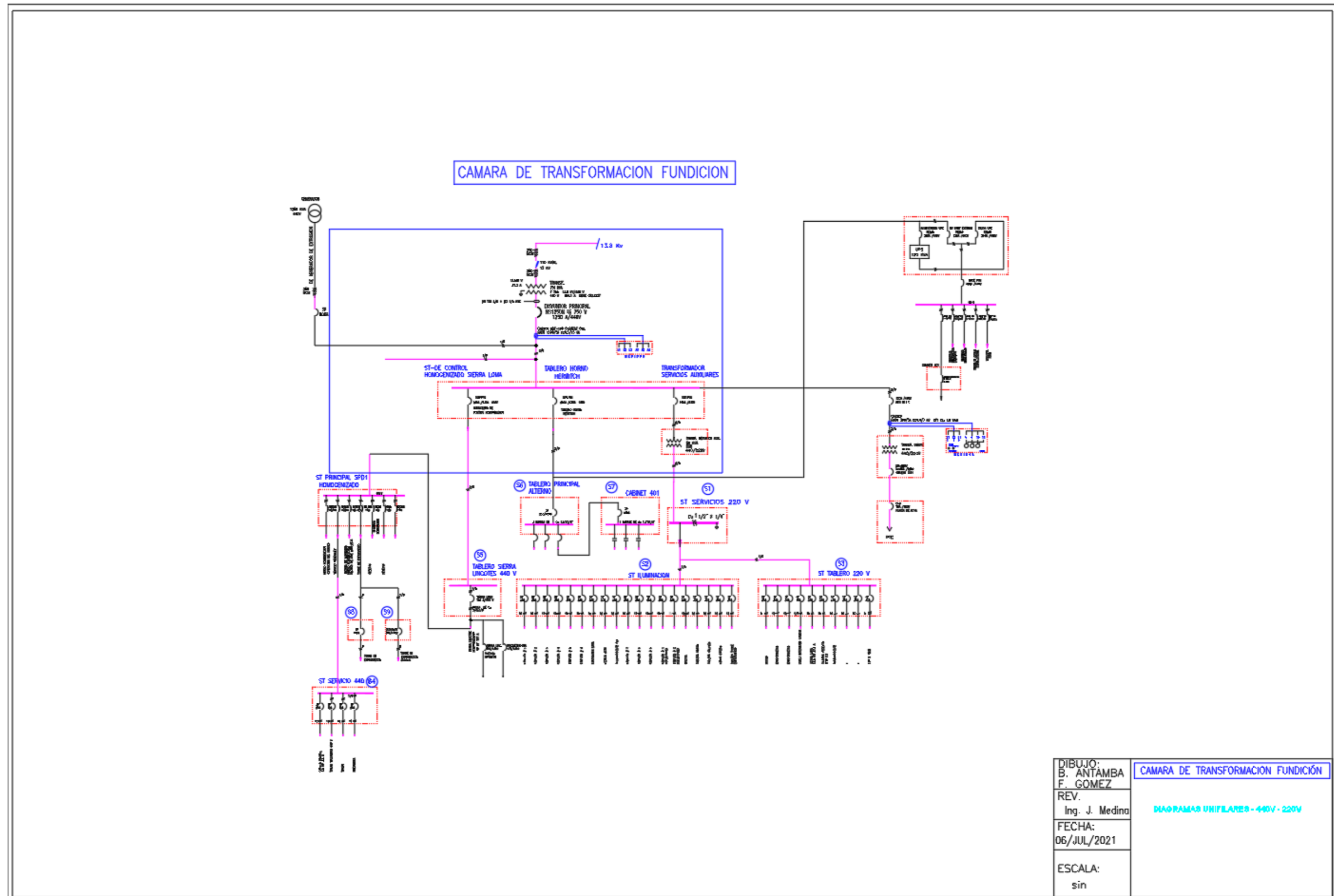


Figura B.1. Diagrama Unifilar del área de Fundición.

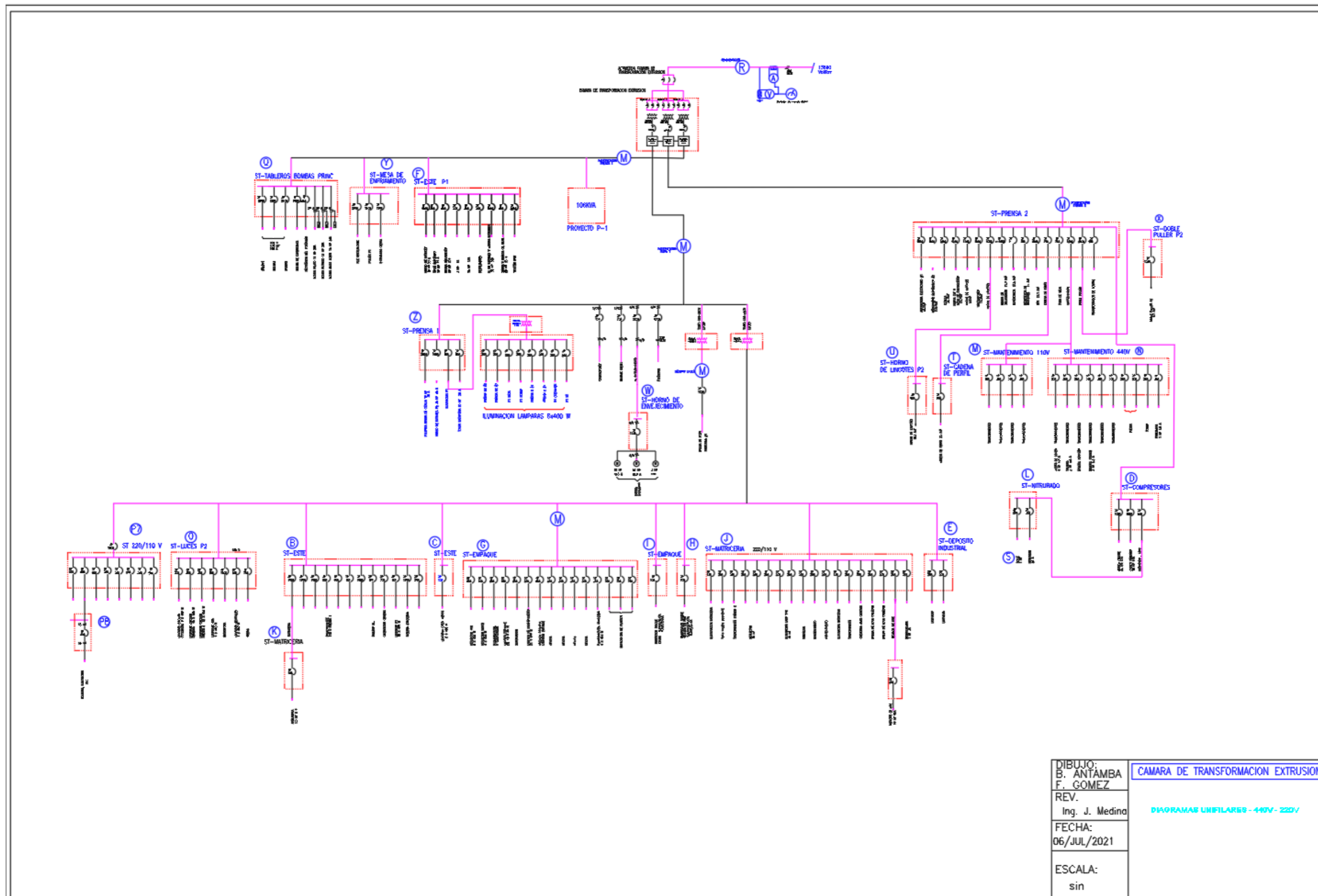


Figura B.2. Diagrama Unifilar del área de Extrusión.

