



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TRANSFORMADOR
DE 300 KVA EN CENTRO DE INVESTIGACIÓN IDICTEC DE LA
UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero de Ejecución en Electricidad

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera

Jorge Alessandro Lamas Veliz

Jorge Antonio Mercado Cortes

Copiapó, Chile 2024

DEDICATORIA

Dedico este proyecto, a toda mi familia y a quienes confiaron en el proceso.

A mis padres, por su sacrificio, dedicación y por enseñarme siempre a perseguir mis sueños con esfuerzo y perseverancia. A mis hermanas por brindarme siempre su apoyo y cariño.

A todas las personas que estimo, que han sido parte de mi vida y que recordare con gratitud.

Atte.

Jorge Alessandro Lamas Veliz.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, cuyo amor, apoyo incondicional y sacrificio han sido fundamentales para alcanzar este logro. A mis padres, por su guía, enseñanza y por los valores inculcados. A mis hermanas, por su compañía y alegría en cada momento de este proceso.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento todas las personas que estimo y que han estado a mi lado, por su amor, apoyo y confianza.

A mis profesores, por su dedicación, enseñanzas y por compartir sus conocimientos. Asimismo, agradecer a nuestro profesor guía Jonathan Agüero Ferrera, quien nos acompañó a lo largo de este proceso, quien dedico su tiempo para ayudarnos y aconsejarnos.

A todos, mi más profundo agradecimiento.

Atte.

Jorge Alessandro Lamas Veliz.

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicar este proyecto a mis padres, quienes me han acompañado y apoyado en este camino desde el inicio.

También a mi pareja por estar presente en esta etapa.

Y finalmente, a las personas y amigos que me han entregado su apoyo incondicional.

Atte.

Jorge Antonio Mercado Cortés.

AGRADECIMIENTOS

Culminar este proceso y escribir estas palabras en la tesis de mi carrera profesional reflejan todo el esfuerzo y dedicación que se ha puesto en el camino, no tan solo de mi parte, sino que también de mi madre y mi padre. Gracias por darme la oportunidad de cumplir mis objetivos y por confiar en mis capacidades.

Agradezco también a cada docente que aportó a mi formación con su sabiduría y conocimientos, en especial a nuestro profesor guía Jonathan Agüero Ferrera quien siempre estuvo dispuesto a resolver nuestras dudas y a acompañar nuestro proceso. Este trabajo es también parte de ustedes.

A quienes me acompañaron en los días difíciles y celebraron conmigo los logros.

Con gratitud infinita, cierro este capítulo y espero retribuir algún día todo el apoyo recibido.

Atte.

Jorge Antonio Mercado Cortés.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Antecedentes del problema.....	3
1.4.1. Antecedente de origen.....	4
1.4.2. Transformador de distribución.....	4
1.4.3. Punto común de conexión	4
1.4.4. Antecedentes de los registros de medición.....	4
1.5. Justificación	5
1.6. Alcances.....	5
1.7. Metodología	6
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1. Calidad de energía eléctrica.....	7
2.2. Calidad de servicio	7
2.2.1. Calidad de producto	8
2.2.2. Calidad de suministro.....	8
2.2.3. Calidad comercial	8
2.3. Variables eléctricas	8
2.3.1. Voltaje (V).....	9
2.3.2. Corriente (I)	10
2.3.3. Frecuencia (f).....	11
2.3.4. Factor de potencia (FP)	11
2.3.4.1. Corrección del factor de potencia.....	12
2.3.5. Potencia aparente	14
2.3.6. Potencia activa	14
2.3.7. Potencia reactiva	15

2.3.8. Potencia distorsionante.....	15
2.4. Perturbaciones en la calidad de energía eléctrica.....	16
2.4.1. Armónicos	16
2.4.1.1. Origen, causa y efecto de los armónicos.....	17
2.4.1.2. Secuencia de armónicos.....	18
2.4.1.3. Interarmónicos.....	19
2.4.1.4. Subarmónicos.....	20
2.4.2. Flicker.....	20
2.4.3. SAG.....	20
2.4.4. SWELL.....	21
2.5. Teorema de Fourier	21
2.6. Tipos de cargas	22
2.6.1. Cargas no lineales	23
2.6.2. Cargas lineales	23
2.7. Filtros armónicos.....	23
2.7.1. Filtros pasivos.....	24
2.7.2. Filtros activos.....	25
2.7.3. Filtros híbridos	26
CAPÍTULO III	27
NORMAS Y ESTÁNDARES.....	27
3.1. Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución	27
3.1.1. Regulación de tensión	27
3.1.2. Regulación de frecuencia	29
3.1.3. Distorsión armónica de corriente para usuarios de media tensión.....	29
3.1.4. La distorsión armónica individual.....	29
3.1.5. Distorsión de demanda total	30
3.1.6. Distorsión armónica total de corriente	31
3.1.7. Distorsión armónica de corriente para usuarios de baja tensión.....	32
3.1.8. Cálculo de factor de potencia	33
3.1.9. Límites del factor de potencia.....	33
3.2. Norma técnica de seguridad y calidad de servicio	33

3.2.1. Artículo 5-18.....	34
3.3. IEEE Std 1159 - 2009.....	34
CAPÍTULO IV	35
ANÁLISIS DE DATOS	35
4.1. Análisis de voltaje.....	35
4.1.1. Límite para la regulación de tensión.....	35
4.1.2. Regulación de tensión en fase R.....	36
4.1.3. Regulación de tensión en fase S.....	38
4.1.4. Regulación de tensión en fase T.....	39
4.1.5. Resultados de la regulación de tensión en fase R, S y T.....	41
4.2. Regulación de frecuencia.....	43
4.2.1. Resultados de regulación de frecuencia.....	44
4.3. Análisis de corriente.....	45
4.3.1. Resultados del análisis de las corrientes.....	48
4.4. Desbalance de las corrientes.....	48
4.5. Distorsión total armónica de tensión en el sistema eléctrico.....	49
4.6. Distorsión total armónica de corriente de la fase R.....	51
4.6.1. Análisis de espectro de Fourier en fase R.....	52
4.7. Distorsión total armónica de corriente de la fase S.....	55
4.7.1. Análisis de espectro de Fourier en fase S.....	56
4.8. Distorsión total armónica de corriente de la fase T.....	59
4.8.1. Análisis de espectro de Fourier en fase T.....	60
4.9. Resultados generales de la distorsión total armónica de corriente.....	63
4.9.1. Resultados de distorsión total armónica de corriente.....	63
4.9.2. Resultados de armónicos individual de corriente.....	65
4.10. Análisis del factor de potencia.....	67
4.10.1. Registros del factor de potencia en el sistema eléctrico.....	67
4.10.2. Análisis en de factor de potencia en las fases y del sistema promedio....	68
4.11. Análisis de las potencias.....	71
4.11.1. Análisis de potencia activa.....	71
4.11.2. Análisis de potencia reactiva.....	72

4.11.3. Potencia activa versus potencia reactiva	74
4.11.4. Cálculo de factor de potencia	75
CAPÍTULO V	77
PROPUESTAS DE MEJORA	77
5.1. Propuesta de mejora de factor de potencia	77
5.1.1. Consideraciones para elección del factor de potencia a mejorar	78
5.1.2. Determinar el tamaño de la potencia reactiva a compensar	79
5.1.3. Cálculo de parámetros para el banco de condensadores	80
5.2. Propuesta diseño de filtros rechaza banda RLC de segundo orden	83
5.2.1. Cálculo de parámetros para filtrar la tercera armónica	83
5.2.2. Cálculo de parámetros para filtrar la quinta armónica	86
5.3. Propuesta de balance de cargas	87
5.4. Simulación de las propuestas de mejora.....	90
5.4.1. Cálculo de la impedancia de las cargas en las fases R, S y T	91
5.4.2. Simulación de sistema eléctrico estudiado	95
5.4.3. Simulación con incorporación de propuestas de mejora	97
5.4.4. Resultados prácticos de las mejoras propuestas	101
CAPÍTULO VI.....	107
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍAS	111
ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1 Forma de onda sinusoidal trifásica.	10
Figura N° 2.2 Tipos de onda de frecuencia.	11
Figura N° 2.3 Triangulo de las potencias.	12
Figura N° 2.4 Pirámide de potencias.	16
Figura N° 2.5 Forma de onda sinusoidal de 50 Hz y otros armónicos.	17
Figura N° 2.6 Secuencia de armónicos.	18
Figura N° 2.7 SAG caída de tensión instantánea.....	20
Figura N° 2.8 SWELL aumento de tensión instantánea.	21
Figura N° 2.9 Descomposición de una onda sinusoidal.....	22
Figura N° 2.10 Tipos de filtros pasivos.....	24
Figura N° 2.11 Conexión de filtro activo.....	25
Figura N° 2.12 Filtro híbrido.....	26
Figura N° 4.1 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase R.	37
Figura N° 4.2 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase S.	39
Figura N° 4.3 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase T.....	41
Figura N° 4.4 Resultados en límites de regulación de tensión en la fase R, S y T.	42
Figura N° 4.5 Gráfico de intervalos de frecuencia.	44
Figura N° 4.6 Gráfico de comportamiento de las corrientes RMS.	47
Figura N° 4.7 Gráfico de distorsión total armónica de tensión.	50
Figura N° 4.8 Espectro de Fourier en fase R de corriente armónica individual.....	53
Figura N° 4.9 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase R.	54
Figura N° 4.10 Espectro de Fourier en fase S de corriente armónica individual.	57
Figura N° 4.11 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase S.	58
Figura N° 4.12 Espectro de Fourier en fase T de corriente armónica individual.	61
Figura N° 4.13 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase T.	62
Figura N° 4.14 Gráfico de distorsión total armónica de corriente.....	65
Figura N° 4.15 Gráfico de comportamiento del factor de potencia en las fases.	68
Figura N° 4.16 Gráfico de comportamiento del factor de potencia promedio.	70
Figura N° 4.17 Gráfico de potencia activa VS. tiempo.	72

Figura N° 4.18 Gráfico de potencia reactiva VS. tiempo	73
Figura N° 4.19 Gráfico de potencia activa VS. potencia reactiva.	74
Figura N° 4.20 Gráfico de FP instantáneo y FP medio semanal VS. tiempo.....	76
Figura N° 5.1 Circuito eléctrico para la simulación.	96
Figura N° 5.2 Simulación de banco de capacitores y filtro armónico en fase R.	98
Figura N° 5.3 Simulación de banco de capacitores y filtro armónico en fase S.	99
Figura N° 5.4 Simulación de banco de capacitores en fase T.	100
Figura N° 5.7 Gráfico del filtro rechaza banda RLC de la tercera armónica.	103
Figura N° 5.8 Gráfico del filtro rechaza banda RLC de la quinta armónica.	104
Figura N° 5.9 Armónicas en fases R y S después de la Filtración.	106
Figura N° A.1. Centro de investigación IDICTEC.	113
Figura N° A.2. Transformador de distribución trifásico.	114
Figura N° A.3. Punto común de conexión.....	115
Figura N° A.4. PowerPad modelo 8335.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1 Límites para la regulación de tensión.	28
Tabla N° 3.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.	29
Tabla N° 3.3 Límites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios, expresados como porcentajes de I_L	31
Tabla N° 3.4 Límites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios en Baja Tensión.	32
Tabla N° 3.5 Categoría y características de fenómenos electromagnéticos.	34
Tabla N° 4.1 Límites de la regulación de tensión.	35
Tabla N° 4.2 Regulación de tensión en fase R.	36
Tabla N° 4.3 Regulación de tensión en fase S.	38
Tabla N° 4.4 Regulación de tensión en fase T.	40
Tabla N° 4.5 Resultado de regulación de tensión en fases R, S y T.	42
Tabla N° 4.6 Valores obtenidos de frecuencia.	43
Tabla N° 4.7 Tiempo de inactividad presentada en las corrientes.	45
Tabla N° 4.8 Valores obtenidos de las corrientes.	46
Tabla N° 4.9 Desequilibrio en las corrientes.	48
Tabla N° 4.10 Valores obtenidos del THD_V.	49
Tabla N° 4.11 Límites de distorsión total armónica de corriente en fase R.	51
Tabla N° 4.12 Permanencia en el tiempo en fase R.	52
Tabla N° 4.13 Límites de distorsión armónica de corriente en fase S.	55
Tabla N° 4.14 Permanencia en el tiempo en fase S.	56
Tabla N° 4.15 Límites de distorsión armónica de corriente en fase T.	59
Tabla N° 4.16 Permanencia en el tiempo en fase T.	60
Tabla N° 4.17 Resultado de la distorsión total armónica de corriente.	63
Tabla N° 4.18 Resultado de la distorsión armónica individual de corriente.	66
Tabla N° 4.19 Registros de Factor de Potencia.	67
Tabla N° 4.20 Registros de Potencia Activa.	71
Tabla N° 4.21 Registros de Potencia Reactiva.	73
Tabla N° 4.22 Factor de potencia instantáneo promedio.	75

Tabla N° 5.1 Resumen de desbalances actuales.	88
Tabla N° 5.2 Resultado de los desbalances nuevos.	90
Tabla N° 5.3 Valores para encontrar la impedancia de las fases.	92
Tabla N° 5.4 Resultados de la impedancia de las fases.	95
Tabla N° 5.5 Comparación de resultados de la simulación.	97
Tabla N° 5.6 Resultados después de la simulación.	101

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo principal estudiar la calidad de la energía eléctrica en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama, alimentado por un transformador de 300 kVA. Se utilizaron los registros de medición de esta área, lo que permitió realizar un análisis detallado de la calidad de la energía eléctrica en comparación con las normativas vigentes. Se comenzó con una contextualización que facilitó al lector una comprensión clara del enfoque y propósito del proyecto, seguido de un marco teórico relacionado con la calidad de energía, abordando aspectos clave como las variables eléctricas, los armónicos y los tipos de cargas. Posteriormente, se revisaron las normativas vigentes, tanto nacionales como internacionales, destacando la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución de Chile y el estándar internacional IEEE Std 1159-2009. Se analizaron los datos obtenidos del centro de investigación IDICTEC, siguiendo las exigencias establecidas por las normativas vigentes, observando diversos parámetros, como los límites de regulación de tensión y frecuencia, el análisis de corriente, las distorsiones armónicas de voltaje y de corriente, y el análisis de potencias. Los hallazgos evidenciaron el incumplimiento normativo y por lo tanto se propusieron mejoras para corregir las deficiencias detectadas, incluyendo el diseño de un banco de condensadores, filtros rechaza banda RLC, un balance de las cargas y se realizó la simulación tanto del banco de condensadores como de los filtros armónicos. Finalmente, los resultados destacaron la importancia de aplicar soluciones específicas para optimizar la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico, cumpliendo con las exigencias mínimas de las normativas analizadas.

CALIDAD DE ENERGÍA - TRANSFORMADOR 300 KVA - DISTORSIÓN
ARMÓNICA - FACTOR DE POTENCIA - CUMPLIMIENTO NORMATIVO.

ABSTRACT

The main objective of this project was to study the electrical power quality at the IDICTEC research center of the University of Atacama, which is supplied by a 300 kVA transformer. Measurement records from this specific area were used, enabling a detailed analysis of the electrical power quality in comparison with current standards. The project began with a contextualization that provided the reader with a clear understanding of the approach and purpose, followed by a theoretical framework related to power quality, addressing key aspects such as electrical variables, harmonics, and types of loads. Subsequently, relevant national and international standards were reviewed, highlighting the Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución from Chile, and international standard IEEE Std 1159-2009. Data obtained from the IDICTEC research center were analyzed, adhering to the requirements established by the current regulations, observing various parameters such as voltage and frequency regulation limits, current analysis, voltage and current harmonic distortions, and power analysis. The findings revealed non-compliance with the standards, leading to the proposal of improvements to correct the detected deficiencies, including the design of a capacitor bank, RLC band-pass filters, load balancing, and simulations of both the capacitor bank and harmonic filters. Finally, the results highlighted the importance of implementing specific solutions to optimize the efficiency and stability of the electrical system, ensuring compliance with the minimum requirements of the analyzed standards.

**ENERGY QUALITY - 300 KVA TRANSFORMER - HARMONIC DISTORTION -
POWER FACTOR - COMPLIANCE WITH STANDARDS**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La calidad de energía eléctrica es un aspecto fundamental para garantizar el funcionamiento adecuado de los equipos y del sistema eléctrico. Se refiere a la medida en que la energía eléctrica suministrada cumple con las especificaciones necesarias para evitar fallos o mal funcionamiento de los dispositivos conectados. Es por esto que se deben conocer y aplicar las normativas correspondientes a los diversos sistemas eléctricos, ya que no todos responden a las mismas normas.

A continuación, exploraremos algunos conceptos clave relacionados con la calidad de energía, como el voltaje, la corriente, las potencias, el factor de potencia y los armónicos. Cumplir con los estándares propuestos en las normas, nos trae beneficios como una mejor confiabilidad, ya que nos permite menos interrupciones en el suministro eléctrico. También nos beneficia con la eficiencia energética, ya que tener una red estable nos ayuda a maximizar los procesos productivos, teniendo un mejor uso de los recursos energéticos, además se tiene un menor riesgo de daños, ya que las perturbaciones en el suministro eléctrico pueden dañar equipos electrónicos sensibles, lo que conlleva costos de reparación o reemplazo.

En el primer capítulo presenta los objetivos generales y específicos del presente proyecto, el planteamiento del problema, los antecedentes que contextualizan la investigación, la justificación del estudio, los alcances y la metodología empleada la cual permite contextualizar de manera clara al lector.

El capítulo dos se trata del marco teórico, se mostrarán y presentarán conceptos fundamentales relacionados con la calidad de energía, destacando sus variables eléctricas esenciales. Se explorarán los diferentes tipos de armónicos, su impacto en los sistemas eléctricos y, además, se hablará de los diferentes filtros armónicos para mitigar los efectos adversos de estos armónicos en la calidad de energía. Este capítulo establece las bases para la comprensión de los fenómenos estudiados.

El capítulo tres se trata de las normas nacionales y estándares internacionales, donde se examinarán los artículos y límites regulatorios que nos permitirán establecer los requerimientos mínimos para ser analizada y evaluada la calidad de energía eléctrica, centrándose especialmente en la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCSD). Se analizarán los aspectos más relevantes de esta norma, que establece los requisitos de calidad y servicio que se deben cumplir. Este estudio del marco regulatorio no solo proporciona un contexto esencial para la investigación, sino que también asegura que el desarrollo del proyecto se alinee con las exigencias y mejores prácticas del sector eléctrico chileno.

El capítulo cuatro se trata del análisis de datos y se realizará un análisis exhaustivo de los datos recopilados, en concordancia con las exigencias de la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución y el estándar IEEE Std 1159 - 2009. Se examinan los artículos más relevantes de estas normas, aplicando sus criterios para evaluar la calidad del servicio eléctrico proporcionado. A través de este análisis, se busca garantizar que el desarrollo del proyecto cumpla con los estándares establecidos, lo que resulta fundamental para la interpretación adecuada de los resultados obtenidos.

El capítulo cinco se trata de las propuestas de mejora, presentando soluciones concretas para mitigar los armónicos de corriente y mejorar el factor de potencia, además de abordar otros problemas identificados en el sistema eléctrico estudiado. Se explorarán soluciones técnicas como la implementación de bancos de condensadores, filtros armónicos y el balance de cargas, con el objetivo de optimizar la calidad de la energía eléctrica y cumplir con las normativas vigentes. Los resultados se mostrarán a través de una simulación práctica que permitirá observar el impacto de estas mejoras al ser implementadas.

El capítulo seis se centra en las conclusiones de la investigación, donde se integran los resultados obtenidos con los fundamentos teóricos y normativos presentados en los capítulos anteriores. Todo esto con el objetivo de garantizar un servicio eléctrico eficiente y confiable. Además, se ofrecerán recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la infraestructura eléctrica de la Universidad de Atacama.

1.1. Objetivo general

Estudiar la calidad de energía en la red eléctrica en un transformador de 300 kVA en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar las variables eléctricas en relación a la calidad de energía en la red eléctrica de la Universidad de Atacama.
- Analizar los datos con los límites regulatorios establecidos por los estándares vigentes para la evaluación de la calidad de la energía eléctrica.
- Proponer medidas y soluciones para la disminución de los efectos negativos de la calidad de energía en la red eléctrica de la Universidad de Atacama.

1.3. Planteamiento del problema

En la Universidad de Atacama, el análisis de la calidad de energía eléctrica se fundamenta en la necesidad de un sistema eléctrico confiable, eficiente y de alta calidad. El planteamiento del problema surge debido a la alta presencia de cargas no lineales que hay en dicho centro de investigación, donde se tiene conocimiento de la existencia de distorsiones armónicas, que afectan a la calidad de la energía eléctrica. La mala calidad energética puede llevar a una serie de problemas, como la degradación prematura de equipos e instrumentos, pérdida de eficiencia en la distribución eléctrica y fallos en el funcionamiento de los dispositivos, lo que subraya la importancia de realizar un análisis detallado para mejorar las condiciones del sistema eléctrico en la Universidad de Atacama.

1.4. Antecedentes del problema

Se han identificado diversos problemas relacionados con la calidad de energía en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama. Entre estos problemas se incluye la corta vida útil de las iluminarias LED, así como fallos en aparatos eléctricos,

como computadores, hervidores eléctricos, entre otros. Además, se han registrado variaciones en las mediciones de equipos como el espectrómetro de absorción atómica presente en el laboratorio de química del centro de investigación, atribuibles a perturbaciones en la calidad de energía. Por último, los sistemas de UPS, que proveen energía de respaldo a estos equipos y computadores del laboratorio, también han sufrido daños a causa de dichas perturbaciones en la red eléctrica.

1.4.1. Antecedente de origen

El registro de mediciones se llevó a cabo el 21 de diciembre del año 2013, en el instituto de investigación científica y tecnológica o en sus siglas IDICTEC, de la Universidad de Atacama, de la tercera región en la comuna de Copiapó. (Ver anexo A.1).

1.4.2. Transformador de distribución

El transformador de distribución trifásico objeto de estudio, presenta las siguientes características; una potencia nominal de 300 kVA, una tensión nominal de 23 kV en media tensión y 380 V en baja tensión, una frecuencia de 50 Hz. Este transformador está montado en dos postes. (Ver anexo A.2).

1.4.3. Punto común de conexión

Los registros de medición se llevaron a cabo en el punto común de conexión (PCC) a nivel de baja tensión de 380 V del transformador, donde se ubica el tablero general del centro de investigación IDICTEC (ver anexo A.3).

1.4.4. Antecedentes de los registros de medición

Los registros de medición fueron proporcionados para el estudio y análisis de la red eléctrica, a través del archivo “Tendencia IDICTEC.xls”. Para ese entonces se utilizó el analizador de redes eléctricas trifásicas PowerPad de AEMC modelo 8335, equivalente al

equipo C.A 8335, (Ver anexo A.4). La configuración del equipo para la toma de datos fue en conexión 3 fases – 5 hilos, en la cual se refiere a las fases R, S, T, el neutro y la tierra. La toma de datos se realizó en intervalos de 10 minutos y se inició el 21 de octubre de 2013 a las 10:50 AM horas y finalizó el día 30 de octubre de 2013 a las 18:00 PM.

1.5. Justificación

La calidad de la energía eléctrica es crucial para la seguridad del establecimiento y de sus ocupantes. Un suministro eléctrico constante y confiable es indispensable en el funcionamiento óptimo de equipos y dispositivos electrónicos utilizados para la formación académica. Una calidad de energía deficiente puede resultar en fallos operativos, interrumpiendo el flujo de enseñanza, aprendizaje e investigación, también afectando el rendimiento de equipos y dispositivos electrónicos y, además, proporciona mayores costos técnicos y económicos teniendo como consecuencia un mayor consumo eléctrico y mayor pago de energía reactiva en la factura eléctrica. Finalmente, cumplir con las normativas relacionadas con la calidad de la energía eléctrica no solo fomenta la eficiencia y sostenibilidad del sistema eléctrico, sino que también reduce los costos de mantenimiento asociados con un sistema deficiente. En conjunto, estos factores marcan la importancia de realizar un análisis detallado de la calidad de la energía para asegurar la estabilidad y la eficiencia del sistema eléctrico en la Universidad de Atacama.

1.6. Alcances

Este estudio se centra en el análisis de la calidad de la energía eléctrica en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama, alimentado por un transformador de 300 kVA. Para ello, se utilizarán los datos obtenidos con el equipo de medición PowerPad modelo 8335 durante el año 2013, con un registro continuo durante al menos una semana (7 días) y con intervalos de medición cada 10 minutos, conforme a los requisitos establecidos por la "Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución". Se analizarán diversas variables eléctricas, como la tensión, corriente, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, y los armónicos de corriente y

voltaje, con el fin de compararlas con las normativas vigentes y evaluar el cumplimiento de los estándares. A partir de este análisis, se desarrollarán propuestas de mejora y soluciones prácticas para abordar los problemas identificados.

1.7. Metodología

Los procedimientos que se utilizarán para llevar a cabo la investigación, son los siguientes:

El enfoque del análisis de datos es cuantitativo. Se estudiarán los registros obtenidos a través del equipo de medición, los cuales se tomaron a lo largo de 7 días en intervalos de 10 minutos, lo que resulta en un total de 1008 datos. Se empleará la estadística para proporcionar una visión general de los datos y facilitar la identificación de patrones en los diversos parámetros analizados. Una vez examinadas en profundidad las variables eléctricas, se realizará una comparación con las normativas eléctricas vigentes en Chile. Esto permitirá determinar si el sistema eléctrico cumple con los estándares requeridos. Dependiendo del estado de la calidad de la energía eléctrica, se formularán propuestas y recomendaciones para su corrección, con el objetivo de asegurar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico en la Universidad de Atacama.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se abordarán conceptos clave como la calidad de energía y sus variables eléctricas. Además, se tratarán los armónicos y los filtros armónicos, estableciendo un contexto técnico que sustenta la investigación y su relevancia en el ámbito energético.

2.1. Calidad de energía eléctrica

Se refiere a la capacidad del suministro eléctrico para mantener características estables y dentro de los estándares aceptables, tales como tensión, frecuencia y forma de onda, mientras se minimizan perturbaciones y distorsiones. La calidad de energía es crucial porque influye directamente en el funcionamiento y la durabilidad de los equipos eléctricos y electrónicos. Pero su definición y gestión son complejas debido a la variedad de parámetros involucrados y las múltiples variables que pueden influir en ella y las expectativas de calidad pueden variar ampliamente según el tipo de equipo o aplicación, lo que complica la estandarización.

Las principales causas que afectan a la calidad de la energía eléctrica son:

- Armónicos, Interarmónicos y Subarmónicos.
- Un mal factor de potencia.
- Fluctuaciones de voltaje y frecuencia.

2.2. Calidad de servicio

Según la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, indica que la calidad de servicio es el “atributo de un sistema eléctrico determinado conjuntamente por la Calidad del Producto, la Calidad del Suministro y la Calidad del Servicio Comercial, entregado a sus distintos usuarios y clientes”. (CNE, 2024b)

2.2.1. Calidad de producto

Se refiere al grado en que un producto cumple con los estándares y expectativas establecidos por los distintos agentes del Sistema Interconectado. Esto incluye aspectos como la magnitud, la frecuencia fundamental y la contaminación de la onda de tensión instantánea.

2.2.2. Calidad de suministro

Este concepto abarca la fiabilidad y estabilidad del suministro de energía. Incluye la frecuencia de interrupciones, la consistencia en el nivel de servicio, la rapidez en la respuesta a problemas y la capacidad para mantener el suministro sin caídas significativas en la calidad.

2.2.3. Calidad comercial

Se refiere al grado en que permite calificar el servicio comercial y la calidad de atención prestada por la empresa distribuidora a sus clientes o usuarios. Incluye elementos como la atención al cliente, la adecuada medición de los consumos y su facturación, la puntualidad en el envío de boletas o facturas y la atención y conexión de nuevos suministros de clientes o usuarios.

2.3. Variables eléctricas

Las variables eléctricas son magnitudes físicas que se utilizan para describir y analizar el comportamiento de los sistemas eléctricos. Estas variables son fundamentales para el análisis, diseño y control de sistemas eléctricos y permiten evaluar el funcionamiento adecuado de la red eléctrica. Algunas de las variables más comunes y relevantes son:

2.3.1. Voltaje (V)

La diferencia de energía por unidad de carga se conoce como voltaje o diferencia de potencial, el cual es fundamental para generar corriente en los circuitos eléctricos. El voltaje, que impulsa el movimiento de la corriente, debe su nombre a Alessandro Volta, un científico italiano destacado en este campo. (Floyd, 2007).

El voltaje se clasifica principalmente en dos categorías, como voltaje continuo DC y voltaje alterno AC:

- El voltaje continuo (DC, por sus siglas en inglés "Direct Current"), se caracteriza porque su valor permanece constante y la corriente fluye en una sola dirección. Además, la dirección del flujo de corriente se mantiene constante a lo largo del tiempo.
- El voltaje alterno (AC, por sus siglas en inglés "Alternating Current") se caracteriza porque su valor varía con el tiempo, cambiando de dirección de manera periódica. Esto significa que la corriente eléctrica fluye en una dirección y luego invierte su sentido, repitiendo este ciclo de forma continua, generalmente en una forma de onda sinusoidal. En Chile, la frecuencia nominal es de 50Hz, mientras que en otros países es de 60Hz.

Las formas más comunes de encontrar el voltaje alterno son en sistemas monofásico y trifásico. En un sistema monofásico, se hace uso de una sola fase y un neutro, siendo utilizado principalmente en residencias y pequeñas instalaciones. En un sistema trifásico, se utilizan tres fases, desfasadas en 120° entre sí. La conexión puede ser en estrella (Y), que incluye un neutro, o en delta (Δ), sin neutro, siendo común en instalaciones industriales.

