FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL TRANSFORMADOR DE 250 KVA DE LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA

Profesor Guía: Jonathan Ismael Agüero Ferrera

Samuel Iván Roco Alarcón

Juan Carlos Andrés Quintana Quintana

Copiapó, Chile 2025

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL TRANSFORMADOR DE 250 KVA DE LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA

Proyecto de titulación para optar al título de Ingeniería en Ejecución en Electricidad.

Profesor Guía: Jonathan Ismael Agüero Ferrera

Samuel Iván Roco Alarcón

Juan Carlos Andrés Quintana Quintana

Copiapó, Chile 2025

DEDICATORIA

Este proyecto va en dedicatoria para los pilares más importantes mis padres, que me apoyaron a la hora de decidir emprender un nuevo viaje a otra ciudad, mostrándome como las cosas con dedicación y esfuerzo siempre tienen sus frutos, gracias por todo su apoyo y consejos cuando muchas veces no supe que hacer, mis hermanos siendo mi cable a tierra y mi forma de desconectarme muchas veces de los problemas acarreados por la distancia, también dedicado para cada una de las personas que se encontraron presentes en este proceso, familiares y amigos.

Atte.

Samuel Iván Roco Alarcón.

AGRADECIMIENTO

Agradecer primeramente a mi familia, por su apoyo y sacrificio durante todo mi proceso formativo siendo una pieza fundamental para alcanzar mis logros. A mis padres y hermanos, por darme una guía y una visión con valores sobre lo que es correcto y lo que no. Además de agradecer a cada una de las personas que estimo y quiero, las cuales siempre estuvieron para brindarme su apoyo, ánimo y confianza en este proceso. A los profesores que formaron parte de este proceso, su dedicación y admiración por lo que hacen compartir sus conocimientos confiando en que siempre obraremos para hacer el bien, agradecer especialmente a nuestro profesor guía señor Jonathan Ismael Agüero Ferrera, quien nos acompañó a lo largo de este proceso, y siempre nos brindó su ayuda y consejos cuando muchas veces no supimos cómo hacer las cosas.

Para todos, mi más profundo agradecimiento y gracias por formar parte de este proceso el cual ya está casi por culminar.

Atte.

Samuel Iván Roco Alarcón.

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a todas las personas que me motivaron a seguir adelante, mi familia y mis dos amigos de la infancia quienes me enseñaron que con esfuerzo y dedicación podía llegar a cualquier lado que me propusiera y que siempre estarían ahí para mí. El final de mi camino de estudiante en esta carrera, se los dedico a mi familia quienes siempre me apoyaron en todo, me aconsejaron, me vieron cambiar para bien y me guiaron con sus valores y enseñanzas hasta la actualidad, se los dedico a mis dos amigos de la infancia quienes siempre me ayudaban a descansar cada vez que lo necesitaba, quienes siempre me apoyaban para cuando tenía que enfrentar cualquier problema o inseguridad, como también me inspiraban para poder levantarme cada vez que caía frente a algún problema personal y finalmente quiero dedicarle este proyecto a los que estuvieron acompañándome en este proceso, mis compañeros más cercanos de la universidad, mi compañero de proyecto Samuel Iván Roco Alarcón y a mi profesor guía Jonathan Ismael Agüero Ferrera.

Atte.

Juan Carlos Andrés Quintana Quintana.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer principalmente a mi familia, a mi mamá, a mi abuela, a mi tío que es una figura paterna para mí, a mis dos hermanos, a mi hermana y a mi sobrino, quienes de cada uno aprendí valores y enseñanzas que me ayudaron a llegar hasta donde estoy actualmente, agradecer por el apoyo y los sacrificios que hicieron por ayudarme durante todo mi camino en este proceso formativo, convirtiéndose en una parte fundamental para cumplir con este objetivo y transformándose en los pilares de mi vida personal, al igual que mis dos amigos de la infancia, a quienes quiero agradecer por todo el apoyo, la confianza y las energías que me entregaron desde el momento en el que nos conocimos hasta la actualidad. Quiero agradecer a los profesores quienes me enseñaron todos sus conocimientos y experiencias profesionales, además de que me apoyaron durante todo el proceso de formación, agradecer especialmente al profesor guía Jonathan Ismael Agüero Ferrera, quien siempre estuvo presente para nosotros y siempre nos ayudó, apoyó y aconsejó cada vez que lo necesitábamos. Quiero agradecer a mi compañero de proyecto Samuel Iván Roco Alarcón, quien también fue una parte fundamental tanto de este proyecto como de mi vida personal al apoyarme y ayudarme cada vez que no sabía cómo continuar con las cosas.

Para todos, muchas gracias por todo y por ser parte de este proceso de formación, el que está por llegar a su fin.

Atte.

Juan Carlos Andrés Quintana Quintana.

ÍNDICE

RESUMEN xiv

ABSTRACT xv

CAPITULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Objetivo general 1
1.2 Objetivos específicos 1
1.3 Planteamiento del problema 2
1.4 Alcances 2
1.5 Antecedentes 2
1.6 Justificación 3
1.7 Metodología 3
1.8 Resumen de capítulos 4

CAPITULO II 5

MARCO TEÓRICO 5

2.1 Calidad de la Energía 5
2.1.1 Calidad de Servicio 6
2.1.2 Calidad de Producto 6
2.1.3 Calidad Comercial 6
2.2 Normativas 6
2.2.1 Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) 6
2.2.2 Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCSD) 7
2.2.3 Norma IEEE 1159 7
2.2.4 Norma internacional IEC 61000-4-30 7
2.2.5 Norma internacional IEC 61000-3-13 8
2.3 Perturbaciones 8
2.3.1 Armónicos 8
2.3.1.1 Secuencia positiva 9

2.3.1.2 Secuencia negativa 9
2.3.1.3 Secuencia cero 9
2.3.2 Distorsión armónica 9
2.3.2.1 Distorsión armónica individual de tensión y corriente (D_V_j y D_I_j) 10
2.3.2.2 Distorsión armónica total de tensión y corriente (THD_v y THD_i) 10
2.3.2.3 Distorsión de demanda total de corriente (TDD_i) 11
2.3.3 Flicker 11
2.3.4 SAG 12
2.3.5 SWELL 12
2.4 Tipos de cargas 12
2.4.1 Cargas lineales 13
2.4.2 Cargas no lineales 13
2.5 Teorema de Fourier 13
2.6 Filtros armónicos 14
2.6.1 Tipos de filtros 15
2.7 Variables eléctricas 15
2.7.1 Voltaje 16
2.7.1.1 Regulación de Voltaje 16
2.7.1.2 Desequilibrio o desbalance de Tensión 17
2.7.2 Corriente 18
2.7.3 Resistencia 18
2.7.4 Frecuencia 19
2.7.5 Factor de potencia 20
2.7.6 Potencia activa 20
2.7.7 Potencia reactiva 21
2.7.8 Potencia aparente 21
2.7.9 Potencia distorsionante 21

2.7.10 Inductancia 22
2.7.11 Capacitancia 22
CAPITULO III 23
ANÁLISIS DE DATOS 23
3.1 Antecedentes 23
3.2 Análisis de variables eléctricas 25
3.2.1 Tensiones de líneas 25
3.2.2 Corrientes rms de lïnea 28
3.2.3 Frecuencias y Factores de Potencias 31
3.2.4 Potencia activa, reactiva y aparente 34
3.3 Análisis de armónicos de corrientes individuales e impares 36
3.3.1 Tercera armónica de corriente 37
3.3.2 Quinta armónica de corriente 38
3.3.3 Séptima armónica de corriente 39
3.3.4 Novena armónica de corriente 40
3.3.5 Undécima armónica de corriente 41
3.3.6 Decimotercera armónica de corriente 42
3.3.7 Decimoquinta armónica de corriente 43
3.3.8 Decimoséptima armónica de corriente 44
3.3.9 Decimonovena armónica de corriente 45
3.3.10 Vigesimoprimer armónica de corriente 46
3.4 Gráficos de espectro de Fourier 47
CAPÍTULO IV 49
EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA 49
4.1 Evaluación de las tensiones de fases 49
4.1.1 Regulación de tensión de fase R, S y T entre neutro 52
4.2 Análisis de distorsiones armónicas de voltajes y corrientes 54
4.2.1 Distorsión armónica total de voltaje (THD_v) 55

4.2.2 Distorsión armónica individual de voltaje (Dvj) 58
4.2.3 Distorsión armónica total de corriente (THD_i) 59
4.2.4 Distorsión armónica individual de corriente (Dij) 61
4.2.5 Distorsión de demanda total (TDD_i) líneas R, S y T 64
4.3 Análisis del factor de potencia 68
4.4 Análisis de potencias 71
4.4.1 Evaluación de potencia activa 72
4.4.2 Evaluación de potencia reactiva 72
4.4.3 Evaluación de potencia aparente 73
4.5 Análisis de frecuencia 74
CAPÍTULO V 76
PROPUESTA DE MEJORA 76
5.1 Diseño de filtro armónico sintonizado en serie RLC 76
5.1.1 Diseño de filtro para reducir tercer armónico 78
5.2 Resultados del filtro pasivo en el sistema eléctrico 82
5.3 Redistribución de cargas 85
5.4 Filtro armónico en el mercado 89
CAPÍTULO VI 91
CONCLUSIONES 91
BIBLIOGRAFÍA 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Símbolo del Filtro Armónico 14
Figura 2.2 Símbolo de la Resistencia 19
Figura 2.3 Ejemplo de Frecuencia 19
Figura 2.4 Triángulo de las potencias 20
Figura 2.5 Símbolo de la Inductancia 22
Figura 2.6 Símbolo de la Capacitancia 22
Figura 3.1 Tablero de Distribución 23
Figura 3.2 Instrumento de Medición Power Pad III AEMC 24
Figura 3.3 Gráfico de Tensión de la línea R 25
Figura 3.4 Gráfico de Tensión de la línea S 26
Figura 3.5 Gráfico de Tensión de la línea T 26
Figura 3.6 Gráfico de Tensión Promedio 27
Figura 3.7 Gráfico de Tensión RMS entre Neutro 28
Figura 3.8 Gráfico de Corriente RMS de la Línea R 29
Figura 3.9 Gráfico de Corriente RMS de la Línea S 29
Figura 3.10 Gráfico de Corriente RMS de la Línea T 30
Figura 3.11 Gráfico de Corriente RMS Promedio 31
Figura 3.12 Gráfico de la Frecuencia Hz 32
Figura 3.13 Gráfico del Factor de Potencia 33
Figura 3.14 Gráfico de la Potencia Activa 34
Figura 3.15 Gráfico de la Potencia Reactiva 35
Figura 3.16 Gráfico de la Potencia Aparente 36
Figura 3.17 Armónicos de Tercer Orden 37

Figura 3.18 Armónicos de Quinto Orden 38
Figura 3.19 Armónicos de Séptimo Orden 39
Figura 3.20 Armónicos de Noveno Orden 40
Figura 3.21 Armónicos de Undécimo Orden 41
Figura 3.22 Armónicos de Decimotercer Orden 42
Figura 3.23 Armónicos de Decimoquinto Orden 43
Figura 3.24 Armónico de Decimoséptimo Orden 44
Figura 3.25 Armónico de Decimonoveno Orden 45
Figura 3.26 Armónico de Vigesimoprimer Orden 46
Figura 3.27 Gráfico de Espectro Fourier Línea R 47
Figura 3.28 Gráfico de Fourier de corriente Línea S 48
Figura 3.29 Gráfico de Fourier Línea T 48
Figura 4.1 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro R 50
Figura 4.2 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro S 51
Figura 4.3 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro T 51
Figura 4.4 Gráfico de Distorsión Armónica Total de Voltaje 56
Figura 4.5 Promedio de Dvj del Sistema 58
Figura 4.6 Gráfico de Distorsión Armónica Total de Corriente 59
Figura 5.1 Resultados de Armónicas de Corrientes de Línea R con Filtro 82
Figura 5.2 Resultados de Armónicas de Corrientes de Línea S con Filtro 83
Figura 5.3 Filtro Armónico Pasivo Sintonizado en Serie RLC Comercial 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Secuencia de Armónicos en Sistemas Balanceados de Tres Fases 9

Tabla 2.2 Límites para Índices de Severidad del Flicker 12

Tabla 2.3 Límites para Regulación de Tensión 17

Tabla 2.4 Límites para Desequilibrio de Tensión 18

Tabla 4.1 Límites de Tensión de Fase R, S y T entre Neutro 49

Tabla 4.2 Datos Recopilados de la Regulación de Tensión 54

Tabla 4.3 Límites para Índices de Distorsión Armónica Individual de Tensión Fundamental 55

Tabla 4.4 Límites de Distorsión Total de Armónico de Tensión por Fases 57

Tabla 4.5 Resultado de THD de Tensión del Sistema 57

Tabla 4.6 Resultado de Dvj Promedio de Líneas R, S y T 58

Tabla 4.7 Límites de Distorsión Total de Armónico de Corriente por Líneas 60

Tabla 4.8 Resultado de THD de Corriente del Sistema 61

Tabla 4.9 Resultado de Dij de la Línea R 61

Tabla 4.10 Resultado de Dij de la Línea S 62

Tabla 4.11 Resultado de Dij de la Línea T 63

Tabla 4.12 Resultados del TDD_i Línea R 64

Tabla 4.13 Resultados del TDD_i Línea S 65

Tabla 4.14 Resultados del TDD_i Línea T 66

Tabla 4.15 Resultados del TDD_i del Sistema 67

Tabla 4.16 Límites del Factor de Potencia 68

Tabla 4.17 Resultados del Factor de Potencia 70

Tabla 4.18 Límites de la Potencia Activa 72

Tabla 4.19 Límites de la Potencia Reactiva 73

Tabla 4.20 Límites de la Potencia Aparente 74

Tabla 4.21 Límites de la Frecuencia 75

Tabla 4.22 Resultados de la Frecuencia 75

Tabla 5.1 Parámetros del Armónico de Corriente de Tercera Orden 78

Tabla 5.2 Resultados del TDD_i del Sistema con Filtro Armónico 84

Tabla 5.3 Límites de Corrientes de Líneas R, S y T 86

Tabla 5.4 Límites de Desbalances de Corrientes 87

Tabla 5.5 Resultados de los Desbalances de Corrientes 89

RESUMEN

Este estudio analizó la calidad de la energía en la red eléctrica del área centro de la Universidad de Atacama, específicamente en el sector del departamento de Psicología, talleres de electricidad, instrumentación, mecánica y soldadura del departamento de Tecnologías de la Energía. El capítulo 1 presentó la introducción, el objetivo general y los específicos, el planteamiento del problema, alcance, antecedentes, justificación, metodología y un breve resumen de los capítulos posteriores. El capítulo 2 expone los conceptos fundamentales de la calidad de energía eléctrica, las normas nacionales e internacionales, las perturbaciones y sus efectos terminando por definir los parámetros importantes que midió el instrumento Power Pad III AEMC 8336.

El capítulo 3 analizó la medición realizada con el Power Pad III AEMC 8336 en la zona de talleres, mostrando gráficos de límites de las variables eléctricas en las tres fases, terminando con un análisis individual de armónicos de corriente y los gráficos de espectros de Fourier en el que se identifica el armónico de tercer orden como la dominante. El capítulo 4 evaluó la calidad de energía del sistema mediante los cálculos de distorsión armónica total (THD), individual (dj), demandada total (TDD) de voltaje y corriente y la regulación de tensión, en el que fueron comparados con los límites de la NTCSD, mostrando que varios parámetros y armónicos superan los límites establecidos por la normativa.

El capítulo 5 propone mejoras como el diseño de un filtro para mitigar el armónico dominante y una redistribución de cargas entre las fases R y S, esto con el objetivo de equilibrar el sistema, reducir el THD, el TDD y elevar el factor de potencia hasta que cumpla con la NTCSD. El capítulo 6 concluye que sin las propuestas de mejoras, el sistema eléctrico de la zona de talleres incumple con la normativa NTCSD, dejando riesgos de daños en instalaciones conectadas al transformador de 250 kVA.

CALIDAD DE ENERGÍA - DISTORSIÓN ARMÓNICA - PARÁMETROS ELÉCTRICOS - FILTRO ARMÓNICO

ABSTRACT

This study analyzed power quality in the electrical grid of the central area of the University of Atacama, specifically in the area of the Psychology Department and the electrical, instrumentation, mechanical, and welding workshops of the Energy Technologies Department. Chapter 1 presented the introduction, the general and specific objectives, the problem statement, scope, background, justification, methodology, and a brief summary of the subsequent chapters. Chapter 2 explains the fundamental concepts of electrical power quality, national and international standards, disturbances and their effects, concluding with a definition of the important parameters measured by the AEMC 8336 Power Pad III instrument.

Chapter 3 analyzed the measurements taken with the AEMC 8336 Power Pad III in the workshop area, showing graphs of the limits of the electrical variables in the three phases. It concluded with an individual analysis of current harmonics and Fourier spectrum graphs, identifying the third-order harmonic as dominant. Chapter 4 evaluated the power quality of the system by calculating total harmonic distortion (THD), individual harmonic distortion (dj), total demand distortion (TDD) of voltage and current, and voltage regulation. These calculations were compared with the NTCSD limits, revealing that several parameters and harmonics exceeded the limits established by the regulations.

Chapter 5 proposes improvements such as the design of a filter to mitigate the dominant harmonic and a load redistribution between phases R and S, with the aim of balancing the system, reducing THD and TDD, and raising the power factor to comply with NTCSD. Chapter 6 concludes that without the proposed improvements, the electrical system in the workshop area does not comply with NTCSD regulations, leaving installations connected to the 250 kVA transformer at risk of damage.