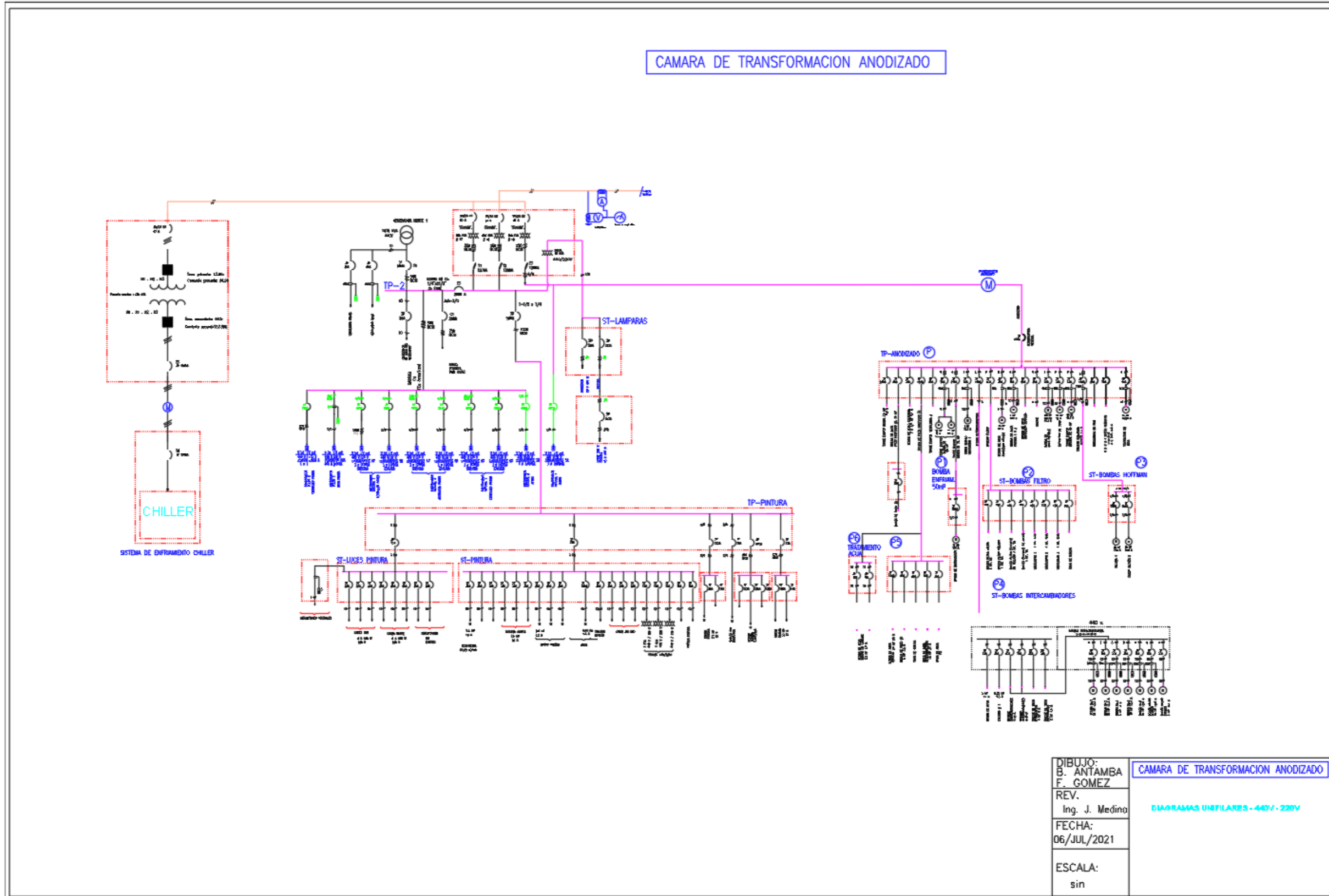


Figura B.3. Diagrama Unifilar del área de Anodizado.

Anexo C.

Tabla C.1. Levantamiento de Cargas del Transformador 1.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSIÓN TRANSFORMADOR 1									
Máquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	Potencia Activa (KW)	Factor de Potencia	Ángulo Rad	Ángulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Pulidora bomba de Cizalla	50	745,7	37285,00	29,64	0,90	0,45	25,84	14,36	32,94
Horno de matrices P2	30	745,7	22371,00	17,78	0,90	0,45	25,84	8,61	19,76
Torno matricería	20	745,7	14914,00	11,86	0,90	0,45	25,84	5,74	13,17
Iluminación P1			3200,00	2,54	0,90	0,45	25,84	1,23	2,83
Compresores	8	745,7	5592,75	4,45	0,90	0,45	25,84	2,15	4,94
Bombas Diesel	19	745,7	14168,30	11,26	0,90	0,45	25,84	5,46	12,52
Horno envejecimiento 1	10	745,7	7457,00	5,93	0,90	0,45	25,84	2,87	6,59
Horno envejecimiento 2	50	745,7	37285,00	29,64	0,90	0,45	25,84	14,36	32,94
Horno envejecimiento 3	3	745,7	2237,10	1,78	0,90	0,45	25,84	0,86	1,98
Fundición	50	745,7	37285,00	29,64	0,90	0,45	25,84	14,36	32,94
Bomba de pozo profundo	43	745,7	31692,25	25,20	0,90	0,45	25,84	12,20	27,99
ST 200/110 P7	10	745,7	7457,00	5,93	0,90	0,45	25,84	2,87	6,59
Lámparas circuito occidental			3200,00	2,54	0,90	0,45	25,84	1,23	2,83
Lámparas circuito derecho			4000,00	3,18	0,90	0,45	25,84	1,54	3,53
Lámparas circuito prensa 2			4800,00	3,82	0,90	0,45	25,84	1,85	4,24
Lámparas sur			1600,00	1,27	0,90	0,45	25,84	0,62	1,41
Estiradora	2	745,7	1491,40	1,19	0,90	0,45	25,84	0,57	1,32
Lámparas centrales			400,00	0,32	0,90	0,45	25,84	0,15	0,35
Sierra	2	745,7	1491,40	1,19	0,90	0,45	25,84	0,57	1,32