2.3.2. Corriente (I)

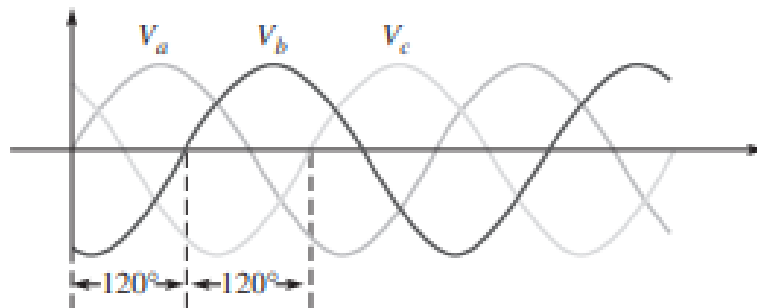
Floyd (2007), indica que “El voltaje proporciona energía a los electrones, lo que les permite moverse por un circuito. Este movimiento de electrones es la corriente, la cual produce trabajo en un circuito eléctrico” (p.23). Su unidad es el Amperio y se representa con la letra A, en honor al físico y matemático Francés André Marie Ampere (1775-1836).

La corriente se clasifica principalmente en dos categorías, como corriente continua DC y corriente alterna AC:

- La corriente continua (DC) es un flujo de electricidad que va en una sola dirección. El voltaje en un sistema de corriente continua permanece constante en el tiempo, lo que significa que no cambia de polaridad.
- La corriente alterna (CA) es un tipo de corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones cambia periódicamente. Este cambio de dirección se produce de forma cíclica, lo que significa que la corriente alterna puede invertirse y variar su magnitud en un intervalo de tiempo determinado. (Isaac, 2022)

La forma más común de representación de la corriente alterna es la onda sinusoidal. Se abarcarán los dos tipos de configuraciones, la corriente alterna monofásica y trifásica.

Figura N° 2.1 Forma de onda sinusoidal trifásica.

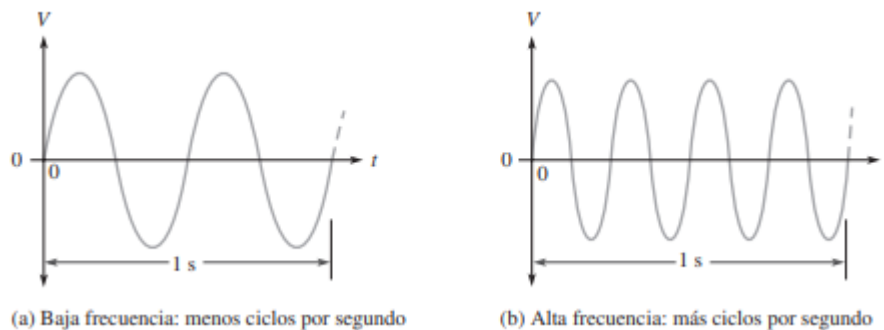


Fuente: Floyd (2007).

2.3.3. Frecuencia (f)

Otro aspecto fundamental a considerar en las bases para el presente análisis es la frecuencia, la cual según lo que plantea Floyd (2007) en su obra, es “el número de ciclos que una onda seno completa en un segundo. Mientras más ciclos se completan en un segundo, más alta es la frecuencia. La frecuencia (f) se mide en unidades de Hertz. Un Hertz (Hz) equivale a un ciclo por segundo; 60 Hz son 60 ciclos por segundo”. (p.410)

Figura N° 2.2 Tipos de onda de frecuencia.



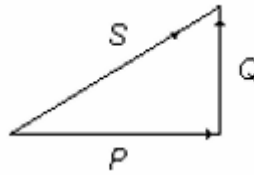
Fuente: Floyd (2007).

2.3.4. Factor de potencia (FP)

Según el mismo autor, el término $\cos u$ se llama factor de potencia y se establece como $PF = \cos u$. Y agrega “Conforme el ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente total se incrementa, el factor de potencia disminuye, lo cual indica la existencia de un circuito crecientemente reactivo. Mientras más pequeño es el factor de potencia, más pequeña es la disipación de potencia” (Floyd, 2007).

Se define como la relación entre la potencia activa (P), que realiza trabajo útil, y la potencia aparente (S), que es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva (Q).

Figura N° 2.3 Triangulo de las potencias.



Fuente: Ramírez (2008).

La representación matemática del factor de potencia se expresa como:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Donde:

- FP: Factor de potencia.
- S: Potencia Aparente, en [kVA].
- P: Potencia Activa, en [kW].
- Q: Potencia Reactiva, en [kVAr].

2.3.4.1. Corrección del factor de potencia

En la corrección del factor de potencia, el objetivo es mejorar la eficiencia de un sistema eléctrico mediante la reducción de la potencia reactiva en el sistema. Generalmente, se busca aumentar el factor de potencia hacia 1 o lo más cercano posible, dependiendo de las condiciones del sistema.

La corrección del factor de potencia es importante, ya que puede resultar en cargos adicionales por parte de las compañías eléctricas debido a la baja eficiencia en el uso de la energía eléctrica.

Entre los métodos utilizados para corregir el factor de potencia se encuentran los bancos de condensadores, los motores sincrónicos y las mejoras en la distribución de las cargas, los cuales permiten optimizar el sistema y reducir la demanda de potencia reactiva.

Los bancos de condensadores proporcionan potencia reactiva capacitiva que compensa la potencia reactiva inductiva de las cargas, mejorando así el factor de potencia del sistema. La compensación de potencia reactiva mediante capacitores puede adoptarse mediante varias estrategias, dependiendo de las características del sistema y las necesidades específicas:

- **Compensación individual:** Se instala un banco de condensadores para compensar de manera puntual cargas específicas que requieren mejorar su factor de potencia.
- **Compensación grupal:** Se utilizan bancos de condensadores para compensar un conjunto de cargas, generalmente en sistemas donde las variaciones de la carga no son significativas o no se producen de manera constante.
- **Compensación mixta:** Combina ambos enfoques, individual y grupal, adaptándose a las variaciones y necesidades del sistema en diferentes momentos.

Además, los bancos de condensadores pueden ser fijos o automáticos. En la compensación fija, se instala una cantidad determinada de condensadores sin ajuste dinámico, mientras que, en la compensación automática, la cantidad de potencia reactiva compensada se ajusta de manera dinámica según las fluctuaciones de carga y la demanda de potencia reactiva. De esta manera, la compensación puede adaptarse a las necesidades del sistema eléctrico.

Los motores sincrónicos pueden ser utilizados para compensar potencia reactiva de manera similar a los bancos de condensadores. Al funcionar como generadores sincrónicos, estos motores pueden inyectar potencia reactiva capacitiva al sistema ayudando a mejorar el factor de potencia del sistema. Además, se pueden regular a través

de la corriente de excitación, lo que permite ajustar la cantidad de potencia reactiva que inyectan al sistema, proporcionando una compensación dinámica que mejora el factor de potencia.

2.3.5. Potencia aparente

La potencia aparente es la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva. Representa la carga total que un sistema eléctrico debe manejar. Su medida es en (VA).

$$S = V_{RMS} * I_{RMS}$$

Donde:

- S: Potencia Aparente, su unidad de medida es en [kVA].
- V_{RMS} : Valor eficaz de la tensión nominal, su unidad de medida es [V].
- I_{RMS} : Valor eficaz de la corriente nominal, su unidad de medida es [A].

2.3.6. Potencia activa

Es la potencia que realmente se consume y se transforma en trabajo útil. Es la que realizan los dispositivos eléctricos en el sistema. Su medida es en (W).

$$P = V_{RMS} * I_{RMS} * \cos(\phi)$$

Donde:

- P: Potencia Activa, su unidad de medida se expresa en [kW].
- V_{RMS} : Valor eficaz de la tensión nominal, su unidad de medida es [V].
- I_{RMS} : Valor eficaz de la corriente nominal, su unidad de medida es [A].
- $\cos(\phi)$: es el factor de potencia, que representa la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

2.3.7. Potencia reactiva

Es la parte de la potencia que no realiza trabajo útil, sino que oscila entre la fuente y la carga. Es especialmente relevante en circuitos que contienen inductores y capacitores, donde se generan campos magnéticos o eléctricos. Su medida es en (VAr)

$$Q = V_{RMS} * I_{RMS} * \text{sen}(\phi)$$

Donde:

- Q: Potencia Reactiva, su unidad de medida se expresa en [kVAr].
- V_{RMS} : Valor eficaz de la tensión nominal, su unidad de medida es [V].
- I_{RMS} : Valor eficaz de la corriente nominal, su unidad de medida es [A].
- $\text{sen}(\phi)$: representa la parte de la corriente que no contribuye al trabajo útil.

2.3.8. Potencia distorsionante

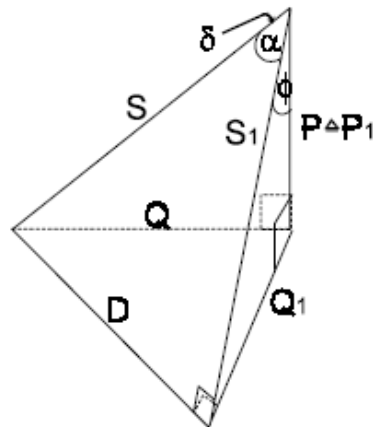
Esto hace referencia a la parte distorsionada que es provocada por la derivación de armónicos que deforman las formas de onda de corriente y tensión. Es un componente adicional de la potencia aparente que surge en sistemas donde la onda no es perfectamente sinusoidal, lo cual es común en redes eléctricas que alimentan cargas no lineales.

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

Donde:

- D: Potencia Distorsionante, en [kVA].
- S: Potencia Aparente, en [kVA].
- P: Potencia Activa, en [kW].
- Q: Potencia Reactiva, en [kVAr].

Figura N° 2.4 Pirámide de potencias.



Fuente: Ramírez (2008).

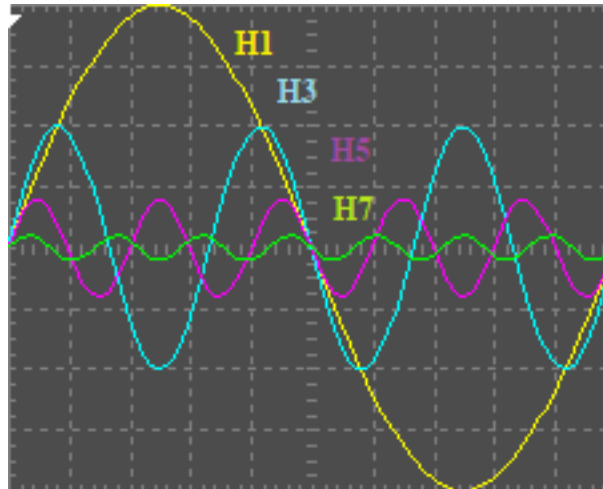
2.4. Perturbaciones en la calidad de energía eléctrica

Las perturbaciones en la calidad de energía son desviaciones o variaciones de las condiciones normales de la electricidad, estas pueden afectar el funcionamiento de equipos y sistemas eléctricos. Estas perturbaciones se pueden manifestar de diversas formas, y entre ellas se incluyen:

2.4.1. Armónicos

El concepto de "armónicos" proviene de la acústica, donde estaba vinculado a las vibraciones de una cuerda o columna de aire a frecuencias que son múltiplos de la frecuencia principal. En los sistemas de alimentación de corriente alterna, un armónico se describe como una componente sinusoidal de una onda periódica cuya frecuencia corresponde a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. (De la Rosa, 2006)

Figura N° 2.5 Forma de onda sinusoidal de 50 Hz y otros armónicos.



Los armónicos en la forma de onda de voltaje o corriente pueden entonces concebirse como componentes perfectamente sinusoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

Existen diferentes tipos de armónicos tales como:

- Armónicos de orden par: son múltiplos pares de la frecuencia fundamental.
- Armónicos de orden impar: son múltiplos impares de la frecuencia fundamental.

2.4.1.1. Origen, causa y efecto de los armónicos

Los armónicos se originan cuando la corriente de alimentación de CA no es perfectamente sinusoidal, sino que tiene distorsiones debido a las cargas no lineales que están conectadas a la red eléctrica. Estas distorsiones modifican la forma de la onda de voltaje o corriente, generando componentes de frecuencia adicional que no corresponden a la frecuencia fundamental de la red.

Según la norma IEEE Std 519 - 2014, dentro de las causas o fuentes más comunes de corrientes armónicas en los sistemas de potencia son; hornos de arco, sistemas de VAR estáticos, inversores para la generación distribuida, controladores de fase de corriente alterna, cicloconvertidores y convertidores AC-DC (rectificadores). (IEEE Std 519 – 2014).

Estos armónicos pueden generar efectos perjudiciales en el sistema eléctrico y dependerán de diversos factores, como los tipos de cargas no lineales presentes en la red, la amplitud de los armónicos, la exposición prologada a los armónicos, entre otros. Y los efectos más comunes son el calentamiento excesivo de conductor, fallas en equipos electrónicos, efectos de resonancia, interferencias electromagnéticas y problemas en los sistemas de protección.

2.4.1.2. Secuencia de armónicos

Cada armónico presenta una secuencia e impacto generado la red, que puede variar dependiendo del armónico que esté presente.

La figura N° 2.6, muestra los diferentes tipos de secuencias armónicas en los distintos órdenes armónicos.

Figura N° 2.6 Secuencia de armónicos.

Secuencia de fases de armónicos en un sistema trifásico equilibrado						
Orden armónico	1	2	3	4	5	6
Secuencia de fase	Positivo	Negativo	Cero	Positivo	Negativo	Cero
	7	8	9	10	11	...
	Positivo	Negativo	Cero	Positivo	Negativo	...

Fuente: Adaptado de la Rosa (2006).

Las componentes de estas secuencias pueden ser positivas, negativas o cero. Esta representación permite visualizar la contribución de cada secuencia al comportamiento

general del sistema, lo que facilita el análisis y la identificación de posibles problemas relacionados con la calidad de la energía.

A continuación, se presentan los tipos de frecuencias de fases, según lo planteado por López (2004).

- Secuencia positiva: Es un sistema Trifásico Balanceado, cuyas componentes. Tienen igual magnitud y una diferencia de fase ($2\pi/3$), y circulan en la dirección igual al de la componente fundamental, es decir R - S - T, Aplica para armónicos de orden 7, 13, 19, etc. (p.12).
- Secuencia negativa: Es un sistema Trifásico balanceado cuyas componentes tienen igual magnitud entre ellas, y una diferencia de fase ($4\pi/3$), y circulan en la dirección igual al de la componente fundamental, es decir R - S - T, Aplica para armónicos de orden 5, 11, 17, etc. (p.12).
- Secuencia cero: Es un sistema trifásico balanceado cuyas componentes son idénticas, es decir, tienen igual magnitud y una diferencia de fase (0_o). Los vectores R - S - T apuntan en la misma dirección y sentido a la vez, Aplica para armónicos de orden 3, 9, 15, etc. (p.12).

2.4.1.3. Interarmónicos

Tal como es planteado en la “Guía de Calidad de la Energía Eléctrica, el concepto de interarmónico “Se trata de una tensión sinusoidal cuya frecuencia está intercalada entre las de los armónicos o, dicho de otra forma, cuya frecuencia no es múltiple entera de la frecuencia fundamental. (Bien, A, & Hanzelka, Z, 2004).

2.4.1.4. Subarmónicos

Mientras que, los Subarmónicos, son “un caso particular de inter armónico cuya frecuencia es menor que la frecuencia fundamental” (p.1).

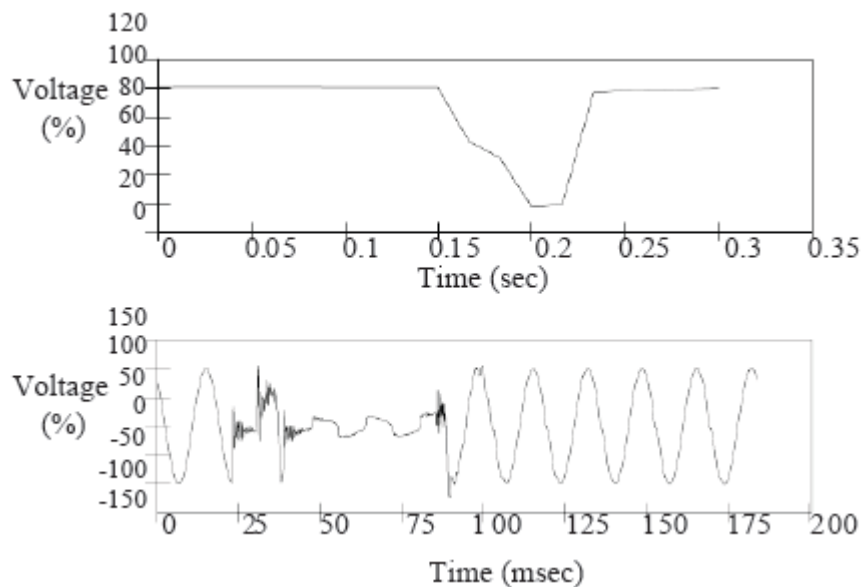
2.4.2. Flicker

El efecto Flicker son fluctuaciones aleatorias en el voltaje que puede causar parpadeo en las luces, perturbando la calidad de la energía y en el bienestar de las personas afectando la percepción visual.

2.4.3. SAG

Es una disminución temporal de corta duración del voltaje en la red eléctrica, generalmente del 10% al 90% o 0.1 a 0.9 pu (por unidad) del voltaje nominal, que dura desde unos pocos ciclos hasta un minuto. Puede ser causado por sobrecargas en el sistema, cortocircuitos o el arranque de equipos de gran potencia.

Figura N° 2.7 SAG caída de tensión instantánea.

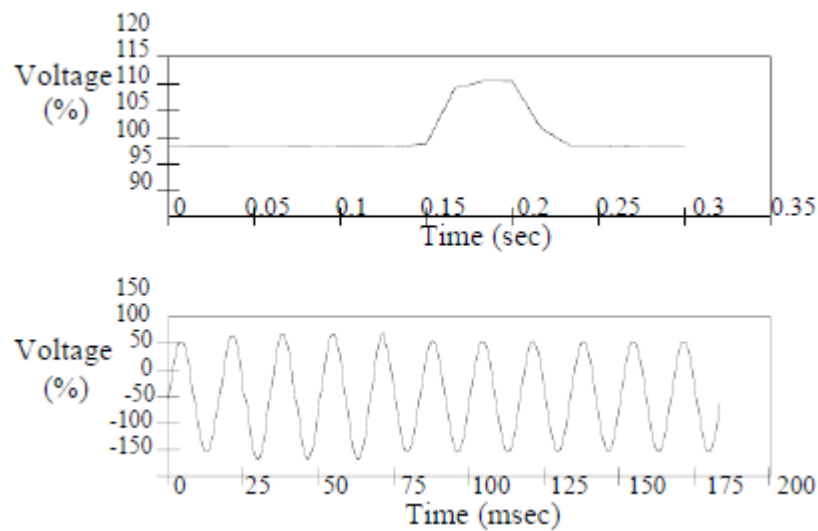


Fuente: IEEE Std 1159 (2009).

2.4.4. SWELL

Es un incremento temporal de corta duración del voltaje, generalmente son por encima del 10% o 0.1 pu del voltaje nominal, que también puede durar desde unos pocos ciclos hasta un minuto. Los swell pueden ser causados por la desconexión repentina de cargas grandes o por condiciones de red inestables.

Figura N° 2.8 SWELL aumento de tensión instantánea.

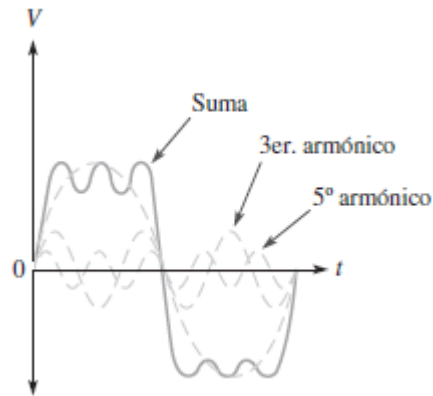


Fuente: IEEE Std 1159 (2009).

2.5. Teorema de Fourier

El teorema de Fourier establece que cualquier función periódica puede representarse como una suma infinita de ondas senoidales y cosenoidales. Este principio es fundamental para el análisis de señales en diversas áreas de la ingeniería, ya que permite descomponer señales complejas en sus componentes de frecuencia, facilitando su estudio y procesamiento. Gracias a este teorema, es posible analizar cómo se distribuyen las frecuencias en una señal, lo que resulta esencial en aplicaciones como el procesamiento de señales y el análisis de la calidad de energía.

Figura N° 2.9 Descomposición de una onda sinusoidal.



Fuente: Floyd (2007).

En la figura N° 2.9, se observa la onda sinusoidal correspondiente a la frecuencia fundamental, la cual se encuentra distorsionada debido a la presencia del tercer y quinto armónico. Esta distorsión es el resultado de la superposición entre la onda fundamental y los armónicos impares, generando una forma de onda que tiende a aproximarse a una señal cuadrada.

2.6. Tipos de cargas

Se sabe que la forma de una onda sinusoidal puede ser capaz de experimentar un fenómeno que produce una distorsión de la onda, esto se le denomina como armónicos, cabe recalcar que uno de sus principales motivos por el cual existe la presencia de armónicos es por tener un sistema con cargas no lineales perjudicando la señal de onda transmitida, por otro lado, la carga lineal sería una onda completamente pura y sin variaciones.

En un sistema eléctricos existen estos dos tipos de cargas que son las cargas no lineales y las cargas lineales, las cuales, según lo que plantea Martínez F, (2001), se definen como:

2.6.1. Cargas no lineales

Cuando no existe esta relación lineal, la carga es definida como no lineal. Ella absorbe entonces una corriente no seno y, por lo tanto, induce la presencia de corrientes armónicas cuando es alimentada por una señal de tensión sinusoidal pura. (p.48)

2.6.2. Cargas lineales

Una carga es lineal cuando tiene una relación lineal (ecuación diferencial lineal con factores constantes) entre la corriente y la tensión. En términos más simples, una carga lineal absorbe una corriente sinusoidal cuando es alimentada por una tensión seno, sin importar si ésta corriente esta desfasada o no un ángulo ϕ con respecto a la onda de tensión. (p.48)

2.7. Filtros armónicos

Los filtros armónicos son dispositivos diseñados para mitigar las distorsiones presentes en las ondas sinusoidales. A través de la implementación de filtros armónicos, se desvían estas frecuencias no deseadas, lo que trae varios beneficios, como la reducción de la distorsión total armónica, la mejora del factor de potencia, la reducción de pérdidas de energía y el cumplimiento de las normativas establecidas para mantener la calidad de la energía.

Es por ello que existen tres tipos de filtros:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos.
- Filtros híbridos.

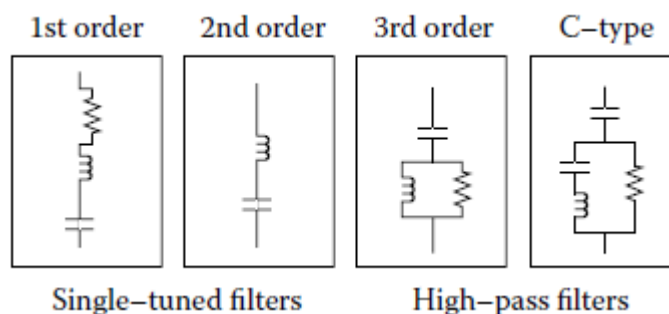
2.7.1. Filtros pasivos

Los filtros pasivos son usados para mitigar las componentes armónicas no deseadas, pudiendo eliminar frecuencias específicas del sistema. Estos filtros están compuestos por inductancias, condensadores y resistencias, dependiendo del propósito del filtro pasivo se puede entrar en dos configuraciones posibles:

- Filtro pasivo en serie: Se conectan en serie entre la fuente de alimentación y la carga o el circuito en el que se desea filtrar la señal. Se utiliza para bloquear o atenuar ciertas frecuencias mientras permite el paso de otras.
- Filtro pasivo en paralelo: Se conectan en paralelo a la carga o al circuito, permitiendo desviar o absorber las frecuencias no deseadas. Este tipo filtro pasivo tiene ventajas con respecto al filtro pasivo en serie, debido a que solo transporta la corriente armónica para la frecuencia que fue sintonizado.

En la figura N° 2.10, se muestran los filtros pasivos más utilizados en la industria.

Figura N° 2.10 Tipos de filtros pasivos.



Fuente: De la Rosa (2006).

Estos filtros pasivos se diseñan con combinaciones de inductores (L), capacitores (C), y resistencias (R) para eliminar o reducir frecuencias no deseadas en los sistemas eléctricos. La eficiencia de un filtro pasivo depende de su diseño y de cómo se combinan los inductores, condensadores y resistencias para lograr la respuesta deseada en el sistema.

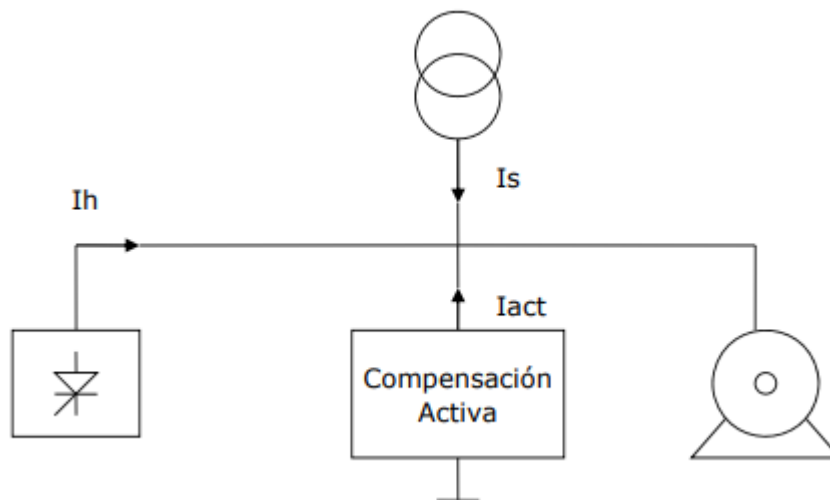
2.7.2. Filtros activos

Los filtros activos son sistemas automáticos de compensación de armónicos y energía reactiva que se adaptan en función de las variaciones que se produzcan en el suministro. Este filtrado está formado por convertidores estáticos de la energía, conectados a la carga contaminante en serie o paralelo, que actúan como fuente de tensión y corriente, anulando instantáneamente los armónicos mediante algoritmos de control. Además, tienen la capacidad de compensar la energía reactiva, equilibrar las corrientes de fase y cancelar la corriente del neutro. (Martínez D, 2012).

A través de este tipo filtro existen diferentes tipos de conexiones tales como:

- Filtro activo en paralelo con fuente de corriente.
- Filtro activo en paralelo con fuente de tensión.
- Filtro activo en serie.
- Filtro activo en serie-paralelo.

Figura N° 2.11 Conexión de filtro activo.



Fuente: Martínez D (2012).

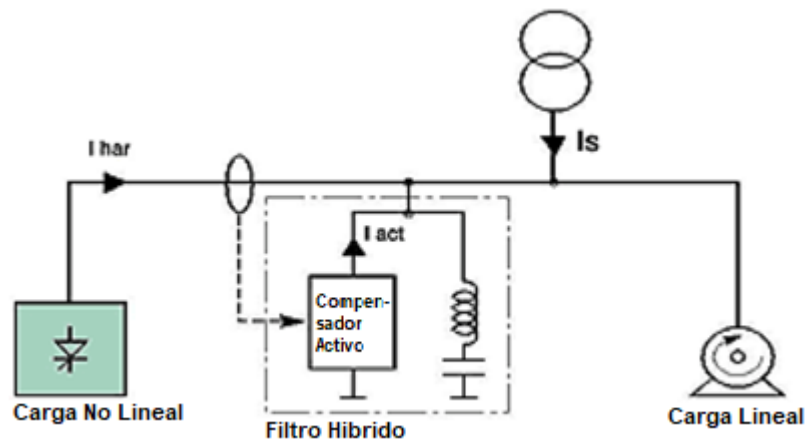
2.7.3. Filtros híbridos

Los filtros híbridos son una combinación de filtros pasivos y filtros activos para aprovechar las ventajas de ambos. Estos filtros se utilizan cuando se desea una mejor eficiencia, mayor control sobre las características de la señal, o cuando se necesita una mayor flexibilidad en términos de diseño y ajuste.

- Filtro activo en serie con el filtro pasivo.
- Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo.
- Filtro activo en serie con la fuente.

El filtro híbrido es una nueva solución que acumula las ventajas de ambas tecnologías, y tienen un rango más amplio de aplicaciones posibles. Esta tecnología permite obtener altas funcionalidades de filtrado sobre un amplio rango de potencia, más accesible que la pura solución activa. (Vásquez, 2003).

Figura N° 2.12 Filtro híbrido.



Fuente: Vásquez (2003).

CAPÍTULO III

NORMAS Y ESTÁNDARES

El presente capítulo aborda los artículos de las normas y estándares relevantes para la electricidad en Chile, con un enfoque particular en la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, (NTCSD). Este análisis establece un marco regulatorio que respalda la investigación, garantizando que el desarrollo del proyecto cumpla con las exigencias y mejores prácticas del sector eléctrico chileno.

3.1. Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución

La Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución o en su forma abreviada (NTCSD), establece las obligaciones y estándares que deben cumplir las empresas concesionarias de servicio de distribución de electricidad. La norma tiene como objetivo mejorar la calidad del servicio eléctrico para los usuarios. Define los estándares y requisitos en áreas como fluctuaciones de tensión, distorsión armónica, interrupciones de suministro y calidad de atención al cliente.

3.1.1. Regulación de tensión

La regulación de la tensión en los sistemas eléctricos desempeña un papel crucial para garantizar tanto la calidad como la estabilidad del suministro de energía. Según el Artículo 3-1 Regulación de Tensión de la Norma Técnica “NTCSD” nos indica como calcular dicha regulación de tensión. (CNE, 2024a)

A través del siguiente indicador, se podrá calcular la regulación de tensión en un punto de la red eléctrica:

$$\Delta V_k = \left| \frac{V_k - V_n}{V_n} \right| * 100\%$$

Donde:

- ΔV_k : Regulación de Tensión en el punto k, en [%].
- V_k : Tensión de suministro en el punto k, determinada como el promedio de las medidas en un intervalo de 15 minutos, en [kV].
- V_n : Tensión Nominal en el punto k, en [kV].