POWER QUALITY - HARMONIC DISTORTION - ELECTRICAL PARAMETERS - HARMONIC FILTER

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Este estudio se enfocará en examinar la calidad de la energía en la red eléctrica del área centro de la Universidad de Atacama, específicamente en el sector del departamento de Psicología, talleres de electricidad, instrumentación, mecánica y soldadura del departamento de Tecnologías de la Energía. El tener una mala calidad de energía puede ocasionar diferentes problemas en los sistemas eléctricos como el desequilibrio de los sistemas, sobrecalentamiento de equipos y reducción de la vida útil de los motores trifásicos. Se utilizará de las normativas internacionales como guía para proporcionar diferentes mejoras en la calidad de energía, como por ejemplo la instalación de filtros activos regulares para nivelar las cargas, calcular un promedio del consumo de cada fase, o verificar que el neutro no esté bien dimensionado, o que no se encuentre en buen estado y puede ser insuficiente para la carga requerida, esto con el objetivo de mejorar la calidad de energía.

Para realizar un análisis exhaustivo, se utilizará el medidor Power Pad III AEMC, la cual permitirá hacer mediciones precisas en un transformador seleccionado de la Universidad de Atacama, durante 7 días consecutivos en intervalos de 15 minutos, tal como lo establece la normativa eléctrica vigente en Chile.

1.1 Objetivo general

Analizar la calidad de energía en la red eléctrica del Área Central de la Universidad de Atacama.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar normativas y estándares vigentes para el estudio de calidad de energía.
- Medir los parámetros eléctricos en la red eléctrica de la zona centro, área de talleres de la Universidad de Atacama a través del equipo de medición Power Pad III AEMC.

- Evaluar los datos obtenidos con los límites establecidos por los estándares vigentes para la evaluación de la calidad de la energía.
- Proponer medidas para disminuir los efectos negativos de calidad de energía en la red eléctrica de la Universidad de Atacama.

1.3 Planteamiento del problema

El estudio surge debido a la alta demanda de cargas y desequilibrio del sistema en el Área Centro de la Universidad de Atacama, lo que puede ocasionar diversos problemas como sobrecalentamiento de equipos o pérdidas eléctricas en los transformadores. La poca cantidad de análisis sobre temas relacionados a la calidad de energía como los desbalances de tensiones puede ser contraproducente a la hora de estudiar la misma calidad de energía, ya que es igual de importante tenerlo en consideración como los armónicos de corrientes, para mantener un correcto funcionamiento de la red eléctrica del establecimiento, cumplir con las normativas vigentes, optimizar el rendimiento de los equipos y prevenir problemas futuros.

Los datos recopilados serán analizados en relación a los estándares establecidos en la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. (NTSyCS), la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCSD), la Norma IEEE 1159 (Práctica recomendada del IEEE para el monitoreo de la calidad de la energía eléctrica), la norma internacional IEC 61000-4-30 y IEC 61000-3-13, con el objetivo de evaluar la calidad de la energía.

1.4 Alcances

Se realizará el estudio en el tablero general de la zona de talleres de la Universidad de Atacama, además el análisis de las mediciones arrojadas por el Power Pad III AEMC, a lo largo de una semana y las propuestas teóricas de mejoramiento del sistema. No se ejecutará en caso de ser necesario, la instalación de filtros.

1.5 Antecedentes

Este análisis se realizará en base a la falta de estudio de la calidad de energía en el transformador que alimenta el área del Departamento de Psicología, talleres de electricidad, instrumentación, mecánica y soldadura del Departamento de Tecnologías

de la Energía, de la Universidad de Atacama. En este análisis se busca comprender y estudiar el estado en el que se encuentra la calidad de energía eléctrica, debido a que la universidad se compone de variadas cargas, destacando algunas de estas, dispositivos electrónicos, iluminación, dispositivos eléctricos de fuerza, equipos mecánicos, entre otros.

1.6 Justificación

El estudio se debe a la elevada demanda de cargas y al desequilibrio del sistema eléctrico en el área centro de la Universidad de Atacama. Esta situación puede desencadenar diversas complicaciones, como el sobrecalentamiento de equipos o pérdidas significativas en los transformadores.

La escasez de análisis en relación con la calidad de la energía, puede resultar contraproducente al abordar el estudio de la misma. Es crucial considerar estos factores, al igual que los armónicos de corrientes, para asegurar el funcionamiento óptimo de la red eléctrica del establecimiento, cumplir con la normativa vigente, optimizar el rendimiento de los equipos y prevenir futuras incidencias.

1.7 Metodología

Para llevar a cabo un estudio exhaustivo, se hará uso del equipo de medición Power Pad III AEMC en el transformador de 250 kVA, que alimenta el tablero general del área centro. El dispositivo posibilitará la realización de mediciones precisas en el tablero general del área centro de la Universidad de Atacama. Dicha actividad se extenderá durante una semana completa, con registros tomados cada 15 minutos. Después de que el equipo de medición entregue los datos, se dará a inicio al análisis en el que estos valores serán comparados bajo los estándares para verificar si está cumpliendo con la normativa de calidad de energía, después de comparar y evaluar las condiciones en las que se encuentren, se propondrá mejoras al sistema eléctrico, lo que entregaría una mejora en la eficiencia eléctrica en el tablero general del área centro de la Universidad de Atacama.

1.8 Resumen de capítulos

En el capítulo 2 se hace una revisión de los conceptos básicos relacionados con la calidad de energía eléctrica, como también los parámetros eléctricos claves que influyen en el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos. Se demuestra la importancia de mantener una buena calidad de energía, abordando temas como la regulación del voltaje y diferentes perturbaciones que pueden alterar la estabilidad del sistema, para finalmente revisar las normativas tanto nacionales como internacionales, que definen los límites permitidos de las mediciones. Después en el capítulo 3 se demuestra los antecedentes de la medición de la calidad de energía como las funciones que se utilizaron del equipo de Power Pad III AEMC, los parámetros que se usaron y el lugar en el que se dejó instalado el equipo de medición. Se hace un análisis de las variables eléctricas medidas por el Power Pad junto con gráficos de líneas, además se analiza cada armónico de corriente por individual, los gráficos del espectro de Fourier por cada línea, teniendo como armónico dominante la tercera orden.

En el capítulo 4 se presenta la evaluación de la calidad de energía medida por el Power Pad en base a los cálculos que permitan ver si las variables eléctricas respetan los límites establecidos por las normas NTCSD y NTSyCS, cálculos como las distorsiones armónicas totales de voltaje o las regulaciones de tensiones teniendo como referencia los valores máximos y mínimos impuestos por las normativas. Luego en el capítulo 5 se entregan las propuestas correspondientes para mejorar la calidad de energía del sistema, en el que se propone un filtro que estabilizaría dicho armónico dominante, junto con una propuesta de redistribución de cargas entre las fases R y S para equilibrar el sistema eléctrico y lograr que el sistema cumpla con los límites establecidos por la norma NTCSD, terminando con el capítulo 6 en el cual se entregan las conclusiones de este proyecto en el que se indica que el sistema eléctrico en su mayoría y sin las propuestas de mejoras, no cumple con los límites establecidos por la normativa NTCSD, lo que indica una alteración en la calidad de energía en este sector de la universidad y que finalmente podría provocar daños en los equipos electrodomésticos e instalaciones eléctricas que se encuentren alimentados por el transformador de 250 kVA en la zona de talleres.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se abarcarán conceptos y definiciones sobre parámetros eléctricos, además de la importancia de la calidad de energía y lo que conlleva a su contexto teórico y motivo del estudio como los armónicos de corrientes o filtros armónicos. De igual forma se explicará las normativas que definen los límites de los armónicos de corrientes como también el objetivo principal que tiene cada normativa para la calidad de la energía.

2.1 Calidad de la Energía

El término de calidad de energía es utilizado para describir una combinación de características a través de las cuales el producto y el servicio del suministro eléctrico corresponden a las expectativas del cliente.

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.

La norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS, 2025) dice en el artículo 1-7 algunas definiciones de Calidad de Servicio, del producto y de suministro.

2.1.1 Calidad de Servicio

De acuerdo a la (NTSyCS, 2025) 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”.

2.1.2 Calidad de Producto

La calidad de producto se refiere al componente de la Calidad de Servicio que permite calificar el producto entregado por los distintos agentes del Sistema Interconectado (SI) y que se caracteriza, entre otros, por la magnitud, la frecuencia fundamental y la contaminación de la onda de tensión instantánea. (NTSyCS, 2025).

2.1.3 Calidad Comercial

De acuerdo a (NTCSD, 2024) la Calidad Comercial es “un componente de la Calidad de Servicio que permite calificar el Servicio Comercial y la Calidad de Atención prestada por la Empresa Distribuidora a sus Clientes o Usuarios, y que se caracteriza, entre otros, por el plazo de restablecimiento del servicio, la información proporcionada al Cliente o Usuario, 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”.

2.2 Normativas

Para analizar los datos correspondientes a la investigación presente, se utilizará de referencia las normativas chilenas que nos permitirá ver toda clase de limitaciones que se deberán cumplir.

2.2.1 Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS)

De acuerdo al Artículo 1-1 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, su objetivo es establecer las exigencias de Seguridad y Calidad de Servicio de los sistemas interconectados.

Dado que para satisfacer varias de estas exigencias en sistemas interconectados se requiere una adecuada coordinación de los diferentes agentes involucrados, en esta

Norma Técnica se establecen exigencias particulares que deben cumplir los concesionarios de cualquier naturaleza, propietarios, arrendatarios, usufructuarios o quien explote, a cualquier título, centrales eléctricas generadoras; líneas de transmisión a nivel nacional, zonal, para polos de desarrollo y dedicados, líneas de interconexión entre sistemas interconectados, equipos de compensación de energía, Sistemas de almacenamiento de energía, instalaciones que provean servicios complementarios, subestaciones eléctricas, incluidas las subestaciones primarias de distribución y barras de consumos de usuarios no sometidos a fijación de precios abastecidos directamente desde el sistema de transmisión, sujetos a la coordinación de la operación del coordinador independiente del sistema eléctrico nacional.

2.2.2 Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCSD)

De acuerdo al artículo 1-1 de la (NTCSD, 2024) tiene como objetivo principal establecer las exigencias y estándares de calidad de servicio para los sistemas de distribución de energía eléctrica.

A diferencia de la NTSyCS, de acuerdo al artículo 1-2 de la (NTCSD, 2024) será aplicable a las Empresas Distribuidoras, los Clientes y los Usuarios de la Red de Distribución, sean estos consumidores con o sin Equipamiento de Generación (EG), o Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD).

2.2.3 Norma IEEE 1159

La normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónico (IEEE) 1159, es una práctica recomendada del IEEE para monitorear la calidad de energía eléctrica. Define y clasifica fenómenos de calidad de potencia como caídas y elevaciones de voltaje, interrupciones, armónicos, flicker y desbalance. Sirve para unificar criterios de diagnóstico y reporte, facilitar comunicación entre empresas eléctricas, industrias y fabricantes y para mejorar la detección y análisis de problemas de calidad de energía.

2.2.4 Norma internacional IEC 61000-4-30

La norma internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 61000-4-30 define el método de medición, la precisión y la agregación de tiempo a la veracidad de

los parámetros de calidad de potencia en 3 clases de rendimiento, para obtener resultados repetibles y comparables.

2.2.5 Norma internacional IEC 61000-3-13

La normativa IEC 61000-3-13 proporciona orientación sobre los principios que pueden utilizarse como base para determinar los requisitos para la conexión de instalaciones desequilibradas como circuitos trifásicos que causan desequilibrio de tensión, a sistemas de energía pública de media tensión (MT), alta tensión (AT). El objetivo principal de esta normativa es proporcionar orientación a los operadores o propietarios de sistemas sobre prácticas de ingeniería, lo que facilitará la prestación de una calidad de servicio adecuada para todos los clientes conectados.

2.3 Perturbaciones

La calidad del suministro, o más específicamente, una perturbación de la calidad del suministro se define en general como cualquier cambio en el suministro ya sea tensión, corriente o frecuencia, que interfiere con el funcionamiento normal del equipo eléctrico, abarcando el uso generalizado de componentes eléctricos en todo lo que nos rodea, desde equipos electrónicos hasta el control de procesos. Dentro de estas anomalías se definirán conceptos que permitirán comprender como se desenvuelven las perturbaciones en un sistema eléctrico. (NTCSD, 2024).

2.3.1 Armónicos

Los armónicos son corrientes o tensiones cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la alimentación. Por ejemplo si la frecuencia fundamental es de 50 Hz, la segunda armónica será de 100 Hz, la tercera de 150 Hz, etc. Las armónicas son originadas por cargas no lineales que absorben corriente en impulsos bruscos, a diferencia de hacerlo suavemente en forma sinusoidal, como lo haría una carga resistiva pura. (NTCSD, 2024).

Además existen diferentes secuencias para los armónicos de corrientes con sus respectivas diferencias cada una.

2.3.1.1 Secuencia positiva

La secuencia positiva tiene una rotación Directa, que le permite producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.

2.3.1.2 Secuencia negativa

A diferencia de la secuencia anterior, la secuencia negativa tiene una rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.

2.3.1.3 Secuencia cero

La secuencia cero en cambio no tiene sentido de rotación, pero de igual manera puede causar calentamiento, las secuencias de armónicas cero (múltiplos de la tercera) son llamados "Triplens".

Tabla 2.1 Secuencia de Armónicos en Sistemas Balanceados de Tres Fases

Orden	**1°**	**2°**	**3°**	**4°**	**5°**	**6°**	**7°**	**8°**	**∞°**
Frecuencia (Hz)	**50**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**	**350**	**400**	**∞**
Secuencia	**+**	**-**	**0**	**+**	**-**	**0**	**+**	**-**	**…**

Fuente: Rosa (2006)

En la tabla 2.1 se muestra un ejemplo de las secuencias de armónicos en los sistemas balanceados de tres fases, en las que las secuencias junto a las frecuencias van cambiando dependiendo del orden de armónico que se esté analizando, desde la primera armónica hasta el infinito.

2.3.2 Distorsión armónica

Según la (NTCSD, 2024), “la distorsión armónica es la distorsión de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiplos de dicha

frecuencia nominal. Para evaluar la distorsión armónica en un punto de la red de distribución se utilizarán los indicadores correspondientes".

2.3.2.1 Distorsión armónica individual de tensión y corriente (D_V_j y D_I_j)

Para calcular la distorsión armónica individual de tensión y corriente, se tiene la siguiente formula con el cual se verifica si estarán cumpliendo con la normativa NTCSD:

$$D_V_j = \frac{V_j}{V_1} \times 100$$

Donde:

- D_V_j: Distorsión Armónica individual de tensión, para la j-ésima armónica, en [%].
- V_j: Tensión de la j-ésima armónica de la Tensión de Suministro, en [kV].
- V_1: Tensión de la componente fundamental de la Tensión de Suministro, en [kV].

El mismo caso sería para la corriente, reemplazando los datos mencionados de tensión por los valores de la corriente.

2.3.2.2 Distorsión armónica total de tensión y corriente (THD_v y THD_i)

En el caso de la distorsión armónica total ya sea de tensión o de corriente, la manera de calcularla es diferente en comparación a la distorsión armónica individual, teniendo la siguiente ecuación correspondiente:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} V_j^2}}{V_1} \times 100$$

Donde:

- THD_v: Distorsión armónica total de tensión, en [%].
- V_j: Tensión de la j-ésima armónica de la Tensión de Suministro, en [kV].
- V_1: Tensión de la componente fundamental de la Tensión de Suministro, en [kV].

Para hallar THDi solo se reemplaza los valores de tensión por los datos de la corriente y se calcula al igual que el caso anterior.

2.3.2.3 Distorsión de demanda total de corriente (TDD_i)

De acuerdo al artículo 3-7 de la normativa (NTCSD, 2024), la distorsión de demanda total es similar al THD, con la diferencia de que el TDD es la relación entre la sumatoria de los valores promedios de los armónicos de corrientes con respecto a la corriente fundamental máxima de la instalación eléctrica, esta puede ser calculada con la siguiente ecuación.

$$TDD_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_L} \times 100$$

Donde:

- TDD_i: 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.

2.3.3 Flicker

También conocido como Parpadeo, de acuerdo al artículo 1-4 de la (NTCSD, 2024) corresponde a una fluctuación cíclica (en el rango 0-30 Hz) de la magnitud de la tensión que origina la impresión subjetiva de variaciones en la luminosidad, como resultado del parpadeo en los elementos de iluminación y mal funcionamiento de otros dispositivos eléctricos conectados a la red.

Además el artículo 3-6 de la (NTCSD, 2024)establece una tabla de límites para índices de severidad del Flicker.

Tabla 2.2 Límites para Índices de Severidad del Flicker

Densidad de la Red	Pst (10 minutos)	Plt (2 horas)
Alta y Media	1,0	0,8
Baja, Muy Baja y Extremadamente Baja	1,25	1,0

Fuente: NTCSD (2024)

En la tabla 2.2 se puede apreciar los límites para los índices del Flicker, límites que están impuestos por la normativa NTCSD del año 2024, la severidad del Flicker varía dependiendo de si la densidad de la red es alta, media, baja, muy baja y extremadamente baja.

2.3.4 SAG

También conocido como Dip, se refiere a una categoría de variaciones de disminución corta duración del voltaje como caídas de tensiones o interrupciones breves en la red eléctrica como sobrecargas, estas pueden ser del 0.1 por unidad (pu) al 0.9 pu con respecto al voltaje nominal, o del 10% al 90% de la misma tensión.

2.3.5 SWELL

Es totalmente opuesto al término SAG, esto ya que el concepto de SWELL se refiere a las variaciones de incremento de corta duración del voltaje, que por lo general superan al 10% del voltaje nominal o 0.1 pu de la misma tensión, existen diferentes causas de un SWELL, las más destacadas son las condiciones de fallas de un sistema o red eléctrica.