Tabla C.2. Continuación del levantamiento de Cargas del Transformador 1.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSION TRANSFORMADOR 1									
Máquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	Potencia Activa (KW)	Factor de Potencia	Ángulo Rad	Ángulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Arenadora	2	745,7	1118,55	0,89	0,90	0,45	25,84	0,43	0,99
Toma corriente 100 V prensa 1	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Tablero B	15	745,7	11185,50	8,89	0,90	0,45	25,84	4,31	9,88
Calentador general	8	745,7	5965,60	4,74	0,90	0,45	25,84	2,30	5,27
Lámparas P1			4800,00	3,82	0,90	0,45	25,84	1,85	4,24
Tablero Anodizado	15	745,7	11185,50	8,89	0,90	0,45	25,84	4,31	9,88
Lámparas Oper. Sierra		400,0	800,00	0,64	0,90	0,45	25,84	0,31	0,71
Reflector sur			4800,00	3,82	0,90	0,45	25,84	1,85	4,24
Reflector norte			2400,00	1,91	0,90	0,45	25,84	0,92	2,12
Fluorescentes y computador	3	745,7	2237,10	1,78	0,90	0,45	25,84	0,86	1,98
Lampara empaque			1520,00	1,21	0,90	0,45	25,84	0,59	1,34
Supervisado	2	745,7	1491,00	1,19	0,90	0,45	25,84	0,57	1,32
Lampara de envejecimiento			8400,00	6,68	0,90	0,45	25,84	3,23	7,42
Breaker principal lámparas de empaque	7	745,7	5219,90	4,15	0,90	0,45	25,84	2,01	4,61
Oficina	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Oficina	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Oficina	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Oficina	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Fluorescentes Anodizado	3	400,0	1600,00	1,27	0,90	0,45	25,84	0,62	1,41
Empacadora de plástico	6	745,7	4474,20	3,56	0,90	0,45	25,84	1,72	3,95
Dosificado tanque color 1			90,00	0,07	0,90	0,45	25,84	0,03	0,08

Tabla C.3. Continuación del levantamiento de Cargas del Transformador 1.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSION TRANSFORMADOR 1									
Máquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	Potencia Activa (KW)	Factor de Potencia	Ángulo Rad	Ángulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Dosificado tanque color 2	1	745,7	372,85	0,30	0,90	0,45	25,84	0,14	0,33
Dosificador tanque sellado en frio 1			180,00	0,14	0,90	0,45	25,84	0,07	0,16
Dosificador tanque sellado en frio 2	1	745,7	372,85	0,30	0,90	0,45	25,84	0,14	0,33
Iluminación matricería	3	745,7	2237,10	1,78	0,90	0,45	25,84	0,86	1,98
Toma virgen corriente	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Tomacorriente prensa 2	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Reflector	30	745,7	22371,00	17,78	0,90	0,45	25,84	8,61	19,76
Iluminación lado sur	10	745,7	7457,00	5,93	0,90	0,45	25,84	2,87	6,59
Niquelina	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Mantenimiento	2	745,7	1491,40	1,19	0,90	0,45	25,84	0,57	1,32
Iluminación matricería	5	745,7	3728,50	2,96	0,90	0,45	25,84	1,44	3,29
Tomacorriente	1	745,7	745,70	0,59	0,90	0,45	25,84	0,29	0,66
Quemador sosa caustica	5	745,7	3728,50	2,96	0,90	0,45	25,84	1,44	3,29
Bomba de agua comedor	9	745,7	6711,30	5,34	0,90	0,45	25,84	2,58	5,93
Bomba de agua comedor	9	745,7	6711,30	5,34	0,90	0,45	25,84	2,58	5,93
Secador de aire	50	745,7	37285,00	29,64	0,90	0,45	25,84	14,36	32,94
Esmeriladora	50	745,7	37285,00	29,64	0,90	0,45	25,84	14,36	32,94
Lámparas			3200,00	2,54	0,90	0,45	25,84	1,23	2,83
Lámparas			4800,00	3,82	0,90	0,45	25,84	1,85	4,24
TOTAL				168,48				81,60	187,21

Tabla C.4. Levantamiento de Cargas del Transformador 2.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSIÓN TRANSFORMADOR 2									
Máquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	Potencia Activa (KW)	Factor de Potencia	Ángulo Rad	Ángulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Arrancador Electrónico #1	150	745,7	111855,00	70,47	0,90	0,45	25,84	34,13	78,30
Arrancador Electrónico #2	150	745,7	111855,00	70,47	0,90	0,45	25,84	34,13	78,30
Cizalla	30	745,7	22371,00	14,09	0,90	0,45	25,84	6,83	15,66
Horno TKF y mesa de Enfriamiento	15	745,7	11185,50	7,05	0,90	0,45	25,84	3,41	7,83
Horno de Matrices	30	745,7	22371,00	14,09	0,90	0,45	25,84	6,83	15,66
Ventiladores	5	745,7	3728,50	2,35	0,90	0,45	25,84	1,14	2,61
Horno de Lingotes	30	745,7	22371,00	14,09	0,90	0,45	25,84	6,83	15,66
Bomba de Sellamiento	15	745,7	11185,50	7,05	0,90	0,45	25,84	3,41	7,83
Supercarga	9	745,7	6711,30	4,23	0,90	0,45	25,84	2,05	4,70
Resistencia de Container	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
OTG	3	745,7	2237,10	1,41	0,90	0,45	25,84	0,68	1,57
Cadena de Perfil	5	745,7	3728,50	2,35	0,90	0,45	25,84	1,14	2,61
Toma de Vela	2	745,7	1118,55	0,70	0,90	0,45	25,84	0,34	0,78
Mantenimiento	9	745,7	6711,30	4,23	0,90	0,45	25,84	2,05	4,70
Doble Puller	5	745,7	3728,50	2,35	0,90	0,45	25,84	1,14	2,61
Transformador de Control	40	745,7	29828,00	18,79	0,90	0,45	25,84	9,10	20,88
Doble Puller P2	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
Sierra de Vaivén	4	745,7	2982,80	1,88	0,90	0,45	25,84	0,91	2,09
Taladro	2	745,7	1491,40	0,94	0,90	0,45	25,84	0,46	1,04
Esmeril Grande	3	745,7	2237,10	1,41	0,90	0,45	25,84	0,68	1,57
Esmeril Pequeño	2	745,7	1118,55	0,70	0,90	0,45	25,84	0,34	0,78

Tabla C.5. Continuación del levantamiento de Cargas del Transformador 2.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSION TRANSFORMADOR 2									
Máquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	Potencia Activa (KW)	Factor de Potencia	Angulo Rad	Angulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Tomacorrientes	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
Tomacorrientes	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
Suelda	5	745,7	3728,50	2,35	0,90	0,45	25,84	1,14	2,61
Torno	10	745,7	7457,00	4,70	0,90	0,45	25,84	2,28	5,22
Fresadora	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
Tecele	1	745,7	745,70	0,47	0,90	0,45	25,84	0,23	0,52
Nitrurado	10	745,7	7457,00	4,70	0,90	0,45	25,84	2,28	5,22
Quincy Grande	55	745,7	41013,50	25,84	0,90	0,45	25,84	12,51	28,71
Quincy Pequeño	50	745,7	37285,00	23,49	0,90	0,45	25,84	11,38	26,10
TOTAL (KW)				62,95				30,49	69,95

Tabla C.6. Levantamiento de Cargas del Transformador 3.