Es importante asegurarse de que los registros medidos se realicen en Estado Normal, es decir, cuando se cumplen los requisitos necesarios para ofrecer un servicio eléctrico sin interrupciones. Además, los registros deben reflejar los valores eficaces de la tensión promediados en intervalos de 10 minutos, los cuales deben mantenerse durante el 95% del tiempo en cualquier semana del año, o en un período continuo de siete días de medición y registro. Esto es crucial para asegurar que la regulación se mantenga dentro de los límites que se especificarán a continuación:

Tabla N° 3.1 Límites para la regulación de tensión.

Tensión de la red \ Densidad de la red	Alta y Media	Baja, Muy Baja y Extremadamente Baja
	Baja Tensión	± 7,5%
Media Tensión	± 6,0%	± 8,0%

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2024).

Como se menciona en la norma técnica, sin excepción de lo anterior, tanto en condiciones normales como anormales, todos los valores eficaces de la tensión promediados en intervalos de 10 minutos para todos los tipos de redes, tanto en baja tensión (BT) como en media tensión (MT), deberán ubicarse dentro del intervalo de $V_n - 15\%$ y $V_n + 15\%$. (p.32)

3.1.2. Regulación de frecuencia

Un control efectivo de la frecuencia es fundamental para garantizar la eficiencia y la seguridad de la operación de toda la infraestructura eléctrica. Del estado de la frecuencia se debe hacer cargo la empresa distribuidora, deberá registrar y medir mensualmente el en punto de conexión entre el alimentador y la fuente de alimentación principal, promediada en intervalos de 10 minutos, permitiendo identificar en que intervalo de la tabla N° 3.2 se encuentra la frecuencia.

Tabla N° 3.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.

Estado de la frecuencia	Intervalo de frecuencia [Hz]
Sub-frecuencia extrema	$f < 47,0$
Sub-frecuencia	$47,0 \leq f < 49,5$ Hz
Normal	$49,5 \leq f < 50,5$ Hz
Sobre frecuencia	$50,5 \leq f < 52,0$
Sobre frecuencia extrema	$52,0 \leq f$

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2024).

3.1.3. Distorsión armónica de corriente para usuarios de media tensión

La distorsión armónica de corriente en media tensión o (MT), es un aspecto importante en la calidad de la energía eléctrica, especialmente en entornos industriales donde se utilizan numerosos dispositivos electrónicos y maquinarias.

3.1.4. La distorsión armónica individual

La distorsión armónica individual proporciona una visión detallada de cómo cada armónica contribuye a la distorsión total de la corriente. Su resultado es expresado en termino de porcentaje “%”, y será determinada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D_{I_j} = \frac{I_j}{I_1} * 100$$

Donde:

- D_{I_j} : Distorsión armónica individual de corriente para la j-ésima armónica, en [%].
- I_j : Corriente de la j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_1 : Corriente de la componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

3.1.5. Distorsión de demanda total

Se utiliza para evaluar la calidad de la energía y el impacto de las armónicas en el consumo total de corriente en un sistema. Su resultado es expresado en termino de porcentaje [%], y será determinada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_L} * 100$$

Donde:

- TDD: Distorsión de Demanda Total, en [%].
- I_j : Magnitud de la j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_L : Corresponde al promedio de los máximos valores efectivos de la componente fundamental de la corriente de carga/inyección de un Usuario en [A], medidos en el Punto Común de Conexión correspondiente. Para el cálculo de dicho promedio, se deberá considerar el valor máximo mensual para cada uno de los últimos 12 meses, en [A].

3.1.6. Distorsión armónica total de corriente

Su resultado es expresado en termino de porcentaje [%], y será determinada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_1} * 100$$

Donde:

- THD_I: Distorsión Armónica Total de Corriente, en [%].
- I_j: j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_L: Componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

En Estado Normal, los registros deben reflejar los valores eficaces de la corriente consumida o inyectada en usuarios de Media Tensión, medidos en el PCC promediados en intervalos de 10 minutos, los cuales deben mantenerse durante el 95% del tiempo en cualquier semana del año, o en un período continuo de siete días de medición y registro, deberán ser tales que la distorsión armónica cumpla con los siguientes limites:

Tabla N° 3.3 Limites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios, expresados como porcentajes de I_L.

I _{sc} /I _L	Orden de la armónica j (armónicas impares)					TDD
	3 ≤ j < 11	11 ≤ j < 17	17 ≤ j < 23	23 ≤ j < 35	35 ≤ j < 50	
≤ 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	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2024).

3.1.7. Distorsión armónica de corriente para usuarios de baja tensión

La distorsión armónica de corriente es un fenómeno importante a considerar en sistemas eléctricos de baja tensión, especialmente en entornos donde se utilizan muchos dispositivos electrónicos. Según el Artículo 3-8 Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios de Baja Tensión Norma Técnica “NTCSD” nos indica como calcular dicha distorsión armónica de corriente. Es importante asegurarse de que los registros medidos se realicen en Estado Normal, los registros deben reflejar los valores eficaces de la corriente consumida o inyectada en usuarios de BT, medidos en el PCC promediados en intervalos de 10 minutos, los cuales deben mantenerse durante el 95% del tiempo en cualquier semana del año, o en un período continuo de siete días de medición y registro, deberán ser tales que la distorsión armónica cumpla con los siguientes límites:

Tabla N° 3.4 Límites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios en Baja Tensión.

Orden de la armónica (n)	Usuarios de tarifa BT1	Usuarios de tarifas BT, excepto BT1
	Corriente armónica máxima, en (A)	Corriente armónica máxima, en (%) de la corriente fundamental
Armónicos Impares No Múltiplos de 3		
5	2,28	12,0
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3,0
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,20	1,6
25	0,18	1,6
>25	4,5/n	0,2+0,8*25/n
Armónicos Impares Múltiplos de 3		
3	4,60	16,6
9	0,80	2,2
15	0,30	0,6
21	0,21	0,4
>21	4,5/n	0,3
THD_I	No Aplica	20

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2024).

3.1.8. Cálculo de factor de potencia

El Factor de Potencia instantáneo será determinado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FP_{inst} = \cos \left(\arctg \left(\frac{EQ_{inst}}{EP_{inst}} \right) \right)$$

Donde:

- FP_{inst} : Factor de Potencia en intervalos de 10 minutos.
- EQ_{inst} : Energía Reactiva en intervalos de 10 minutos, en [kVARh].
- EP_{inst} : Energía Activa en intervalos de 10 minutos, en [kWh].

3.1.9. Límites del factor de potencia

El factor de potencia indica la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica en un sistema eléctrico. Se define como la relación entre la potencia activa, la potencia aparente y la potencia reactiva.

El factor de potencia deberá mantenerse dentro de los siguientes límites:

$$0,95_{CAP} \leq FP \leq 0,96_{IND}$$

3.2. Norma técnica de seguridad y calidad de servicio

La Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio o en su forma abreviada (NTSyCS), es un estándar regulatorio establecido en Chile por la Comisión Nacional de Energía., con el objetivo de garantizar un suministro seguro y de alta calidad. Esta norma aborda aspectos críticos como la continuidad del servicio, la tensión y frecuencia adecuadas, así como la minimización de interrupciones. Además, se enfoca en la seguridad, definiendo requisitos para la infraestructura eléctrica y la capacitación del

personal. A través de métodos de medición y monitoreo, se busca asegurar el cumplimiento de estándares, al mismo tiempo que se establece un protocolo para la gestión de reclamaciones y sanciones.

3.2.1. Artículo 5-18

Como se menciona en el artículo 5-18 de la norma técnica, se establecen los límites que puede tener el factor de potencia. 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo en los puntos de control con tensión nominal inferior a 30(kV). Y se deberá cumplir por al menos un 98% del tiempo estadístico de cada mes. (CNE, 2024b).

3.3. IEEE Std 1159 - 2009

Esta práctica recomendada aborda las condiciones nominales y sus posibles desviaciones, las cuales pueden originarse tanto en la fuente de suministro como en el equipo de carga. Además, se examinan los dispositivos utilizados para monitorear la calidad de la energía, así como las técnicas de aplicación y la interpretación de los resultados obtenidos.

la tabla 3.5, muestra los resultados de los desbalances de voltaje y corriente según el estándar IEEE 1159-2009. Este estándar clasifica los fenómenos electromagnéticos en diversas categorías, permitiendo evaluar y comparar los distintos tipos de perturbaciones en la red eléctrica.

Tabla N° 3.5 Categoría y características de fenómenos electromagnéticos.

Categoría y características de fenómenos electromagnéticos del sistema de energía (IEEE Std 1159 – 2009)			
Categoría	Contenido típico espectral	Duración típica	Magnitud típica del voltaje
4.0 Desbalance			
4.1 Voltaje		Estado estable	0.5-2%
4.2 Corriente		Estado estable	1.0-30%

Fuente: Adaptado de IEEE Std 1159 (2009).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DATOS

El presente capítulo se centra en el análisis de los datos en función de la norma NTCSD (Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución), cumpliendo con sus exigencias. Se examinan los artículos más relevantes de esta norma, aplicando sus criterios para evaluar la calidad del servicio y garantizar que el desarrollo del proyecto se ajuste a los estándares establecidos. Este análisis proporciona una base sólida para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones informadas.

4.1. Análisis de voltaje

Para comenzar a realizar un correcto análisis de voltaje, se deberá tener en cuenta la evaluación de la regulación del voltaje en la fase R, S y T. Para su comprobación se utilizará la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

4.1.1. Límite para la regulación de tensión

La tabla N° 4.1, presenta los límites de regulación de tensión. El sistema eléctrico en estudio tiene como punto común de conexión (PCC), en nivel de baja tensión, con un voltaje de 220 V entre fase y neutro. Los límites de regulación de tensión se definen con base en la tabla N° 3.1. Considerando que la tensión nominal de la red es de baja tensión y que la densidad de la red es alta y media, se establecerá un límite de $\pm 7,5\%$ respecto a la tensión nominal para la regulación de la tensión en el sistema eléctrico.

Tabla N° 4.1 Límites de la regulación de tensión.

Ítems	Tensión (V)
Límite superior	236,5
Tensión nominal	220
Límite inferior	203,5

4.1.2. Regulación de tensión en fase R

Se debe aplicar la tensión nominal del sistema 220 V entre fase y neutro como lo estipula la norma. Se utilizará el promedio de la tensión nominal para la regulación de tensión en la fase R.

$$\Delta V_k = \left| \frac{232,67 - 220}{220} \right| * 100\% = 5,76\%$$

Los resultados de la regulación de tensión de la fase R se presentan en la tabla N° 4.2, presenta el resumen de los valores de tensión obtenidos por lo registros durante 10 minutos por 7 días, con el total de 1008 datos.

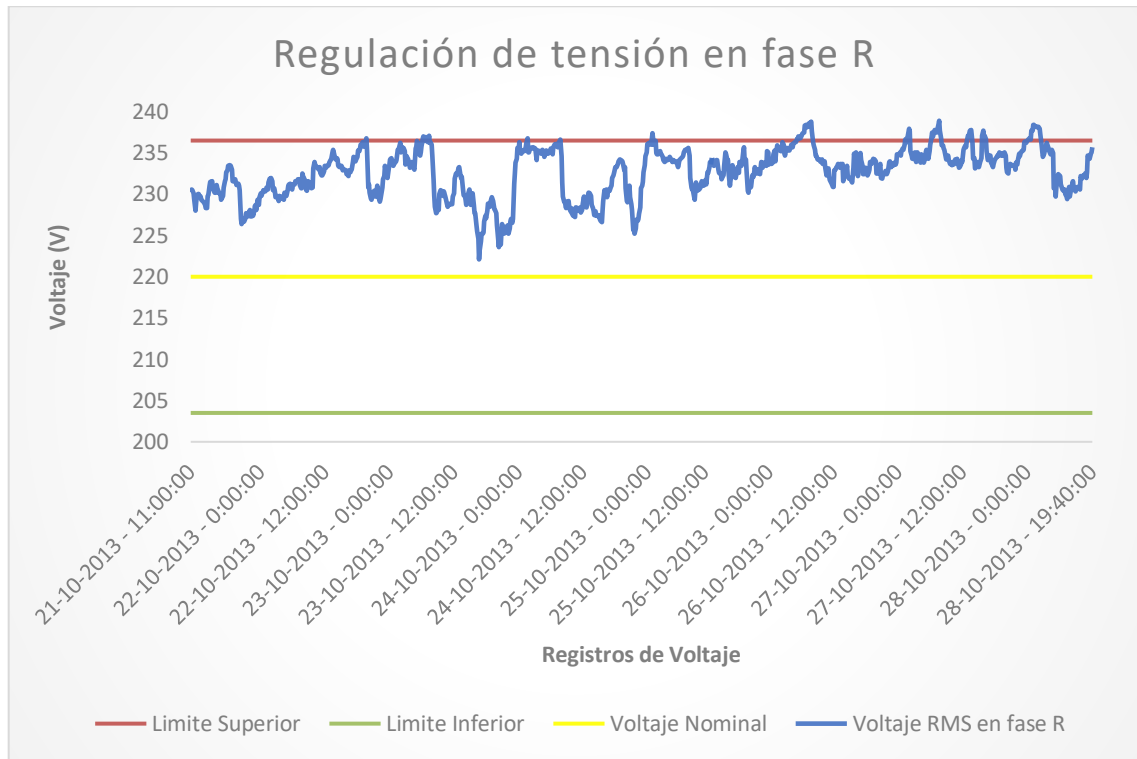
Tabla N° 4.2 Regulación de tensión en fase R.

Fase R			
Ítems	Limites (V)	Tensión (V)	Regulación de tensión (%)
Máximo	236,5	238,90	8,59
Promedio	220	232,67	5,76
Mínimo	203,5	222,10	0,95

Se puede observar en la tabla N° 4.2, que en la fase R que la tensión promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, la tensión máxima es de 238,9 V sobrepasando el límite superior, y la tensión mínima es de 222,1 V estando dentro del límite inferior. La regulación de voltaje promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, siendo como máximo un 8,59% y como mínimo un 0,95%.

La figura N° 4.1, presenta los resultados de este análisis para la fase R, evidenciando el comportamiento del voltaje nominal en el tiempo y facilitando la identificación de los límites de regulación establecidos por la Norma Técnica de Calidad y Servicio para Sistema de Distribución.

Figura N° 4.1 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase R.



En la figura N° 4.1, se observa un aumento de la tensión en el total de los registros en comparación con la tensión nominal de 220 V. Algunos registros sobrepasan el límite superior, mientras que no se encuentran registros que excedan el límite inferior. Para evaluar si la fase R cumple con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite superior. Si menos del 95% de los registros están dentro de los límites establecidos, se determinará que no cumple con la norma.

- Se han identificado 68 registros que exceden el límite superior. De un total de 1008 registros, 940 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase R tiene una permanencia del 93,25%. Por lo tanto, se concluye que la fase R no cumple con la norma técnica.

4.1.3. Regulación de tensión en fase S

Se debe aplicar la tensión nominal del sistema 220 V entre fase y neutro como lo estipula la norma. Se utilizará el promedio de la tensión nominal para la regulación de tensión en la fase S.

$$\Delta V_k = \left| \frac{227,18 - 220}{220} \right| * 100\% = 3,28\%$$

Los resultados de la regulación de tensión de la fase S se presentan en la tabla N° 4.3, presenta el resumen de los valores de tensión obtenidos por lo registros durante 10 minutos por 7 días, con el total de 1008 datos.

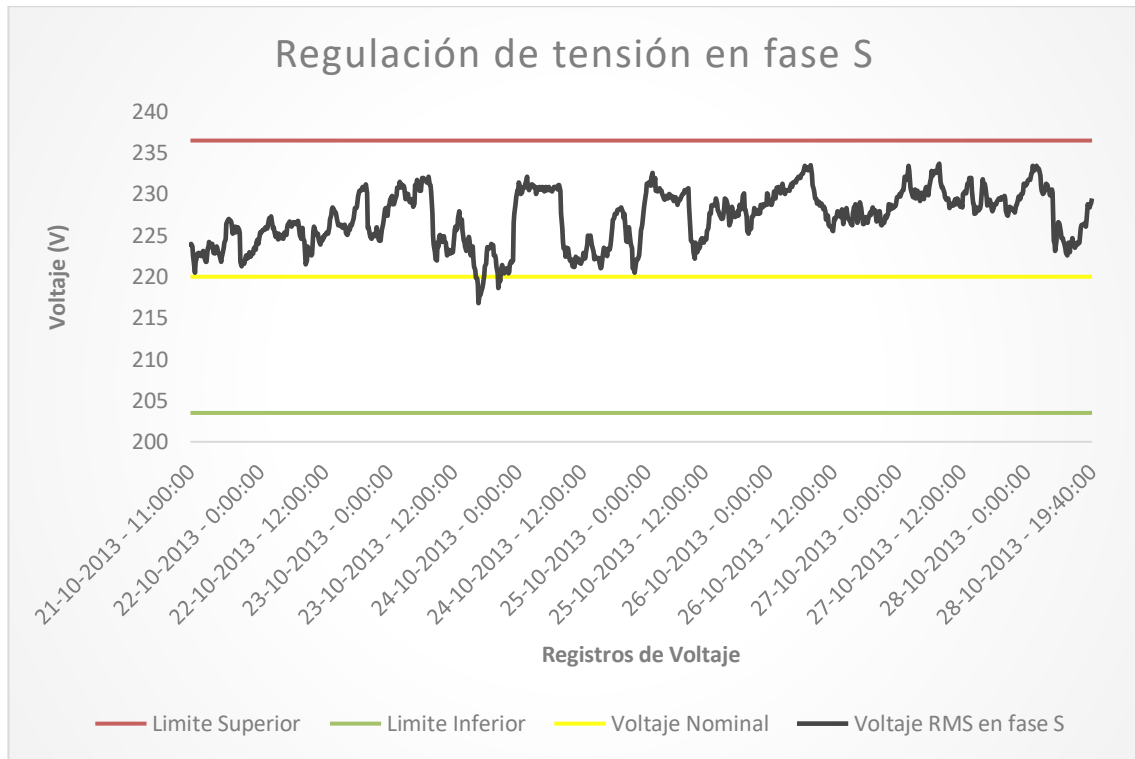
Tabla N° 4.3 Regulación de tensión en fase S.

Fase S			
Ítems	Limites (V)	Tensión (V)	Regulación de tensión (%)
Máximo	236,5	233,70	6,23
Promedio	220	227,18	3,28
Mínimo	203,5	216,80	0,05

Se puede observar en la tabla N° 4.3, que en la fase S que la tensión promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, la tensión máxima es de 233,7 V estando dentro del límite superior, y la tensión mínima es de 216,8 V estando dentro del límite inferior. La regulación de voltaje promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, siendo como máximo un 6,23% y como mínimo un 0,05%.

La figura N° 4.2, presenta los resultados de este análisis para la Fase S, evidenciando el comportamiento del voltaje nominal en el tiempo y facilitando la identificación de los límites de regulación establecidos por la Norma Técnica de Calidad y Servicio para Sistema de Distribución.

Figura N° 4.2 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase S.



En la figura N° 4.2, se observa un aumento de la tensión en la mayoría de los registros en comparación con la tensión nominal de 220 V. No se encuentra ningún registro fuera de los límites. Por lo tanto, se puede determinar que el total de los registros cumplen con la norma, estando por encima del 95%.

- Se han identificado 0 registros que excedan el límite inferior o superior de un total de 1008 registros. Lo que significa que la fase S tiene una permanencia del 100%. Por lo tanto, se concluye que la fase S cumple con la norma técnica.

4.1.4. Regulación de tensión en fase T

Se debe aplicar la tensión nominal del sistema 220 V entre fase y neutro como lo estipula la norma. Se utilizará el promedio de la tensión nominal para la regulación de tensión en la fase T.

$$\Delta V_k = \left| \frac{226,28 - 220}{220} \right| * 100\% = 2,87\%$$

Los resultados de la regulación de tensión de la fase T se presentan en la tabla N° 4.4, presenta el resumen de los valores de tensión obtenidos por los registros durante 10 minutos por 7 días, con el total de 1008 datos.

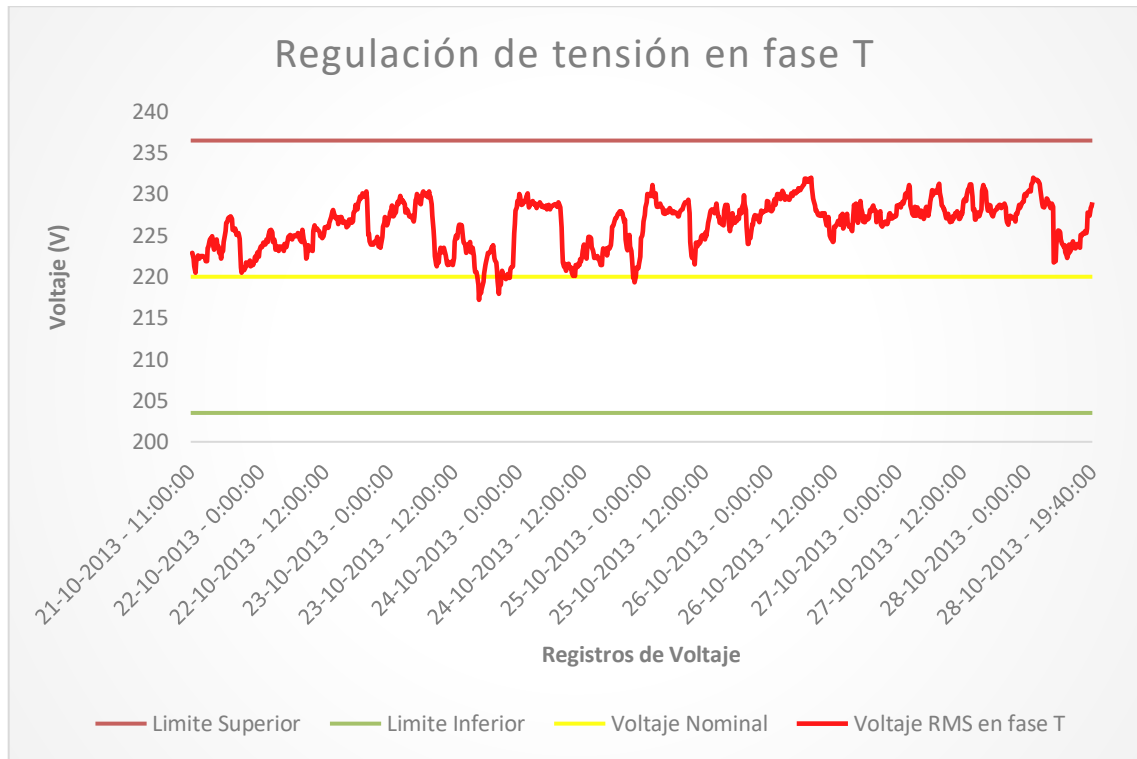
Tabla N° 4.4 Regulación de tensión en fase T.

Fase T			
Ítems	Limites (V)	Tensión (V)	Regulación de tensión (%)
Máximo	236,5	232,00	5,45
Promedio	220	226,28	2,87
Mínimo	203,5	217,20	0,00

Se puede observar en la tabla N° 4.4, que en la fase T que la tensión promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, la tensión máxima es de 232 V estando dentro del límite superior, y la tensión mínima es de 217,2 V estando dentro del límite inferior. La regulación de voltaje promedio está dentro del $\pm 7,5\%$ establecido, siendo como máximo un 5,45% y como mínimo un 0%.

La figura N° 4.3, presenta los resultados de este análisis para la Fase T, evidenciando el comportamiento del voltaje nominal en el tiempo y facilitando la identificación de los límites de regulación establecidos por la Norma Técnica de Calidad y Servicio para Sistema de Distribución.

Figura N° 4.3 Gráfico de límites de regulación de tensión en la fase T.



En la figura N° 4.3, se observa que al igual que en la fase R y S hay un aumento de la tensión en la mayoría de los registros en comparación con la tensión nominal de 220 V. No se encuentra ningún registro fuera de los límites. Por lo tanto, se puede determinar que el total de los registros cumplen con la norma, estando por encima del 95%.

- Se han identificado 0 registros que excedan el límite inferior o superior de un total de 1008 registros. Lo que significa que la fase S tiene una permanencia del 100%. Por lo tanto, se concluye que la fase T cumple con la norma técnica.

4.1.5. Resultados de la regulación de tensión en fase R, S y T

Tras el análisis individual de cada una de las fases del sistema, se determinó que las fases R, S y T se encuentran dentro del límite de $\pm 7,5\%$ de regulación de tensión. Sin embargo, esto no garantiza el cumplimiento de la norma, ya que los registros de la fase R no cumplen con el requisito de estar dentro del 95% del tiempo exigido. Por lo tanto, la

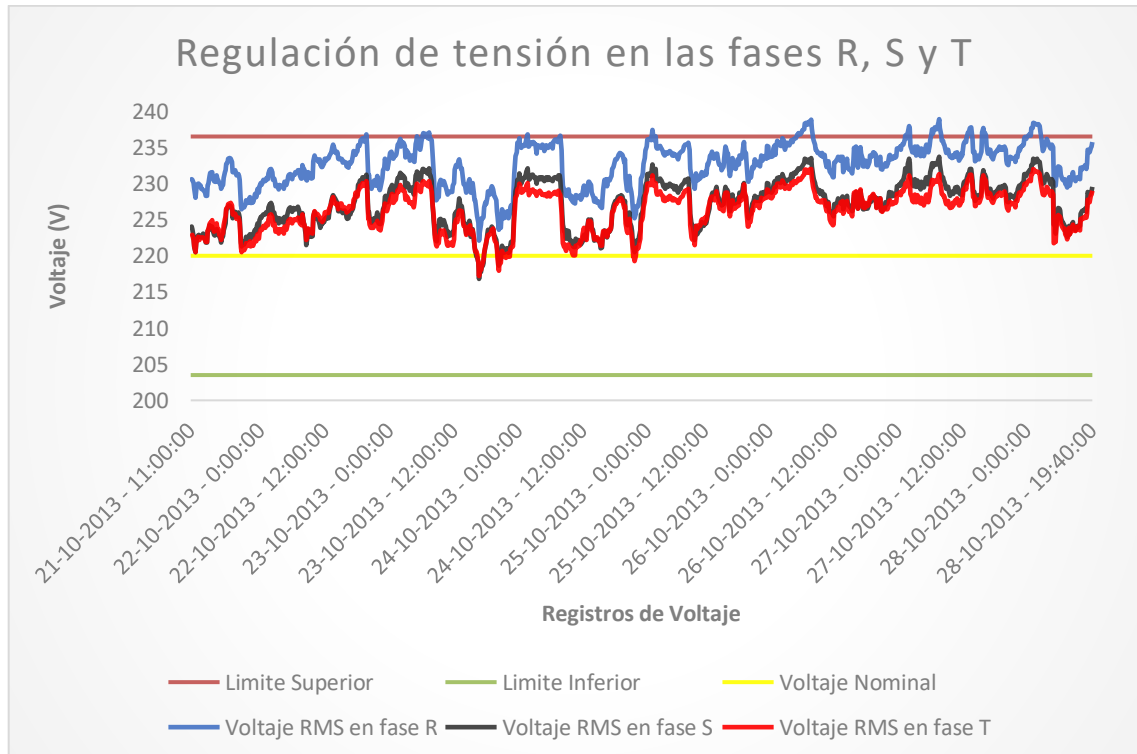
fase R no se ajusta a la norma técnica, mientras que las fases S y T sí cumplen con ella, como se detalla en la tabla N° 4.5.

Tabla N° 4.5 Resultado de regulación de tensión en fases R, S y T.

Regulación de tensión					
Fases	Límite de Regulación %	Regulación de tensión promedio %	Mínimo de permanencia %	Permanencia %	Cumplimiento
R	±7,5	5,76	95	93,25	No
S		3,28		100	Si
T		2,87		100	Si

La figura N°4.4, grafica los resultados obtenidos en el análisis de las fases R, S y T. Esta representación visual permite observar de manera clara el cumplimiento de las normas de regulación de tensión y el tiempo que cada fase se encuentra dentro de los límites establecidos.

Figura N° 4.4 Resultados en límites de regulación de tensión en la fase R, S y T.



Analizando la figura N° 4.4, se pueden ver los momentos donde la fase R no cumple con la regulación de voltaje, indicando que está fuera de los límites aceptables establecidos por la norma técnica, lo que puede afectar la eficiencia y el funcionamiento de los equipos conectados. Es fundamental investigar la causa raíz de este desbalance, ya que se puede presentar que las cargas conectadas a cada fase no están equilibradas, esto puede causar diferencias en las tensiones, como un aumento en su voltaje.

4.2. Regulación de frecuencia

Para comenzar a realizar un correcto análisis de frecuencia, se deberá tener en cuenta las exigencias generales de la norma NTCSD, que nos indica que la magnitud de la frecuencia nominal para sistemas de distribución es de 50 Hz.

Los resultados de la frecuencia se presentan en la tabla N° 4.6, mostrando los valores máximos, mínimos y el promedio de la frecuencia a través de los registros obtenidos del sistema eléctrico.

Tabla N° 4.6 Valores obtenidos de frecuencia.