2.4 Tipos de cargas

Las cargas eléctricas de corriente alterna (CA) de acuerdo a (YT Electric, 2022) se denominan lineales o no lineales según cómo toman corriente de la forma de onda de la fuente de alimentación principal. Además las cargas se clasifican en las siguientes categorías:

- Cargas Inductivas: en las que la forma de onda de la corriente se retrasa con respecto a la forma de onda del voltaje, con una corriente de irrupción potencialmente alta en el arranque, por ejemplo, un transformador, un motor o una fuente de alimentación conmutada (SMPS).
- Cargas Capacitivas: donde la forma de onda actual conduce a la forma de onda de voltaje, por ejemplo, un servidor Blade.
- Cargas resistivas: una carga sin inductancia o capacitancia, por ejemplo, un banco de carga resistivo. Por lo general, el dispositivo no tendrá una sobretensión de encendido inicial y la corriente consumida aumenta inmediatamente a un estado estable.

2.4.1 Cargas lineales

Con una carga lineal, la relación entre las formas de onda de voltaje y corriente es sinusoidal, y la corriente en cualquier momento es proporcional al voltaje (ley de Ohm), los ejemplos de las cargas lineales incluirían transformadores, motores y condensadores. (YT Electric, 2022).

2.4.2 Cargas no lineales

Por otro lado, con una carga no lineal, la corriente no es proporcional al voltaje y fluctúa en función de la impedancia de carga alterna, los ejemplos comunes de cargas no lineales incluyen rectificadores, unidades de velocidad variable y dispositivos electrónicos como computadoras, impresoras, televisores y servidores. (YT Electric, 2022).

2.5 Teorema de Fourier

Una serie de Fourier de acuerdo a (Academia Lab, 2025), es una suma de funciones sinusoidales armónicamente relacionadas, también conocidas como componentes o armónicos. El resultado de la suma es una función periódica cuya forma funcional está determinada por las opciones de duración del ciclo o periodo, el número de componentes y sus amplitudes y parámetros de fase. Se puede hacer que un ciclo de la suma se aproxime a una función arbitraria en ese intervalo, en cuyo caso se pueden

elegir los otros parámetros para hacer que la serie converja a casi cualquier función periódica de buen comportamiento.

La convergencia de la serie de Fourier significa que a medida que se suman más y más componentes de la serie, cada suma sucesiva de serie parcial de Fourier se aproximará mejor a la función y la igualará con un número potencialmente infinito de componentes, las pruebas matemáticas para esto pueden denominarse colectivamente como el Teorema de Fourier.

2.6 Filtros armónicos

Un filtro es un componente que tiene la capacidad de seleccionar o rechazar una determinada frecuencia o un rango de frecuencias dentro de una señal eléctrica. Su propósito es eliminar las interferencias, el ruido y cualquier otra distorsión no deseada de la señal, y puede ajustar su amplitud y fase. Se representa con una función de transferencia y, visualmente, con un símbolo que contiene tres bandas que representan los distintos rangos de frecuencia (baja, alta e intermedia). En los casos en los que no se especifica el tipo de filtro, se utiliza un símbolo genérico como el que se muestra en el diagrama. (Cogollo, 2016)

Figura 2.1 Símbolo del Filtro Armónico

Fuente: Cogollo (2016)

Los filtros de armónicos han creado con el propósito de disminuir aquellas señales que podrían generar daños, sostenerlas dentro de límites seguros. También ayudan a amortiguar las resonancias del sistema, evitando que los armónicos se intensifiquen. Estos filtros están diseñados para seleccionar ciertas frecuencias eléctricas específicas, permitiendo ajustar tanto su fase como su amplitud. (CTM Magnetics, 2021).

2.6.1 Tipos de filtros

Los filtros se dividen en dos categorías principales: pasivos y activos. Los filtros pasivos emplean componentes como resistencias, capacitores e inductores, dado que los inductores son elementos, voluminosos, pesados y costosos, el empleo de filtros pasivos es poco conveniente excepto en frecuencias bastante altas. En cambio, los filtros activos incorporan además elementos como transistores o amplificadores, junto con los componentes pasivos mencionados. (Miyara, 2004)).

Los filtros activos están compuestos por resistencias, capacitores y amplificadores operacionales. Su función principal es permitir o bloquear el paso de señales dentro de un rango específico de frecuencias. Gracias a sus componentes activos, como transistores o amplificadores operacionales, estos filtros pueden amplificar la señal, lo que permite obtener una tensión de salida superior a la de entrada para ciertas frecuencias. En contraste, los filtros pasivos no tienen esta capacidad, ya que su salida siempre presenta una tensión menor que la de entrada.

Entre las ventajas más destacadas de los filtros activos frente a los pasivos se encuentra su alta precisión. Son capaces de generar la corriente armónica exacta necesaria para contrarrestar la que circula en la red, sin verse afectados por las variaciones en la carga. No obstante, una de sus principales desventajas es el costo más elevado, debido al mayor nivel de control que ofrecen sobre el sistema. Al igual que los filtros pasivos, pueden instalarse tanto en configuración serie como en paralelo.
Los filtros híbridos están diseñados para reducir el impacto de las corrientes armónicas en todo el espectro de frecuencias. En este tipo de filtro, la sección pasiva se encarga de atenuar las armónicas correspondientes a las frecuencias más dominantes, mientras que la parte activa actúa sobre el resto del espectro, inyectando corrientes en fase opuesta para contrarrestar la distorsión.

2.7 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.

2.7.1 Voltaje

Existe una fuerza de atracción entre una carga positiva y una negativa, se debe aplicar cierta cantidad de energía, en forma de trabajo, para vencer dicha fuerza y separar las cargas a determinada distancia. Todas las cargas opuestas poseen cierta energía potencial a causa de la separación que hay entre ellas. La diferencia en la energía potencial por carga es la diferencia de potencial o voltaje. En circuitos eléctricos, el voltaje es la fuerza propulsora y es lo que establece la corriente.

2.7.1.1 Regulación de Voltaje

En ingeniería eléctrica, la regulación de voltaje es una medida del cambio en la magnitud del voltaje entre el extremo emisor y receptor de un componente, como una línea de transmisión o distribución. La regulación de voltaje describe la capacidad de un sistema para proporcionar un voltaje casi constante en una amplia gama de condiciones de carga.

El término puede referirse a una propiedad pasiva que resulta en una mayor o menor caída de voltaje bajo diversas condiciones de carga, o a la intervención activa con dispositivos con el propósito específico de ajustar el voltaje.

De acuerdo al artículo 3-1 de la (NTCSD, 2024), para evaluar la regulación de tensión en un punto de la Red de Distribución se utilizará el siguiente indicador:

$$\Delta V_k = \frac{|V_n - V_n|}{V_n} \times 100$$

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 10 minutos, en [kV].
- V_n: Tensión Nominal en el punto k, en [kV].

Tabla 2.3 Límites para Regulación de Tensión

Densidad de la red / Tensión de la red	Alta y Media	Baja y Muy Baja
Baja Tensión	± 7,5%	± 10,0%
Media Tensión	± 6,0%	± 8,0%

Fuente: NTCSD (2024)

En la tabla 2.3 se muestran los límites que impone la normativa NTCSD del año 2024 para la regulación de tensión, indicando que para baja tensión la densidad de la red debe ser superior en comparación a la red de media tensión que su densidad ya sea alta, media, baja o muy baja, debe ser inferior.

2.7.1.2 Desequilibrio o desbalance de Tensión

La definición de la IEEE 1159 (2019), dice que "el desbalance de voltaje es la razón entre la componente de secuencia negativa o cero con la componente de secuencia positiva". El desbalance puede ser estimado como la máxima desviación entre las tres fases del promedio de voltaje o corrientes trifásicas, dividido por el promedio del voltaje o corriente trifásico, expresado en porcentaje.

De acuerdo al artículo 3-2 de la norma (NTCSD, 2024), para evaluar el desequilibrio de tensión en un punto de la red de distribución se utilizará el indicador:

$$\text{Desequilibrio de Tensión} = \left|\frac{V-}{V+}\right|$$

Donde:

- $V-$: Componente de secuencia negativa de la tensión en [V].
- $V+$: Componente de secuencia positiva de la tensión en [V].

Para el caso de sistemas trifásicos de cuatro conductores, la medición deberá realizarse considerando como referencia la tensión fase-neutro y para un sistema trifásico de tres conductores deberá considerarse como referencia la tensión fase-fase. En Estado Normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión determinadas como

el promedio de las medidas en un intervalo de 10 minutos, deberán ser tales que la componente de secuencia negativa (fundamental) de la tensión no exceda los siguientes límites (respecto de la componente fundamental de secuencia positiva):

Tabla 2.4 Límites para Desequilibrio de Tensión

Densidad de la red	Alta y Media	Baja, Muy Baja y Extremadamente Baja
Límite Desequilibrio de Tensión	2%	3%

Fuente: NTCSD (2024)

La tabla 2.4 se muestran los límites para el desequilibrio de tensión que impone la normativa NTCSD del año 2024, en el que la densidad de la red si es alta y media, tiene que tener un límite de desequilibrio de tensión del 2%, inferior al porcentaje de desbalance de voltaje que tiene la densidad de la red cuando sea baja, muy baja o extremadamente baja, que debe de tener un límite de 3% de desequilibrio de tensión.

2.7.2 Corriente

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. Es el flujo de carga eléctrica que atraviesa un material conductor durante un periodo de tiempo determinado, esto debido al desplazamiento de los electrones que orbitan en el núcleo de los átomos que componen al conductor.

2.7.3 Resistencia

Cuando en un material existe corriente, los electrones libres se mueven en éste y de vez en cuando chocan con átomos. Estas colisiones provocan que los electrones pierdan algo de su energía, con lo cual se restringe su movimiento. Entre más colisiones haya, más se restringe el flujo de electrones. Esta restricción varía y está determinada por el tipo de material. La propiedad de un material de restringir u oponerse al flujo de electrones se llama resistencia, R. La resistencia es la oposición a la corriente. La resistencia se expresa en ohms, simbolizada mediante la letra griega omega (Ω). Existe

un ohm (1 Ω) de resistencia si hay un ampere (1 A) de corriente en un material cuando se aplica un volt (1 V) al material.

Figura 2.2 Símbolo de la Resistencia

Fuente: José (2012)

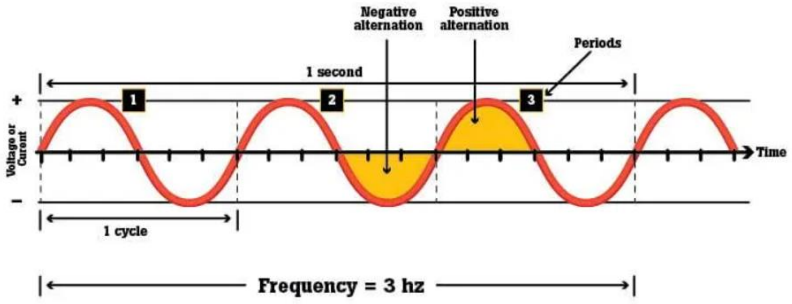
En la figura 2.2 se muestra el símbolo que tiene la resistencia y con la cual se le es conocida en todo tipo de circuito o plano eléctrico de cualquier sistema de distribución.

2.7.4 Frecuencia

La frecuencia de la CA es el número de ciclos por segundo de una onda sinusoidal de corriente alterna (CA). Dicho de otra forma, la frecuencia es la velocidad a la que la corriente cambia de sentido por segundo. Se mide en hercios (Hz), una unidad internacional de medida donde 1 hercio es igual a 1 ciclo por segundo.

En su forma más básica, la frecuencia es cuántas veces se repite algo, en el caso de corriente eléctrica, la frecuencia es el número de veces que una onda sinusoidal se repite, o completa, un ciclo de positivo a negativo.

Figura 2.3 Ejemplo de Frecuencia



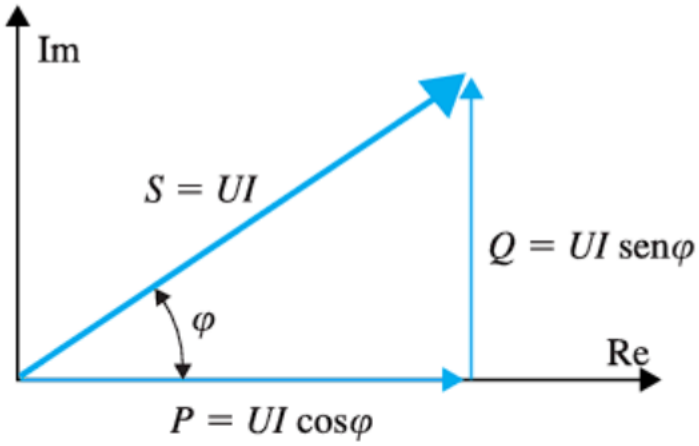
Fuente: Fluke (s.f.)

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de la frecuencia, en la que se puede apreciar las ondas en el punto negativo y positivo, los periodos que tienen las ondas sinusoidales junto a los ciclos por segundos, en una frecuencia dada por 3 Hz.

2.7.5 Factor de potencia

Este es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo, aunque se le conoce en ecuaciones como (cosφ) y se expresa en (fp). Mientras más pequeño es el factor de potencia, más pequeña es la disipación de potencia. El factor de potencia puede variar desde 0 para el caso de un circuito puramente reactivo hasta 1 en el caso de un circuito puramente resistivo.

Figura 2.4 Triángulo de las potencias



Fuente: Fraile (2019)

En la figura 2.4 se puede apreciar el triángulo de las potencias en el que se encuentran la potencia activa, reactiva y aparente, junto con el ángulo que ayudaría a hallar el factor de potencia.

2.7.6 Potencia activa

La potencia activa se trata de la que realmente se consume y se transforma en trabajo útil, siendo la que realizan los dispositivos eléctricos en el sistema y tiene la siguiente ecuación correspondiente:

$$P = V_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos(\varphi)$$

Donde:

- P: Potencia Activa, su unidad de medida se expresa en W.

- 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(φ): Es el factor de potencia, que representa la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

2.7.7 Potencia reactiva

Es la parte de la potencia que no realiza trabajo útil, sino que oscila entre la fuente y la carga. Es importante en sistemas que tienen inductores y capacitores, donde se generan campos magnéticos o eléctricos y su ecuación correspondiente es la siguiente:

$$Q = V_{RMS} \times I_{RMS} \times \text{sen}(\varphi)$$

Donde:

- Q: Potencia Reactiva, su unidad de medida se expresa en VAr.
- Sen(φ): Se trata de la parte de la corriente que no colabora al trabajo útil.

2.7.8 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, a diferencia de las otras potencias su ecuación correspondiente es la siguiente:

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS}$$

Siendo:

- S: Es la Potencia Aparente cuya unidad de medida es VA.

2.7.9 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 del todo sinusoidal, lo cual es común en redes eléctricas que alimentan cargas no lineales.

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

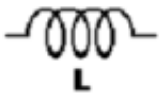
Donde:

- D: Potencia Distorsionante cuya unidad de medida es VA.
- S: Potencia Aparente, en VA.
- P: Potencia Activa, en W.
- Q: Potencia Reactiva, en VAr.

2.7.10 Inductancia

La inductancia es un dispositivo eléctrico que se usa para almacenar la energía en forma de campo magnético, está formada por un enrollamiento de alambre de forma que el campo magnético generado por una espira, afecte a las espiras vecinas de manera que los campos magnéticos de todas las espiras se sumen o contrarresten para formar una distribución espacial de campo magnético de la bobina. (José, 2012).

Figura 2.5 Símbolo de la Inductancia



Fuente: José (2012)

En la figura 2.5 se aprecia el símbolo que representa a la inductancia en todos los planos de los circuitos eléctricos, junto con su letra representativa “L” con la cual se identifica también para los cálculos de la misma inductancia.

2.7.11 Capacitancia

La capacitancia es una medida de la propiedad de un dispositivo de almacenar energía en forma de cargas separadas o de un campo eléctrico. (Dorf, 1995).

Figura 2.6 Símbolo de la Capacitancia

Fuente: José (2012)

En la figura 2.6 se puede aprecia el símbolo de la capacitancia con la que se es representada en la mayoría de planos o esquemas de circuitos eléctricos.

CAPITULO III

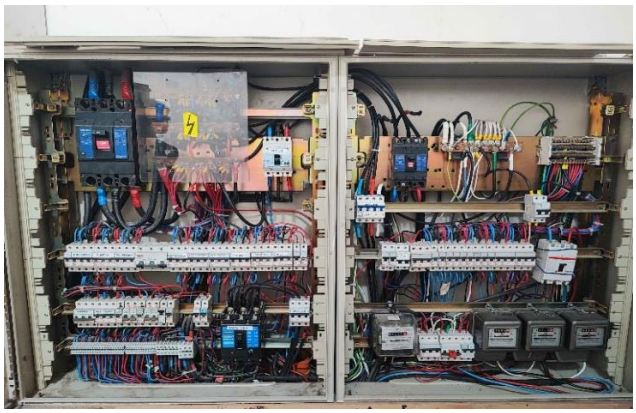
ANÁLISIS DE DATOS

En el presente capítulo 3 se abarcarán los datos obtenidos por el instrumento Power Pad III AEMC 8336, el cual fue utilizado para medir la calidad de la energía eléctrica del transformador de 250 kVA de la Universidad de Atacama, esto teniendo de referencia los límites impuesto por las normativas vistas anteriormente en el capítulo 2 de este proyecto, más específicamente las dos normativas de calidad de energía siendo la NTCSD 2024 (Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución) la NTSyCS 2025 (Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio).

3.1 Antecedentes

Antes de ver los datos que entregó el instrumento de medición Power Pad III AEMC, hay que especificar qué variables eléctricas serán medidas por el instrumento que fue instalado para analizar la calidad de energía del transformador de 250 kVA, dichas variables eléctricas serán las tensiones, corrientes, potencias activas, reactivas y aparentes, los armónicos de corriente y las frecuencias de las tres líneas. Estos datos serán medidos y analizados a lo largo de 7 días consecutivos con un tiempo de 15 minutos de diferencia entre cada dato registrado por el instrumento de medición, la fecha del comienzo de la medición es el día 26 de Agosto del año 2025 a las 16:45 PM finalizando en el día 03 de Septiembre del año 2025 a las 9:30 AM.