MAQUINARIA INSTALADA EN EL AREA DE EXTRUSIÓN TRANSFORMADOR 3									
Maquina	Potencia (HP)	Potencia de un HP	Potencia (W)	TOTAL (KW)	Factor de Potencia	Angulo Rad	Angulo Grados	Potencia Reactiva (KVAR)	Potencia Aparente (KVA)
Bombas	50	745,7	37285,00	33,93	0,90	0,45	25,84	16,43	37,70
Bombas	50	745,7	37285,00	33,93	0,90	0,45	25,84	16,43	37,70
Bombas	50	745,7	37285,00	33,93	0,90	0,45	25,84	16,43	37,70
Bomba de Supercarga	10	745,7	7457,00	6,79	0,90	0,45	25,84	3,29	7,54
Resistencia del Container	1	745,7	745,70	0,68	0,90	0,45	25,84	0,33	0,75
Bomba Piloto	15	745,7	11185,50	10,18	0,90	0,45	25,84	4,93	11,31
Bomba Filtrado	15	745,7	11185,50	10,18	0,90	0,45	25,84	4,93	11,31
Bomba Acum. Aceite	15	745,7	11185,50	10,18	0,90	0,45	25,84	4,93	11,31
PLE Ventiladores	2	745,7	1491,40	1,36	0,90	0,45	25,84	0,66	1,51
Puller P1	9	745,7	6711,30	6,11	0,90	0,45	25,84	2,96	6,79
Estiradora Cierra	4	745,7	2982,80	2,71	0,90	0,45	25,84	1,31	3,02
Horno de Matrices	30	745,7	22371,00	20,36	0,90	0,45	25,84	9,86	22,62
Teclé Eléctrico	10	745,7	7457,00	6,79	0,90	0,45	25,84	3,29	7,54
Bomba Sellamiento	20	745,7	14914,00	13,57	0,90	0,45	25,84	6,57	15,08
3 HP	3	745,7	2237,10	2,04	0,90	0,45	25,84	0,99	2,26
10 HP	10	745,7	7457,00	6,79	0,90	0,45	25,84	3,29	7,54
Ventiladores	5	745,7	3728,50	3,39	0,90	0,45	25,84	1,64	3,77
H. de Matrices y Cámara Extrusión	30	745,7	22371,00	20,36	0,90	0,45	25,84	9,86	22,62
Sierra y Suelda OIL Gear	5	745,7	3728,50	3,39	0,90	0,45	25,84	1,64	3,77
Splitter Box	3	745,7	2237,10	2,04	0,90	0,45	25,84	0,99	2,26
TOTAL				228,684				110,76	254,09

Anexo D. Simulación.

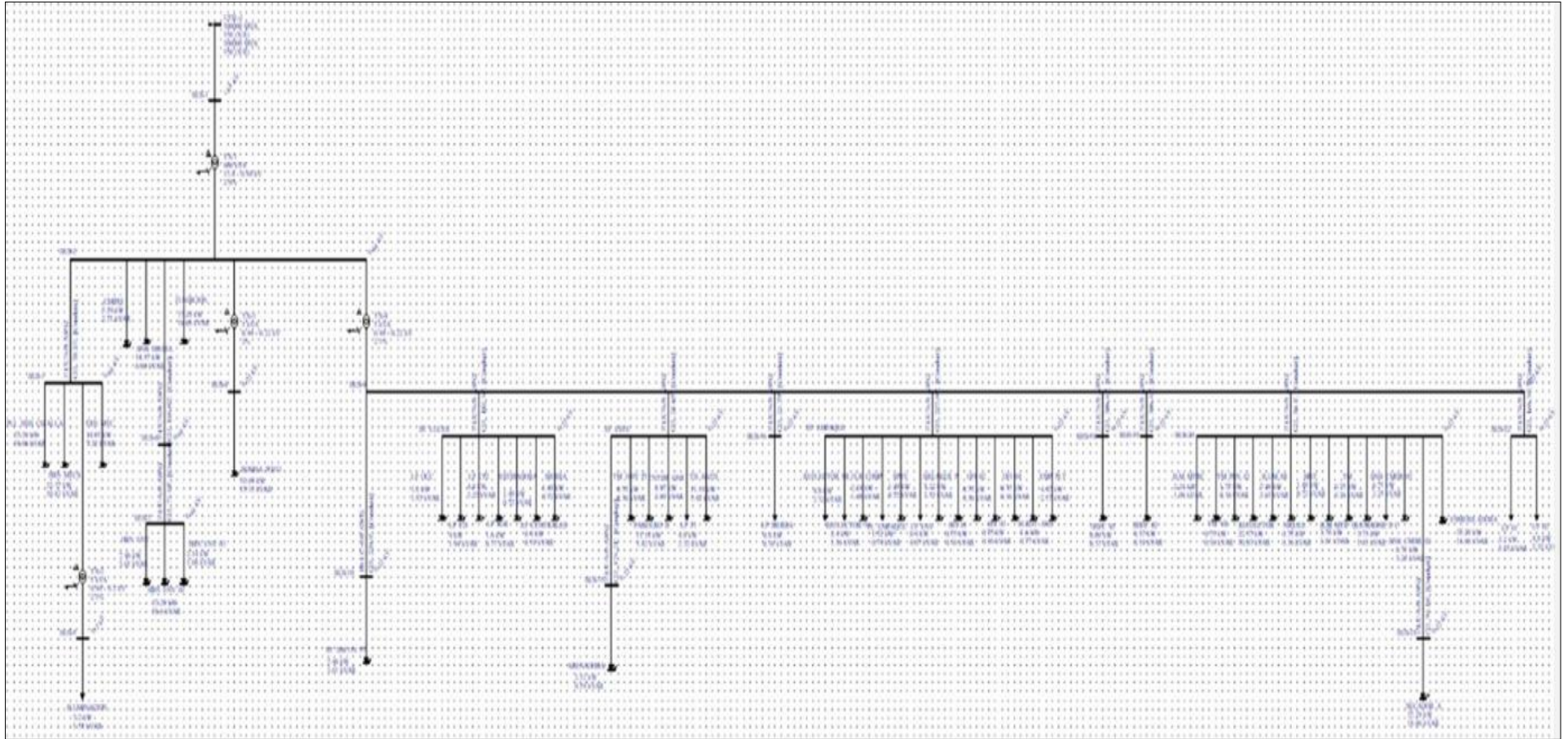


Figura D.1. Simulación del transformador 1 en el software EASY POWER.