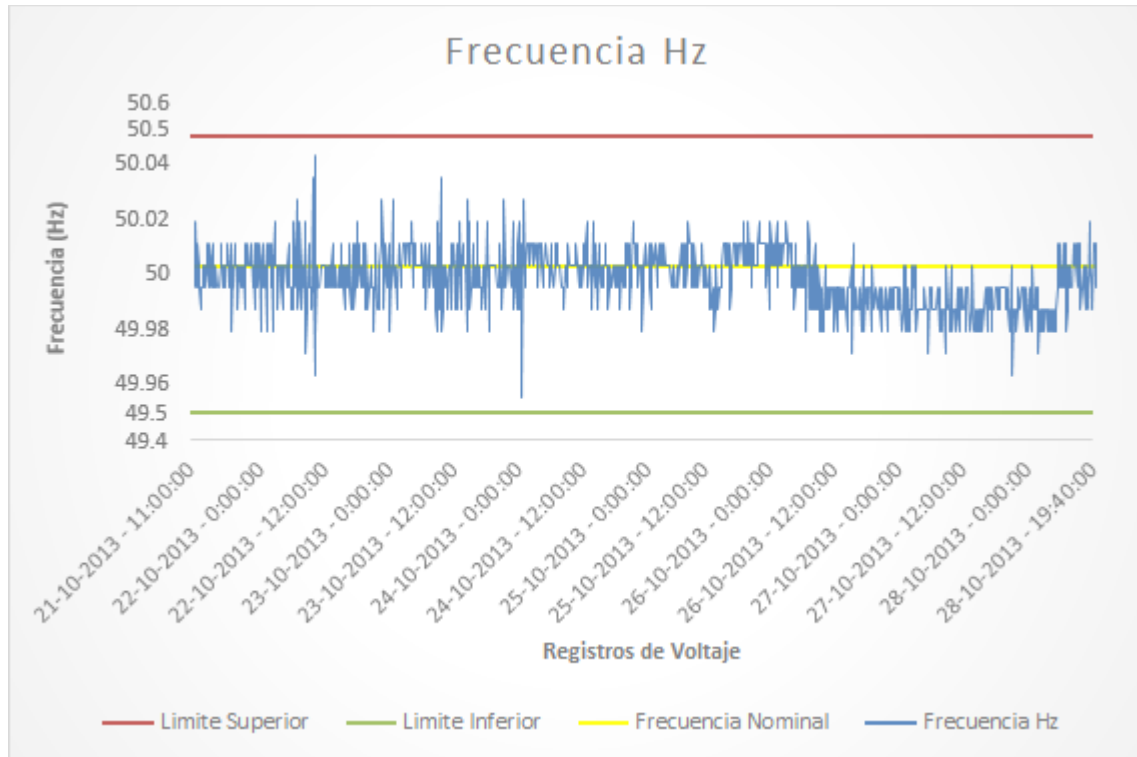
Frecuencia (Hz)	
Máximo	50,05
Promedio	49,99
Mínimo	49,94

Se puede observar en la tabla N° 4.6, que la frecuencia promedio es de 49,99 Hz, lo que es muy cercano a la frecuencia nominal. De manera similar, la frecuencia máxima registrada es de 50,05 Hz, y la mínima de 49,94 Hz, indicando una variabilidad mínima y una adecuada estabilidad en el sistema.

La figura N° 4.5, grafica los intervalos en los que se encuentra el estado de la frecuencia del sistema, utilizando los límites máximos y mínimos obtenidos en la tabla N° 4.6 y comparándolos con los intervalos establecidos en la tabla N° 3.2, para registrar las variaciones de la frecuencia. Al examinar detenidamente los valores obtenidos, se puede

concluir que el estado de la frecuencia es normal, con un intervalo designado de $49,5 \leq f < 50,5$.

Figura N° 4.5 Gráfico de intervalos de frecuencia.



En la figura N° 4.5, se puede observar cómo la frecuencia se mantiene dentro de los intervalos establecidos previamente. Además, se destaca la baja variabilidad respecto a la frecuencia nominal, lo que indica una estabilidad adecuada en el sistema.

4.2.1. Resultados de regulación de frecuencia

Los resultados de la frecuencia presentan una baja variabilidad y se alinean completamente con la frecuencia nominal establecida en el artículo 1-5 de la Norma Técnica de Calidad y Seguridad para Sistemas de Distribución. La frecuencia se encuentra dentro del intervalo de $49,5 \leq f < 50,5$ lo que indica que se mantiene en un estado normal.

4.3. Análisis de corriente

Para llevar a cabo el análisis de corrientes, comenzaremos con la tabla N°4.7 que ilustra el tiempo de inactividad que presenta el sistema eléctrico. Esta inactividad se manifiesta como una desconexión total de la corriente eléctrica, reflejándose en un consumo de 0 A en las tres fases del sistema. Es importante considerar si esta desconexión es el resultado de un factor periódico inherente al funcionamiento del sistema eléctrico o si puede deberse a una posible desconexión de la sonda de corriente. Este análisis nos permitirá identificar patrones y comprender mejor las dinámicas del consumo eléctrico en la instalación.

Tabla N° 4.7 Tiempo de inactividad presentada en las corrientes.

Días	Fecha	Registros sin actividad	Hora de inicio	Hora de termino	Horas
Lunes	21/10/2013	10	19:40	21:10	01:30
Martes	22/10/2013	24	20:00	23:50	03:50
Miércoles	23/10/2013	16	19:30	22:00	02:30
		2	22:40	22:50	00:10
		38	23:30	05:40	06:10
Jueves	24/10/2013	1	09:10	/	/
		43	20:30	03:30	07:00
Viernes	25/10/2013	5	04:40	05:20	00:40
		7	19:50	20:50	01:00
		43	21:30	04:30	07:00
Sábado	26/10/2013	0	/	/	/
Domingo	27/10/2013	55	19:50	04:50	09:00
Lunes	28/10/2013	0	/	/	/
	Registros totales	244		Horas totales	38:50

Al examinar la tabla N° 4.7, se observa una notable desconexión del consumo eléctrico durante seis de los siete días de la semana de medición. De un total de 1008 registros, se registran 244 instancias con un consumo de 0 A, lo que equivale a un total de 38 horas y 50 minutos de inactividad, es decir, aproximadamente un día completo con 14 horas y 50 minutos de desconexión.

Un aspecto relevante es que la hora de inicio de esta inactividad es bastante consistente, generalmente comienza en la tarde, alrededor de las 19:30 horas, y se extiende hasta la madrugada, cerca de las 04:30 horas. Esta regularidad sugiere que la desconexión no es producto de un factor externo aleatorio ni de una falla en la sonda de corriente, sino que parece ser una característica particular del sistema eléctrico analizado.

Por ende, se puede deducir que, la repetitividad y lo específico del horario de esta inactividad indican un patrón constante, lo que sugiere que se trata de un comportamiento sistemático del consumo eléctrico estudiado. Esto podría tener implicaciones importantes para la gestión y optimización del uso energético en la instalación.

Continuando con el análisis de corriente, se mostrarán los valores eficaces, de los valores máximos, mínimos y promedios de las fases R, S y T y en el neutro a partir de la tabla N°4.8.

Tabla N° 4.8 Valores obtenidos de las corrientes.

Corrientes RMS				
Ítems	Fase R (A)	Fase S (A)	Fase T (A)	Neutro (A)
Máximo	27,90	34,80	33,10	29,00
Promedio	4,25	7,41	4,95	6,38
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00

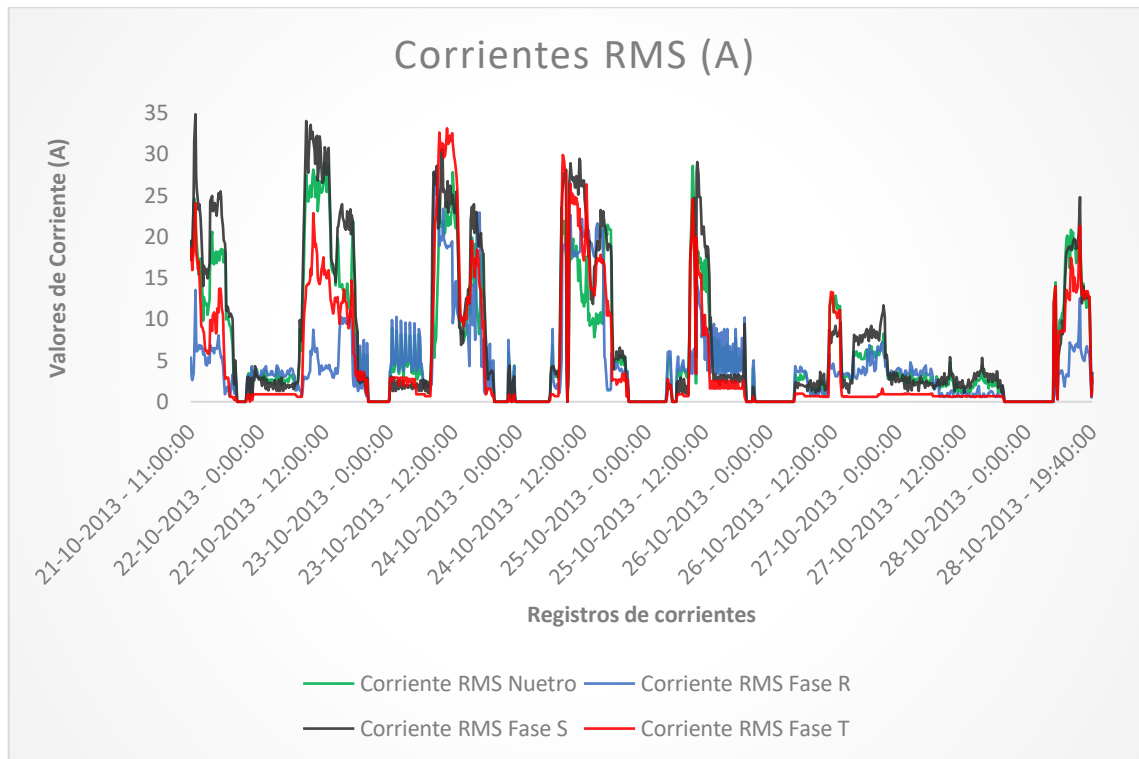
En los resultados de la tabla N° 4.8, se observa que la fase S presenta la mayor corriente, tanto en su valor máximo como en el promedio, alcanzando una corriente máxima de 34,8 A y un promedio de 7,41 A. Las fases R y T muestran un comportamiento similar, aunque con valores inferiores en comparación con la fase S.

Lo que destaca de este análisis es que el neutro se comporta prácticamente como si fuera una fase adicional del sistema. Presenta una corriente máxima de 29 A y un promedio de 6,38 A, lo que indica que su consumo es incluso superior al de las fases R y T. Esta situación puede ser preocupante, ya que un neutro con un consumo tan alto puede conllevar varios problemas, entre ellos:

- Sobrecarga del neutro.
- Desequilibrio en el sistema.
- Riesgo de fugas de corriente.
- Impacto en la eficiencia energética.

La figura N° 4.6, graficará el comportamiento de las fases R, S, T y el neutro, durante la semana continua de medición y se podrá evidenciar las características del sistema eléctrico estudiado.

Figura N° 4.6 Gráfico de comportamiento de las corrientes RMS.



Como se había mencionado en la tabla N° 4.7, se puede visualizar y comprobar la existencia en los tiempos de inactividad en el sistema eléctrico, en el cual el consumo eléctrico es de 0 A y que efectivamente afecta a todos los días de medición y registro, con excepción del día sábado como lo muestra la figura N° 4.6. Complementando con la tabla N° 4.8, se puede corroborar que el neutro del sistema tiene el mismo comportamiento que las fases y que este sea en mayor parte el causante de este desequilibrio de las corrientes.

4.3.1. Resultados del análisis de las corrientes

Los resultados de las corrientes revelan un consumo desequilibrado entre las fases. En particular, la fase S muestra un consumo mayor a plena carga en comparación con las fases R y T. Además, el neutro presenta el mayor problema, ya que su valor promedio de consumo supera al de las fases R y T. Esta situación genera un desequilibrio en la distribución de cargas entre las fases, que excede el 42% y esto no asegura un funcionamiento seguro, eficiente y confiable de la red eléctrica estudiada.

4.4. Desbalance de las corrientes

Los límites de desbalance de corriente se detallan en la tabla N° 3.5. Los límites varían desde el 1,0 % hasta el 30 %.

El sistema eléctrico estudiado al no encontrarse con cargas balanceadas en sus fases, se produce un desequilibrio en las corrientes, afectando la eficiencia del sistema y acortar la vida útil de los equipos conectados, la tabla N° 4.9 muestra el desbalance de las corrientes en el sistema.

Tabla N° 4.9 Desequilibrio en las corrientes.

Desequilibrio de las corrientes	
Ítems	Desbalance (%)
Máximo	92,10
Promedio	42,36
Mínimo	6,50

En la tabla N° 4.9, se observa un notable desequilibrio en las cargas, con un promedio del 42,36%. Este desequilibrio puede deberse a cargas desiguales en las fases o a variaciones en su distribución. Al comparar este resultado con los límites establecidos por la norma internacional IEEE Std 1159-2009, se observa que el valor supera el límite máximo permitido del 30%, lo que indica un incumplimiento de dicha normativa. Complementando este análisis, los resultados de la tabla N° 4.8, indican que el neutro está

transportando una corriente prácticamente igual a la de las fases, lo que sugiere una sobrecarga. Un neutro que tiene dichas características produce un desequilibrio significativo, lo que puede comprometer no solo la eficiencia del sistema, sino también la seguridad del mismo.

4.5. Distorsión total armónica de tensión en el sistema eléctrico

Los registros de las mediciones estudiadas se realizaron en un PCC de baja tensión, por lo que se hará uso del artículo 3-5 Distorsión Armónica de y severidad de parpadeo, de la norma NTCSD. La tensión de referencia es entre fase y neutro de 220 V. Se utilizará un límite de 8% para la distorsión total armónica de tensión.

Los resultados de la distorsión armónica de voltaje se presentan en la tabla N° 4.10, se muestran los registros de las mediciones de la distorsión total armónica de tensión del sistema eléctrico estudiado.

Tabla N° 4.10 Valores obtenidos del THD_V.

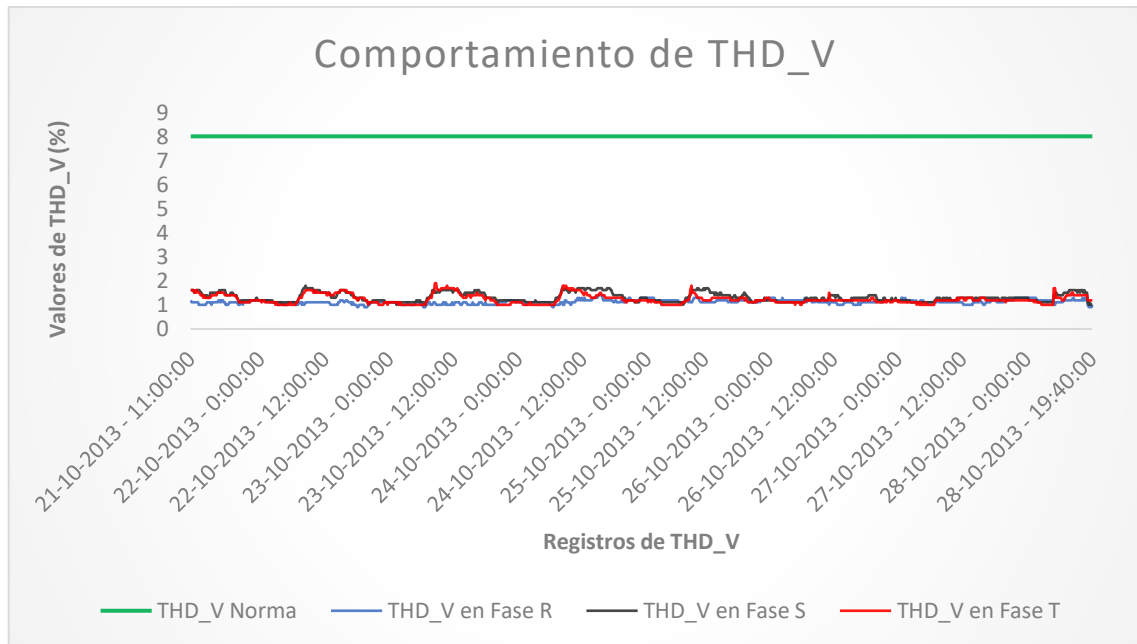
THD_V			
Ítem	Fase R (%)	Fase S (%)	Fase T (%)
Máximo	1,40	1,80	1,90
Promedio	1,13	1,31	1,23
Mínimo	0,90	1,00	1,00

Como se puede observar en la tabla N° 4.10, los valores promedios de la distorsión total armónica de tensión no superan el límite del 8% establecido por la norma vigente en ninguna de las tres fases. Además, se evidencia que ninguno de los valores máximos excede este límite, lo que indica que el 100% de los datos se encuentra dentro de los parámetros aceptables.

La figura N°4.7, muestra los registros de las mediciones de la distorsión total armónica de tensión del sistema eléctrico. Esta figura permitirá observar la permanencia de los

niveles de distorsión a lo largo del tiempo, en relación con los límites establecidos por la normativa.

Figura N° 4.7 Gráfico de distorsión total armónica de tensión.



En la figura N° 4.7, se puede observar cómo la distorsión total armónica de tensión se mantiene dentro del límite establecido previamente, lo que indica una estabilidad adecuada en el sistema. Para evaluar correctamente el 95% de los registros deberán estar dentro del límite, se determinará que no cumple con la norma.

- Se han identificado 0 registros que exceden el límite. De un total de 1008 registros, lo que significa que tiene una permanencia del 100%. Por lo tanto, se concluye que si cumple con el THD_V que propone la norma técnica.

Con base en los resultados obtenidos, se puede deducir que ninguna de las fases incumple con la Norma Técnica. Por lo tanto, no se considera necesario realizar un análisis por fases, ya que los resultados demuestran que el límite máximo de distorsión total armónica de tensión no se supera y que el 100% de los registros medidos se mantiene dentro de los parámetros aceptables.

4.6. Distorsión total armónica de corriente de la fase R

Los registros de las mediciones estudiadas se realizaron en un PCC de baja tensión, por lo que se hará uso de la tabla N°11 del artículo 3-8 Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios en Baja Tensión, de la norma NTCSD.

Los resultados de los límites de distorsión total armónica de corriente en la fase R se presentan en la tabla N°4.11. Se muestran los registros de las mediciones de las armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden. Estas se han clasificado en dos categorías, aquellas que son múltiplos de 3 y aquellas que no lo son. Se han excluido las armónicas pares, ya que su efecto tiende a cancelarse entre sí y no tienen una influencia relevante en el análisis.

Tabla N° 4.11 Límites de distorsión total armónica de corriente en fase R.

Fase R			
Armónicos de orden impar (H)	Límites permitidos (%)	Limites Promedios (%)	Limites cumplidos
3	16,6	16,15	SI
5	12,0	13,66	NO
7	8,5	10,06	NO
9	2,2	8,25	NO
11	4,3	5,83	NO
13	3,0	3,36	NO
15	0,6	2,28	NO
17	2,7	2,20	SI
19	1,9	1,30	SI
21	0,4	0,96	NO
THD_I	20	26,06	NO

Como se observa en la tabla N° 4.11, las armónicas que van desde el quinto hasta el décimo quinto orden, así como la del vigésimo primer orden, superan los límites establecidos por la norma técnica. Esto indica que no cumplen con los estándares requeridos dentro de la distorsión armónica individual de corriente. Además, el THD_I de la fase R es del 26,06% lo que excede el límite máximo permitido del 20% para la

distorsión armónica total de corriente. Este nivel de distorsión sugiere una considerable relevancia de la distorsión presente en la señal estudiada. Tal situación puede tener implicaciones significativas en el rendimiento y la calidad de los diferentes equipos eléctricos.

La tabla N°4.12, muestra los registros de la permanencia en el tiempo que tienen las diferentes armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden.

Tabla N° 4.12 Permanencia en el tiempo en fase R.

Fase R				
Armónicos de orden impar (H)	Datos dentro de rango	Datos fuera de rango	Permanencia (%)	Cumplimiento de norma
3	699	309	69,35	NO
5	616	392	61,11	NO
7	631	377	62,60	NO
9	303	705	30,06	NO
11	514	494	50,99	NO
13	683	325	67,76	NO
15	381	627	37,80	NO
17	639	369	63,39	NO
19	690	318	68,45	NO
21	412	596	40,87	NO
THD_I	510	498	50,60	NO

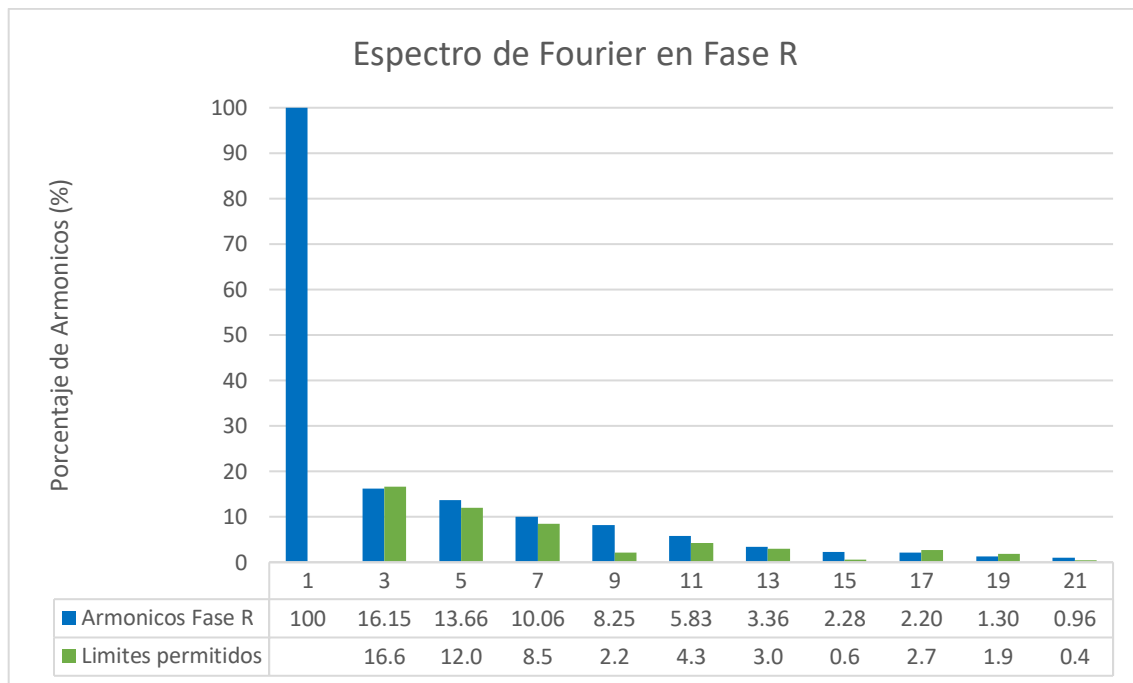
En la tabla N° 4.12, se puede ver que en la fase R ninguna de las armónicas impares presentadas y también el THD_I no cumple con la normativa, que establece que los registros deben permanecer un 95% del tiempo, lo que implica que no deben caer por debajo de 957 registros para estar dentro de los límites establecidos para cada armónica individual.

4.6.1. Análisis de espectro de Fourier en fase R

En este análisis, nos centraremos en la fase R del sistema trifásico. En la figura N°4.8, se presentarán los resultados de este análisis graficando a través del espectro de Fourier,

facilitando la identificación de frecuencias dominantes y las desviaciones de los estándares establecidos por la normativa técnica.

Figura N° 4.8 Espectro de Fourier en fase R de corriente armónica individual.



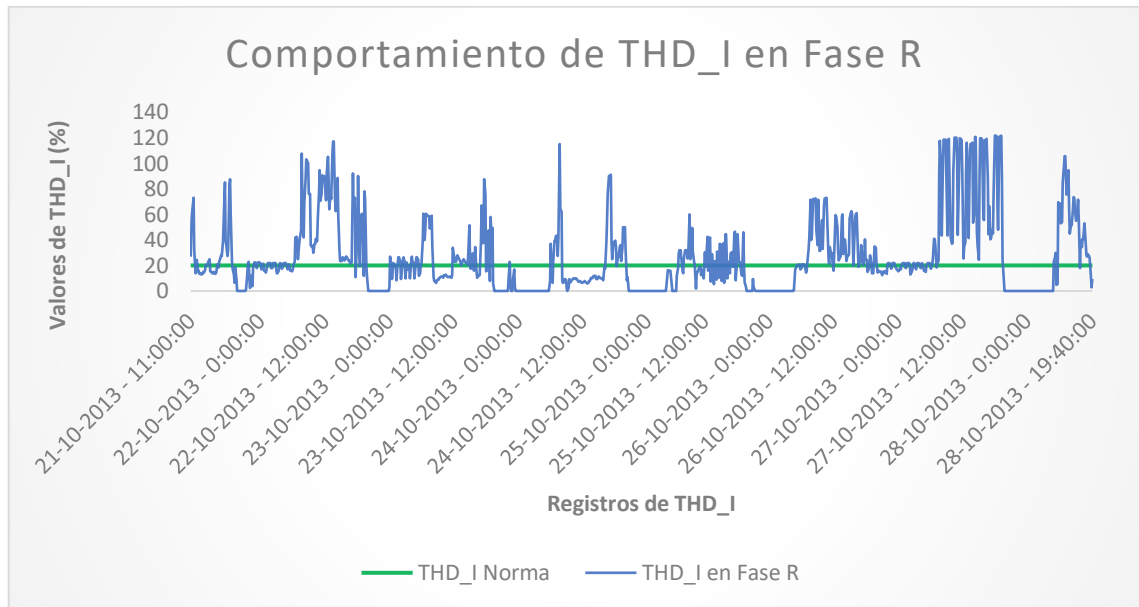
En la figura N° 4.8, se puede apreciar el análisis de las distorsiones armónicas de la fase R, destacando tanto los límites cumplidos como los no cumplidos según la normativa técnica. Se observa que la distorsión armónica individual presenta los tres tipos de secuencias, positiva, negativa y cero.

Dentro de la secuencia positiva, se identifican dos armónicas que no cumplen con los límites establecidos, la armónica de séptimo orden, que presenta un valor del 10,06% superando su límite de 8,5% y la armónica de décimo tercer orden con un 3,36% que excede el límite de 3,0%. En la secuencia negativa, también hay incumplimientos normativos, destacándose la armónica de quinto orden que muestra un valor del 13,66% frente a su límite de 12% y la armónica de undécimo orden con un 5,83% superando el límite de 4,3%. Finalmente, en la secuencia cero se registran varias armónicas que exceden los límites permitidos, la armónica de noveno orden con un valor 8,25% frente a su límite

de 2,2%, la armónica de décimo quinto orden con un 2,28% superando el límite de 0,6% y la armónica de vigésimo primer orden con un 0,96% superando el límite de 0,4%.

La figura N°4.9, grafica los registros de las mediciones de la distorsión total armónica de corriente de la fase R. Esta figura permitirá observar la permanencia de los niveles de distorsión a lo largo del tiempo, en relación con los límites establecidos por la normativa.

Figura N° 4.9 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase R.



En la figura N° 4.9, se observa un aumento significativo del THD_I en el total de los registros en comparación con el THD_I que establece la norma técnica de 20%. Gran cantidad de registros sobrepasan el límite. Para evaluar si la fase R cumple con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite. Si menos del 95% de los registros están dentro de los límites establecidos, se determinará que no cumple con la norma.

- Se han identificado 489 registros que exceden el límite. De un total de 1008 registros, 510 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase R tiene una permanencia del 50,60%. Por lo tanto, se concluye que la fase R no cumple con el THD_I que propone la norma técnica.

4.7. Distorsión total armónica de corriente de la fase S

Los registros de las mediciones estudiadas se realizaron en un PCC de baja tensión, por lo que se hará uso de la tabla N°11 del artículo 3-8 Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios en Baja Tensión, de la norma NTCSD.

Los resultados de los límites de distorsión total armónica de corriente en la fase S se presentan en la tabla N°4.12. Se muestran los registros de las mediciones de las armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden. Estas se han clasificado en dos categorías, aquellas que son múltiplos de 3 y aquellas que no lo son. Se han excluido las armónicas pares, ya que su efecto tiende a cancelarse entre sí y no tienen una influencia relevante en el análisis.

Tabla N° 4.13 Límites de distorsión armónica de corriente en fase S.

Fase S			
Armónicos de orden impar (H)	Límites permitidos (%)	Promedios (%)	Limites cumplidos
3	16,6	11,52	SI
5	12,0	10,82	SI
7	8,5	9,22	NO
9	2,2	7,17	NO
11	4,3	4,97	NO
13	3,0	2,69	SI
15	0,6	1,82	NO
17	2,7	1,46	SI
19	1,9	1,34	SI
21	0,4	1,34	NO
THD_I	20	20,72	NO

En la tabla N° 4.13, se observa que las armónicas desde el séptimo hasta el undécimo orden, así como la del décimo quinto y vigésimo primer orden, superan los límites establecidos por la norma técnica, indicando un incumplimiento en la distorsión armónica individual de corriente. Además, el THD_I de la fase S es del 20,72%, lo que ligeramente excede el límite máximo permitido del 20%. Aunque el exceso sea mínimo, es crucial

abordar esta situación, ya que este nivel de distorsión puede tener implicaciones significativas en el rendimiento de los equipos eléctricos.

A continuación, se presenta la tabla N° 4.14, que mostrara los registros de la permanencia en el tiempo que tienen las diferentes armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden.

Tabla N° 4.14 Permanencia en el tiempo en fase S.