Figura 3.1 Tablero de Distribución



En la figura 3.1 Tablero de Distribución, se muestra el tablero en el que se dejará instalado el instrumento de medición Power Pad III AEMC para que analice las variables eléctricas mencionadas anteriormente, tablero que está conectado al transformador de 250 kVA al interior de la Universidad de Atacama.

Figura 3.2 Instrumento de Medición Power Pad III AEMC

Fuente: AEMC instruments (2014)

En la figura 3.2 Instrumento de Medición Power Pad III AEMC, se muestra el equipo que se instalará en el tablero de distribución, el cual recibirá los datos de las variables eléctricas que están pasando por el transformador de 250 kVA para poder analizar la calidad de energía del mismo transformador.

El instrumento Power Pad III AEMC tiene diferentes funciones, entre ellas las que se utilizaron para este análisis de calidad de energía:

- Las medidas de los armónicos para el voltaje, la corriente y la potencia, hasta la armónica 50 ya sea en RMS o en su valor fundamental.
- Cuatro terminales de entrada de voltaje y tres de corriente.
- La medida de potencia activa, reactiva y aparente por línea.
- La captura de armónicos de voltaje, corriente y potencia del orden 0 hasta el orden 50, sumada a la dirección en tiempo real.
- La visualización en tiempo real de diagramas de fasores con valores y ángulos de línea.
- La frecuencia nominal de 40 a 70 Hz.

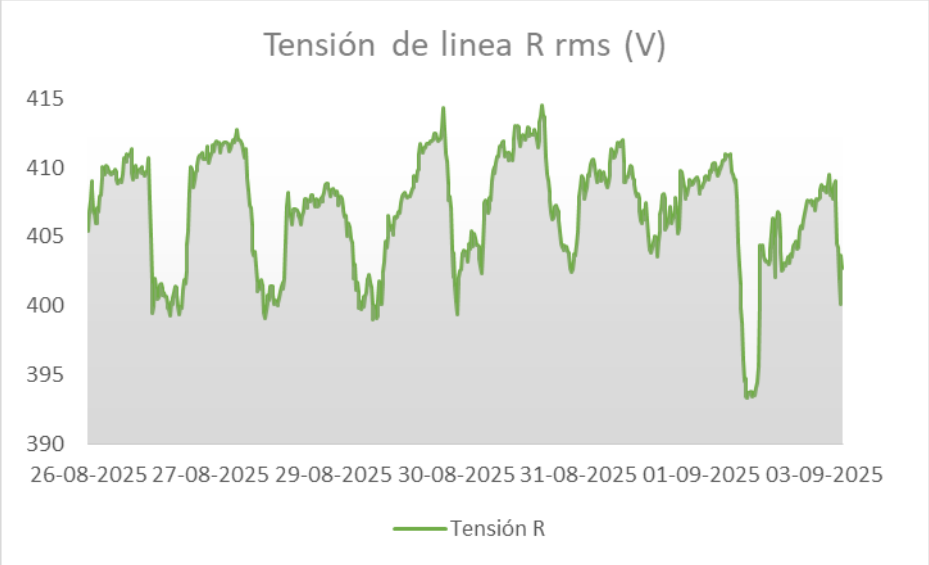
3.2 Análisis de variables eléctricas

Luego de dejar instalado el instrumento Power Pad III AEMC en el tablero de distribución por la fecha mencionada anteriormente, el equipo entregó una serie de variables eléctricas que fueron variando con el pasar de los días, parámetros que serán mostrados a continuación con gráficos de líneas, separadas y diferenciadas por cada fase del sistema eléctrico.

3.2.1 Tensiones de líneas

Empezando por las tensiones de líneas, el equipo de medición entregó los niveles de voltajes por cada una de las tres líneas del sistema eléctrico de distribución, dicho parámetro independiente de la línea, tuvo un flujo muy variado con el pasar de los días.

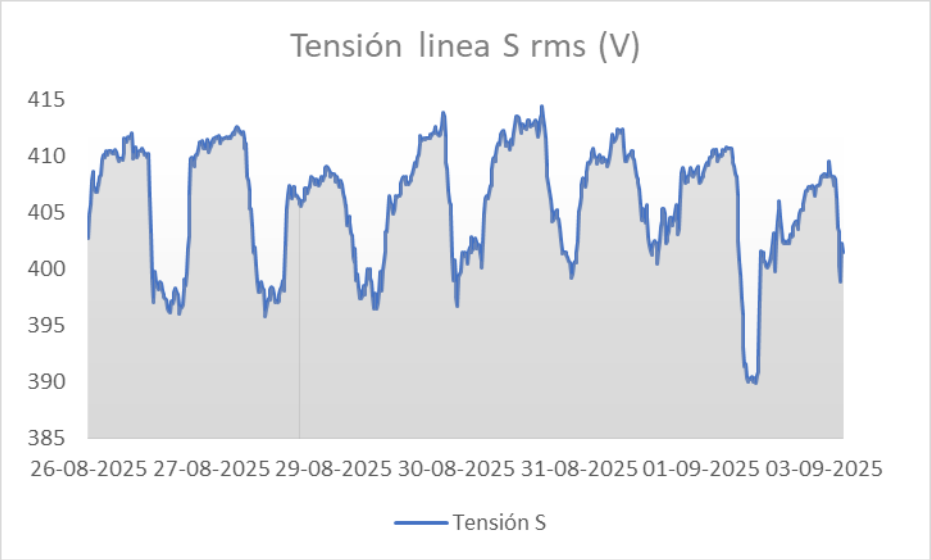
Figura 3.3 Gráfico de Tensión de la línea R



En la figura 3.3 se presenta el gráfico de la tensión que pasa por la primera línea, es decir el voltaje en la línea R, mostrando que el punto más alto de tensión se encuentra entre los días 30 y 31 de Agosto, mientras que el punto más bajo que alcanzó la tensión de la línea R por otro lado se encuentra entre los días 01 y 03 de Septiembre. Esto podría deberse al poco uso de los equipos electrónicos durante los días más bajo de niveles de tensión registrados por el Power Pad III AEMC, siendo totalmente lo

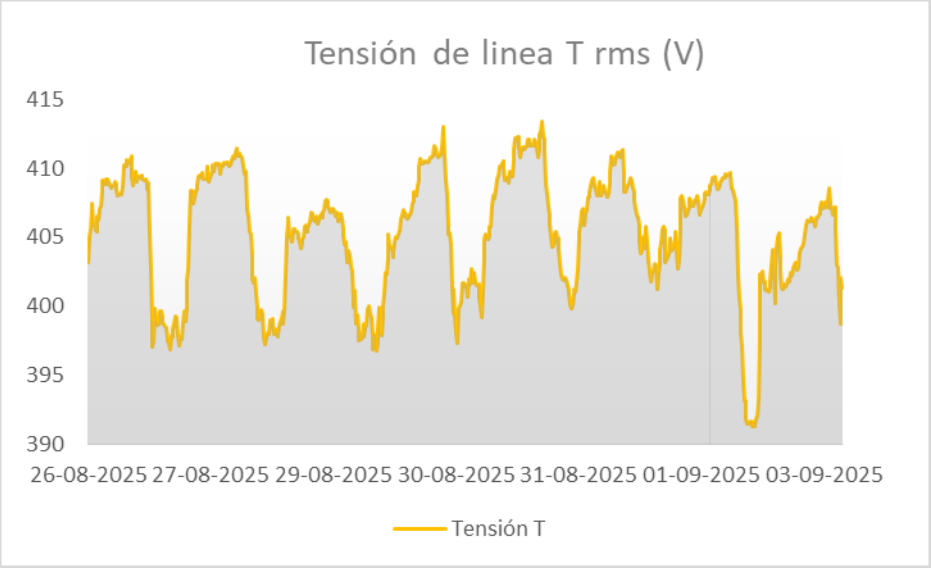
contrario con respecto a los días en los que se registró los niveles más altos de tensiones.

Figura 3.4 Gráfico de Tensión de la línea S



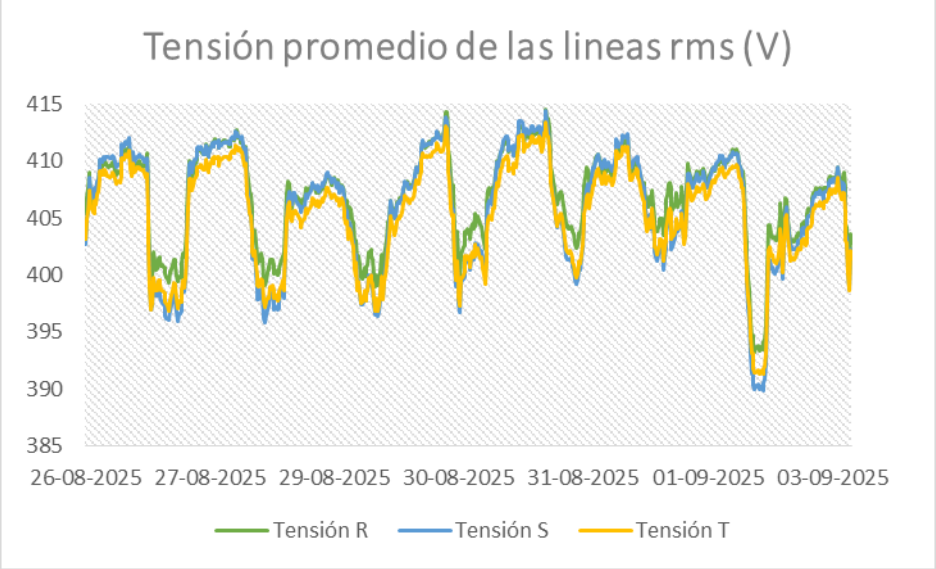
De igual forma en la figura 3.4 se tiene el gráfico que demuestra la variación que tiene la tensión de la línea S, teniendo una variación de niveles de tensión idéntica a la de la línea anterior incluyendo las fechas del punto más alto y bajo que tuvo el voltaje.

Figura 3.5 Gráfico de Tensión de la línea T



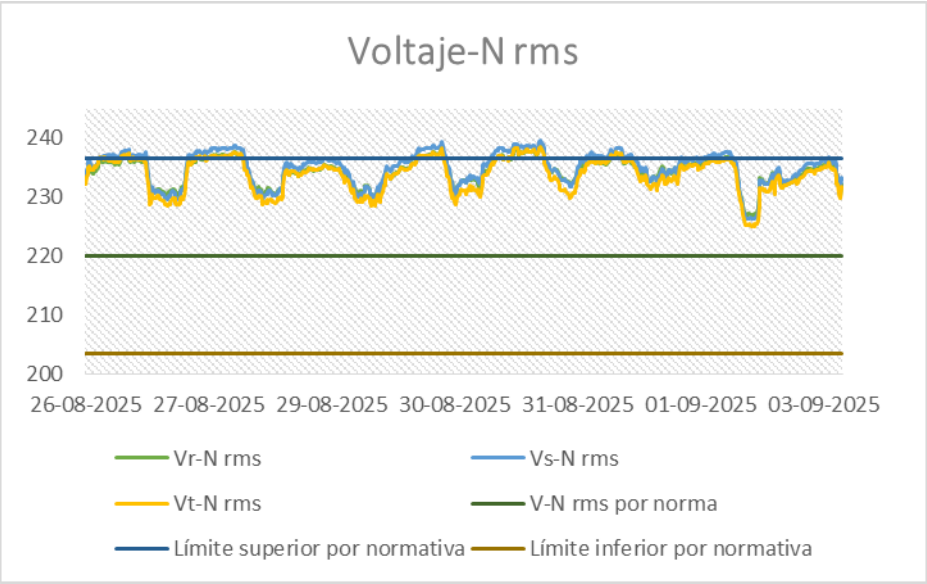
Finalmente en la figura 3.5 está el gráfico de la tensión de la tercera línea, es decir la línea T, que en comparación al último día, el voltaje cambia con respecto al primer día en el que el instrumento Power Pad III AEMC comenzó a medir el parámetro eléctrico, pero sigue teniendo en común con las otras dos líneas anteriores, que la tensión está en el punto más alto y bajo en las mismas fechas indicadas con anterioridad.

Figura 3.6 Gráfico de Tensión Promedio



En la figura 3.6 se tiene el gráfico de la tensión promedio de las tres líneas, es decir las líneas R, S y T, en el cual se puede ver la diferencia de niveles de tensión que tiene cada una de las líneas del sistema de distribución, destacando que el voltaje de la línea S tiene tanto el punto más alto como el punto más bajo en comparación a la tensión de las otras líneas, pero el parámetro eléctrico tiene un flujo similar en las tres líneas de distribución variando solamente en los niveles que se registraron gracias al instrumento de medición.

Figura 3.7 Gráfico de Tensión RMS entre Neutro

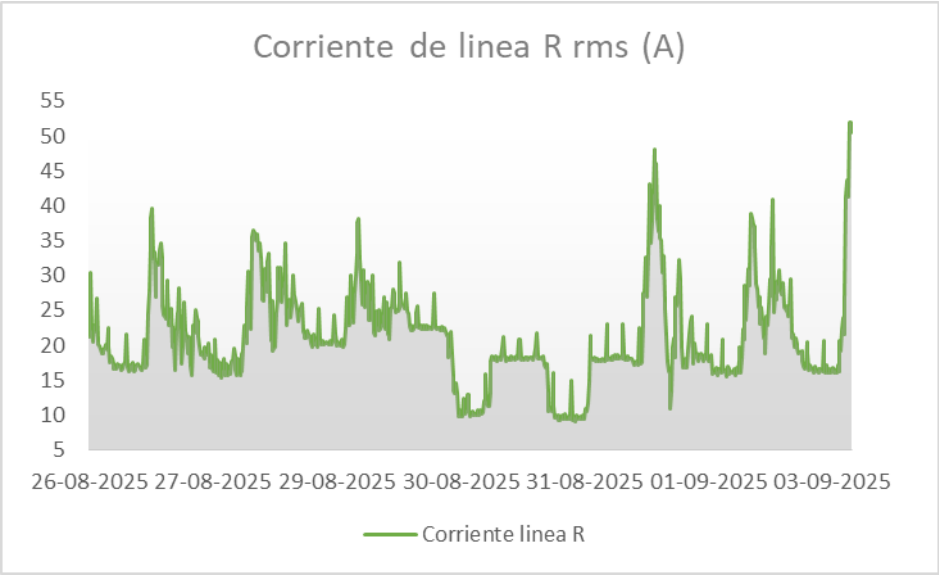


Para finalizar con el parámetro eléctrico voltaje, en la figura 3.7 se muestra la tensión que hay entre cada fase y el neutro, junto con los límites de los voltajes tanto la nominal, superior como inferior, permitidos por el artículo 3-1 de la normativa NTCSD, siendo el voltaje nominal de 220 V, la tensión de 236,5 V como límite superior junto al límite inferior de 203,5 V y de acuerdo a la figura 3.7, las tensiones de las tres fases superan algunas veces el límite superior por poca cantidad, siendo registrado los días 30 y 31 de Agosto en donde más elevado están las tensiones de las tres fases de distribución.

3.2.2 Corrientes rms de línea

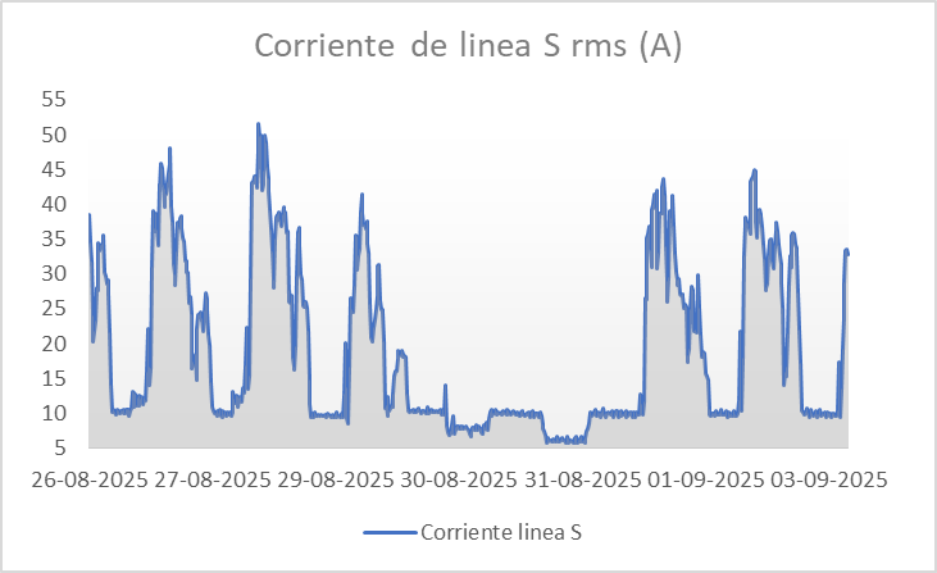
Siguiendo con las variables eléctricas medidas por el equipo Power Pad III AEMC, las corrientes fueron analizadas de igual manera tanto por línea individual con su valor en rms (Root Mean Square), es decir en su valor eficaz, como en promedio con las tres líneas juntas en una sola figura para poder ver cual línea tiene el parámetro eléctrico dominante, tal y como se mostró con las tensiones de línea.