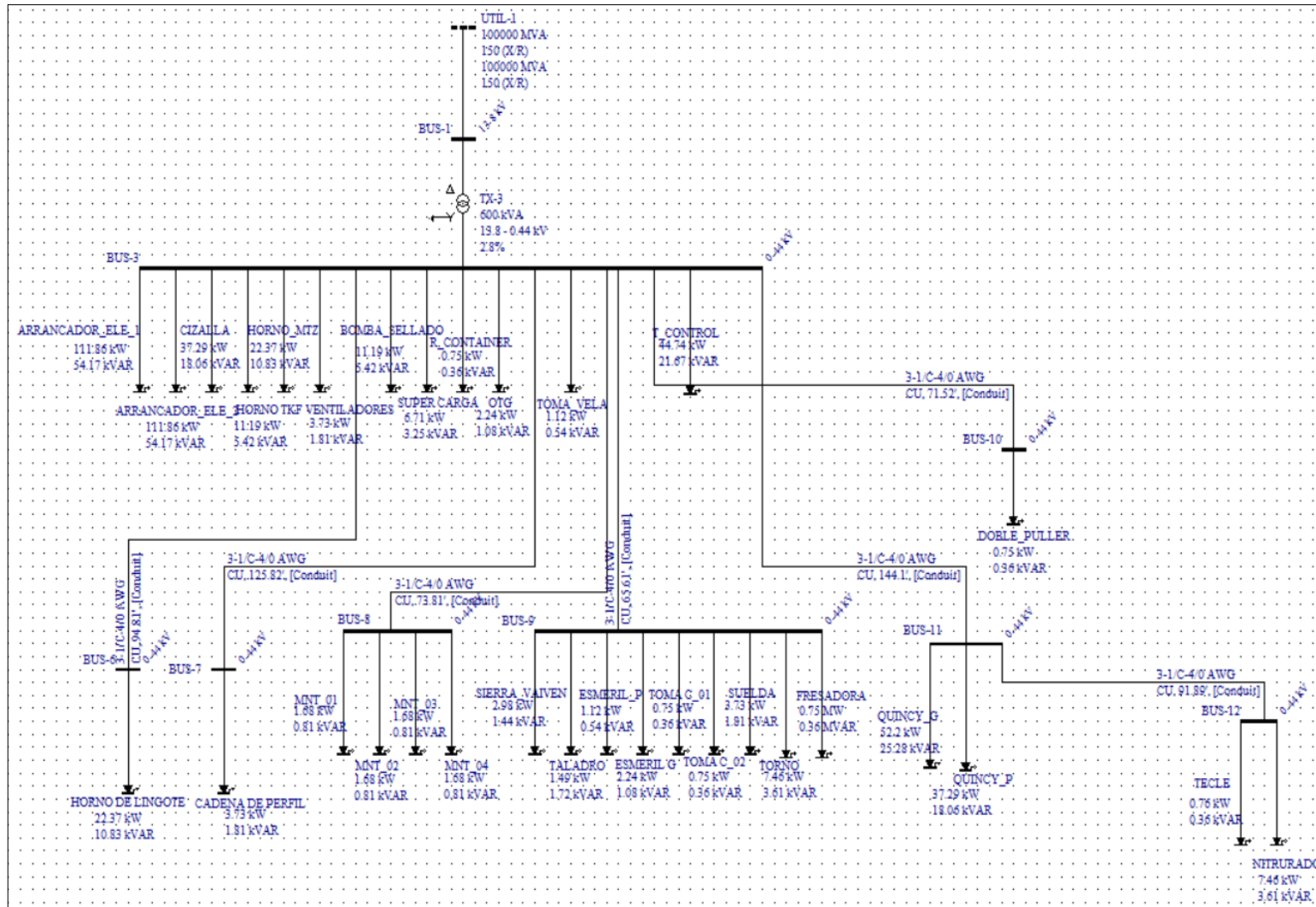


Figura D.2. Simulación del transformador 2 en el software EASY POWER.

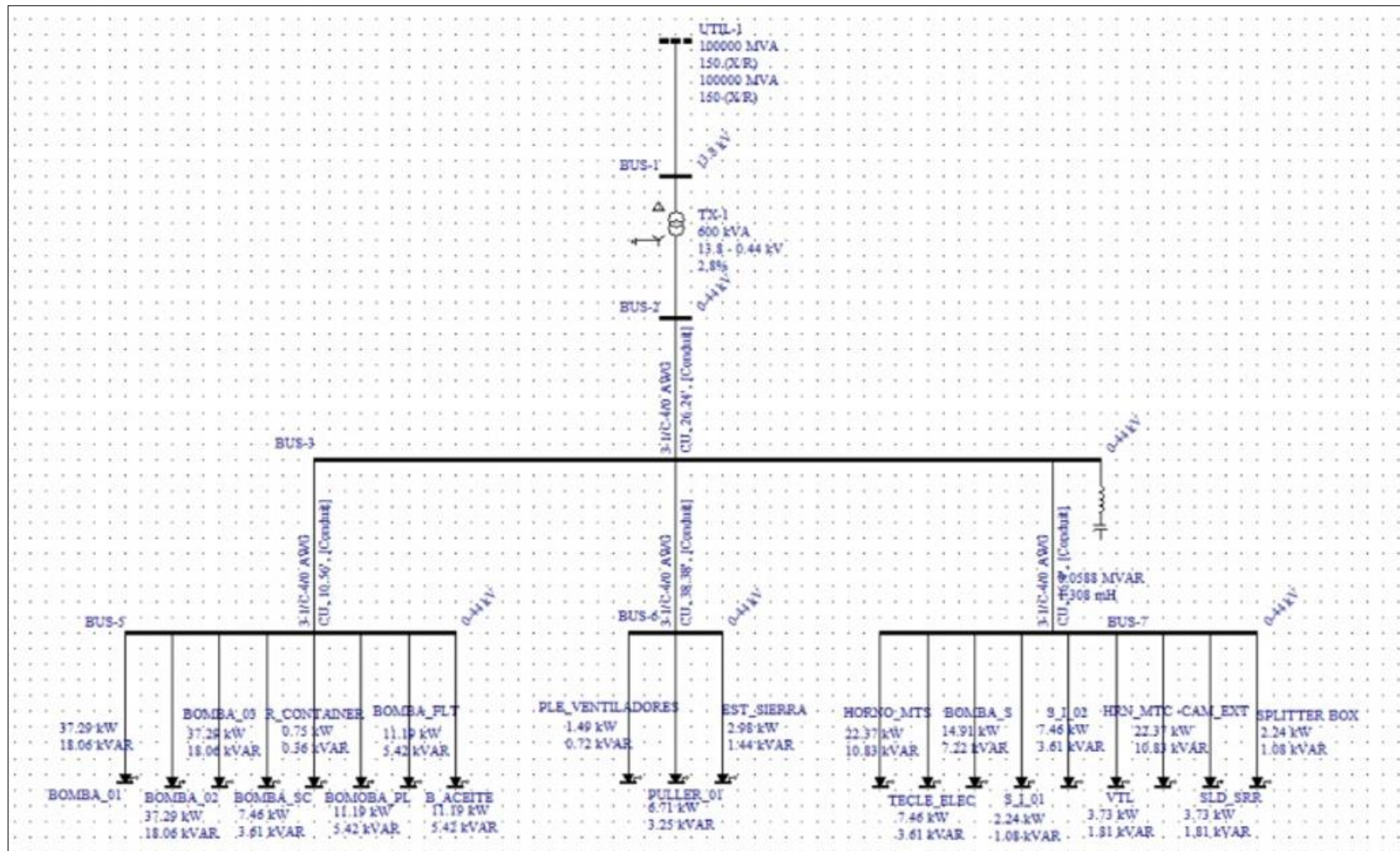


Figura D.3. Simulación del transformador 3 en el software EASY POWER.