Fase S				
Armónicos de orden impar (H)	Datos dentro de rango	Datos fuera de rango	Permanencia (%)	Cumplimento de norma
3	685	323	67,96	NO
5	636	372	63,10	NO
7	625	383	62,00	NO
9	340	668	33,73	NO
11	615	393	61,01	NO
13	640	368	63,49	NO
15	438	570	43,45	NO
17	832	176	82,54	NO
19	703	305	69,74	NO
21	416	592	41,27	NO
THD_I	698	310	69,25	NO

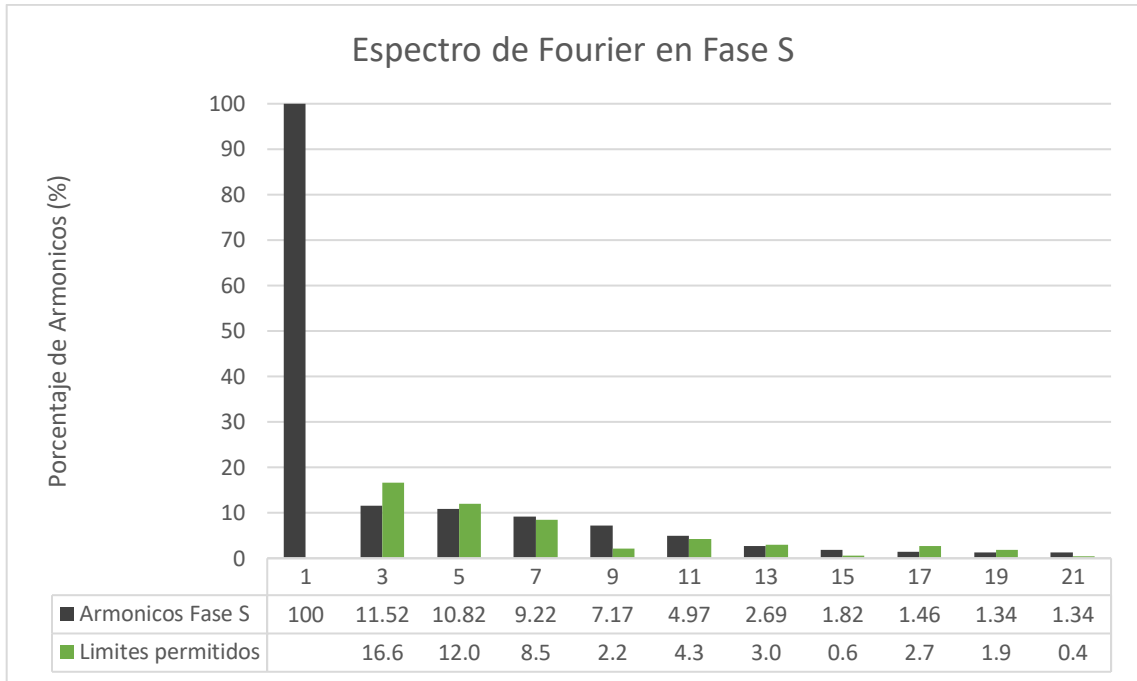
En la tabla N° 4.14, se observa que, al igual que en la fase R, ninguna de las armónicas impares, incluido el THD_I, cumple con la normativa. Esta normativa estipula que los registros deben mantenerse en un 95% del tiempo, lo que implica que no deben caer por debajo de 957 registros para estar dentro de los límites establecidos para cada armónica individual.

4.7.1. Análisis de espectro de Fourier en fase S

En este análisis, nos centraremos en la fase S del sistema trifásico En la figura N°4.10, se presentarán los resultados de este análisis graficando a través del espectro de Fourier,

facilitando la identificación de frecuencias dominantes y las desviaciones de los estándares establecidos por la normativa técnica.

Figura N° 4.10 Espectro de Fourier en fase S de corriente armónica individual.

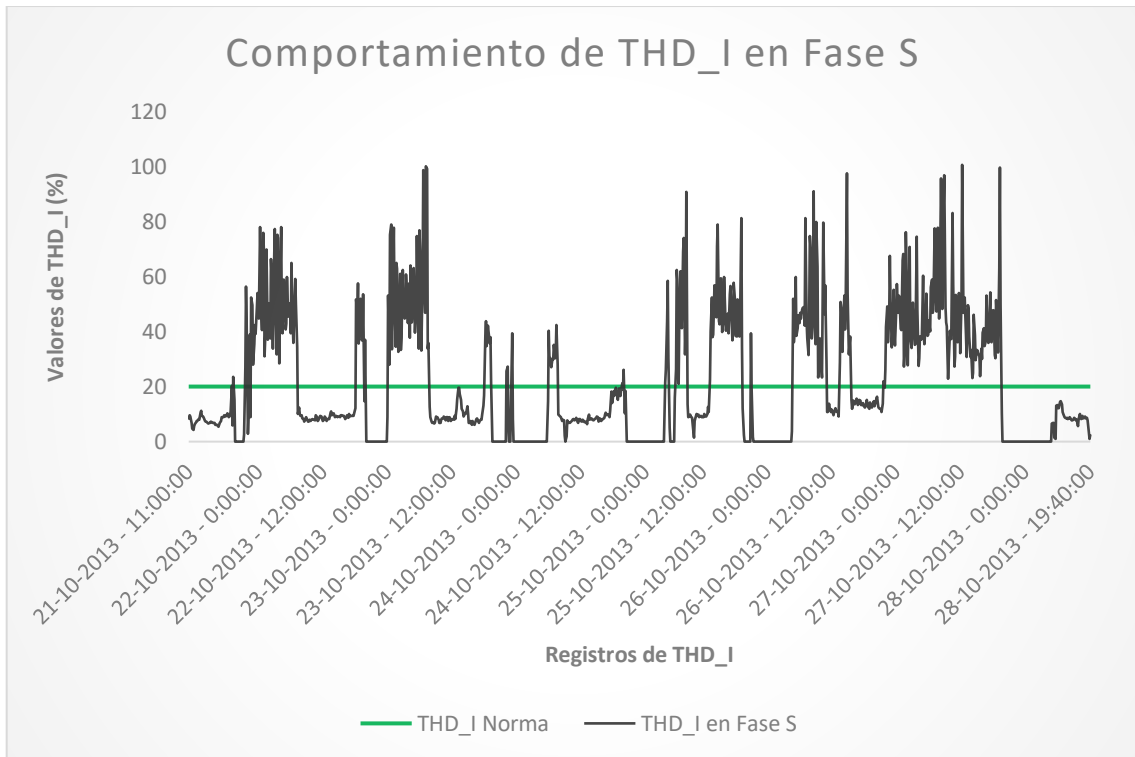


En la figura N° 4.10, se puede apreciar el análisis de las distorsiones armónicas de la fase S, destacando tanto los límites cumplidos como los no cumplidos según la normativa técnica. Se observa que la distorsión armónica individual presenta los tres tipos de secuencia, positiva, negativa y cero.

Dentro de la secuencia positiva, se identifican una armónica que no cumplen con los límites establecidos, la armónica de séptimo orden que presenta un valor del 9,22% superando su límite de 8,5%. En la secuencia negativa, también hay incumplimientos normativos, destacándose la armónica de undécimo orden con un 5,83% superando el límite de 4,3%. Finalmente, en la secuencia cero se registran varias armónicas que exceden los límites permitidos, la armónica de noveno orden con un valor 7,17% frente a su límite de 2,2%, la armónica de décimo quinto orden con un 1,82% superando el límite de 0,6% y la armónica de vigésimo primer orden con un 1,34% superando el límite de 0,4%.

La figura N°4.11, grafica los registros de las mediciones de la distorsión total armónica de corriente de la fase S. Esta figura permitirá observar la permanencia de los niveles de distorsión a lo largo del tiempo, en relación con los límites establecidos por la normativa.

Figura N° 4.11 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase S.



En la figura N° 4.11, Al igual que en la fase R se observa un aumento del THD_I en el total de los registros en comparación con el THD_I que establece la norma técnica de 20%. Gran cantidad de registros sobrepasan el límite. Para evaluar si la fase S cumple con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite. Si menos del 95% de los registros están dentro de los límites establecidos, se determinará que no cumple con la norma.

- Se han identificado 376 registros que exceden el límite. De un total de 1008 registros, 632 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase S tiene una permanencia del 62,70%. Por lo tanto, se concluye que la fase S no cumple con el THD_I que propone la norma técnica.

4.8. Distorsión total armónica de corriente de la fase T

Los registros de las mediciones estudiadas se realizaron en un PCC de baja tensión, por lo que se hará uso de la tabla N°11 del artículo 3-8 Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios en Baja Tensión, de la norma NTCSD.

Los resultados de los límites de distorsión total armónica de corriente en la fase T se presentan en la tabla N°4.15. Se muestran los registros de las mediciones de las armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden. Estas se han clasificado en dos categorías, aquellas que son múltiplos de 3 y aquellas que no lo son. Se han excluido las armónicas pares, ya que su efecto tiende a cancelarse entre sí y no tienen una influencia relevante en el análisis.

Tabla N° 4.15 Límites de distorsión armónica de corriente en fase T.

Fase T			
Armónicos de orden impar (H)	Límites permitidos (%)	Promedios (%)	Limites cumplidos
3	16,6	6,77	SI
5	12,0	2,19	SI
7	8,5	2,84	SI
9	2,2	2,70	NO
11	4,3	2,16	SI
13	3,0	1,53	SI
15	0,6	1,53	NO
17	2,7	2,04	SI
19	1,9	1,10	SI
21	0,4	0,94	NO
THD_I	20	9,13	SI

En la tabla N° 4.15, se evidencia que las armónicas de séptimo, décimo quinto y vigésimo primer orden superan los límites establecidos por la norma técnica, lo que indica un incumplimiento en la distorsión armónica individual de corriente. Sin embargo, el THD_I de la fase T se sitúa en un 9,13%, lo que está por debajo del límite máximo permitido del 20%, cumpliendo así con la normativa vigente.

La tabla N°4.16, muestra los registros de la permanencia en el tiempo que tienen las diferentes armónicas impares desde el tercer hasta el vigésimo primer orden.

Tabla N° 4.16 Permanencia en el tiempo en fase T.

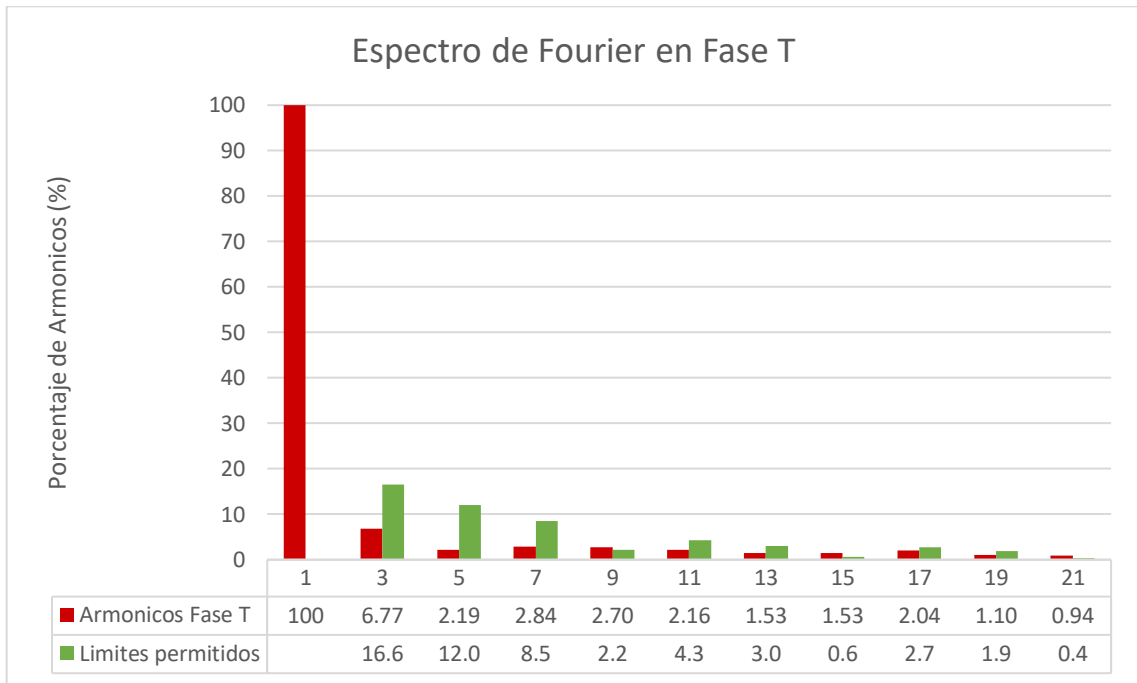
Fase T				
Armónicos de orden impar (H)	Datos dentro de rango	Datos fuera de rango	Permanencia (%)	Cumplimiento de norma
3	992	16	98,41	SI
5	999	9	99,11	SI
7	998	10	99,01	SI
9	434	574	43,06	NO
11	991	17	98,31	SI
13	809	199	80,26	NO
15	434	574	43,06	NO
17	617	391	61,21	NO
19	737	271	73,12	NO
21	474	534	47,02	NO
THD_I	990	18	98,21	SI

En la tabla N° 4.16, se observa que, en la fase T es la que más armónicas están dentro del rango aceptable en comparación a las fases R y S. Las armónicas desde el tercer hasta el séptimo orden, así como la del undécimo orden, cumplen con el límite de permanencia establecido del 95% del tiempo, lo que implica que superan los 957 registros mínimos aceptados. Además, el THD_I también se ajusta a estos estándares normativos.

4.8.1. Análisis de espectro de Fourier en fase T

En este análisis, nos centraremos en la fase T del sistema trifásico. En la figura N°4.12, se presentarán los resultados de este análisis graficando a través del espectro de Fourier, facilitando la identificación de frecuencias dominantes y las desviaciones de los estándares establecidos por la normativa técnica.

Figura N° 4.12 Espectro de Fourier en fase T de corriente armónica individual.

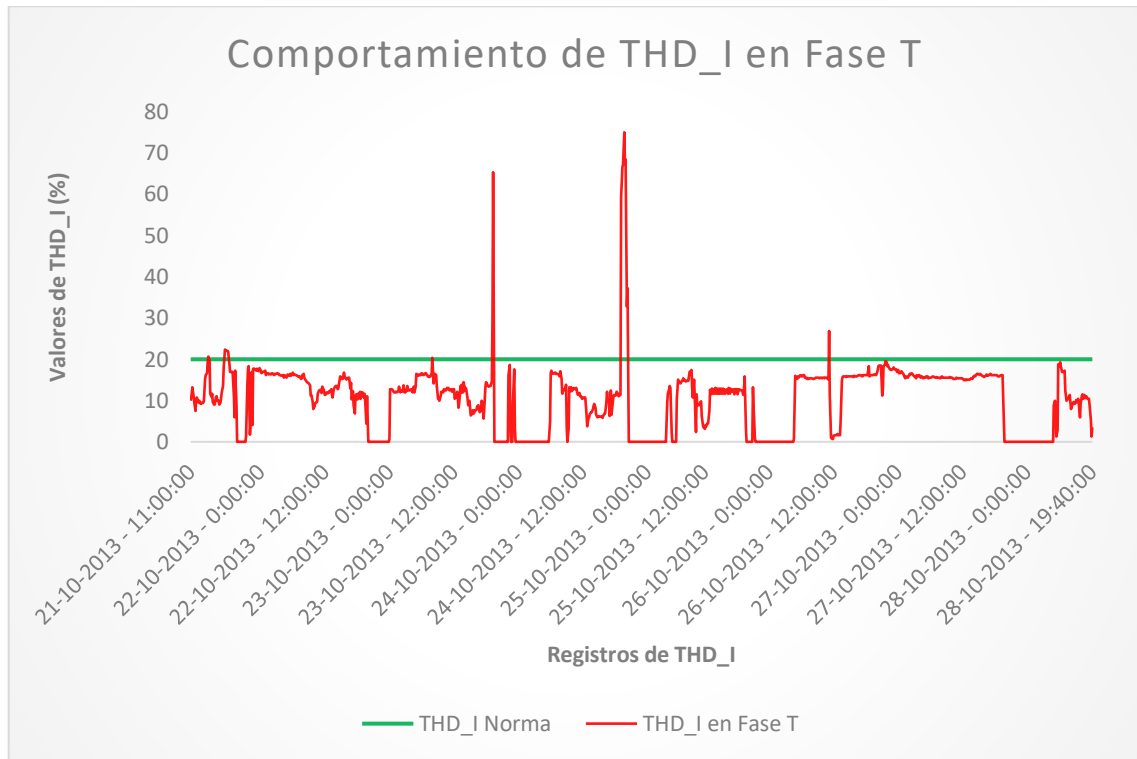


En la figura N° 4.12, se puede apreciar el análisis de las distorsiones armónicas de la fase T, destacando tanto los límites cumplidos como los no cumplidos según la normativa técnica. Se observa que la distorsión armónica individual presenta solo la secuencia cero.

Dentro de la secuencia cero, se registran varias armónicas que exceden los límites permitidos, la armónica de noveno orden con un valor 2,7% frente a su límite de 2,2%, la armónica de décimo quinto orden con un 1,53% superando el límite de 0,6% y la armónica de vigésimo primer orden con un 0,94% superando el límite de 0,4%.

La figura N° 4.13, grafica los registros de las mediciones de la distorsión total armónica de corriente de la fase T. Esta figura permitirá observar la permanencia de los niveles de distorsión a lo largo del tiempo, en relación con los límites establecidos por la normativa.

Figura N° 4.13 Gráfico de distorsión total armónica de corriente en fase T.



En la figura N° 4.13, se observa que, a diferencia de las otras fases, la fase T presenta un THD_I donde la mayoría de los registros se encuentran dentro del límite permitido, de acuerdo con la norma técnica que establece un umbral del 20%. Solo una mínima cantidad de registros supera este límite. Para evaluar si la fase T cumple con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite. Si menos del 95% de los registros están dentro de los límites establecidos, se determinará que no cumple con la norma.

- Se han identificado 18 registros que exceden el límite. De un total de 1008 registros, 990 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase T tiene una permanencia del 98,21%. Por lo tanto, se concluye que la fase T si cumple con el THD_I que propone la norma técnica.

4.9. Resultados generales de la distorsión total armónica de corriente

Los resultados generales de la distorsión total armónica de corriente (THD_I) y los armónicos individuales de corriente (D_{ij}), del sistema eléctrico estudiado se presentarán en las siguientes tablas, mostrando los límites y sus cumplimientos en base al artículo 3-8 Distorsión Armónica de Corriente para Usuario en Baja Tensión.

4.9.1. Resultados de distorsión total armónica de corriente

La tabla N° 4.17, detalla los resultados obtenidos para el THD_I en las fases R, S y T, así como el promedio del sistema eléctrico. En esta tabla, se podrá observar tanto el cumplimiento como el incumplimiento de las normativas establecidas, analizando los valores en relación con los límites fijados y su permanencia a lo largo del tiempo.

Tabla N° 4.17 Resultado de la distorsión total armónica de corriente.

Distorsión total armónica de corriente						
Fases	THD_I Límite (%)	THD_I promedio (%)	Cumple con la norma	Mínimo de permanencia (%)	Permanencia (%)	Cumple con la norma
R	20	26,11	NO	95	50,6	NO
S		20,72	NO		62,7	NO
T		9,13	SI		98,21	SI
Sistema		19,45	SI		52,38	NO

En la tabla N° 4.17, se presenta un resumen de los resultados sobre el cumplimiento del THD_I para las tres fases y del sistema promedio general. En primer lugar, es necesario verificar que las fases R, S y T, así como el sistema, cumplan con el límite de THD_I establecido por normativa, que es del 20%. Además, se debe asegurar que estas fases mantengan una permanencia en el tiempo no inferior al 95% de los registros medidos.

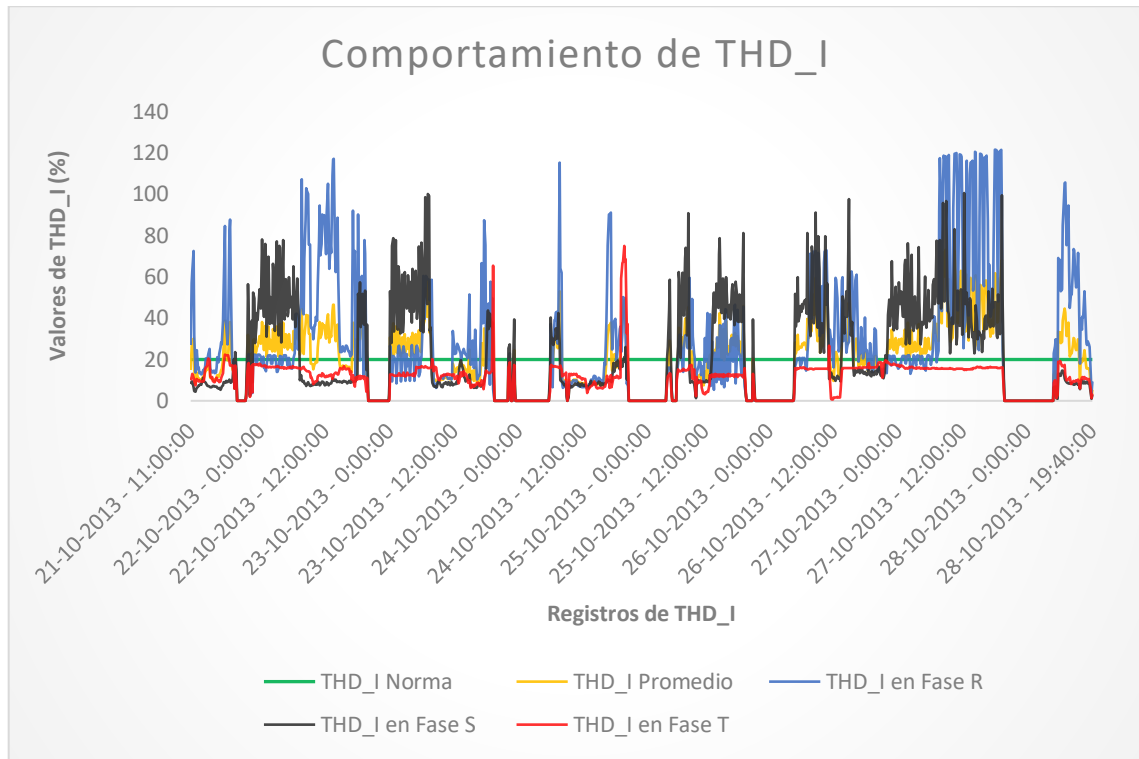
- La fase R presenta un THD_I del 26,11%, lo que supera el límite permitido del 20%. Además, su permanencia en el tiempo es del 50,6%, por debajo del mínimo requerido del 95% de los registros totales. Por lo tanto, se concluye que

la fase R no cumple con los estándares establecidos por la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

- La fase S presenta un THD_I de 20,72% la cual no cumple con el límite del 20%, además tiene un 62,7% de permanencia en el tiempo incumpliendo con el tiempo mínimo del 95% de los registros totales, por ende, se puede decir que la fase S no cumple por ningún motivo con los estándares propuestos por la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.
- La fase T muestra un THD_I del 9,13%, lo que se encuentra por debajo del límite del 20%. Además, su permanencia en el tiempo es del 98,21%, cumpliendo con el mínimo requerido del 95% de los registros totales. Por lo tanto, se puede afirmar que la fase T cumple con los estándares establecidos por la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.
- El sistema presenta un THD_I promedio del 19,45%, lo que se sitúa por debajo del límite permitido del 20%. Sin embargo, su permanencia en el tiempo es del 52,83%, lo que no cumple con el mínimo requerido del 95%. Por lo tanto, se concluye que el sistema no cumple con la normativa vigente.

La figura N° 4.14, grafica los registros generales de las mediciones de la distorsión total armónica de corriente de las fases R, S y T. Esta figura permitirá observar la permanencia de los niveles de distorsión a lo largo del tiempo, en relación con los límites establecidos por la normativa.

Figura N° 4.14 Gráfico de distorsión total armónica de corriente.



En la figura N° 4.14, se pueden observar los diferentes comportamientos de las tres fases y el sistema, evidenciando que las fases R y S presentan una distorsión armónica muy elevada, superando los límites normativos. Por otro lado, la fase T tiene la mayoría de sus registros por debajo del límite, aunque presenta algunas alzas en su THD_I, las cuales no afectan su resultado. Además, el promedio del THD_I de estas tres fases indica que el sistema, en su conjunto, no cumple con los estándares normativos establecidos.

4.9.2. Resultados de armónicos individual de corriente

La tabla N°4.18, detalla los resultados obtenidos para la distorsión armónica individual de corriente en las fases R, S y T, así como el promedio del sistema eléctrico. En esta tabla, se podrá observar tanto el cumplimiento como el incumplimiento de las normativas establecidas, analizando los valores en relación con los límites fijados y su permanencia a lo largo del tiempo.

Tabla N° 4.18 Resultado de la distorsión armónica individual de corriente.

Cumplimiento de distorsión armónica individual de corriente											
Orden de armónicos (H)	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	
Límite permitido (%)	16,6	12,0	8,5	2,2	4,3	3,0	0,6	2,7	1,9	0,4	
Fase R	Nivel armónico	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO
	Permanencia > 95%	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Fase S	Nivel armónico	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO
	Permanencia > 95%	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Fase T	Nivel armónico	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO
	Permanencia > 95%	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO
Sistema	Nivel armónico	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	SI	NO
	Permanencia > 95%	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

En la tabla N° 4.18, se muestran los cumplimientos e incumplimientos normativos, organizados por fase y sistema. Para que se considere que se cumple con la normativa, es necesario que se cumplan ambas condiciones: el nivel armónico individual debe estar por debajo de los límites permitidos y los registros deben mantenerse dentro de dicho límite al menos el 95% del tiempo.

- La fase R cumple con la normativa en los niveles armónicos de tercer, décimo séptimo y décimo noveno orden. Sin embargo, no se alcanza el requisito de permanencia del 95% del tiempo, lo que significa que ninguna de las distorsiones armónicas individuales de la fase R cumple con la norma técnica.
- La fase S cumple con la normativa en los niveles armónicos de tercer, quinto, décimo tercer, décimo séptimo y décimo noveno orden. Sin embargo, no se alcanza el requisito de permanencia del 95% del tiempo, lo que significa que ninguna de las distorsiones armónicas individuales de la fase S cumple con la norma técnica.
- La fase T cumple con la normativa en los niveles armónicos de tercer, quinto, séptimo, undécimo, décimo tercero, décimo séptimo y décimo noveno orden.

No obstante, solo se logra el requisito de permanencia del 95% del tiempo en las armónicas de tercer, quinto, séptimo y undécimo orden, lo que indica que únicamente estas armónicas de la fase T cumplen con la norma técnica.

- Las armónicas promedias de las fases, conforman al sistema en general y solo cumple con la normativa en los niveles armónicos de tercer, quinto, séptimo, décimo tercero y décimo noveno orden. Sin embargo, no se alcanza el requisito de permanencia del 95% del tiempo, lo que significa que ninguna de las distorsiones armónicas individuales de la fase S cumple con la norma técnica.

4.10. Análisis del factor de potencia

Se recurrirá a la norma técnica NTSyCS para realizar un análisis más detallado, utilizando el artículo 5-18, que establece que los límites para el FP en niveles de tensión inferiores a 30 kV son de $0,96_{CAP} \leq FP \leq 0,93_{IND}$, aplicables durante al menos el 98% del tiempo.

4.10.1. Registros del factor de potencia en el sistema eléctrico

Los resultados de los registros del factor de potencia se presentan en la tabla N°4.19, mostrando los valores registrados de las fases R, S y T, además del factor de potencia promedio del sistema.

Tabla N° 4.19 Registros de Factor de Potencia.

Factores de Potencia				
Ítems	Fase R	Fase S	Fase T	FP Promedio
Máximo	1,00	0,94	0,99	0,91
Promedio	0,80	0,71	0,64	0,71
Mínimo	0,57	0,57	0,37	0,55

Al analizar la tabla N° 4.19, se observa que, en promedio las fases R, S y T no cumplen con el requisito de un factor de potencia (FP) mayor o igual a 0,93 inductivo establecido

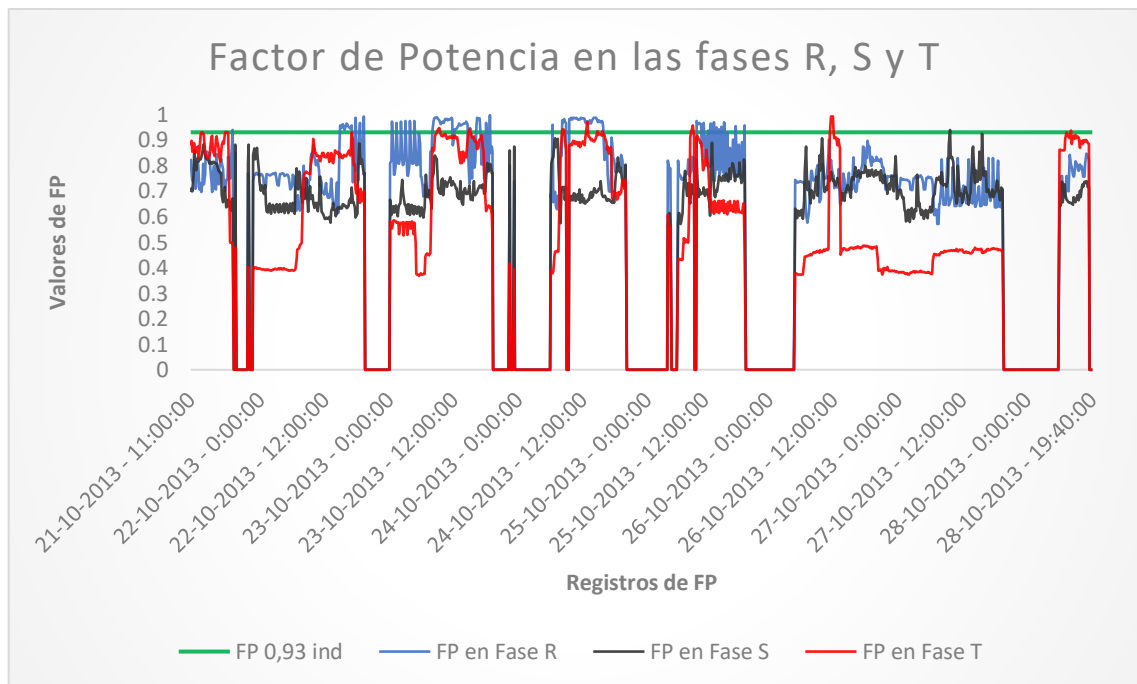
por la norma técnica NTSyCS, lo que también se refleja en el FP promedio. Esto indica un desempeño deficiente en el factor de potencia del sistema eléctrico estudiado.