Figura 3.8 Gráfico de Corriente RMS de la Línea R



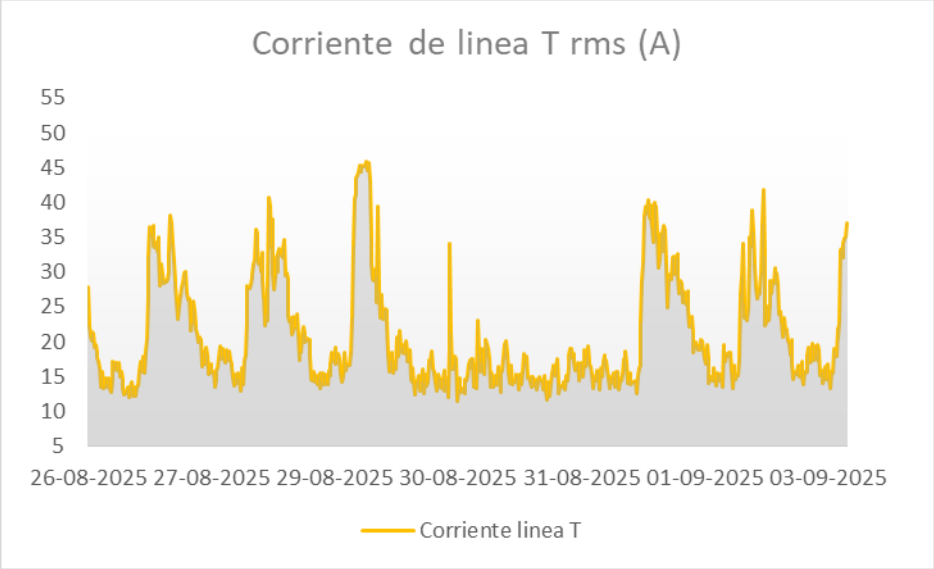
En la figura 3.8 se muestra la medición de la corriente en la primera línea, es decir en la línea R, teniendo el nivel de corriente más alto entre las fechas de 01 y 03 de Septiembre, mientras que por otro lado el punto más bajo de la corriente en esta línea está en las fechas del 30 a 31 de Agosto y se puede apreciar que el flujo que tiene la corriente en la figura 3.8 es totalmente diferente al flujo que se mostraron en las tensiones de las figuras anteriores.

Figura 3.9 Gráfico de Corriente RMS de la Línea S



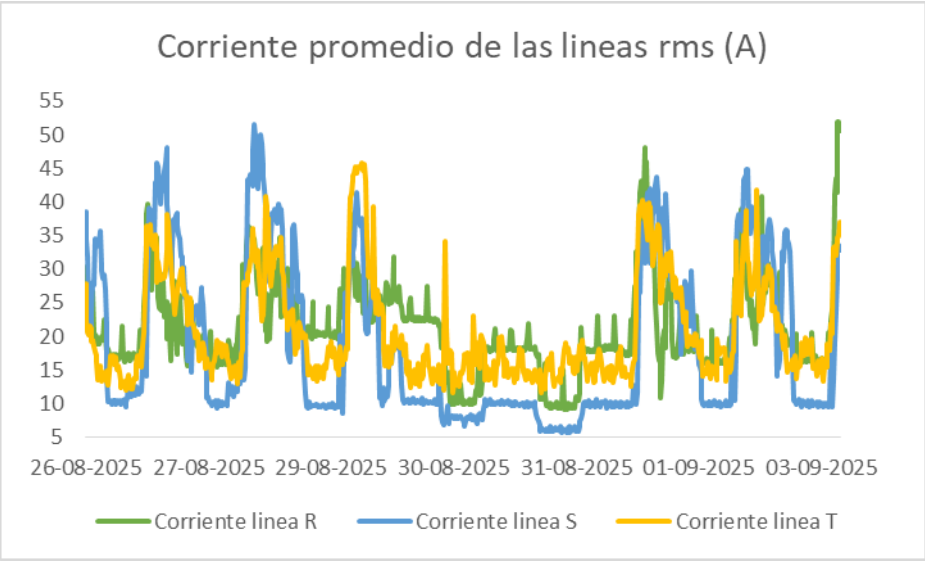
Continuando con el análisis de las corrientes de línea, en la figura 3.9 se encuentra el gráfico de la corriente que hay en la línea S, siendo muy diferente su flujo en comparación a la línea R, debido a que ahora el punto más alto de corriente que registró el equipo de medición ahora se encuentra entre las fechas del 28 y 29 de Agosto, mientras que el punto más bajo de corriente sigue encontrándose en la fecha del 31 de Agosto.

Figura 3.10 Gráfico de Corriente RMS de la Línea T



Al seguir con el análisis de las variables eléctricas, está la figura 3.10 en la que se demuestra el gráfico de la corriente en la línea T, mostrando los diferentes niveles que tuvo este parámetro eléctrico entre el primer y último día de la medición, además también se muestra un flujo de corriente diferente en comparación a las líneas anteriores. El punto más alto que tuvo el nivel de corriente en esta línea se encuentra entre el día 29 y 30 de Agosto, y el punto más bajo está en el día 31 del mismo mes.

Figura 3.11 Gráfico de Corriente RMS Promedio

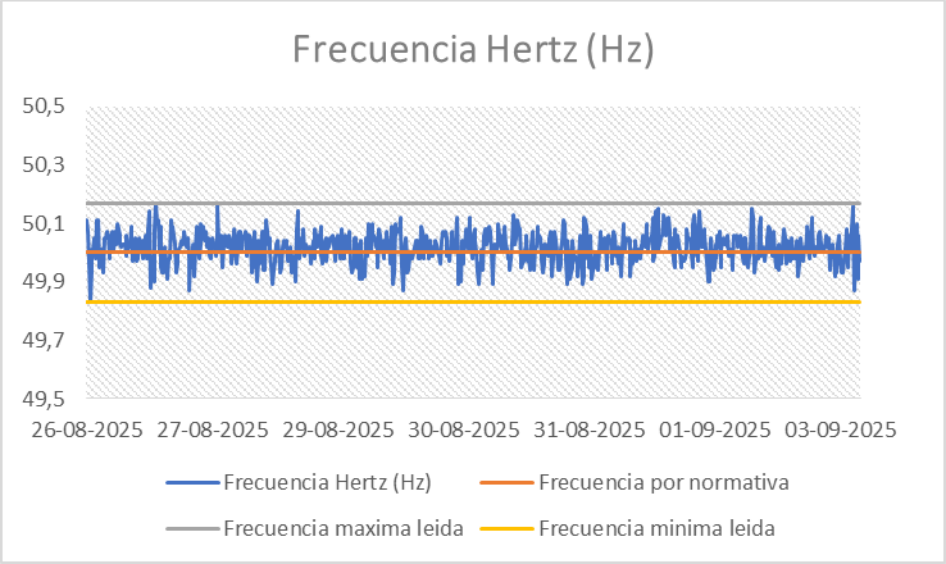


Finalmente en la figura 3.11 se encuentra el gráfico de la corriente promedio en cada línea y como se puede apreciar, el flujo que tiene la corriente de cada línea es diferente la una con la otra. La corriente dominante en este caso se encuentra en la línea R en cuanto al punto más alto se refiere, tal y como se muestra en la figura 3.11, mientras que el punto más bajo lo domina la corriente de la línea S, estando en el día 31 de Agosto.

3.2.3 Frecuencias y Factores de Potencias

Otra de las variables eléctricas que el equipo Power Pad III AEMC entregó en los días de medición, fueron la frecuencia y el factor de potencia con el que contaba el sistema eléctrico de distribución. En este punto se analizará si los parámetros eléctricos ya mencionados anteriormente, cumplen también con los límites impuestos por los artículos 1-5 y 3-4 de la normativa NTCSD para la frecuencia y los artículos 3-11 junto con el 5-18 de la misma normativa nacional para el factor de potencia.

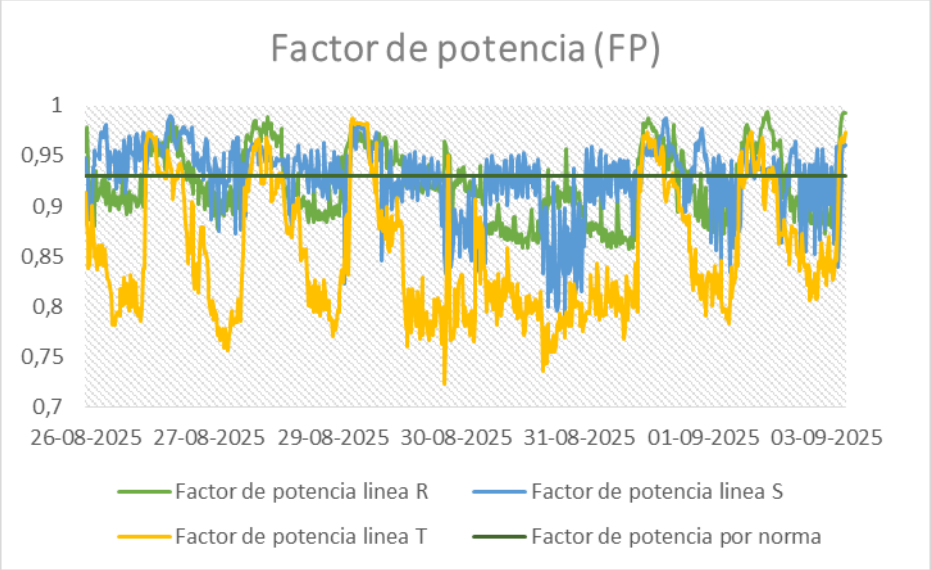
Figura 3.12 Gráfico de la Frecuencia Hz



En la figura 3.12 se tiene el gráfico de la frecuencia con la que estuvo rindiendo el sistema de distribución durante todo el periodo de tiempo en el que estuvo midiendo el Power Pad III AEMC, mostrando que de acuerdo al artículo 1-5 de la normativa NTCSD, el cual dice que la frecuencia nominal de un sistema de distribución debe ser de 50 Hz, la frecuencia que ha estado registrando el equipo de medición, no está tan distanciado de la frecuencia límite impuesto por normativa. Además, de acuerdo al artículo 3-4 de la misma normativa nacional, que establece que los intervalos de frecuencia que se considera en estado normal son $49{,}5\ \text{Hz} \leq f \leq 50{,}5\ \text{Hz}$, los valores mínimos y máximos de la frecuencia registrados por el equipo de medición no superan los límites establecidos por la normativa nacional.

En el día 27 de Agosto se encuentra el punto máximo de la frecuencia leída, teniendo 50,17 Hz como frecuencia medida en dicha fecha, mientras que en el día 26 de Agosto, se registró el punto mínimo de la frecuencia leída, teniendo 49,83 Hz como frecuencia registrada en el primer día de medición.

Figura 3.13 Gráfico del Factor de Potencia

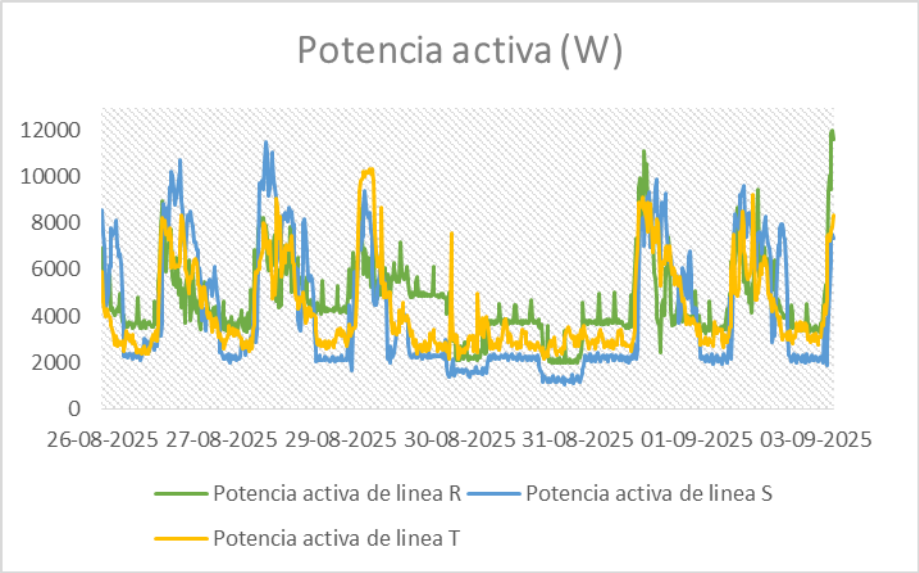


Y por otro lado en la figura 3.13 está el gráfico del factor de potencia por cada línea, es decir, línea R, S y T, figura en la que se muestra que el factor de potencia de las tres líneas en cuanto a sus valores mínimos, están por debajo del factor de potencia que establece el artículo 5-18 de la normativa NTCSD, el cual dice que el límite del factor de potencia inductivo es de 0,93 y el del factor de potencia capacitivo es de 0,96 para los usuarios regulados que tengan una tensión bajo los 30 kV, teniendo que respetar 98% del tiempo tales valores. El que se esté incumpliendo el límite impuesto por la normativa puede deberse a un corte de suministro eléctrico ya programado con anterioridad, debido a que se encuentran los valores máximos del factor de potencia de cada línea, superando los límites impuesto por la normativa NTCSD, pero de acuerdo al artículo 3-11 el cual establece que la empresa distribuidora debe de notificar al cliente junto con la próxima factura cuando detecta un incumplimiento de factor de potencia, esta situación del factor de potencia estando debajo del límite establecido por la normativa debió de ser informada por la empresa distribuidora.

3.2.4 Potencia activa, reactiva y aparente

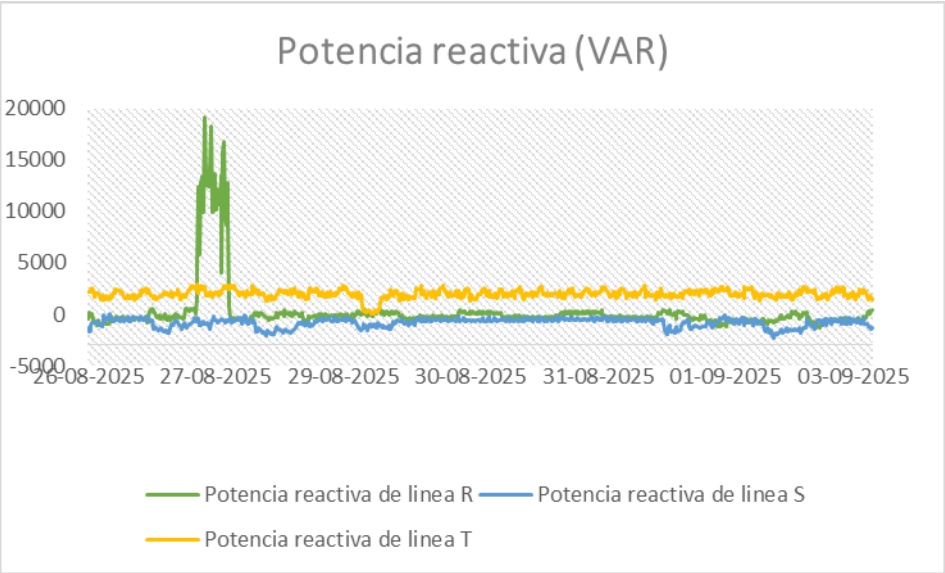
Finalizando con las variables eléctricas que midió el equipo Power Pad III AEMC, están las potencias activas, reactivas y aparentes del sistema eléctrico de distribución, dichos parámetros serán analizadas de igual manera en las tres líneas correspondientes.

Figura 3.14 Gráfico de la Potencia Activa



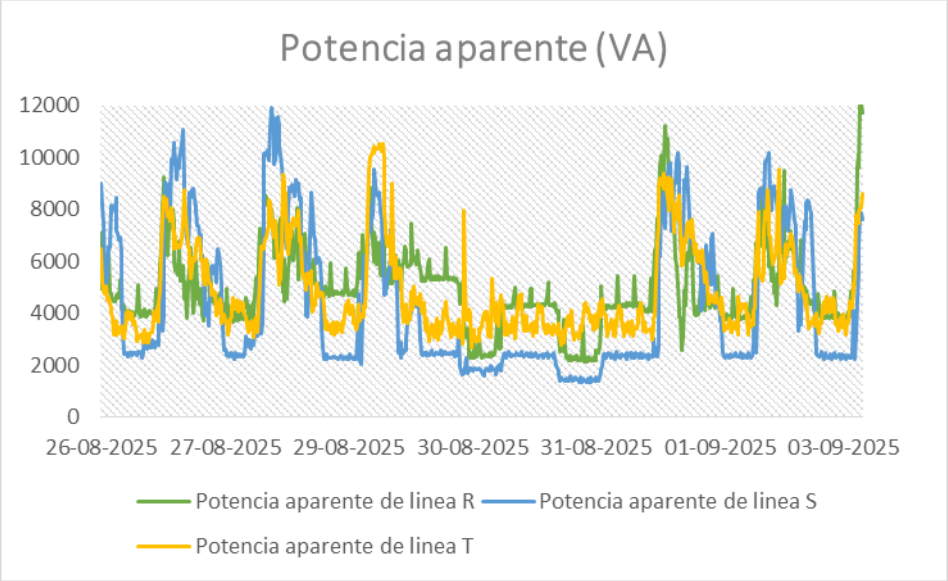
En la figura 3.14 se puede apreciar la variación que tiene la potencia activa en las tres líneas a lo largo del tiempo desde el primer día hasta el último día de medición, teniendo la línea R como dominante en cuanto al valor máximo de la potencia ubicándose en la fecha del 03 de Septiembre en su punto más alto de potencia activa. Por otro lado la línea S predomina en el valor mínimo de la potencia activa en el día 31 de Agosto, cabe resaltar que la distorsión de potencia que se muestra en las tres líneas de la figura 3.14, son relativamente diferentes.