Anexo E. Calculo y dimensionamiento de filtro para atenuación de armónico.**TRANSFORMADOR 1**

Potencia consumida en la Carga = 365,23 kW

Voltaje L-L = 440W

$$f_{p1}=0.89 \qquad \theta_1 = \cos^{-1}(0.87) = 27.13 \qquad (E.1)$$

$$f_{p2}=0.92 \qquad \theta_2 = \cos^{-1}(0.92) = 23.07 \qquad (E.2)$$

Cálculo de KVAR efectivos (Qeff).

$$Q_{\text{eff}} = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \qquad (E.3)$$

$$Q_{\text{eff}} = 294.3 (\tan (27.13) - \tan (23.07)) \qquad (E.4)$$

$$Q_{\text{eff}} = 31.53 \text{ kVAR} \qquad (E.5)$$

Cálculo de la Reactancia efectiva del filtro

$$X_{\text{eff}} = \frac{(V_{\text{ll sist}})^2}{Q_{\text{eff}}} \qquad (E.6)$$

$$X_{\text{eff}} = \frac{(440 \text{ v})^2}{31.53 \times 10^3} \qquad (E.7)$$

$$X_{\text{eff}} = 6.141 \text{ x fase} \qquad (E.8)$$

$$h = \frac{f \text{ armónico}}{f \text{ fundamental}} \quad (\text{E.9})$$

$$h = \frac{300}{60} ; h=5 ; \quad 5*6\%=0.3 ; \quad 5-0.18=4.7 \quad (\text{E.10})$$

Cálculo de la Reactancia capacitiva

$$X_c = \frac{(hx0.6)^2}{(hx0.6)^2 - 1} * X_{\text{eff}} \quad (\text{E.11})$$

$$X_c = \frac{(0.3)^2}{(0.3)^2 - 1} * 6.141 \quad (\text{E.12})$$

$$X_c = 6.432 \, \Omega \quad (\text{E.13})$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (\text{E.14})$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 6.432} \quad (\text{E.15})$$

$$C = 412.389 \, \mu\text{F} \quad (\text{E.16})$$

Debemos elegir un capacitor de valor comercial de 500 uF.

Cálculo de la Reactancia inductiva

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (\text{E.17})$$

$$X_L = \frac{6.432}{5^2} \quad (\text{E.18})$$

$$X_L = \frac{6.432}{25} \quad (\text{E.19})$$

$$X_L = 0.2573 \, \Omega \quad (\text{E.20})$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi * 60} \quad (\text{E.21})$$

$$L = \frac{0.2573 \Omega}{2 * \pi * 60} \quad (E.22)$$

$$L = 0.6825 \text{ mH} \quad (E.23)$$

Cálculo de la Resistencia del Filtro

$$R = \frac{X_l * h * 0.6}{Q_f} \quad (E.24)$$

$$R = \frac{0.2573 \Omega * 0.3}{20} \quad (E.25)$$

$$R = 60.463 \text{ m}\Omega \quad (E.26)$$

Cálculo de la Impedancia del Filtro

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (E.27)$$

$$Z = 60.463 \text{ m}\Omega + j \left(2 \times \pi \times 60 \times 0.6825 \text{ mH} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 412.389 \text{ uF}} \right) \quad (E.28)$$

$$Z = 0.0604 - j 6.1749 \quad (E.29)$$

Cálculo de los kVAR del Filtro

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{V_i^2 I - I}{X_c - X_l} \quad (E.30)$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{(440)^2}{6.432 - 0.2573} \quad (E.31)$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = 0.0314 \text{ MVA} \quad (E.32)$$

El filtro adecuado debe ser comprobado mediante la simulación para lo cual se ingresarán los siguientes parámetros para este elemento:

Inductor= $0.060463 + j 6.432 \Omega$

Capacidad en MVAR= 0.0314 MVAR

Voltaje de línea a línea = 0.44 kV

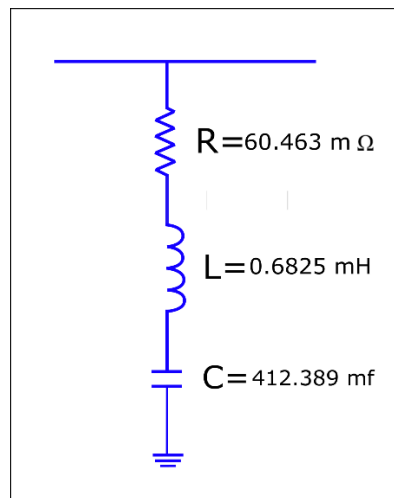


Figura E.1. Diseño del filtro para mitigar armónicos para el transformador 1.

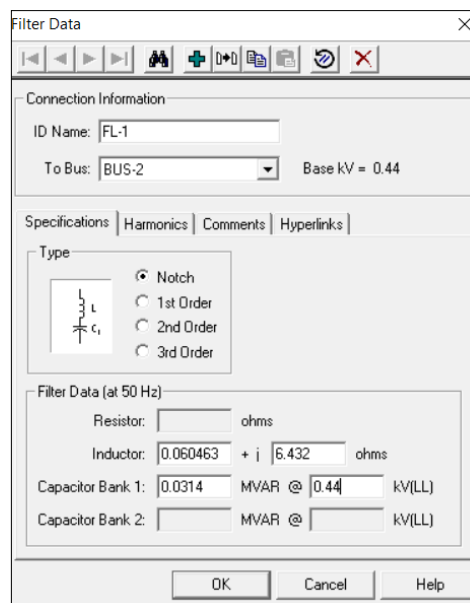


Figura E.2. Configuración de parámetros del filtro en EASY POWER para el transformador 1.

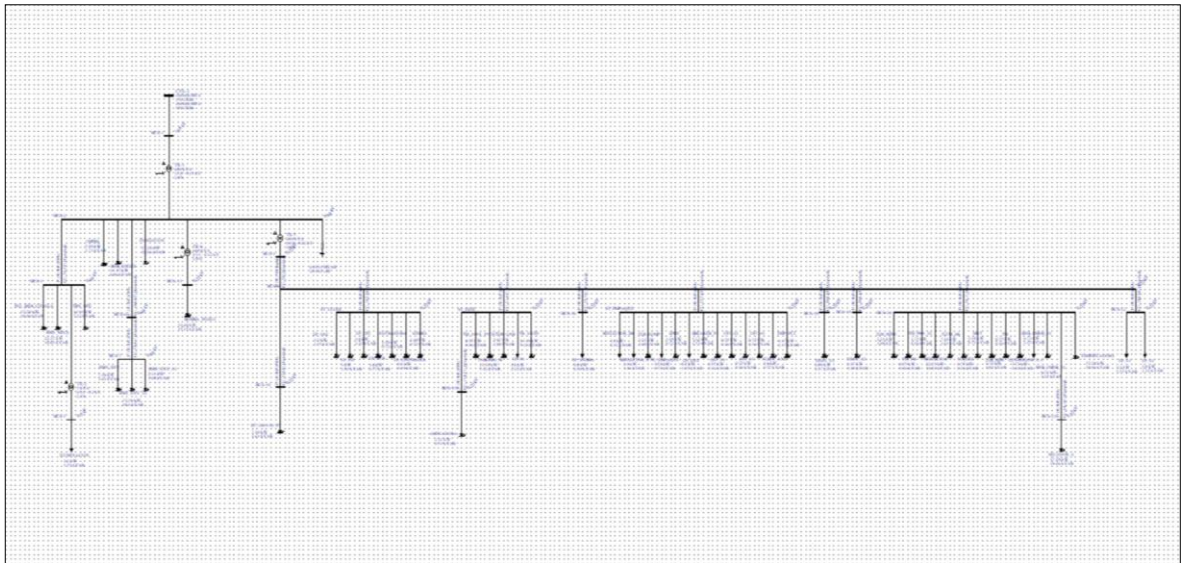


Figura E.3. Simulación del sistema del transformador 1 con el filtro diseñado en el software EASY POWER.