Para analizar con mayor detalle el comportamiento del factor de potencia del sistema eléctrico estudiado, se llevará a cabo un análisis por fases y el con FP promedio. Además, es fundamental verificar si la permanencia de los registros cumple con el 98% del tiempo requerido.

4.10.2. Análisis en de factor de potencia en las fases y del sistema promedio

La figura N° 4.15, grafica el comportamiento del factor de potencia de la fase R, S y T a lo largo del tiempo, en comparación con el límite normativo. Asimismo, se verificará si los registros se mantienen por encima del 98% del tiempo en el valor límite establecido.

Figura N° 4.15 Gráfico de comportamiento del factor de potencia en las fases.



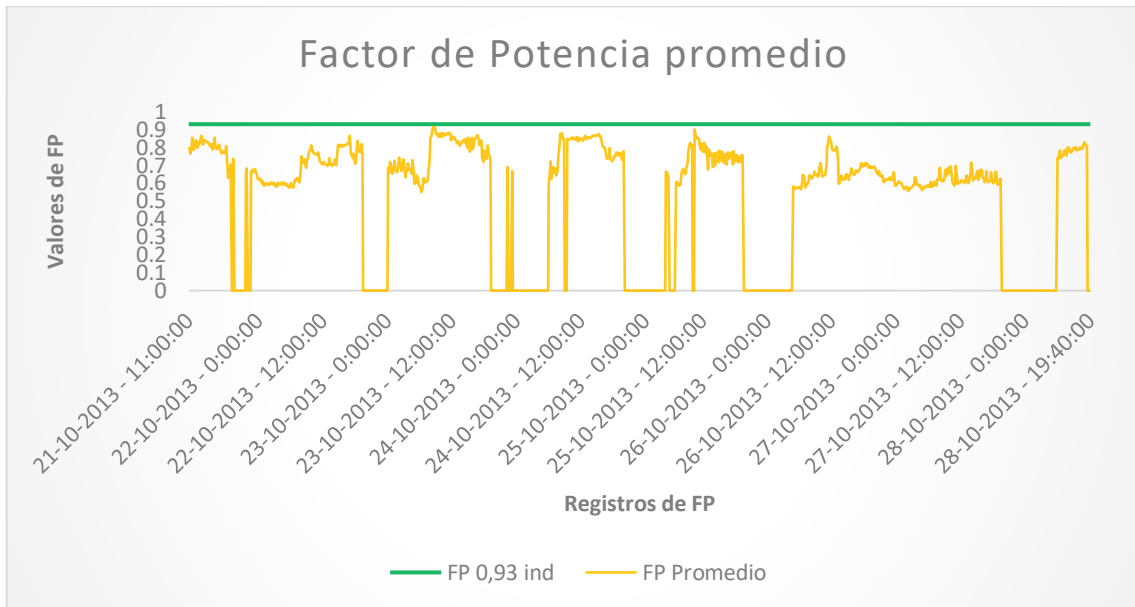
En la figura N° 4.15, se observa que en las tres fases la mayoría de los registros están por debajo en comparación con el factor de potencia que establece la norma técnica de

0,93 inductivo, lo cual es un claro indicativo de que en ninguna fase se está cumpliendo con la norma NTSyCS. Para confirmar si las fases R, S y T cumplen con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite, teniendo que encontrarse dentro del 98% del tiempo.

- Para la fase R se han identificado 877 registros que están debajo del límite. De un total de 1008 registros, 131 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase R tiene una permanencia del 13%. Por lo tanto, se concluye que la fase R no cumple con el factor de potencia que propone la norma técnica.
- Para la fase S se han identificado 1007 registros que están debajo del límite. De un total de 1008 registros, 1 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase S tiene una permanencia del 0,1%. Por lo tanto, se concluye que la fase S no cumple con el factor de potencia que propone la norma técnica.
- Para la fase T se han identificado 989 registros que están debajo del límite. De un total de 1008 registros, 19 se encuentran dentro del rango permitido, lo que significa que la fase T tiene una permanencia del 1,89%. Por lo tanto, se concluye que la fase T no cumple con el factor de potencia que propone la norma técnica.

La figura N° 4.16, ilustra el comportamiento del factor de potencia promedio del sistema a lo largo del tiempo, en comparación con el límite normativo. También se verificará si los registros se mantienen por encima del 98% del tiempo en el valor límite establecido.

Figura N° 4.16 Gráfico de comportamiento del factor de potencia promedio.



En la figura N° 4.16, se observa que al igual que las tres fases, el factor de potencia promedio presenta que la mayoría de los registros están por debajo en comparación con el factor de potencia que establece la norma técnica de 0,93 inductivo. Para confirmar si dicho factor de potencia promedio cumple con la norma, es necesario analizar cuántos registros se sitúan por encima del límite, teniendo que encontrarse dentro del 98% del tiempo.

- Se han identificado 1008 registros que se encuentran por debajo del límite, de un total de 1008 registros. Esto indica que el factor de potencia promedio tiene una permanencia del 0% del tiempo. Por lo tanto, se concluye que no cumple con el requerimiento establecido por la norma técnica.

Viendo que el sistema eléctrico estudiado presenta un sistema deficiente en cuanto al factor de potencia es necesario resaltar que “el cargo por factor de potencia medio mensual, cuyo factor de potencia medio mensual sea inferior a 0,93, se cargara 1% por cada 0,01 en que dicho factor baje de 0,93”. (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023).

4.11. Análisis de las potencias

El análisis de potencias es fundamental para entender el comportamiento de los sistemas de energía. En este contexto, se diferencian tres tipos de potencia: la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S), que es la combinación vectorial de ambas. En un análisis previo, se determinó que el factor de potencia se situaba por debajo del valor normativo establecido por la NTSyCS, alcanzando un 0,71 en su componente inductivo. Este resultado indica una ineficiencia en el uso de la energía eléctrica, lo que justifica la necesidad de realizar un análisis más exhaustivo de las potencias involucradas.

4.11.1. Análisis de potencia activa

La tabla N° 4.20, presenta un resumen estadístico de los 1008 registros de potencia activa recopilados durante el periodo de estudio. En ella se detallan los valores máximos, mínimos y promedios de la potencia activa.

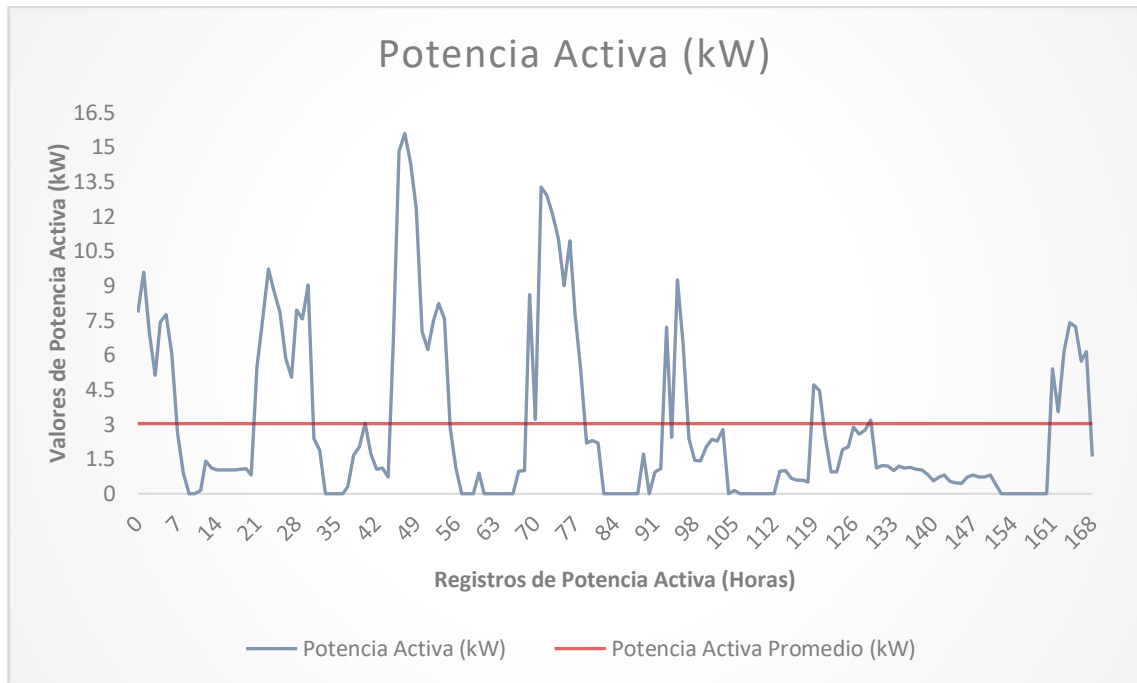
Tabla N° 4.20 Registros de Potencia Activa.

Potencia Activa (kW)				
Ítems	Fase R	Fase S	Fase T	kW Total
Máximo	6,34	6,25	6,92	16,08
Promedio	0,87	1,19	0,98	3,03
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00

Al observar la tabla N° 4.20, se destaca que la fase S presenta el mayor consumo de potencia activa, con un promedio de 1,19 kW. Esto se debe a que el sistema trifásico es desequilibrado por las diferencias de tensión y consumo eléctrico en las fases, pero aun así sigue siendo muy similares a las fases R y T. La suma de las potencias activas de las tres fases alcanza un total de 3,03 kW, esta es la potencia que está siendo utilizada realmente en el sistema eléctrico. Es importante señalar que los valores mínimos registrados fueron impactados por desconexiones temporales en el consumo de corriente, como se detalla anteriormente en la tabla N° 4.7.

Se mostrará el comportamiento de la potencia activa expresada en kilowatts (kW) versus el tiempo, a través de la figura N° 4.17.

Figura N° 4.17 Gráfico de potencia activa VS. tiempo.



En la figura N° 4.17 se puede observar el comportamiento de la potencia activa a lo largo del tiempo, revelando un patrón de consumo diario. Se identifican claramente las horas de mayor demanda, destacándose un pico significativo de consumo de potencia activa que se presenta entre las 45 y 55 horas, alcanzando un máximo de 16 kW. Además, la gráfica permite corroborar el impacto de las desconexiones temporales en el consumo de corriente, evidenciando cómo estas interrupciones afectan los niveles de potencia activa en el sistema.

4.11.2. Análisis de potencia reactiva

La tabla N° 4.21, presenta un resumen estadístico de los 1008 registros de potencia reactiva recopilados durante el periodo de estudio. En ella se detallan los valores máximos, mínimos y promedios de la potencia reactiva.

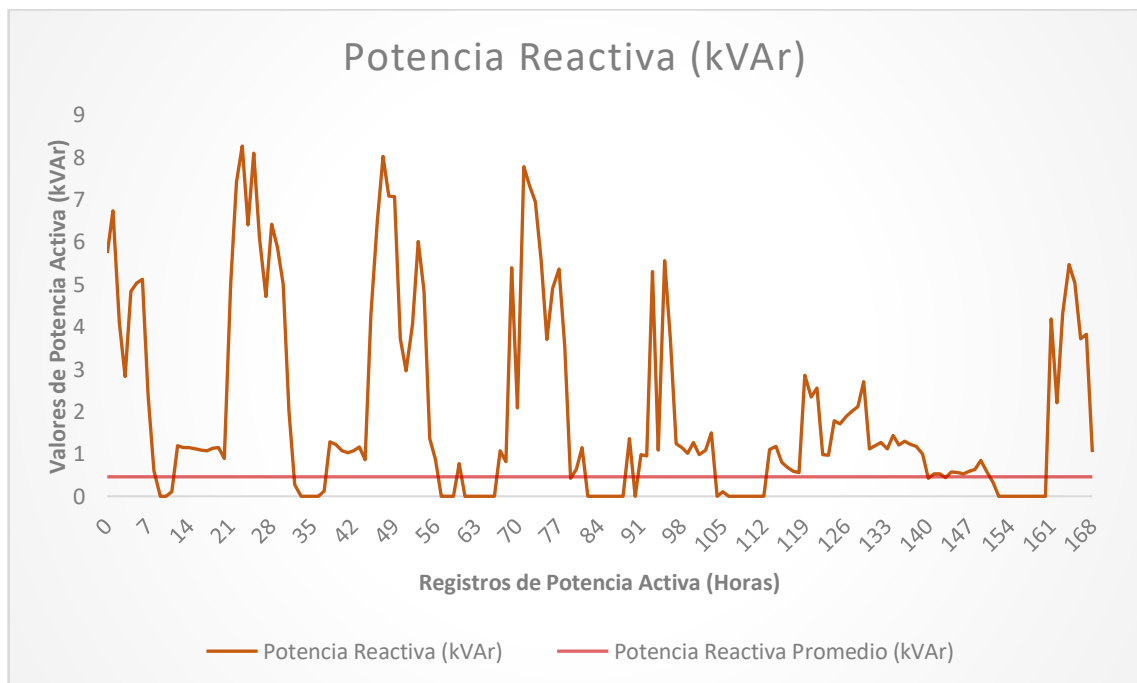
Tabla N° 4.21 Registros de Potencia Reactiva.

Potencia Reactiva (kVAr)				
Ítems	Fase R	Fase S	Fase T	kVAr Total
Máximo	2,16	5,61	3,05	9,29
Promedio	0,38	1,16	0,46	2,00
Mínimo	-0,54	0,00	0,00	0,00

Al observar la tabla N° 4.21, vuelve a destacar la fase S presentando el mayor consumo de potencia reactiva, con un promedio de 1,16 kW. En la fase R el valor mínimo es de -0,54 kVAr, esto es un indicativo de que se está suministrando potencia reactiva al sistema. La suma de las potencias activas de las tres fases alcanza un total de 2 kW, esta es la potencia que no está siendo utilizada en el sistema eléctrico.

Se mostrará el comportamiento de la potencia reactiva expresada en kilovoltios-amperios reactivos (kVAr) versus el tiempo, a través de la figura N° 4.18.

Figura N° 4.18 Gráfico de potencia reactiva VS. tiempo



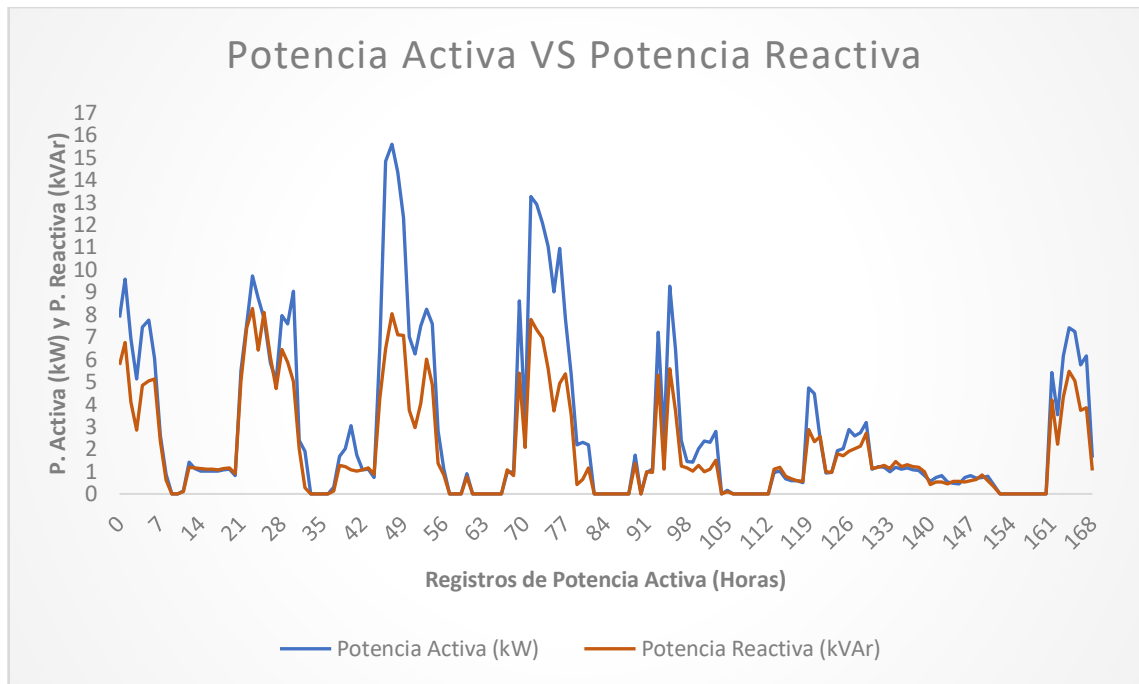
En la figura N° 4.18, se puede observar el comportamiento de la potencia reactiva a lo largo del tiempo, revelando un patrón de consumo diario. Se identifican claramente las

horas de mayor demanda, se destacan tres picos significativos de consumo de potencia reactiva, alcanzando un máximo de 9,3 kVAr.

4.11.3. Potencia activa versus potencia reactiva

En la figura N° 4.19, muestra el comportamiento de la potencia activa expresada en kilowatts (kW) versus la potencia reactiva expresada en kilovoltios-amperios reactivos (kVAr), a través del tiempo.

Figura N° 4.19 Gráfico de potencia activa VS. potencia reactiva.



Como se observa en la figura N° 4.19, se concluye que, la potencia activa es mayor que la reactiva, lo que sugiere un consumo eficiente de energía en términos de trabajo útil. Sin embargo, el factor de potencia promedio es de 0,71 indica que hay un desfase significativo, posiblemente debido a cargas inductivas, lo que sugiere que se podrían tomar medidas para mejorar la eficiencia del sistema, como la instalación de capacitores para corregir el factor de potencia. Esto no solo ayudaría a optimizar el uso de la energía, sino que también podría reducir costos en la factura eléctrica.

4.11.4. Cálculo de factor de potencia

En primer lugar, se debe calcular el factor de potencia instantáneo. En segundo lugar, se debe calcular el FP medio mensual o semanal, a través de las fórmulas del artículo 3-9 de la norma técnica NTCSD, (CNE, 2024a). Los registros de las mediciones se hicieron en intervalos de 10 minutos durante una semana.

A modo de ejemplo, realizaremos el cálculo del FP instantáneo utilizando un solo registro de energía activa y reactiva.

$$FP_{inst} = \cos(\arctg\left(\frac{1189,89(Varh)}{1724,23(Wh)}\right)) = 0,82$$

La tabla N° 4.22, presenta un resumen de los 1008 registros del factor de potencia instantáneo. En ella se detallan los valores máximos, mínimos y promedios.

Tabla N° 4.22 Factor de potencia instantáneo promedio.

FP instantáneo	
Ítems	FP
Máximo	0,851
Promedio	0,829
Mínimo	0,776

A continuación, se calculará el FP medio semanal para este caso, ya que, solo se cuentan con los registros realizados en una semana.

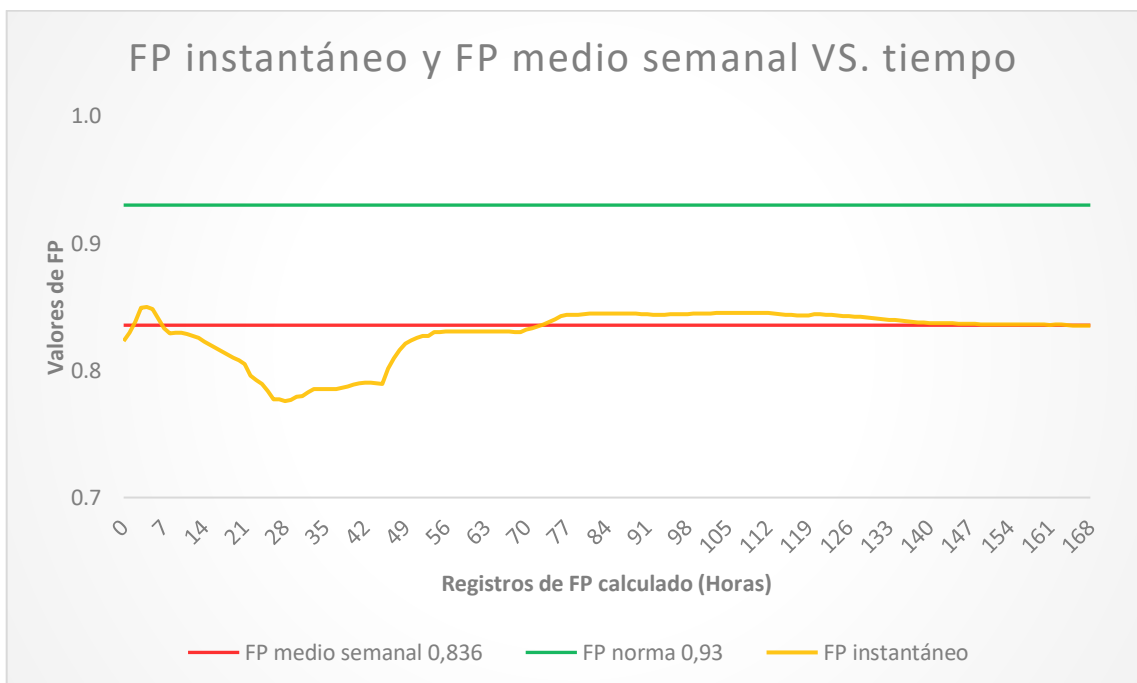
$$FP = \frac{\sum_{k=1}^{1008} ((0,82 * 1724,23(Wh))_1 + (0,827 * 2867,04(Wh))_2 + (...)_1008)}{\sum_{k=1}^{1008} ((1724,23(Wh))_1 + (2867,04(Wh))_2 + (...)_1008)} = 0,836$$

El decreto de precio de nudo vigente nos indica que las empresas distribuidoras podrán imputar un cargo, el cual establece que, “el cargo por factor de potencia medio mensual, cuyo factor de potencia medio mensual sea inferior a 0,93 se cargará 1% por cada 0,01 en

que dicho factor baje de 0,93”. (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023). A través de los resultados obtenidos para el cálculo del factor de potencia medio semanal de 0,84 inductivo, se puede decir que tendrá un 9% de recargo por cada 0,01 centésima de factor de potencia inferior al límite.

La figura N° 4.20, ilustra la evolución del FP instantáneo a lo largo de los 1008 registros, lo que permitirá visualizar el comportamiento general del sistema.

Figura N° 4.20 Gráfico de FP instantáneo y FP medio semanal VS. tiempo.



En la figura N° 4.20, se puede observar que tanto el factor de potencia medio semanal como el factor de potencia instantáneo se encuentran por debajo del rango establecido por el artículo 5-18 de la norma NTSyCS, (CNE, 2024b). Un factor de potencia bajo puede resultar en mayores costos y en problemas de sobrecarga en el sistema, generando pérdidas de potencia debido a la mayor corriente circulante por los cables eléctricos. Se recomienda la instalación de equipos de corrección del factor de potencia, como capacitores, para reducir el desfase, mejorar la eficiencia energética y optimizar el consumo.

CAPÍTULO V

PROPUESTAS DE MEJORA

En los sistemas eléctricos, especialmente en aquellos con equipos electrónicos y cargas no lineales, es común enfrentar problemas de distorsión armónica, como también un bajo factor de potencia y un desbalance de las cargas, que podrían estar afectando la calidad y estabilidad del suministro energético. En los análisis realizados en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama, se hallaron niveles significativos de armónicos de corriente en el transformador de 300 kVA, particularmente en las fases R y S, lo cual impacta negativamente en la calidad de energía del sistema. También se identificó que los factores de potencia de las fases están por debajo de los límites establecidos en la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución o en su forma abreviada (NTCSD). Además, se presenta un desbalance de las cargas de 42,36% el cual es atribuido a las distintas corrientes que circulan por las fases del sistema.

Ante estas problemáticas se genera la necesidad de corregir el factor de potencia a través de un banco de condensadores, realizando una compensación de la energía reactiva. También para un control adecuado de las frecuencias no deseadas, se considera el uso de filtros armónicos para la fase R y S, además, del planteo de una redistribución de las cargas para ayudar a mitigar efectos negativos en la red eléctrica, como la circulación de corriente por el neutro y mejorar la calidad de la energía eléctrica.

5.1. Propuesta de mejora de factor de potencia

El factor de potencia (FP) es un indicador clave en los sistemas eléctricos, ya que refleja la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica. Un factor de potencia bajo no solo significa una mayor cantidad de energía reactiva en el sistema, sino que también puede generar penalizaciones económicas, además de incrementar las pérdidas en el sistema.

En el presente sistema eléctrico trifásico, el factor de potencia promedio instantáneo es de 0,829 lo que indica que una parte significativa de la potencia utilizada en el sistema corresponde a energía reactiva. Además, al analizar las fases individuales, se observa que:

- En la fase R el factor de potencia promedio es de 0,80.
- En la fase S el factor de potencia promedio es de 0,71.
- En la fase T el factor de potencia promedio es de 0,64.

Para cumplir con los requisitos normativos y optimizar el desempeño del sistema eléctrico, es necesario mejorar el factor de potencia de las fases hacia un valor cercano a 0,93 lo que implicará una mayor eficiencia en el uso de la energía, una reducción de las pérdidas y un control adecuado de la potencia reactiva.

5.1.1. Consideraciones para elección del factor de potencia a mejorar

Si se elige el factor de potencia (FP) más bajo de las fases, en este caso el 0,64 de la fase T, se está asegurando que el banco de condensadores compensará adecuadamente la potencia reactiva de la fase más desbalanceada. Esto puede ser una forma de evitar que esta fase quede con un FP insuficiente o muy bajo después de la compensación.

Sin embargo, este enfoque podría resultar en sobrecompensación en las otras fases, especialmente en la fase R con un FP de 0,8 y la fase S con un FP de 0,71. Lo que podría generar un FP superior al 0,93 en esas fases y causar un desbalance entre las fases. Este desbalance puede generar corrientes de circulación innecesarias o incluso daños a los equipos si el sistema no está diseñado para manejar este exceso de potencia reactiva.

Si se elige el FP más alto, en este caso el 0,8 de la fase R, el banco de condensadores no estará sobre compensando las demás fases con un FP más alto. Sin embargo, las otras fases podrían no alcanzar el FP de 0,93 que se desea, ya que las fases con FP más bajo como la S y T podrían necesitar más compensación para alcanzar este valor. Esto también puede causar un desbalance si las otras fases no logran mejorar lo suficiente.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el banco de condensadores será calculado a través del factor de potencia promedio de la fase R para ayudar a compensar de manera que no se sobrecompense el sistema y más acercado al factor de potencia deseado.

5.1.2. Determinar el tamaño de la potencia reactiva a compensar

El cálculo de la cantidad de potencia reactiva que se debe compensar, así como el dimensionamiento adecuado de los bancos de condensadores, es fundamental para alcanzar un factor de potencia de 0,93 sin sobre compensar el sistema.

Datos proporcionados del sistema:

- Potencia activa total (P): 3,0332 [kW].
- Factor de potencia promedio de la fase R (FP actual): 0,8.
- Factor de potencia objetivo (FP objetivo): 0,93.
- Voltaje de línea (V_L): 380 [V].

Se debe calcular la potencia reactiva necesaria para alcanzar el factor de potencia ideal, para ello se usará la siguiente ecuación.

$$Q_{necesario} = P * (\tan(\arccos(FP_{actual})) - \tan(\arccos(FP_{objetivo})))$$

Donde:

- $Q_{necesario}$: Potencia reactiva necesaria para compensar el sistema en [kVAr].
- P: Potencia activa en [kW].
- $\arccos(FP_{actual})$: Angulo del factor de potencia actual.
- $\arccos(FP_{objetivo})$: Angulo del factor de potencia objetivo.

En primer lugar, se deberá calcular los ángulos del factor de potencia actual y del factor de potencia al que se desea llegar. Posteriormente se calculará la tangente del ángulo actual y del ángulo objetivo o deseado. Finalmente se calculará la potencia reactiva efectiva, propuesta en la fórmula anterior en términos de kVAr, que se deberá instalar en sistema eléctrico estudiado.

$$\begin{aligned}\theta_{actual} &= \arccos(0,8) = 36,87^\circ \\ \theta_{objetivo} &= \arccos(0,93) = 21,57^\circ \\ \tan(36,87^\circ) &= 0,750 \\ \tan(21,57^\circ) &= 0,395 \\ Q_{necesario} &= 3,0332kW * (0,750 - 0,395) = 1,076 kVAr\end{aligned}$$

La potencia reactiva necesaria que se deberá instalar en el sistema eléctrico para mejorar el factor de potencia a 0,93 es de 1,076 kVAr. Al ser una potencia reactiva tan pequeña que se necesita compensar, se puede utilizar un de 1 kVAr comercial.

5.1.3. Cálculo de parámetros para el banco de condensadores

Para el ajuste inicial del banco de condensadores se tiene que calcular la reactancia capacitiva efectiva (X_C) a través de la siguiente ecuación.

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_{necesario}}$$

Donde:

- X_C : Reactancia efectiva del banco de condensadores en [Ω].
- V_L : Voltaje de línea del sistema en [V].
- $Q_{necesario}$: Potencia reactiva necesaria para compensar el sistema en [kVAr].

$$X_C = \frac{380V^2}{1,076kVAr * 10^3} \approx 134,2\Omega$$

Para calcular el valor de la capacitancia (C) necesaria para el banco de condensadores y compense la potencia reactiva, utilizamos la siguiente ecuación.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Donde:

- C: Es la capacitancia del condensador en [μF].
- X_C : Es la reactancia capacitiva en [Ω].
- f : Es la frecuencia fundamental del sistema en [Hz].

$$C = \frac{1}{2\pi * 50 * 134,2\Omega} = 23,72 \mu\text{F}$$

Se ha considerado utilizar la conexión delta para el banco de condensadores debido que esta configuración nos permite tener una menor corriente de línea, pudiendo así colocar condensadores de menor capacidad individual, para obtener la misma capacidad total, resultando más económico. También la conexión delta puede ayudar en cierto modo a mejorar el balance del sistema, pero no corregirá completamente el problema del desbalance.