Figura 3.15 Gráfico de la Potencia Reactiva



Para la figura 3.15 se muestra el gráfico de la potencia reactiva que circula por cada línea, aquí existe un caso en particular en el que se muestra que la potencia reactiva de la línea R, en la fecha del 27 de Agosto, se eleva a niveles muy alto llegando a un valor máximo de 19 kVAr, para después mantener una distorsión más similar a las líneas S y T con potencia reactiva más moderado. Esto podría deberse a un alto consumo de energía eléctrica durante ese día, mientras que las otras líneas se mantienen con una distorsión medianamente constante sin altas o bajas variaciones de potencia, siendo entonces la línea R que tiene la potencia reactiva más alta en el día 27 de Agosto, mientras que la línea S es la que llega a tener la potencia reactiva más baja entre los días 01 y 02 de Septiembre.

Figura 3.16 Gráfico de la Potencia Aparente



Y finalmente en la figura 3.16 se presenta el gráfico de la potencia aparente en cada una de las tres líneas, es decir en la línea R, S y T, junto al cambio que tiene entre el primer día y el último día del intervalo de tiempo en el que el equipo de medición estuvo analizando. En la potencia aparente de la línea R, se encuentra el valor máximo de este parámetro en el día 03 de Septiembre, mientras que el valor mínimo de la potencia aparente estaría predominando en la línea S en la fecha del 31 de Agosto.

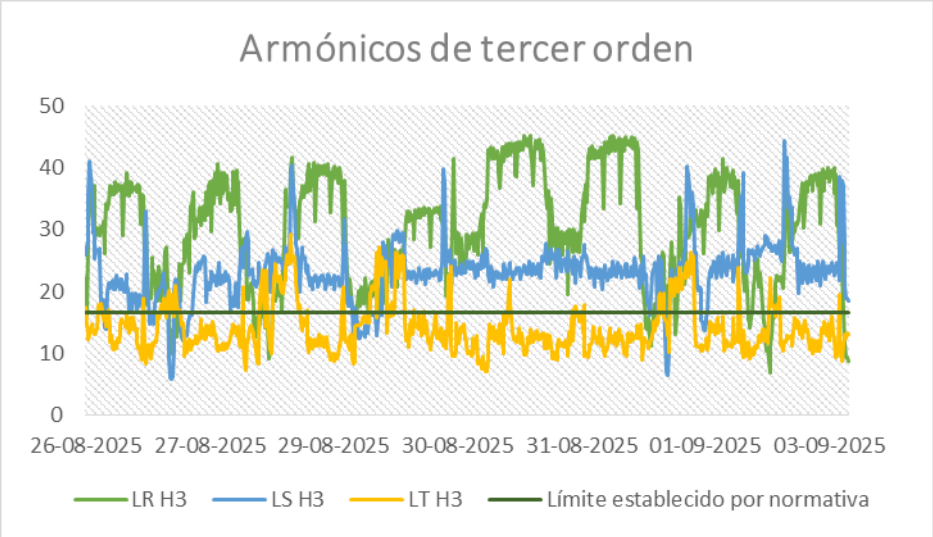
3.3 Análisis de armónicos de corrientes individuales e impares

Las distorsiones armónicas de corrientes es una de las perturbaciones que el equipo de medición Power Pad III AEMC registró en el periodo de tiempo en el que estuvo midiendo en el tablero de distribución que es alimentado por el transformador de 250 kVA, se analizarán los armónicos de corrientes individuales y de orden impares, desde la tercera orden hasta el vigesimoprimer orden de armónico debido a que es en donde se encontraron más variaciones y distorsiones estando también la armónica de corriente dominante de acuerdo a lo registrado por el equipo de medición, además se verá si cada armónico cumple con los límites establecidos por el artículo 3-8 de la normativa NTCSD.

3.3.1 Tercera armónica de corriente

La tercera armónica de corriente tiene un límite establecido por la normativa NTCSD de 16,6% debiendo de tener un 95% del tiempo de registro de medición y durante el periodo de tiempo en el cual el equipo de medición estuvo obteniendo los datos de todos los parámetros eléctricos del tablero de distribución alimentado por el transformador de 250 kVA, el power pad entregó los siguientes registros sobre la tercera armónica de corriente.

Figura 3.17 Armónicos de Tercer Orden



Se puede apreciar en la figura 3.17 que cada línea del sistema de distribución, tiene una distorsión armónica completamente diferente la una con la otra, en donde el punto más alto de la armónica de tercer orden es alcanzado por la línea R en la fecha del 31 de Agosto. Se observa que el armónico de tercer orden tiene un comportamiento variado dependiendo de la línea analizada, debido a que los armónicos de las líneas R y S en su mayoría superan con creces el límite del 16,6% establecido por la normativa NTCSD, a diferencia del armónico de la línea T que la mayor parte del tiempo se mantiene por debajo del límite del 16,6% superando tal límite solo en algunos momentos del periodo de tiempo en el que estuvo midiendo el power pad.

Se tienen las cantidades de los armónicos que sobrepasan el límite del 16,6% por cada línea, como también los que están por debajo de dicho límite.

La línea R tiene un total de 680 valores que sobrepasan el límite del 16,6% de un total de 739 valores registrados por el power pad, quedando con un total de 59 valores que están por debajo del 16,6% establecido por la normativa.

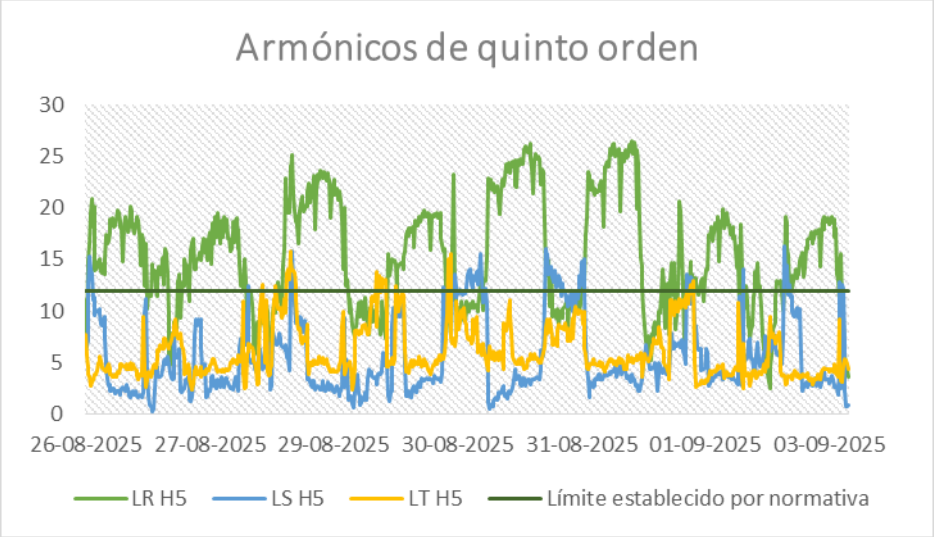
La línea S en cambio tiene 674 valores que sobrepasan el límite del 16,6% establecido por la norma, quedando con un total de 62 valores que están por debajo de dicho límite.

La línea T por último tiene un total de 139 valores que sobrepasan el límite del 16,6% marcando así la diferencia con respecto a las anteriores líneas, quedando con un total de 599 valores que están por debajo del límite.

3.3.2 Quinta armónica de corriente

La quinta armónica de corriente tiene un límite establecido por la normativa NTCSD diferente al de tercer orden, este sería de 12% debiendo de tener 95% del tiempo de registro de medición, a continuación se muestra los datos que fueron registrados por el power pad.

Figura 3.18 Armónicos de Quinto Orden



En la figura 3.18 se observa las diferentes distorsiones de armónicas que tienen cada línea, siendo la línea R que la mayor parte del tiempo su armónico sobrepasa el límite establecido por la norma, mientras que las línea S y T tienen sus armónicos debajo del límite solo superando el 12% en algunas fechas determinadas.

La línea R tiene 517 valores que sobrepasan el 12% quedando con 220 que se quedan por debajo de aquel límite.

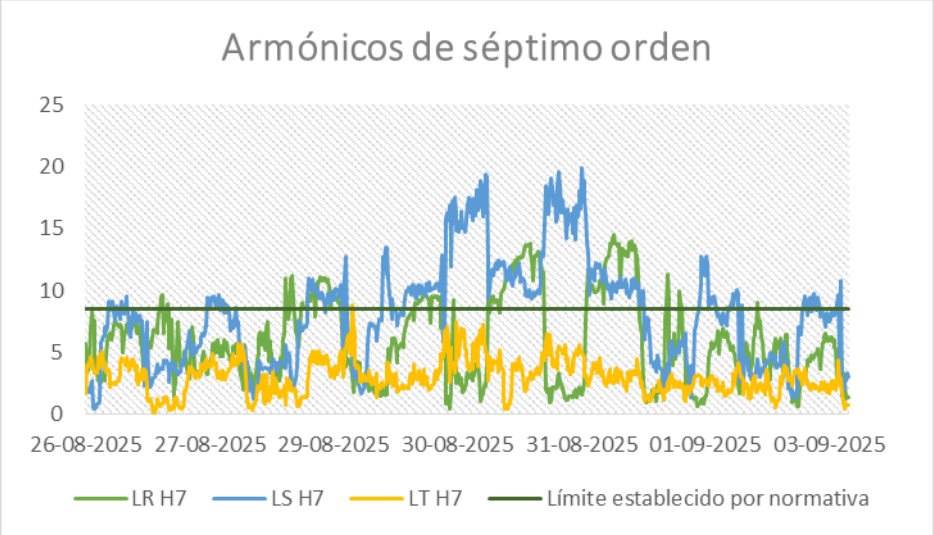
La Línea S tiene 70 valores que sobrepasan el 12% teniendo más valores que están por debajo del límite establecido por la norma NTCSD, siendo esta cantidad de 667 valores en total.

La Línea T en cambio tiene 24 valores que sobrepasan el 12% quedando con un total de 714 valores que están por debajo del límite ya mencionado.

3.3.3 Séptima armónica de corriente

Siguiendo con el análisis de los armónicos de corriente, la armónica de séptimo orden tiene un límite impuesto por la normativa NTCSD de 8,5% teniendo que estar dentro del 95% del tiempo de registro de medición. A continuación se muestra los registros de la séptima armónica medidas por el power pad.

Figura 3.19 Armónicos de Séptimo Orden



Como se puede observar en la figura 3.19 la línea R junto con la línea S son las que tienen más valores por encima del límite establecido por la normativa NTCSD, pero la mayor parte del tiempo tienden a estar por debajo de dicho límite.

La línea R tiene un total de 180 valores que sobrepasan los 8,5% de límite, quedando con 553 valores que están por debajo del límite ya mencionado.

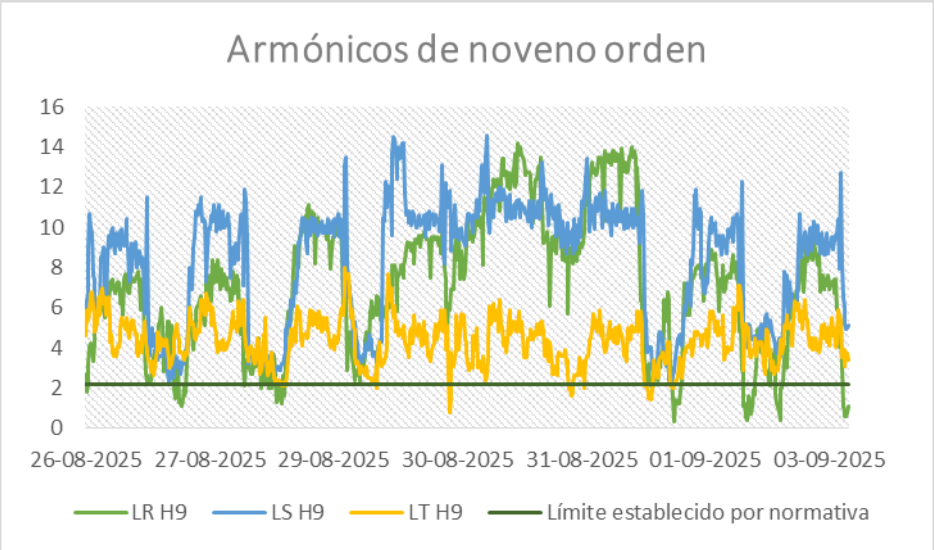
La línea S por otro lado tiene un total de 341 valores que sobrepasan el límite, estando con un total de 391 valores que están por debajo del límite establecido por la norma.

La línea T solo cuenta con un total de 1 valor que sobrepasa el 8,5% que establece la normativa, teniendo 738 valores que están por debajo del límite.

3.3.4 Novena armónica de corriente

La novena Armónica de corriente consta un con límite de 2,2% establecido por la normativa NTCSD, teniendo que ver si se está dentro del 95% del tiempo de registro de medición, se demuestra a continuación los armónicos de las tres líneas registrados por el power pad.

Figura 3.20 Armónicos de Noveno Orden



En la figura 3.20 se puede apreciar que las tres líneas superan la mayor parte del tiempo el límite establecido por la normativa NTCSD, teniendo solo pocos momentos en los que las líneas R y S se encuentran debajo del límite.

La línea R cuenta con un total de 673 valores que sobrepasan el límite del 2,2% de la normativa, quedando con 58 valores en total que están por debajo del límite ya mencionado con anterioridad.

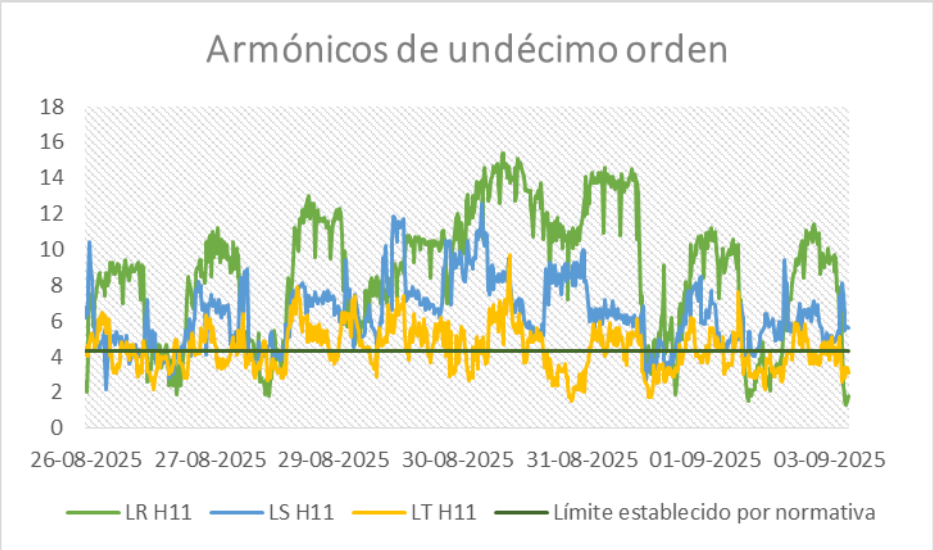
La línea S cuenta con un total de 738 valores que sobrepasan el límite, quedando con 0 valores que están por debajo del 2,2% debido a que tiene 1 valor que es igual al límite establecido por la normativa NTCSD.

La línea T por otro lado tiene 711 valores que están por encima del límite, contando con 24 valores que se encuentran debajo de los 2,2% establecidos por la normativa.

3.3.5 Undécima armónica de corriente

La armónica de undécimo orden tiene un límite de 4,3% establecido por la normativa NTCSD y teniendo que ver si está dentro del 95% del tiempo de registro, a continuación se muestran los registros que obtuvo el power pad dentro del periodo de medición.

Figura 3.21 Armónicos de Undécimo Orden



Como se puede observar en la figura 3.21 la distorsión armónica que tienen las tres líneas siguen siendo muy variadas y para esta ocasión, las tres líneas siguen estando por encima del límite establecido por la normativa la mayor parte del tiempo, estando por debajo de dicho límite solo pocos momentos de algunos días.

La línea R cuenta con un total de 626 valores que están por encima del 4,3% el cual es el límite que establece la norma NTCSD, quedando con 109 valores que se encuentran debajo de ese límite.

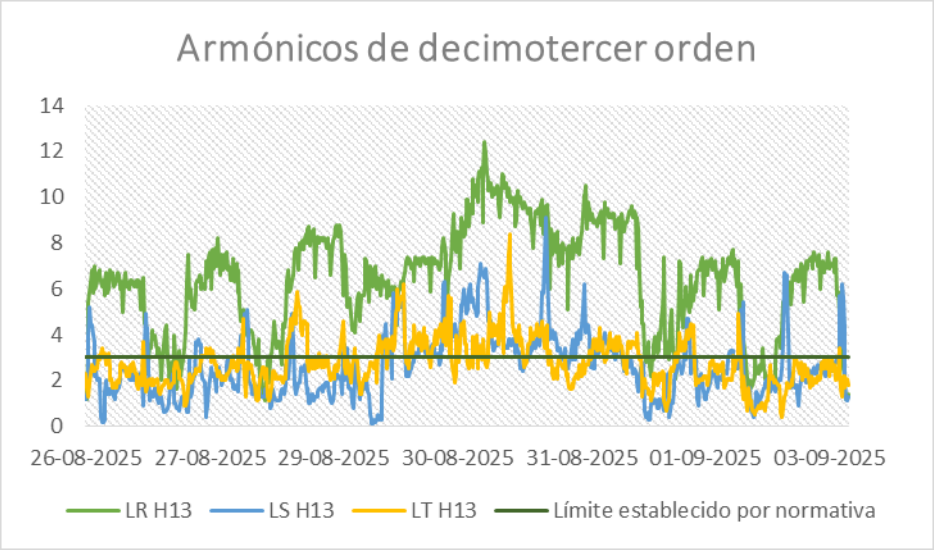
La línea S tiene un total de 640 valores que se encuentran por encima de límite ya mencionado con anterioridad, quedando con solo 86 valores que están por debajo del límite que establece la normativa NTCSD.

La línea T cuenta con 368 valores que están por encima del límite de 4,3% que establece la normativa, quedando con 349 valores que están por debajo del límite que impone la normativa NTCSD.