Anexo F. Calculo y dimensionamiento de filtro para atenuación de armónico.

TRANSFORMADOR 3

Potencia consumida en la Carga = **221,34 kW**

Voltaje L-L = **440W**

$$f_{p1}=0.87 \qquad \theta_1= \cos^{-1}(0.87)=29.54 \qquad (F.1)$$

$$f_{p2}=0.92 \qquad \theta_2= \cos^{-1}(0.92)=23.07 \qquad (F.2)$$

Cálculo de KVAR efectivos (Qeff)

$$Q_{\text{eff}}=P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \qquad (F.3)$$

$$Q_{\text{eff}}=294.3 (\tan (29.54) - \tan (23.07)) \qquad (F.4)$$

$$Q_{\text{eff}}=31.15 \text{ kVAR} \quad (\text{F.5})$$

Cálculo de la Reactancia efectiva del filtro

$$X_{\text{eff}} = \frac{(\text{Vll sist})^2}{Q_{\text{eff}}} \quad (\text{F.6})$$

$$X_{\text{eff}} = \frac{(440 \text{ v})^2}{31.15 \times 10^3} \quad (\text{F.7})$$

$$X_{\text{eff}} = 6.215 \text{ x fase} \quad (\text{F.8})$$

$$h = \frac{f \text{ armónico}}{f \text{ fundamental}} \quad (\text{F.9})$$

$$h = \frac{180}{60} ; h=3 ; \quad 3*6\%=0.18 ; \quad 3-0.18=2.82 \quad (\text{F.10})$$

Cálculo de la Reactancia capacitiva

$$X_c = \frac{(hx0.6)^2}{(hx0.6)^2 - 1} * X_{\text{eff}} \quad (\text{F.11})$$

$$X_c = \frac{(0.18)^2}{(0.18)^2 - 1} * 6.215 \quad (\text{F.12})$$

$$X_c = 7.109 \Omega \quad (\text{F.13})$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (\text{F.14})$$

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 7.109} \quad (\text{F.15})$$

$$C = 373.113 \text{ uF} \quad (\text{F.16})$$

Debemos elegir un capacitor de valor comercial de 420uF.

Cálculo de la Reactancia inductiva

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (\text{F.17})$$

$$X_L = \frac{7.109}{3^2} \quad (\text{F.18})$$

$$X_L = \frac{7.109}{9} \quad (\text{F.19})$$

$$X_L = 0.7899 \, \Omega \quad (\text{F.20})$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot 60} \quad (\text{F.21})$$

$$L = \frac{0.7899 \, \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 60} \quad (\text{F.22})$$

$$L = 2.0953 \, \text{mH} \quad (\text{F.23})$$

Cálculo de la Resistencia del Filtro

$$R = \frac{X_L \cdot h \cdot 0.6}{Q_f} \quad (\text{F.24})$$

$$R = \frac{0.7899 \, \Omega \cdot 0.18}{20} \quad (\text{F.25})$$

$$R = 111.380 \, \text{m}\Omega \quad (\text{F.26})$$

Cálculo de la Impedancia del Filtro

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (\text{F.27})$$

$$Z=111.380 \text{ m}\Omega + j (2 \times \pi \times 60 \times 2.0953 \text{ mH} - \frac{1}{2\pi \times 60 \times 373.113 \text{ uF}} \quad (\text{F.28})$$

$$Z=0.1113-j 6.3194 \quad (\text{F.29})$$

Cálculo de los kVAR del Filtro

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{V_i^2 I_l}{X_c - X_l} \quad (\text{F.30})$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = \frac{(440)^2}{7.109 - 0.7899} \quad (\text{F.31})$$

$$Kvar_{\text{filtro}} = 0.0306 \text{ MVA} \quad (\text{F.32})$$

Con base en los cálculos realizados se puede dimensionar un filtro adecuado, el diseño debe ser comprobado mediante la simulación para lo cual se ingresarán los siguientes parámetros para este elemento:

Inductor=0.1113 + j 7.109 Ω

Capacidad en MVAR=0.0306 MVAR

Voltaje de línea a línea =0.44 kV

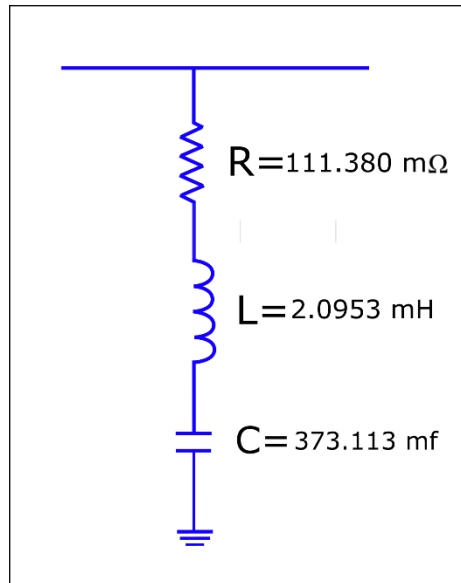


Figura F.1. Diseño del filtro para mitigar armónicos en el transformador 3.

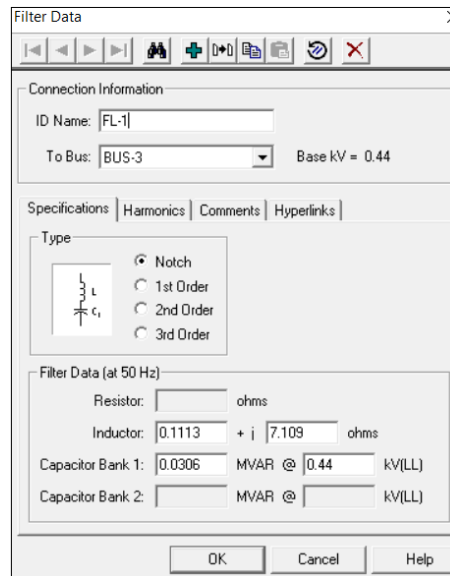


Figura F.2. Configuración de parámetros del filtro en EASY POWER para el transformador 3.