La capacitancia individual del banco de condensadores será un tercio de la capacidad total del condensador previamente calculado y dicha capacidad en conexión delta se calculará con la siguiente ecuación.

$$C = \frac{23,72\mu\text{F}}{3} = 7,907 \mu\text{F}$$

Finalmente tenemos 3 condensadores de 7,907 μF si se conectan en delta se obtendrá la misma compensación reactiva total.

Las protecciones de los bancos de condensadores son esencial para su correcto funcionamiento y para ello se debe tener en consideración las condiciones mínimas de seguridad para su instalación. Dentro de los medios de protección para el banco de condensadores se encuentran las protecciones termomagnéticas, disyuntores, fusibles, contactores y el dimensionamiento de cables.

Se calculará la corriente nominal que circula a través del banco de condensadores y se agregará un factor de seguridad 1,3 a través de la siguiente ecuación.

$$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * V_L} * 1,3$$

Donde:

- I: Es la corriente que circula por el banco de condensadores en [A].
- Q_c : Potencia reactiva de compensación del sistema en [kVAr].
- V_L : Es la tensión de línea en [V].

$$I_{Nominal} = \frac{1,076kVAr * 10^3}{\sqrt{3} * 380V} = 1,63 A$$
$$I_{Protección} = \frac{1,076kVAr * 10^3}{\sqrt{3} * 380V} * 1,3 = 2,45 A$$

A través de esta corriente de protección se pueden buscar los diferentes tipos de protecciones. Al tratarse de una mejora teórica se puede generalizar que todos los componentes estén dimensionados para soportar las exigencias operativas del banco de condensadores con una corriente de 2,45 A. Para el caso de estudio, se sugiere un disyuntor con una capacidad nominal superior a 2,45 A. Para el cableado se deberá tener en cuenta la longitud de la instalación, así como la corriente de protección. Además, se recomienda poner fusibles individuales de 3 o 4 A.

5.2.Propuesta diseño de filtros rechaza banda RLC de segundo orden

Para el diseño de los filtros armónico, se considerará filtrar la armónica predominante, en este caso es la armónica de tercer y quinto orden. Se quiere reducir la distorsión total armónica de corriente de la fase R y S, debido a que estas no cumplen con los límites propuestos en la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución. La fase R presenta un THD_I de 26,11% y la fase S presenta un THD_I de 20,72%.

5.2.1. Cálculo de parámetros para filtrar la tercera armónica

El filtro se debe sintonizar a la frecuencia de la armónica que se desea eliminar, en este caso será de 150 Hz para la tercera armónica, en un sistema de 50 Hz. La frecuencia de resonancia (f_0) del filtro se calcula con la siguiente ecuación. La resistencia a utilizar será de 10 k Ω y un factor de calidad de 10 con fines prácticos

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Donde:

- f_0 : Es la frecuencia de resonancia en [Hz].
- L: Es la inductancia del filtro [mH].
- C: Es la capacitancia del filtro [μ F].

El factor de calidad (Q_f), que en este caso será de valor 10, debido a que este factor hará el filtro sea más selectivo en la frecuencia que se desea eliminar, teniendo una amplitud razonable, no muy estrecha y se realizará través de la siguiente ecuación.

$$Q_f = \frac{f_0}{BW}$$

Donde:

- Q_f : Es el factor de calidad.
- f_0 : Es la frecuencia de resonancia en [Hz].
- BW: Es el ancho de banda del filtro que corresponde al rango de frecuencias alrededor de f_0 , se expresa en [Hz].

Despejando el ancho de banda (BW) de la ecuación anterior, podemos encontrar el rango en el cual el filtro tendrá una atenuación significativa sobre las frecuencias.

$$BW = \frac{150Hz}{10} = 15Hz$$

Esto significa que el filtro rechazará las frecuencias alrededor de 150 Hz en un rango $\pm 7,5Hz$.

Para el cálculo de la inductancia se utilizará el factor de calidad previamente seleccionado de 10 y una resistencia comercial de 1 k Ω . La inductancia puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación que relaciona el factor de calidad (Q_f), la resistencia (R) y la inductancia (L).

$$L = \frac{R}{2\pi f_0 Q_f}$$

Donde:

- L: Es la Inductancia en [mH].
- R: Es la resistencia en [Ω].
- f_0 : Es la frecuencia de resonancia en [Hz].
- Q_f : Es el factor de calidad.

$$L = \frac{1000\Omega}{2\pi * 150\text{Hz} * 10} = 0,106 \text{ H}$$

$$L = 106 \text{ mH}$$

Para encontrar la capacidad del condensador que debemos usar, se debe calcular la capacitancia a través de la siguiente ecuación.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L}$$

Donde:

- C: Es la capacitancia del condensador en [μF].
- f_0 : Es la frecuencia de resonancia en [Hz].
- L: Es la Inductancia en [mH].

$$C = \frac{1}{(2\pi * 150\text{Hz})^2 * 106\text{mH}} = 10,62 \text{ uF}$$

Como resultado para el filtro rechaza banda RLC de segundo orden para la tercera armónica, obtuvimos que la resistencia es de 1 k Ω , el inductor es de 106 mH y el capacitor es de 10,62 μF .

Para comprobar si el filtro rechaza banda RLC de segundo orden está operando a la frecuencia de resonancia correcta, utilizaremos los valores de inductancia y capacitancia del filtro calculado, en la primera ecuación mostrada anteriormente.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(106 * 10^{-3}\text{H}) * (10,62 * 10^{-6}\text{F})}} = 150 \text{ Hz}$$

5.2.2. Cálculo de parámetros para filtrar la quinta armónica

Al tratarse del mismo filtro, pero para otra frecuencia, se utilizarán las mismas ecuaciones propuestas anteriormente para el filtro rechaza banda RLC de segundo orden. El filtro se debe sintonizar a la frecuencia de la armónica que se desea eliminar, en este caso será de 250 Hz para la quinta armónica, en un sistema de 50 Hz.

El ancho de banda se calculará usando el factor de calidad (Q) de valor 10, al igual que para la tercera armónica.

$$BW = \frac{250\text{Hz}}{10} = 25 \text{ Hz}$$

Esto significa que el filtro rechazará las frecuencias alrededor de 250 Hz en un rango $\pm 12,5$ Hz.

Para la inductancia del filtro se usará una resistencia de 1 k Ω y puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación.

$$L = \frac{1000\Omega}{2\pi * 250\text{Hz} * 10} = 0,0636 \text{ H}$$
$$L = 63,6 \text{ mH}$$

Para encontrar la capacidad del condensador que debemos usar, se debe calcular la capacitancia a través de la siguiente ecuación.

$$C = \frac{1}{(2\pi * 250\text{Hz})^2 * 63,6 \text{ mH}} = 6,37 \text{ uF}$$

Como resultado para el filtro rechaza banda RLC de segundo orden para la quinta armónica, obtuvimos que la resistencia es de 1 k Ω , el inductor es de 63,6 mH y el capacitor es de 6,37 μF .

Para comprobar si el filtro rechaza banda RLC de segundo orden está operando a la frecuencia de resonancia correcta, utilizaremos los valores de inductancia y capacitancia del filtro calculado, en la primera ecuación mostrada anteriormente.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(63,6 * 10^{-3}H) * (6,37 * 10^{-6}F)}} = 250 \text{ Hz}$$

5.3. Propuesta de balance de cargas

Se propone una redistribución de cargas para corregir el desbalance identificado en el sistema eléctrico del centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama, el cual presenta un desbalance del 42,36%. La reconfiguración de las cargas es esencial para prevenir el sobrecalentamiento de los conductores de alimentación, minimizar las corrientes en el neutro (que alcanzan hasta 6,38 A en el sistema analizado), y evitar posibles fallas en los interruptores, los cuales podrían dispararse debido a estas condiciones anormales.

Se calculará la corriente promedio entre las fases R , S y T del sistema eléctrico, incluyendo los 1008 registros de cada fase.

$$I_{Promedio} = \frac{(I_{Fase R} + I_{Fase S} + I_{Fase T})}{3}$$

$$I_{Promedio} = \frac{(4,25 + 7,41 + 4,95)}{3} = 5,54 \text{ A}$$

Se calculará el desbalance individual de las fases R , S y T del sistema eléctrico, este desbalance nos permitirá saber que fases están excediendo el límite normado en la IEEE Std 1159 - 2009.

$$Desbalance(\%) = \frac{|I_{Fase} - I_{Promedio}|}{I_{Promedio}} * 100\%$$

$$\text{Desbalance de Fase R} = \frac{|4,25 - 5,54|}{5,54} * 100\% = 23,25\%$$

$$\text{Desbalance de Fase S} = \frac{|7,41 - 5,54|}{5,54} * 100\% = 33,81\%$$

$$\text{Desbalance de Fase T} = \frac{|4,95 - 5,54|}{5,54} * 100\% = 10,55\%$$

Los registros de los desbalances de corriente actuales en las fases R, S y T son mostrados en la tabla N° 5.1.

Tabla N° 5.1 Resumen de desbalances actuales.

Ítems	Corriente promedio (A)	Desbalance Corriente (%)
Fase R	4,25	23,25
Fase S	7,41	33,81
Fase T	4,95	10,55
Promedio	5,54	42,36

En la tabla N° 5.1, se observa que la fase S presenta una corriente mayor en comparación con las fases R y T. Además, se evidencia que su desbalance es del 33,81%, superando el límite máximo establecido por la norma IEEE Std 1159-2009. En contraste, la fase R tiene un desbalance del 23,25%, mientras que la fase T presenta un desbalance del 10,55%.

Dado que la fase S supera el límite de desbalance del 30%, se procederá a redistribuir parte de sus cargas hacia la fase R y T, que son las que presentan la menor corriente de carga, además, la fase T presenta el valor más bajo de THD_I, con un 9,13%. Considerando esto, resulta conveniente redirigir las cargas hacia la fase R y T. Se establecerá un límite teórico de desbalance del 10% para la fase S, de modo que las cargas sobrantes puedan ser distribuidas de manera adecuada hacia la fase R y T.

La carga nueva para la fase S se determinará despejando la corriente de carga incógnita (X), a través del nuevo valor de desbalance de 10%, expresados por la siguiente ecuación.

$$\text{Carga nueva para Fase S} = 10\% = \frac{|X - 5,54|}{5,54} * 100 = 6,094 \text{ A}$$

La carga a distribuir para la fase R y T se determinará restando el valor actual de la fase S menos su nuevo valor de carga, expresados por la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \text{Corriente de carga a distribuir} &= I_{\text{Fase S actual}} - I_{\text{Fase S nueva}} \\ \text{Corriente de carga a distribuir} &= 7,41 - 6,094 = 1,316 \text{ A} \end{aligned}$$

Se propone que, para la nueva carga en la fase R, se redistribuya en promedio 1 A de la corriente total a distribuir, y el resto, es decir, 0,316 A, se asigne a la fase T. Para determinar estas corrientes, se sumará la corriente actual de cada una de las fases con la corriente de carga a distribuir previamente calculada, lo cual se expresará mediante la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} \text{Carga Nueva para Fase R} &= 4,25 + 1 = 5,25 \text{ A} \\ \text{Carga Nueva para Fase T} &= 4,95 + 0,316 = 5,266 \text{ A} \end{aligned}$$

Ahora se procederá a calcular los desbalances de las fases R, S y T con sus nuevas distribuciones de corrientes.

$$\begin{aligned} \text{Desbalance de Fase R} &= \frac{|5,25 - 5,54|}{5,54} * 100 = 5,235\% \\ \text{Desbalance de Fase S} &= \frac{|6,094 - 5,54|}{5,54} * 100 = 10\% \\ \text{Desbalance de Fase T} &= \frac{|5,266 - 5,54|}{5,54} * 100 = 4,945\% \end{aligned}$$

Los resultados de los nuevos desbalances de corriente se mostrarán en la tabla 5.2. Mostrando una comparativa con los desbalances de corriente antes del ajuste de las cargas.

Tabla N° 5.2 Resultado de los desbalances nuevos.

Ítems	Corriente promedio anterior (A)	Desbalance Corriente anterior (%)	Nueva corriente distribuida (A)	Nuevo desbalance de corriente (%)
Fase R	4,25	23,25	5,25	5,235
Fase S	7,41	33,81	6,094	10
Fase T	4,95	10,55	5,266	4,945

En la tabla N° 5.2, se puede observar cómo los desbalances de corriente se redujeron bastante con esta propuesta de redistribución de las cargas. La fase R quedo con un 5,235% de desbalance, la fase S con un 10% y la fase T con un 4,945%, todas estando dentro del límite proporcionado en la norma IEEE Std 1159 - 2009.

A través de esta propuesta se puede redistribuir las cargas de manera eficiente, dando como resultado el balance de las cargas, pudiendo así reducir, las corrientes por el neutro, y mejorar algunos armónicos.

Se tiene que entender que no siempre en el tablero de distribución existe el espacio necesario para realizar estos ajustes de cargas, que los disyuntores termomagnéticos a veces están muy justos en su capacidad nominal como para incorporar nuevas cargas y que incluso dichos ajusten exceden del presupuesto.

5.4. Simulación de las propuestas de mejora

La simulación se realizará con el fin de evaluar el impacto de estas mejoras antes de su implementación práctica, asegurando la optimización de los recursos y el cumplimiento de los estándares normativos. Las propuestas formuladas incluyen la corrección del factor de potencia, la atenuación de armónicos. A continuación, se detallan las soluciones propuestas:

- Banco de condensadores para mejorar el factor de potencia: Se calculó e implementó un banco de condensadores de $7.907 \mu\text{F}$ en conexión delta, con el objetivo de corregir el factor de potencia del sistema. Esto se logra al compensar la reactancia inductiva predominante, reduciendo así las pérdidas de energía y mejorando la eficiencia del sistema eléctrico.
- Filtro rechaza banda RLC de segundo orden: Para mitigar la presencia de la tercera y quinta armónica en las fases R y S. Se diseñó un filtro individual para estas frecuencias. Estos filtros fueron dimensionados específicamente para rechazar la tercera armónica de 150 Hz y la quinta armónica de 250 Hz, disminuyendo la distorsión total armónica y mejorando la calidad de la señal eléctrica y protegiendo los equipos sensibles de los efectos adversos de los armónicos de corriente.

El balance de las cargas no se incorpora a la simulación debido a que, para calcular las impedancias de las cargas necesarias para simular el sistema eléctrico, se requieren datos obtenidos del analizador de redes eléctricas trifásicas PowerPad modelo 8335, tales como la nueva tensión de fase y el nuevo factor de potencia resultantes de dicho balance de cargas. Por lo tanto, no se llevará a cabo la simulación con la propuesta de cargas balanceadas.

5.4.1. Cálculo de la impedancia de las cargas en las fases R, S y T

Para realizar la simulación de estas propuestas, fue fundamental contar con un cálculo estimativo de las impedancias de las cargas en las fases R, S y T. Sin esta información, no habría sido posible modelar adecuadamente el comportamiento del sistema eléctrico. A través de la tabla N° 5.3, se mostrarán los valores promedios de cada fase.

Tabla N° 5.3 Valores para encontrar la impedancia de las fases.

Condiciones del sistema			
Ítems	Fase R	Fase S	Fase T
Voltaje de fase (V)	232,67	227,18	226,28
Corriente de fase (A)	4,25	7,41	4,95
Factor de potencia	0,80	0,71	0,64

La impedancia total de las cargas de un circuito RL es en serie y está dada por la siguiente ecuación.

$$Z = R + jX_L$$

Donde:

- R: Es la parte real de la impedancia, componente resistiva en $[\Omega]$.
- X_L : Es la parte imaginaria de la impedancia, reactancia inductiva en $[\Omega]$.
- j : Es la unidad imaginaria.

Teniendo en cuenta que la impedancia (Z) total de cada fase se puede calcular utilizando la tensión de fase y la corriente de fase, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$Z = \frac{V_{Fase}}{I_{Fase}}$$

Donde:

- Z: Es la impedancia de la fase en $[\Omega]$.
- V: Es la tensión de fase en [V].
- I: Es la corriente de fase en [A].

$$Z_R = \frac{236,67V}{4,25A} = 54,74 \Omega$$

$$Z_S = \frac{227,18V}{7,41A} = 30,66 \Omega$$

$$Z_T = \frac{226,28V}{4,95A} = 45,71 \Omega$$

Usando el factor de potencia (FP), podemos calcular la componente resistiva (R). El factor de potencia está relacionado con la fase del ángulo θ de la impedancia, es decir, el ángulo entre la corriente y la tensión. El factor de potencia es igual al coseno de este ángulo.

$$FP = \frac{R}{|Z|}$$

Despejando la ecuación anterior podemos encontrar la resistencia de la impedancia.

$$R = FP * |Z|$$

Una vez que conocemos la impedancia total Z y la componente resistiva R, podemos calcular la componente reactiva X usando la relación.

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$X = \sqrt{|Z|^2 - R^2}$$

Donde:

- FP: Es el factor de potencia.
- R: Es la resistencia en $[\Omega]$.
- $|Z|$: Es el módulo de la impedancia en $[\Omega]$.
- X: Es la reactancia de la impedancia en $[\Omega]$.

Por lo tanto, ahora podemos calcular la componente resistiva (R) de la impedancia.

$$R = FP * |Z|$$

$$R_R = 0,8 * |54,74\Omega| = 43,53 \Omega$$

$$R_S = 0,71 * |30,66\Omega| = 21,69 \Omega$$

$$R_T = 0,64 * |45,71\Omega| = 29,15 \Omega$$

Ahora podemos hallar la componente reactiva (X) de la impedancia.

$$X = \sqrt{|Z|^2 - R^2}$$

$$X_R = \sqrt{|54,74\Omega|^2 - 43,53^2} = 33,19 \Omega$$

$$X_S = \sqrt{|30,66\Omega|^2 - 21,69^2} = 21,67 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{|45,71\Omega|^2 - 29,15^2} = 35,17 \Omega$$

Para estimar la inductancia de cada fase, se puede utilizar la fórmula de la reactancia inductiva X_L en función de la frecuencia y la inductancia.

$$X_L = 2\pi fL$$

Despejando la ecuación anterior podemos encontrar la inductancia.

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

Donde:

- L: Es la inductancia en [mH].
- X_L : Es la reactancia inductiva en [Ω].
- f : Es la frecuencia fundamental en [Hz].

Por lo tanto, podemos encontrar la inductancia de cada una de las fases.

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

$$L_R = \frac{33,19\Omega}{2\pi * 50} = 105,6 \text{ mH}$$

$$L_S = \frac{21,67\Omega}{2\pi * 50} = 68,9 \text{ mH}$$

$$L_T = \frac{35,17\Omega}{2\pi * 50} = 111,9 \text{ mH}$$

Los resultados de los cálculos obtenidos se mostrarán en la tabla N° 5.4, de los cuales son un estimativo de las impedancias de las cargas en las fases R, S y T para poder simular el sistema eléctrico.

Tabla N° 5.4 Resultados de la impedancia de las fases.

Resultados de la impedancia de las cargas				
Ítems	Impedancia Z (Ω)	Resistencia R (Ω)	Reactancia XL (Ω)	Inductancia L (mH)
Fase R	54,74	43,53	33,19	0,106
Fase S	30,66	21,69	21,67	0,069
Fase T	45,68	29,15	35,17	0,112

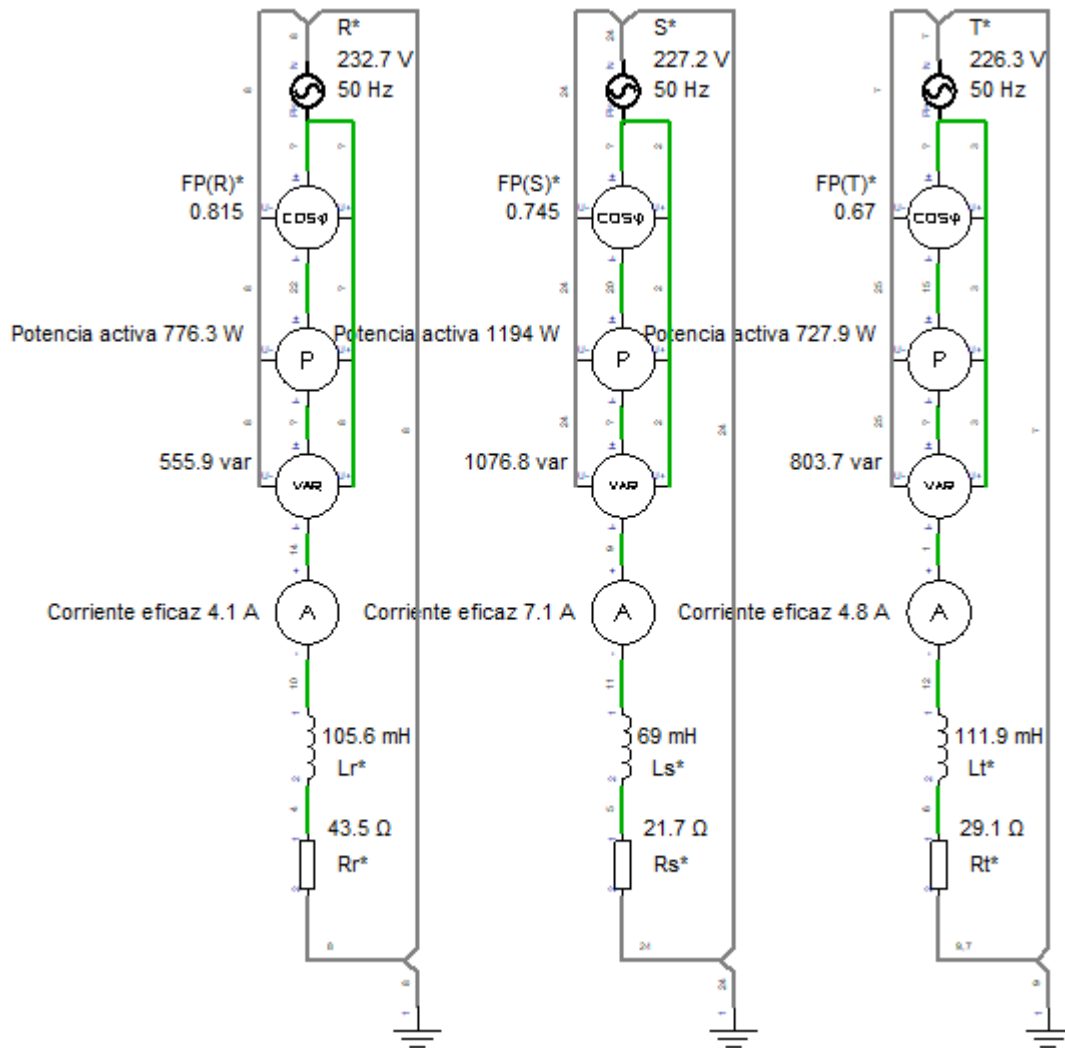
La impedancia de carga calculada para la fase R está formada por una resistencia de 43,53 Ω en serie con una inductancia de 106 mH. En la fase S, la impedancia de carga consiste en una resistencia de 21,69 Ω en serie con una inductancia de 69 mH. Por último, para la fase T, la impedancia de carga se compone de una resistencia de 35,17 Ω en serie con una inductancia de 112 mH.

5.4.2. Simulación de sistema eléctrico estudiado

Se utilizará el programa AutomationStudio para realizar la simulación del sistema eléctrico. También se hará uso del programa Proteus para poder visualizar la respuesta ante el filtro armónico propuesto. La representación de las fases será con alimentación monofásicas debido a que se simulará pensando en los parámetros eléctricos promedios de cada una de las fases, tanto como tensión, corriente, factor de potencia e impedancia.

La figura N° 5.1, muestra la simulación en AutomationStudio del sistema eléctrico en su representación por fase sin ninguna implementación de las propuestas, detallando los parámetros eléctricos simulados, además se incorporaron instrumentos medición, como de factor de potencia, de medición de potencia activa, de potencia reactiva y de corriente eléctrica para poder visualizar los valores de dichas mediciones.

Figura N° 5.1 Circuito eléctrico para la simulación.



En la tabla N° 5.5, se podrá ver la representación de los valores obtenidos a través del analizador de redes eléctricas trifásicas PowerPad modelo 8335 en comparación con los valores calculados teóricamente para realizar la simulación.

Tabla N° 5.5 Comparación de resultados de la simulación.

Ítems	Registros de analizador de energía				Registros de la simulación			
	FP	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Corriente (A)	FP	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Corriente (A)
Fase R	0,80	0,869	0,378	4,25	0,815	0,776	0,555	4,1
Fase S	0,71	1,188	1,160	7,41	0,745	1,194	1,076	7,1
Fase T	0,64	0,977	0,459	4,95	0,67	0,727	0,803	4,8

Como se puede observar en la tabla N° 5.5, los resultados de la simulación en comparación con el analizador de redes eléctricas trifásicas son similares, si bien no idénticos, pero nos sirven para representar el sistema eléctrico estudiado y poder ver el comportamiento de las propuestas de mejora, con fines prácticos.

5.4.3. Simulación con incorporación de propuestas de mejora

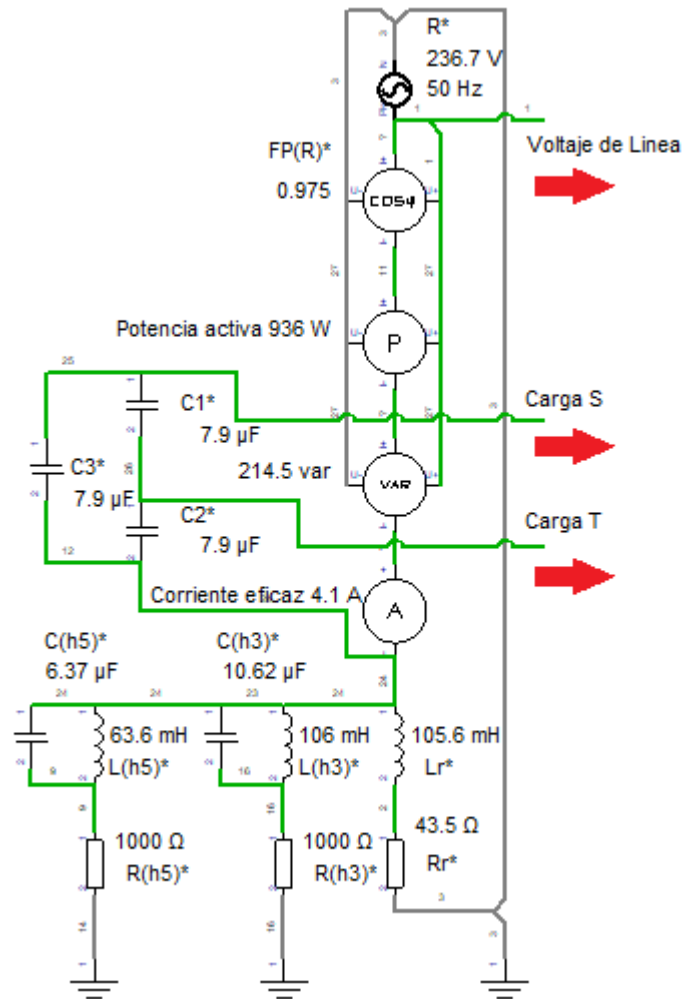
En esta etapa de la simulación, se incorporan dos mejoras clave para optimizar el rendimiento del sistema eléctrico. Las propuestas son el banco de condensadores y el filtro armónico, sin el balance de cargas.

- Banco de Condensadores: Esta propuesta tiene como objetivo principal mejorar el factor de potencia del sistema. El factor de potencia, que inicialmente se encuentra en un valor bajo de 0,8 se incrementará al añadir el banco de condensadores trifásico.
- Filtro Armónico: El filtro armónico propuesto es un filtro rechaza banda RLC de segundo orden que se conectará en paralelo a las fases R y S. Este filtro tiene como propósito de eliminar la tercera y quinta armónica.

La figura N° 5.2, presenta la simulación del sistema eléctrico en la fase R después de la incorporación del banco de condensadores en conexión delta. El principal objetivo de este banco es mejorar el factor de potencia de la fase. Además del filtro rechaza banda

RLC de segundo orden en paralelo a la carga de la fase R. Este filtro está diseñado específicamente para atenuar la tercera y quinta armónica.

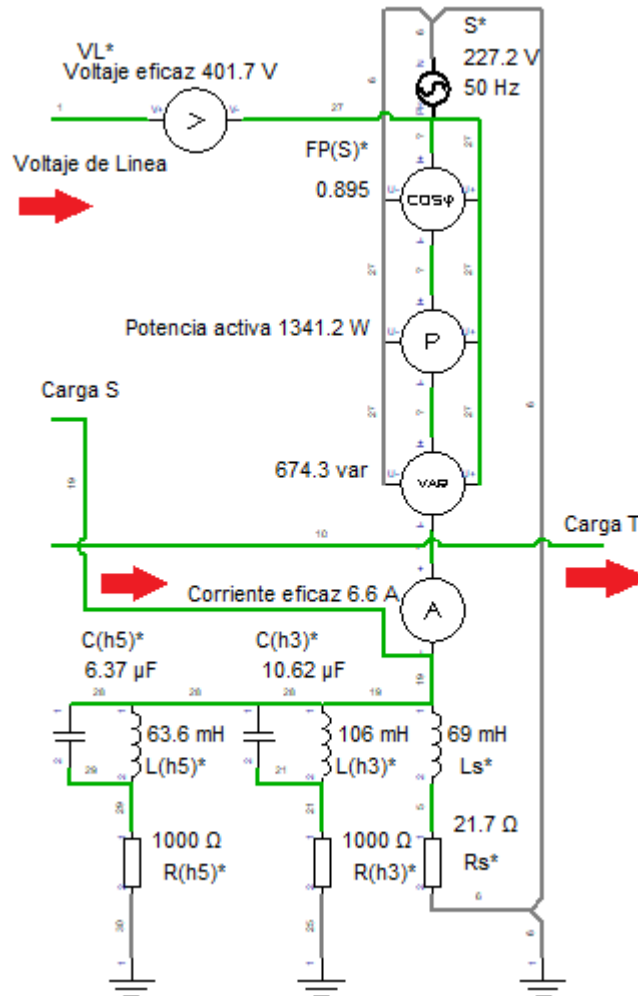
Figura N° 5.2 Simulación de banco de capacitores y filtro armónico en fase R.