3.3.6 Decimotercera armónica de corriente

Continuando con el análisis de los armónicos de corriente, el límite que tiene esta orden es de 3,0% establecido por la normativa NTCSD, también se debe observar si están dentro del 95% del tiempo de registro de medición. A continuación se demostrará los registros que dejó el power pad en el periodo de medición.

Figura 3.22 Armónicos de Decimotercer Orden



Como se puede apreciar en la figura 3.22 los armónicos de las líneas S y T pasan la mayor parte del tiempo debajo del límite establecido por la normativa, teniendo un periodo de tiempo del día 30 a 31 de Agosto en el que estuvieron por encima del límite de la normativa NTCSD, mientras que la línea R estuvo la mayor parte del tiempo del periodo de medición por encima de los 3,0% que impone de límite la normativa.

La línea R tiene un total de 664 valores que están por encima del límite impuesto por la normativa NTCSD, quedando con 68 valores que se encuentran debajo de ese límite.

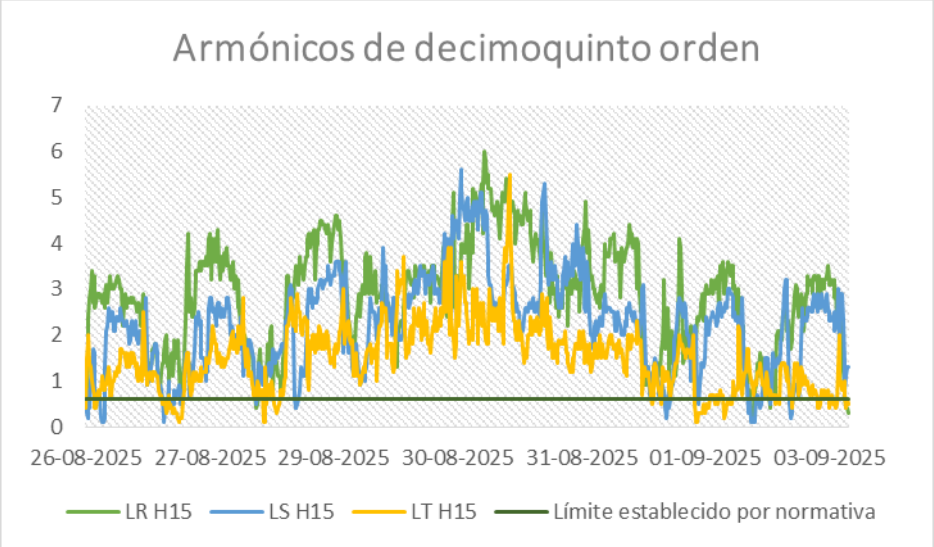
La línea S cuenta con un total de 249 valores que sobrepasan el límite de 3,0% que impone la norma, quedando con 471 valores que están por debajo del límite ya mencionado.

La línea T tiene un total de 250 valores que se encuentran por encima del límite establecido por la normativa, quedando con 472 valores que están por debajo del límite.

3.3.7 Decimoquinta armónica de corriente

Continuando con el análisis de los armónicos de corriente, la decimoquinta armónica de corriente consta con un límite de 0,6% impuesto por la norma NTCSD, teniendo que verificar si se encuentra dentro del 95% del tiempo de registro de medición, a continuación se entregará los registros que mostró el power pad.

Figura 3.23 Armónicos de Decimoquinto Orden



Se puede apreciar en la figura 3.23 que los armónicos de las tres líneas se encuentran superando los límites impuestos por la norma la mayor parte del tiempo, estando por debajo del 0,6% por algunos momentos.

La línea R cuenta con un total de 723 valores que sobrepasan el límite del 0,6% que impone la normativa NTCSD, quedando con 12 valores que están por debajo de ese límite.

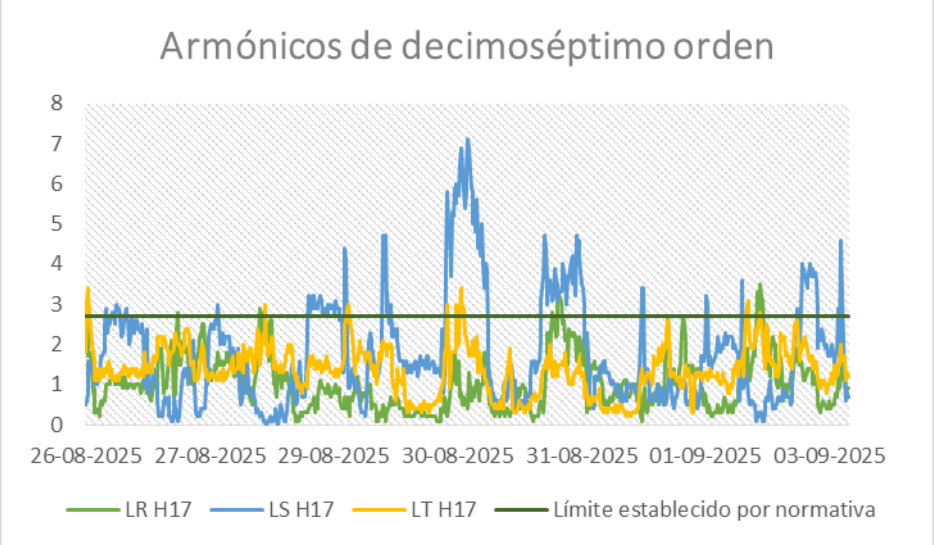
La línea S tiene un total de 685 datos que están por encima del límite impuesto por la normativa, quedando con 43 valores que se encuentra por debajo del 0,6% que impone la norma.

La línea T tiene 647 valores en total que superan el límite ya mencionado anteriormente, quedando con 68 valores que están por debajo de aquel límite impuesto por la normativa NTCSD.

3.3.8 Decimoséptima armónica de corriente

La decimoséptima armónica de corriente consta con un límite de 2,7% impuesto por la normativa NTCSD, para verificar si se encuentra dentro del 95% del tiempo de registro de medición, a continuación se muestra lo registrado por el equipo de medición dentro del periodo de medición.

Figura 3.24 Armónico de Decimoséptimo Orden



Tal y como se puede observar en la figura 3.24 la mayor parte del tiempo las tres líneas estuvieron debajo del límite establecido por la norma, pero la línea S tuvo un

incremento considerablemente alto en los días 29, 30 y 31 de Agosto, se elevó al punto de llegar a superar el límite impuesto por la norma.

La línea R tiene un total de 14 valores que superaron el límite, quedando con un total 720 valores que están por debajo de dicho límite, establecido por la normativa.

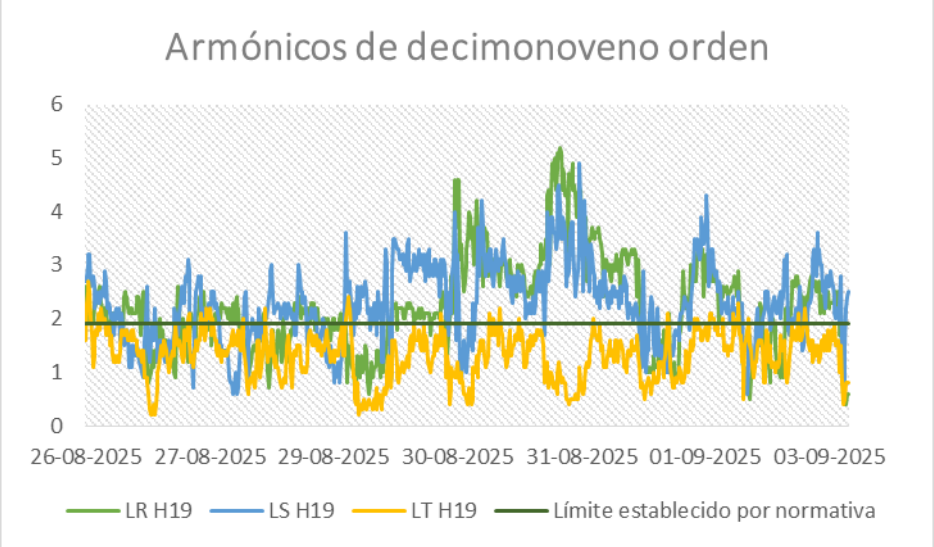
La línea S cuenta con un total de 154 valores que superan el límite mencionado anteriormente, teniendo un total de 576 valores que se encuentran debajo del límite de 2,7% que impone la norma.

La línea T consta con un total de 17 valores que se encuentran por encima del límite impuesto por la normativa NTCSD, teniendo un total de 721 valores que están por debajo del límite.

3.3.9 Decimonovena armónica de corriente

Siguiendo con el análisis de los armónicos de corriente, se tiene la decimonovena orden de armónico que cuenta con un límite de 1,9% impuesto por la normativa NTCSD, si se encuentra dentro del 95% del tiempo de registro, se mostrará lo registrado por el equipo de medición.

Figura 3.25 Armónico de Decimonoveno Orden



Como se puede apreciar en la figura 3.25 las líneas R y S son las que tienen constantes subidas de niveles en las distorsiones armónicas en todo el periodo de medición de siete

días, a diferencia de la línea T que en su mayoría se mantiene por debajo del límite impuesto por la normativa NTCSD.

La línea R tiene un total de 472 valores que superan el límite de 1,9% que impone la norma, quedando con 228 valores que están debajo del límite de la normativa.

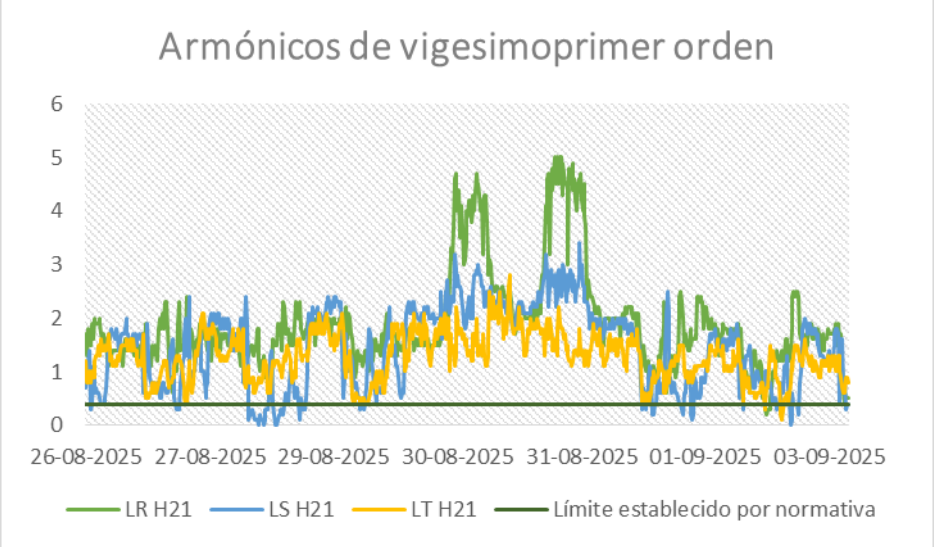
La línea S cuenta con un total 510 valores que superan el límite impuesto por la norma, teniendo un total de 201 valores que están debajo del límite de 1,9% que impone la normativa.

La línea T contiene un total de 50 valores que superan el límite de 1,9% impuesto por la normativa NTCSD, superando tal cantidad de valores con un total de 664 valores que están por debajo del límite.

3.3.10 Vigesimoprimer armónica de corriente

Finalizando con el análisis de cada armónico por individual, el armónico de vigesimoprimer orden tiene un límite de 0,4% impuesto por la normativa NTCSD, para ver que se encuentra dentro del 95% del tiempo de registro de medición, a continuación se muestra los registros que obtuvo el power pad.

Figura 3.26 Armónico de Vigesimoprimer Orden



Como se puede ver en la figura 3.26 los armónicos de las tres líneas sobrepasan con creces los límites impuestos por la normativa la mayor parte del tiempo.

La línea R cuenta con un total de 733 valores que sobrepasan el límite impuesto por la normativa, teniendo solo un total de 5 valores que están por debajo del 0,4% impuesto por la norma NTCSD.

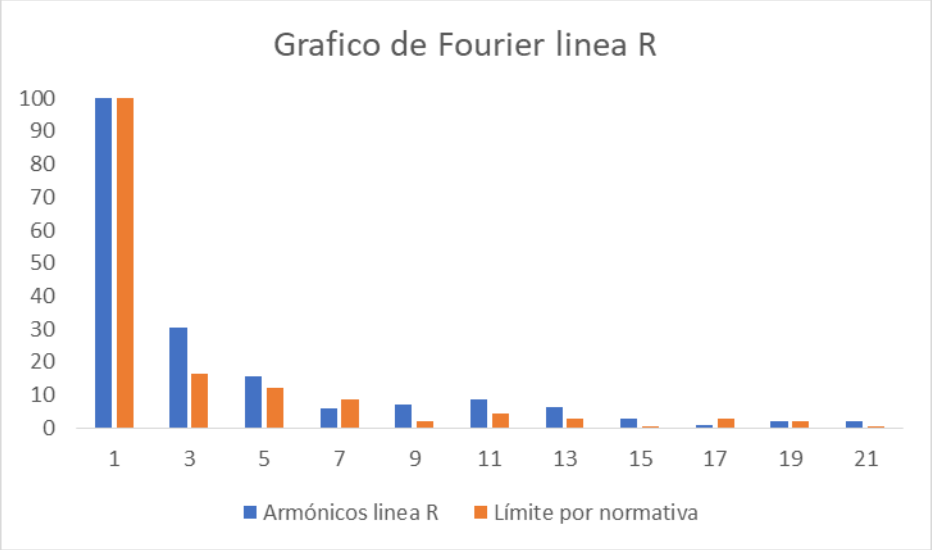
La línea S tiene un total de 652 valores que superan el límite impuesto por la normativa, manteniendo un total de 56 valores que están por debajo de dicho límite.

La línea T finalmente consta de 718 valores que sobrepasan el límite de 0,4% impuesto por la normativa NTCSD, quedando solamente con 5 valores que están por debajo de dicho límite al tener varios valores que son iguales al mismo límite.

3.4 Gráficos de espectro de Fourier

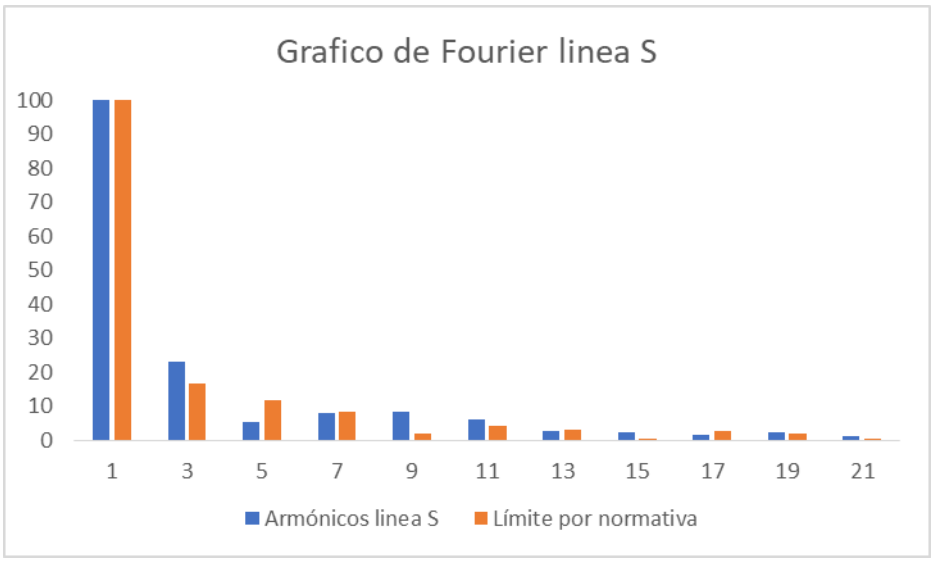
Para observar que la tercera armónica es la dominante en las tres líneas del sistema eléctrico, se realizaron gráficos de barras con el cual puedan medirse los límites de la normativa NTCSD, teniendo las órdenes de cada armónico impar por otro lado.

Figura 3.27 Gráfico de Espectro Fourier Línea R



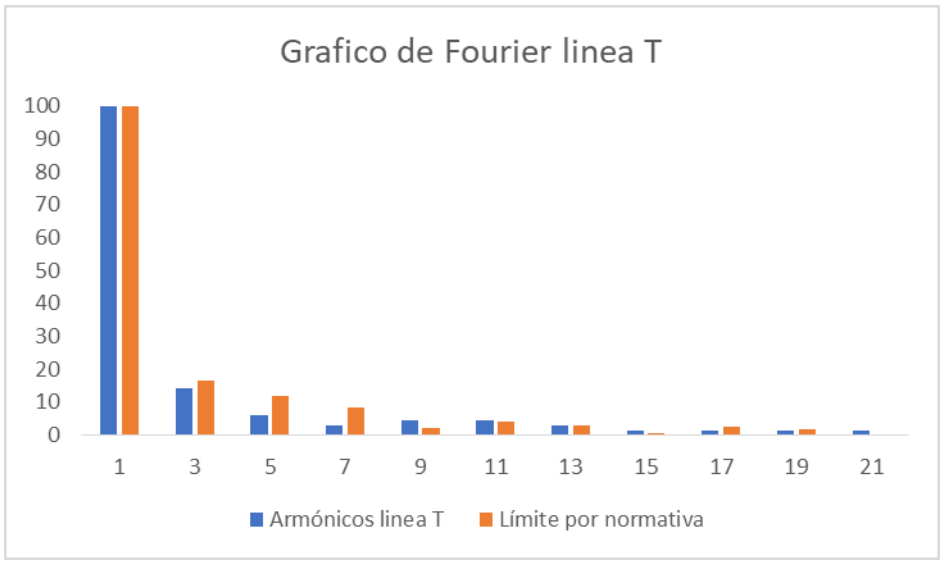
En la figura 3.27 se muestra de mejor manera los armónicos de la línea R, que la primera armónica está funcionando al 100% para después pasar a la tercera armónica, siendo esta la dominante en comparación a todos los otros armónicos de corriente ya que consta un porcentaje elevado a diferencia de las otras órdenes, llegando a tener un 30,472% de cantidad de armónico.