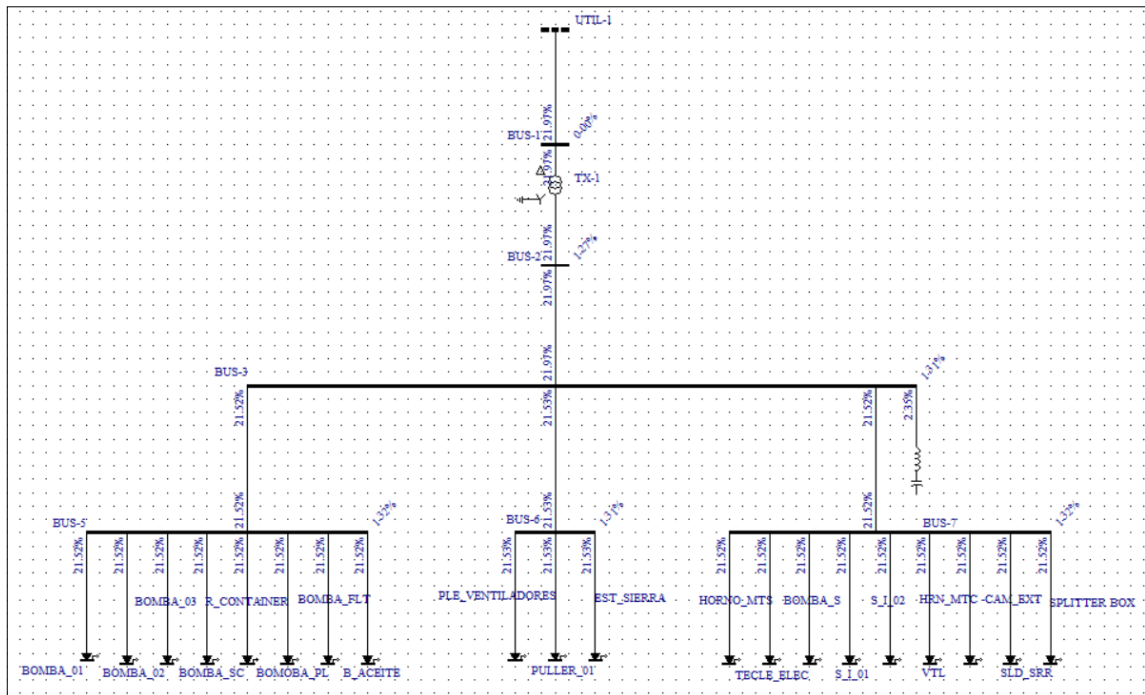


Figura F.3. Simulación del sistema del transformador 3 con el filtro diseñado en el software EASY POWER.

Anexo G. Cálculo del TIR y TMAR**Tabla G.1.** Cálculo del TIR Y TMAR

Cuentas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	(20.832,00)										
Ahorro Económico		12.884,21	13.000,16	13.529,27	14.079,91	14.652,96	15.249,34	15.869,99	16.515,90	17.188,09	17.887,65
Gastos											
Instalación		1.400,00									
Mantenimiento		600,00	624,42	649,83	676,28	703,81	732,45	762,26	793,29	825,57	859,17
Flujo neto	(20.832,00)	10.884,21	12.375,74	12.879,44	13.403,63	13.949,16	14.516,89	15.107,72	15.722,61	16.362,52	17.028,47

Anexo H. Calibración.

Figura H.1. Certificado de Calibración del Analizador de Redes.

METRÓLOGOS ASOCIADOS DEL ECUADOR		LABORATORIO DE CALIBRACIÓN Y ENSAYO	
			
CONTRIBUYENDO AL SISTEMA DE CALIDAD ECUATORIANO		Red Ecuatoriana de Metrología	
		Accreditación N° SAE-LCA-17-001 LABORATORIO DE CALIBRACIÓN	
		"Laboratorios Secundarios de Calibración"	
MAGNITUDES ELÉCTRICAS			
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN			
Número de Certificado: LMEL19341PQA			
<u>DATOS DEL CLIENTE</u>		<u>INSTRUMENTO BAJO PRUEBA</u>	
Nombre:	ING. PAULINA SALAZAR	Descripción:	POWER QUALITY AND ENERGY ANALYZER
Dirección:	Latacunga	Marca:	FLUKE
Representante:	Ing. Paulina Salazar.	Modelo:	435 II
Teléfono:	099 2546829	Serie:	-----
		Código:	IPS-18-560-LME
		Fecha de recepción:	2021-03-05
PROCEDIMIENTO UTILIZADO: PR-LMEL-02			
<u>CONDICIONES AMBIENTALES</u>		<u>FECHA DE CALIBRACIÓN</u>	
Lugar de Calibración:	LABORATORIO	Inicio de Calibración:	2021-03-06
	<u>PROMEDIO</u>	Fin de Calibración:	2021-03-06
Temperatura ambiente:	20,6 °C	Fin de Emisión:	2021-03-06
Humedad Relativa:	45,9 % HR	Próxima Calibración:	-----
		Núm. de días de Calibración:	01 día
<u>INSTRUMENTO PATRÓN UTILIZADO</u>			
Descripción:	MULTI PRODUCT CALIBRATOR	AMP AC/DC CLAMP COIL ADAPTER	
Marca:	TRANSMILLE	TRANSMILLE	
Modelo:	3041A	EA002	
Serie:	L1395A16	111657A16	
Núm. Certificado:	LMEL19017PMC	38364	
Fecha de Cal:	2021-03-06	2021-03-07	
F. de próx. Cal:	2022-03-07	2022-03-15	
<u>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CALIBRACIÓN</u>			
<p>Todas las incertidumbres declaradas en este certificado de calibración son expresadas para un factor de cobertura $k=2$ (aproximadamente 95,45 % de probabilidad de cobertura (ó nivel de confianza) asumiendo distribución normal) de acuerdo a la G.U.M. La calibración ha considerado entre otras las siguientes fuentes de incertidumbre: Instrumento Patrón, Sistema de Calibración, Repetibilidad y Resoluciones de las mediciones del instrumento bajo prueba.</p> <p>Los resultados de este Certificado de Calibración son válidos únicamente para el instrumento indicado y bajo las condiciones de referencia declaradas.</p> <p>Las mediciones realizadas por nuestro laboratorio se basan en patrones de referencia que mantienen trazabilidad a Laboratorios Nacionales y Laboratorios acreditados bajo la norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018, se utilizan procedimientos desarrollados por la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA.</p> <p>Este certificado de calibración no debe ser copiado parcialmente, solo en su totalidad, con las firmas del personal responsable de la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA.</p> <p>La trazabilidad del laboratorio de la Compañía METASDELECUADOR CÍA. LTDA. Está disponible para el cliente si lo requiere.</p> <p>El intervalo de calibración (Intervalo de confirmación metroológica) del instrumento es responsabilidad del cliente.</p>			
F-CAL-ATSG-01-2		Página: 1 de 6	
www.calibraciones-metas.com		Telf. 023 680 700 / 097 9673068 atenciónalcliente@calibraciones-metas.com	
		Quito, Av. Guayanay Ñan Oe3-121 y General Gallardo (Sector Quitumbe)	