Como se puede observar en la figura N° 5.2, al incorporar el banco de condensadores, se aprecia una mejora significativa en el factor de potencia de la fase R, que pasó de un FP promedio de 0,8 a 0,975. La potencia activa, antes de agregar el banco de condensadores, era de 776,3 W y después aumentó a 936 W. Por otro lado, la potencia reactiva antes era de 1194 VAR y después disminuyó a 214,5 VAR. La corriente consumida se mantuvo constante en 4,1 A.

La figura N° 5.3, presenta la simulación del sistema eléctrico en la fase S después de la incorporación del banco de condensadores en conexión delta. Además del filtro rechaza banda RLC de segundo orden en paralelo a la carga de la fase S.

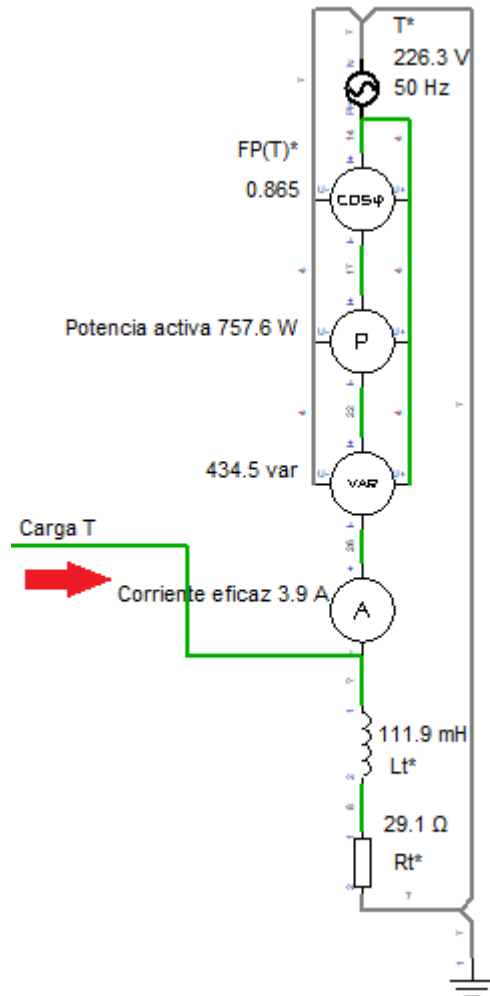
Figura N° 5.3 Simulación de banco de capacitores y filtro armónico en fase S.



Como se puede observar en la figura N° 5.3, al incorporar el banco de condensadores, se aprecia que el factor de potencia de la fase S mejoró, pasando de un FP promedio de 0,71 a 0,895. La potencia activa, antes de agregar el banco de condensadores, era de 1194 W, y después aumentó a 1341,2 W. En cuanto a la potencia reactiva, antes era de 1076,8 VAR y disminuyó a 674,3 VAR. La corriente consumida, antes de instalar el banco de condensadores, era de 7,1 A y finalmente se redujo a 6,6 A.

La figura N° 5.4, presenta la simulación del sistema eléctrico en la fase T después de la incorporación del banco de condensadores en conexión delta. Esta fase no lleva filtro armónico, debido a su cumplimiento normativo.

Figura N° 5.4 Simulación de banco de capacitores en fase T.



Como se puede observar en la figura N° 5.4, al incorporar el banco de condensadores se puede apreciar que el factor de potencia de la fase T paso de tener un FP promedio de 0,64 mejorando a 0,865. La potencia activa antes de agregar banco de condensadores era de 727,9 W y después aumento a 757,6 W, mientras tanto la potencia reactiva antes era de 803,7 VAR y después disminuyo a 434,5 VAR. La corriente consumida, antes de instalar el banco de condensadores, era de 4,8 A y finalmente se redujo a 3,9 A.

5.4.4. Resultados prácticos de las mejoras propuestas

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos tras la implementación de las mejoras propuestas para optimizar la calidad de la energía en el sistema. Se evidenciarán los resultados de la incorporación del banco de condensadores y de los filtros armónicos, los cuales fueron diseñados para mejorar el factor de potencia y reducir las distorsiones armónicas.

Los resultados después de implementar el banco de condensadores se presentan en la tabla N° 5.6, mostrando la comparativa de los resultados obtenidos en la simulación sin las propuestas del banco de condensadores y el filtro armónico con las mejoras implementadas.

Tabla N° 5.6 Resultados después de la simulación.

Fases	Registros de la simulación sin propuestas				Registros de la simulación con propuestas			
	FP	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Corriente (A)	FP	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Corriente (A)
R	0,815	0,776	0,555	4,1	0,975	0,963	0,214	4,1
S	0,745	1,194	1,076	7,1	0,875	1,341	0,674	6,6
T	0,67	0,727	0,803	4,8	0,865	0,757	0,434	3,9

En la tabla N° 5.6, se ve que, tras la incorporación del banco de condensadores el factor de potencia se mejora significativamente. Este aumento en el factor de potencia contribuye a la reducción de las pérdidas de energía, mejora la eficiencia del sistema y reduce la carga en las instalaciones eléctricas.

Como se trabajó en base a parámetros promedios de las fases y el banco de capacitores se presentó como un promedio del sistema se calculará dicho nuevo factor de potencia promedio del sistema eléctrico.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

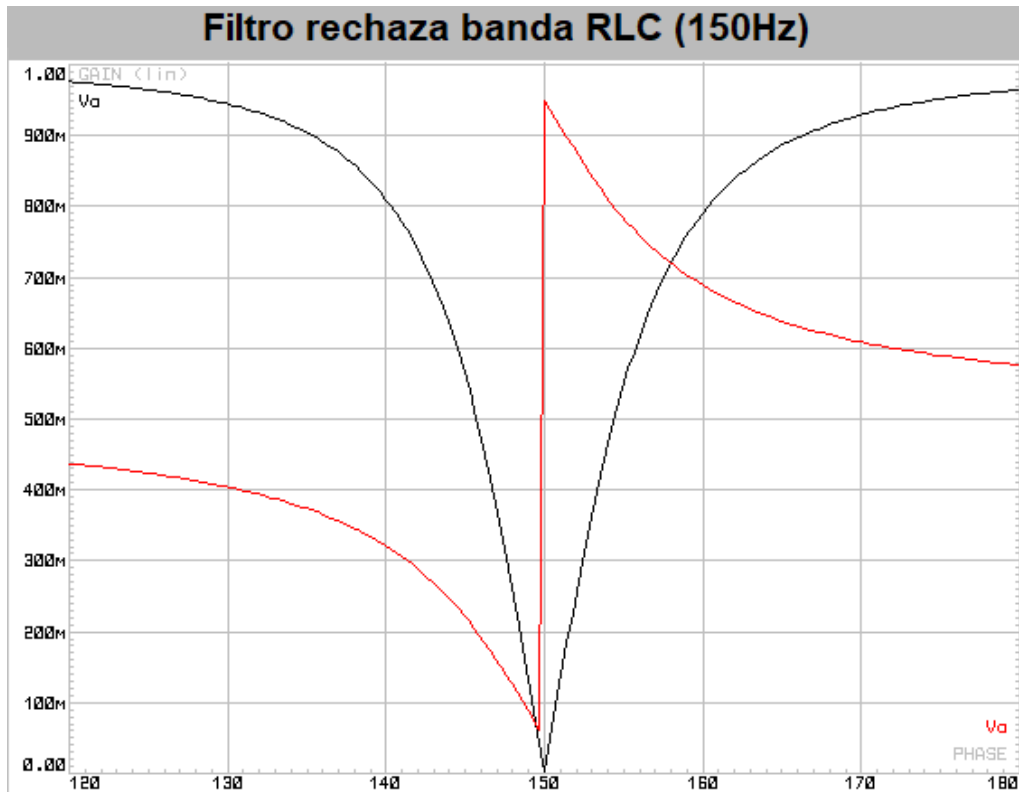
$$FP = \frac{(0,963 + 1,341 + 0,7576)}{\sqrt{(0,963 + 1,3412 + 0,7576)^2 + (0,2145 + 0,6743 + 0,4345)^2}} = 0,916$$

El factor de potencia promedio antes de agregar el banco de condensador era de 0,8 y después de la propuesta aumento a 0,916. Si bien aumento considerablemente, no logro llegar al factor de potencia deseado, estando solo 0,014 por debajo de lo que propone la norma de 0,93 inductivo.

- Factor de potencia: Se observa una mejora en el factor de potencia, como resultado directo de la integración del banco de condensadores. Esta mejora implica un uso más eficiente de la energía eléctrica y una reducción de la potencia reactiva.
- Potencia Activa y Reactiva: La potencia activa promedio se mantiene en 3,03 kW mientras que la potencia reactiva disminuye, lo que indica una reducción en la cantidad de energía no útil que circula por el sistema.
- Corriente del Sistema: La corriente general del sistema también experimenta una reducción gracias a la mejora del factor de potencia, lo que ayuda a disminuir la carga sobre el sistema y la red.

La figura N° 5.7, muestra la respuesta del filtro armónico para la armónica de tercer orden de 150 Hz en el sistema eléctrico.

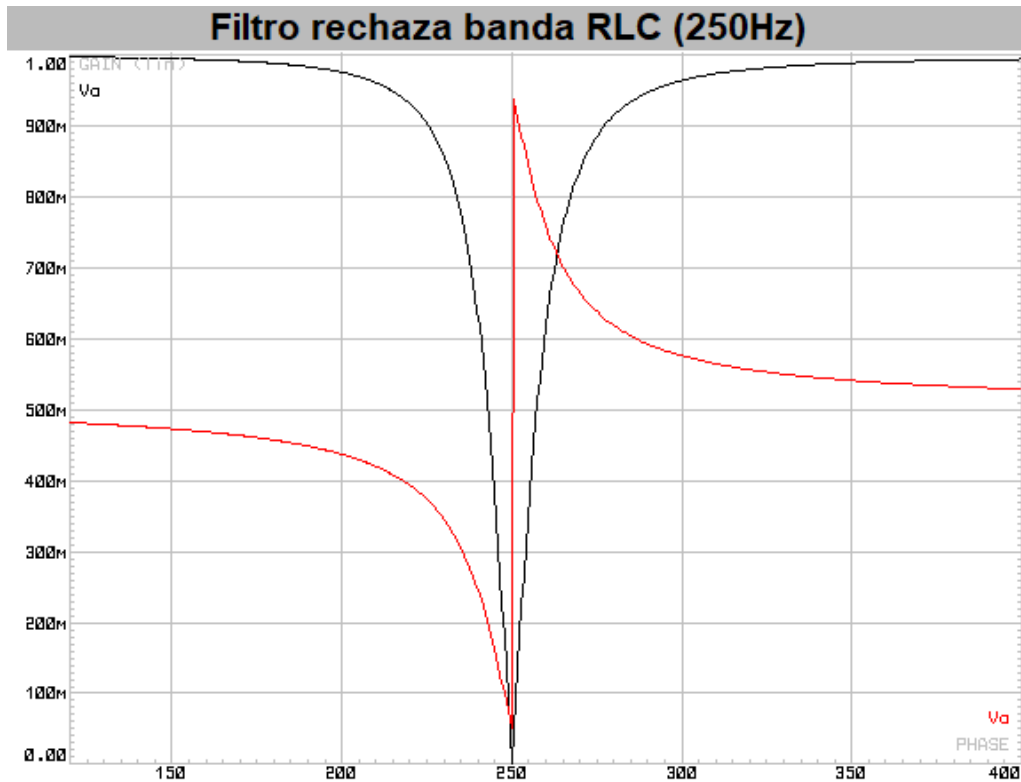
Figura N° 5.7 Gráfico del filtro rechaza banda RLC de la tercera armónica.



Como se observa en la Figura N° 5.7, el filtro diseñado logra atenuar eficazmente la frecuencia de 150 Hz. En la representación gráfica, la magnitud de la señal, mostrada en color negro, evidencia una notable atenuación en el rango de frecuencia deseado. Por otro lado, la fase de la señal, indicada en color rojo, refleja el comportamiento de desplazamiento característico del filtro dentro de este intervalo. Este resultado confirma tanto la correcta sintonización del filtro como su capacidad para mitigar con precisión el punto de corte y eliminar las armónicas no deseadas.

La figura N° 5.8 muestra la respuesta del filtro armónico para la armónica de quinto orden de 250 Hz en el sistema eléctrico.

Figura N° 5.8 Gráfico del filtro rechaza banda RLC de la quinta armónica.



Como se puede apreciar en la figura N° 5.8, el filtro diseñado mitiga la frecuencia de 250 Hz. Este resultado confirma la sintonización del filtro y la precisión con la cual mitiga el punto de corte y su capacidad para eliminar armónicas no deseadas.

Ahora se procederá a calcular la distorsión total armónica de corriente para las fases R y S, debido a la atenuación de la tercera y quinta armónica. A través de la fórmula del THD_I, originalmente se encuentra expresada en términos de corriente, pero se trabajará la distorsión total armónica de corriente en términos de porcentaje.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_1} * 100$$

Se calculará el THD_I de las fases R y S sin contar la tercera y quinta armónica, ya que prácticamente fueron eliminadas por la implementación de los filtros armónicos

propuestos. Debido a que las armónicas desde el vigésimo primer orden en adelante son insignificantes, solo se calculara hasta esa armónica, utilizando los valores del THD_I individual.

$$THD_I = \frac{\sqrt{(h_7)^2 + (h_9)^2 + \dots + (h_{19})^2 + (h_{21})^2}}{100} * 100$$

$$THD_{I_R} = \frac{\sqrt{(10,1)^2 + (8,25)^2 + \dots + (1,301)^2 + (0,961)^2}}{100} * 100 = 15,07\%$$

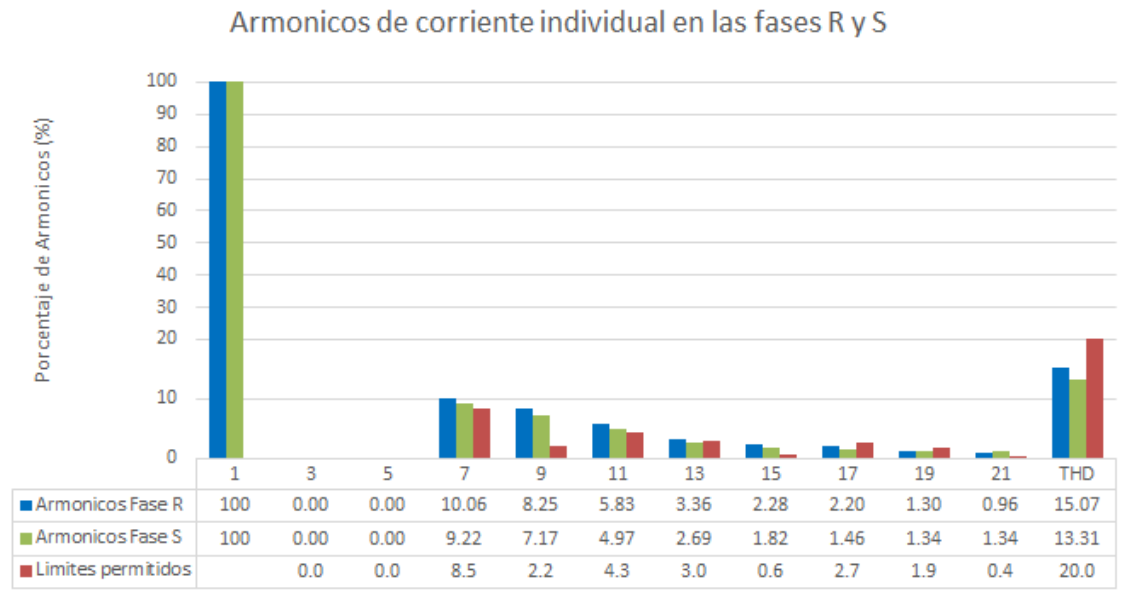
$$THD_{I_S} = \frac{\sqrt{(9,22)^2 + (7,17)^2 + \dots + (1,34)^2 + (1,34)^2}}{100} * 100 = 13,31\%$$

La implementación de los filtros armónicos en las fases R y S mostró una mejora significativa en la reducción de la distorsión armónica. Antes de la instalación de los filtros, la fase R presentaba un THD_I de 26,11% y la fase S un THD_I de 20,72%, ambos valores indicando una presencia considerable de armónicas, especialmente de tercer y quinto orden. Tras la incorporación de los filtros, el THD_I en la fase R disminuyó a 15,07%, mientras que en la fase S el THD_I bajó a 13,31%.

Estos resultados demuestran la eficacia de los filtros armónicos para reducir las componentes armónicas indeseadas, contribuyendo a una mejor calidad de la energía en el sistema. Aunque el THD_I no se redujo a niveles extremadamente bajos, la disminución significativa de la distorsión armónica indica un notable avance en la eficiencia del sistema eléctrico, además se espera que, a través del conjunto de propuestas, se logre disminuir aún más las corrientes armónicas.

La figura N° 5.9, muestra una representación de la eliminación de la tercera y quinta armónica tras la implementación de los filtros armónicos. Se presentan las armónicas desde la tercera hasta la vigésima primera armónica, evidenciando la reducción significativa en la amplitud de las componentes armónicas de tercer y quinto orden en ambas fases.

Figura N° 5.9 Armónicas en fases R y S después de la Filtración.



En la figura N° 5.9, se puede ver la atenuación de las armónicas filtradas, además de la reducción del THD de corriente. Estos resultados demuestran la efectividad de los filtros armónicos diseñados para mitigar la distorsión armónica en el sistema, mejorando así la calidad de la energía y reduciendo los posibles efectos adversos sobre los equipos conectados.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente análisis se determinó que las condiciones de la calidad de energía eléctrica en el centro de investigación IDICTEC de la Universidad de Atacama, son insatisfactorias, debido a los incumplimientos normativos en base a la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución vigente, que propone los estándares y exigencias necesarios para el correcto funcionamiento de la red eléctrica en Chile.

Se detectó que el sistema eléctrico presenta periodos sin consumo eléctrico, especialmente de domingo a viernes, en horarios promedios entre las 19:30 PM y las 04:30 AM. Los trabajadores del centro de investigación IDICTEC no conocen la causa, ya que ocurre fuera del horario laboral y estudiantil. Además, un trabajador del laboratorio químico observó que la fuente UPS de su laboratorio ha dejado de funcionar debido a que se enciende más de lo normal, atribuibles a perturbaciones en la calidad de energía.

Al analizar más detenidamente las corrientes, se observó que el neutro tiene un consumo promedio de 6,38 A, lo que es superior a las corrientes de las fases R de 4,25 A y T de 4,95 A, pero inferior a la fase S con 7,41 A. La figura N° 4.6, mostró que el neutro actúa casi como una fase adicional, lo que genera un desbalance de corriente en el sistema. Aunque la norma técnica chilena no especifica límites para este desbalance, la IEEE Std 1159 - 2009 establece un límite del 30% y en el sistema estudiado se encontró un desbalance del 42,23% en promedio, lo que podría afectar la eficiencia y seguridad del sistema.

Se observó que, en cuanto a la regulación de tensión, la fase R es la única que no cumple con la normativa, ya que los registros de medición no se mantienen dentro del rango permitido de $\pm 7,5\%$ respecto a los 220 V entre fase y neutro. La fase R permaneció dentro de los límites durante un 93,25% del tiempo, cuando la norma establece un 95%. En cuanto a la distorsión armónica de voltaje, tanto individual como total, no se encontraron incumplimientos normativos. Los resultados de la frecuencia presentan una baja

variabilidad y se alinean completamente con la frecuencia nominal establecida de 50 Hz, pudiendo concluir que el estado de la frecuencia es normal, con un intervalo designado de $49,5 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$.

Se determinó que las fases R, con un THD_I de 26,11%, y S, con un THD_I de 20,72%, presentan el mayor incumplimiento normativo en los resultados de distorsión total armónica total de corriente, en comparación con la fase T que alcanzó un THD_I de 9,13%, cumpliendo con la normativa, como se evidencio en la tabla N°4.18. Las armónicas individuales más significativas corresponden desde el tercer hasta el vigésimo primer orden. El incumplimiento se observa tanto en la superación de los límites permitidos por la norma técnica, como en la duración del 95% del tiempo en el que los registros deberían mantenerse dentro de los límites establecidos.

Se encontró en el análisis del factor de potencia que la fase R con un valor de 0,8, en la fase S con un valor de 0,71 y la fase T con un valor de 0,64 lo que también se refleja en el factor de potencia promedio de 0,71. Esto indica un desempeño deficiente en el factor de potencia del sistema eléctrico estudiado. A raíz de estos resultados se consultó a la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución sobre los cálculos del factor de potencia instantáneo y nos dio como promedio un FP de 0,829 estando aún por debajo de la norma.

A causa de los incumplimientos normativos, se realizaron propuestas de mejora para poder solucionar los problemas encontrados en este análisis. Dentro de las propuestas se incorporó la corrección del factor de potencia a través de un banco de condensadores en conexión delta de baja tensión, así poder estar dentro de los estándares normativos, reducir perdidas en el sistema eléctrico y a un bajo costo. También se diseñó un filtro rechaza banda RLC de segundo orden, para la tercera y quinta armónica de las fases R y S, para lograr reducir la distorsión total armónica de corriente y lograr que estén dentro de los límites permitidos. Además, se propuso un balance de las cargas, para poder evitar el desbalance de corriente, redistribuyendo las cargas de manera eficiente, pudiendo así reducir dicho desbalance, evitar las corrientes por el neutro y las sobrecargas.

En cuanto a la simulación, los cálculos teóricos realizados para la compensación de potencia reactiva resultaron acertados, ya que la corrección del factor de potencia fue beneficiosa para las tres fases. A pesar de las diferencias en el factor de potencia individual de cada fase, el sistema en su conjunto logró equilibrarse a un factor de potencia promedio de 0,916. Esto resultó en una reducción de la circulación de corriente y de la potencia reactiva, lo que aporta beneficios tanto técnicos como económicos. Por otro lado, la implementación de cuatro filtros rechaza banda RLC de segundo orden en paralelo a las cargas de las fases R y S. Lograron eliminar las frecuencias de resonancia para las que fueron diseñados, atenuando la tercera y quinta armónica de dichas fases, disminuyendo la distorsión total armónica de corriente de la fase R y S. Antes de la implementación de los filtros en la fase R se tenía un THD_I de 26,11% y en la fase S de 20,72%, luego de la propuesta de incorporar los filtros armónicos, la fase R bajó a un THD_I de 15,07% y en la fase S de 13,31%, así poder mejorar la calidad de la señal eléctrica reduciendo los posibles efectos adversos producidos por los armónicos de corriente.

Se han identificado varias deficiencias importantes que requieren atención urgente para evitar efectos adversos a la infraestructura eléctrica y a los equipos sensibles. Teniendo en cuenta que los resultados corresponden al año 2013 y que, según la información disponible, no se ha realizado ninguna acción para mejorar la situación hasta la actualidad. A continuación, se presentan algunas recomendaciones:

- Realizar un análisis actualizado de la calidad de energía eléctrica: Dado que el estudio se basó en mediciones realizadas en 2013, es fundamental llevar a cabo un nuevo análisis de calidad de energía para evaluar las condiciones actuales del sistema eléctrico. Esto permitirá identificar si los problemas señalados han empeorado con el tiempo debido al aumento de cargas y la falta de mantenimiento.
- Revisión y corrección de las conexiones a tierra: Se sabe de la falta de puestas a tierra adecuadas, lo cual representa un riesgo tanto para la seguridad de las personas como para el buen funcionamiento de los equipos. Se recomienda

revisar todas las conexiones a tierra del sistema y corregir cualquier deficiencia existente, asegurando que se cumpla con los estándares de seguridad.

- Control de las corrientes excesivas por el neutro: El análisis ha revelado que existe una gran cantidad de corriente circulando por el neutro, lo que provoca un desbalance de corriente en el sistema. Es esencial realizar ajustes en la distribución de cargas para evitar el sobrecargado del neutro y asegurar que las fases estén equilibradas.
- Capacitación continua para el personal técnico: Es importante que el personal encargado del mantenimiento y gestión del sistema eléctrico reciba capacitación continua sobre buenas prácticas de mantenimiento y actualizaciones normativas.
- Monitoreo y control: Se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo de la calidad de energía eléctrica. Como la compensación de reactivos mediante un sistema automático.

BIBLIOGRAFÍAS

- AEMC Instruments. (n.d.). *Power analyzer 8335* [Imagen]. Recuperado de <https://www.aemc.com/products/power-analyzers/power-8335>
- Bien, A, & Hanzelka, Z (2004). *Guía de la Calidad de la Energía Eléctrica: Armónicos e Interarmónicos. (2004)*. AGH University of Science and Technology. Recuperado de <https://impic.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/311-armonicos-interarmonicos.pdf>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2023). Decreto 3: Decreto 3T. Fija precios de nudo para suministros de electricidad. Recuperado de <https://bcn.cl/yFxNEB>
- Comisión Nacional de Energía (2024a). Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/NTCSDx2024-1.pdf>
- Comisión Nacional de Energía (2024b). Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/10/NTSyCS-October-24.pdf>
- De La Rosa, F.C. (2006). *Harmonics and Power Systems* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420004519>
- Floyd, T. (2007). *Principios de circuitos eléctricos*. (8° Ed). Pearson Educación.
- IEEE. (2009). Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," in IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995) , vol., no., pp.1-94, 26 June 2009, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>
- IEEE. (2014). Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)* , vol., no., pp.1-29, 11 June 2014, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

- Isaac. (7 de septiembre de 2022). *Corriente Alterna vs Corriente Continua*. Profesional Review. Recuperado de <https://www.profesionalreview.com/2022/09/07/corriente-alterna-vs-corriente-continua/>
- López, E. (2004). *Análisis de armónicos en sistemas de distribución* (Vol. 14). Univ. Nacional de Colombia. Recuperado de https://books.google.com.cu/books?id=O08UfHfOhwwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Martínez, D. (2012). *Estudio de armónicos y propuesta de soluciones en el taller de chapistería de SEAT MARTORELL* [Trabajo de final de grado]. UPC, Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Elèctrica. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099.1/15767>
- Martínez, F. (2001). El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas. *Con-Ciencias*. 5(9), 46-54. Recuperado de <https://geox.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6117/7641>
- Ramírez, E. (2008). *Distorsión armónica*. *Autom. Product. Y Calid. SaCV*, 222, p. 1-31. Recuperado de <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- Román, M. (2006). *Filtros Activos de Potencia para la Compensación Instantánea de Armónicos y Energía Reactiva* [Tesis doctoral]. Universidad de Cataluña. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/93618>
- Vázquez, R. (2003). *Filtrado de Armónicos: ¿Cómo decidir entre la opción de filtro activo, compensador activo o filtro híbrido ?* Recuperado de <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=121#>

ANEXOS

ANEXO A.1. Instituto de investigación de la Universidad de Atacama.

Figura N° A.1. Centro de investigación IDICTEC.



Fuente: Google Maps.

ANEXO A.1. Transformador de distribución trifásico.

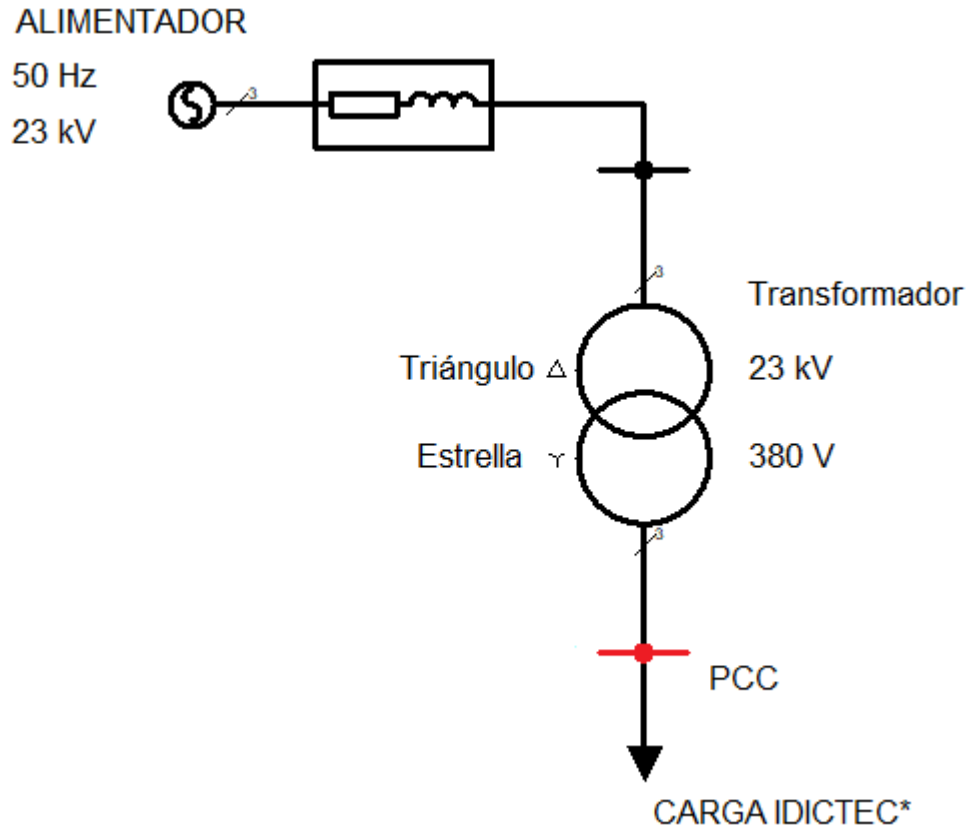
Figura N° A.2. Transformador de distribución trifásico.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO A.3. Punto común de conexión en lugar de medición.

Figura N° A.3. Punto común de conexión.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO A.4. Analizador de redes eléctrica trifásico PowerPad modelo 8335.

Figura N° A.4. PowerPad modelo 8335.



Fuente: AEMC Instruments. (n.d.).