Figura 3.28 Gráfico de Fourier de corriente Línea S



En este caso se presenta algo similar que en el gráfico anterior, debido a que en la figura 3.2 el gráfico de Fourier de la línea S muestra que los armónicos tienen una secuencia similar, la tercera armónica sigue siendo la dominante con un total de 23,096% superando a todas las otras órdenes de armónicas.

Figura 3.29 Gráfico de Fourier Línea T



Finalmente se presenta en la figura 3.29 el gráfico de Fourier de la línea T, en el que se muestra que la tercera orden de armónica cuenta con un 14,077%.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ENERGÍA

En el presente capítulo 4 se abarcarán la evaluación de la calidad de energía del sistema eléctrico de distribución, verificando que cada parámetro obtenido por el instrumento de medición Power Pad III AEMC, cumpla con los límites establecidos por las dos normativas de calidad de energía siendo la NTCSD 2024 (Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución) y la NTSyCS 2025 (Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio), calculando las regulaciones de tensiones con los valores promedios y nominales del parámetro eléctrico mencionado, calculando las distorsiones armónicas totales e individuales de corrientes y voltajes, para finalmente obtener las distorsiones de demanda total de las líneas R, S y T.

4.1 Evaluación de las tensiones de fases

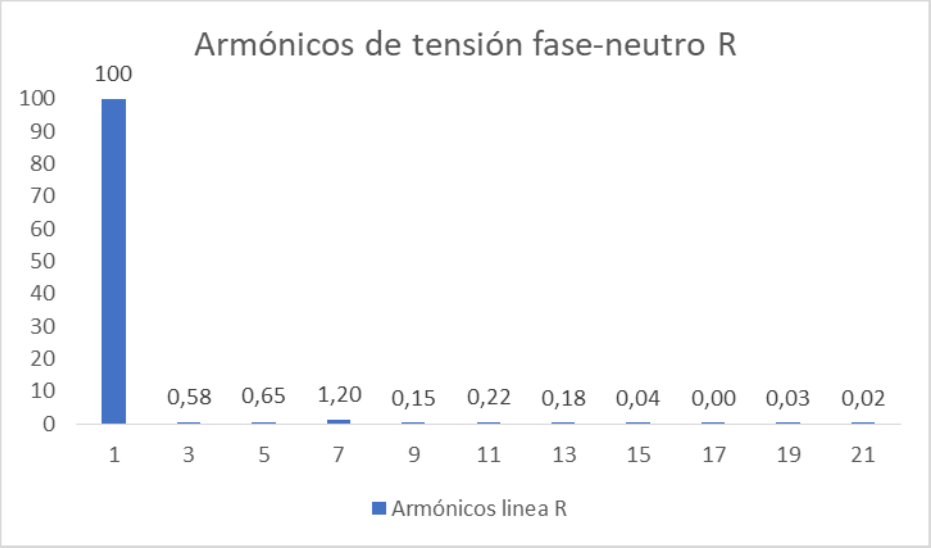
Para averiguar si los voltajes de las tres fases se encuentran dentro de los límites establecidos por las normativas mencionadas con anterioridad, se necesitan los valores mínimo, máximo y promedio de las tensiones de fase entre neutro, esto con el fin de poder calcular las regulaciones de tensiones que darán valores expresados en porcentajes.

Tabla 4.1 Límites de Tensión de Fase R, S y T entre Neutro

Tensiones de Fase	**V-N rms Fase R**	**V-N rms Fase S**	**V-N rms Fase T**
Valores Máximos	**238,8 V**	**239,7 V**	**238,6 V**
Valores Promedios	**234,4 V**	**235,02 V**	**233,8 V**
Valores Mínimos	**226,7 V**	**226,2 V**	**225 V**

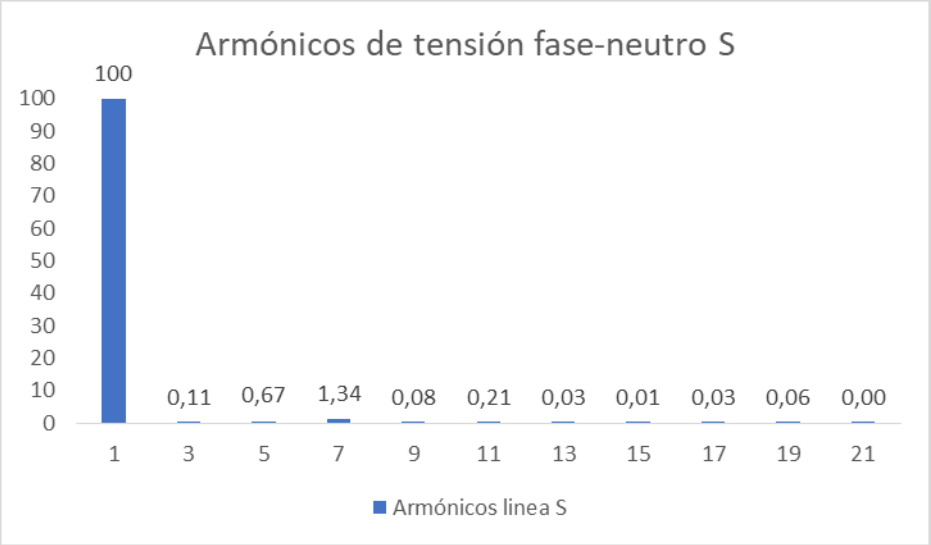
Como se puede apreciar en la tabla 4.1 los valores máximos de la tensión en las tres fases, superan los límites establecidos por la normativa siendo este de 236,5 V mientras que los valores mínimos de las tres fases, no llegan a estar por debajo del límite establecido por la normativa el cual es de 203,5 V.

Figura 4.1 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro R



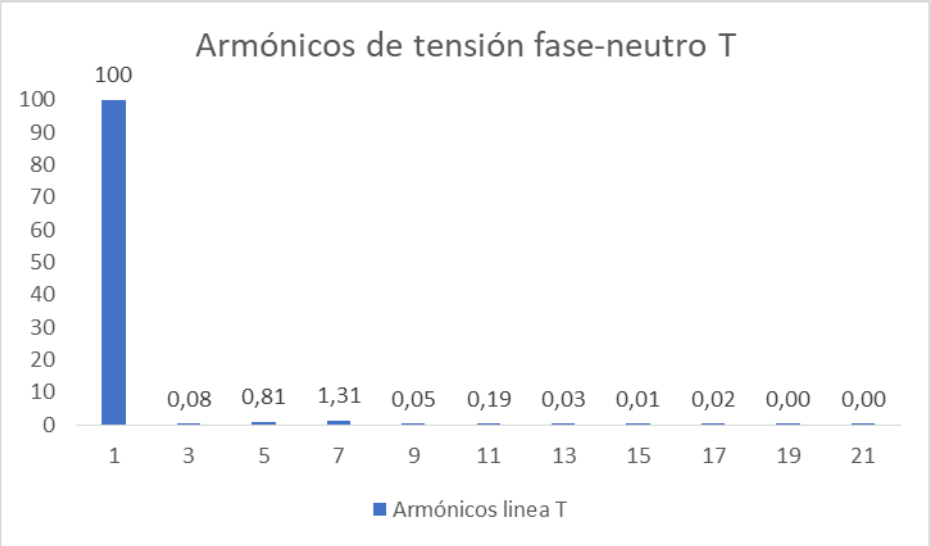
En la figura 4.1 es presentado el gráfico de los porcentajes de los armónicos individuales de V-N de la fase R, en el que los valores son tan pequeños para cada orden de armónico que no generan una inestabilidad en el sistema y tampoco hay riesgo de que ocurra alguna falla eléctrica en comparación a la orden de armónicos de corrientes.

Figura 4.2 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro S



En la figura 4.2 se puede apreciar que de igual manera que en la fase anterior, los armónicos individuales de V-N de la fase S, tienen un valor muy bajo tanto que no llegan a presentar un riesgo para el sistema eléctrico de distribución.

Figura 4.3 Gráfico de Armónicos de Tensión Fase-Neutro T



Finalmente en la figura 4.3 se muestran las mismas condiciones que en las fases anteriores, los armónicos individuales de V-N de la fase T tienen un porcentaje muy

bajo cada orden de armónico lo que no llega a presentar un riesgo para el sistema eléctrico de distribución.

4.1.1 Regulación de tensión de fase R, S y T entre neutro

Teniendo los valores promedios de las tensiones de las tres fases, junto al voltaje nominal establecido por la normativa el cual es de 220 V se puede hallar finalmente las regulaciones de voltajes que servirán para mantener bajo control la tensión y sus variaciones en el sistema eléctrico.

$$\text{Fase R } \Delta V_k = \frac{|234{,}4 - 220|}{220} \times 100\% = 6{,}54\%$$

$$\text{Fase S } \Delta V_k = \frac{|235{,}02 - 220|}{220} \times 100\% = 6{,}82\%$$

$$\text{Fase T } \Delta V_k = \frac{|233{,}8 - 220|}{220} \times 100\% = 6{,}27\%$$

De acuerdo a lo calculado con las regulaciones de tensiones, las tres fases tienen un porcentaje inferior al límite impuesto por la normativa NTCSD el cual es de ±7,5% lo que indica que cumple con una de las condiciones que rige la norma.

La tensión V-N rms de la fase R tiene un total de 133 valores que están por encima del límite impuesto por la normativa NTCSD, quedando con 595 valores que se encuentran debajo de ese límite máximo, mientras que cuenta con 0 valores que están por debajo del límite mínimo establecido por la norma.

La tensión V-N rms de la fase S cuenta con un total de 269 valores que sobrepasan el límite de 236,5 V que impone la norma, quedando con 460 valores que están por debajo del límite ya mencionado, también cuenta con 0 valores que están por debajo del límite mínimo de 203,5 V que impone la normativa NTCSD.

La tensión V-N rms de fase T tiene un total de 136 valores que se encuentran por encima del límite establecido por la normativa, quedando con 590 valores que están por debajo del límite, finalizando esta evaluación con 0 valores que están por debajo del límite mínimo impuesto por la norma.

De acuerdo a los valores que están por encima y debajo de los límites ya sean máximos o mínimos que impone la normativa NTCSD, existen varios datos que se encuentran dentro de los límites de la regulación de voltaje calculada por cada fase, entonces para evaluar finalmente que cumplan con lo impuesto por la normativa mencionada el cual indica que tienen que estar dentro de un 95% del tiempo de medición, a continuación se realizarán los cálculos de los porcentajes de la tensión de las fases R, S y T.

Se sabe que para la fase R se tienen 133 valores que están por encima del límite de los 236,5 V que impone la norma, a la par de que se midieron un total de 739 valores.

$$x = \left(\frac{133}{739}\right) \times 100\% = 17{,}99\%$$

Eso quiere decir que solo el 82,01% de los valores medidos se encuentran dentro del rango establecido por la norma NTCSD mientras que el 17,99% están fuera de rango, por lo que gracias a los cálculos se puede confirmar que no cumple con la normativa NTCSD.

Por otro lado para la fase S se tienen 269 valores que están por encima del límite de los 236,5 V junto con el total de los 739 valores medidos.

$$x = \left(\frac{269}{739}\right) \times 100\% = 36{,}40\%$$

Gracias a este cálculo se sabe que solo el 63,6% de los valores medidos están dentro del rango establecido por la norma NTCSD, mientras que el 36,40% está fuera de rango, por lo que tampoco cumple con la normativa NTCSD.

Finalmente la fase T cuenta con 136 valores que están fuera del rango límite de los 236,5 V junto con el total de los 739 valores medidos.

$$x = \left(\frac{136}{739}\right) \times 100\% = 18{,}40\%$$

Esto quiere decir que el 81,6% de los valores medidos se encuentran dentro del rango límite establecido por la normativa NTCSD, mientras que el 18,40% está fuera de rango, por lo que la fase T tampoco cumple con la norma.

Tabla 4.2 Datos Recopilados de la Regulación de Tensión

Tensiones de Fases	V-N rms Fase R	V-N rms Fase S	V-N rms Fase T
Datos Totales Medidos	739		
Valores Fuera de Rango	133	269	136
Valores Dentro de Rango	595	460	590
Porcentaje de Tiempo Dentro del Límite	82,01%	63,6%	81,6%
Porcentaje de Tiempo Fuera del Límite	17,99%	36,40%	18,40%
Cumple con Límite NTCSD	No Cumple	No Cumple	No Cumple

En la tabla 4.2 se puede apreciar que las tres fases están por debajo del límite del 95% del tiempo de la medición, por lo que ninguna de las tres fases cumple con lo establecido por el artículo 3-1 de la normativa NTCSD.

4.2 Análisis de distorsiones armónicas de voltajes y corrientes

Para seguir evaluando la calidad de energía en este sistema de distribución eléctrica, se deben de verificar que las distorsiones armónicas totales de voltajes (THD_v) y corrientes (THD_i) cumplan con los límites establecidos por el artículo 3-5 y 3-8 de la normativa NTCSD, también se deben observar las distorsiones armónicas individuales

de voltaje (Dvj) y de corriente (Dij), para saber si cumplen con la norma NTCSD. Además se debe de calcular el total de demanda de distorsión de corriente (TDD_i) y también verificar que cumpla con los límites establecidos por la normativa NTCSD.

4.2.1 Distorsión armónica total de voltaje (THD_v)

Para analizar y evaluar la distorsión armónica total de voltaje se tendrá de referencia los límites impuestos por el artículo 3-5 de la NTCSD, cuyos indicadores son para la distorsión armónica de la tensión tanto individual como total, con su respectivo método de cálculo.

El artículo 3-5 de la NTCSD indica que para el caso de sistemas trifásicos de cuatro conductores, la medición deberá realizarse considerando como referencia la tensión fase-neutro, además en estado normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de registro, los valores eficaces de cada tensión armónica individual promediados en 15 minutos, deberán ser menores o iguales a los límites indicados en la siguiente tabla:

Tabla 4.3 Límites para Índices de Distorsión Armónica Individual de Tensión Fundamental

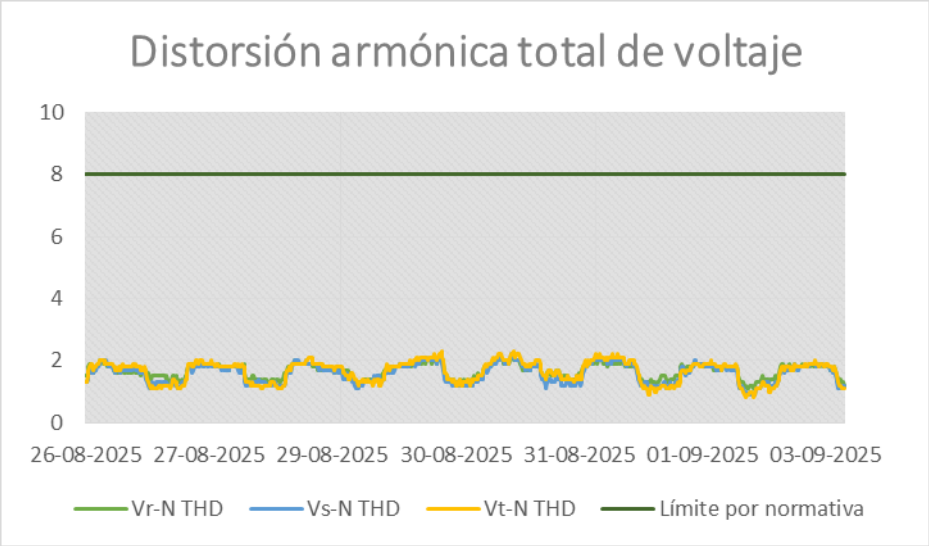
Armónicas impares no múltiplos de 3		**Armónicas impares múltiplos de 3**		**Armónicas pares**	
Orden	**Armónica tensión (%)**	**Orden**	**Armónica tensión (%)**	**Orden**	**Armónica tensión (%)**
5	**6**	**3**	**5**	**2**	**2**
7	**5**	**9**	**1.5**	**4**	**1**
11	**3.5**	**15**	**0.3**	**6**	**0.5**
13	**3**	**21**	**0.2**	**8**	**0.5**

17	**2**	**>21**	**0.2**	**10**	**0.5**
19	**1.5**			**12**	**0.2**
23	**1.5**			**>12**	**0.2**
>25	**1.5**				

Fuente: NTCSD (2024)

La tabla 4,3 muestra los límites que impone la normativa NTCSD para la distorsión armónica individual de tensión con respecto a las órdenes ya sean pares, impares no múltiplos de 3 o impares múltiplos de 3.

Figura 4.4 Gráfico de Distorsión Armónica Total de Voltaje



En la figura 4.4 se puede apreciar el THD del V-N por cada fase, R, S y T, junto al THD limitado por la normativa NTCSD del año 2024, ninguna de las fases mencionadas supera el límite del 8% por lo que la distorsión armónica total de tensión para las tres fases, se encuentra cumpliendo con el artículo 3-5 de la norma.

Los valores THD de cada fase entregados por el equipo de medición power pad III AEMC, se mostrarán a continuación en la siguiente tabla, datos que no superan el límite máximo de 8% impuesto por la normativa.

Tabla 4.4 Límites de Distorsión Total de Armónico de Tensión por Fases

THD_v de Fases	THD_v Fase R	THD_v Fase S	THD_v Fase T
Valores Máximos	2,1%	2,2%	2,3%
Valores Promedios	1,66%	1,59%	1,65%
Valores Mínimos	1,1%	0,9%	0,8%

En la tabla 4.4 se puede apreciar los valores máximos, mínimos y promedios de las fases R, S y T, demostrando que no existe ninguna línea que tenga un THD de voltaje fuera del rango establecido por la NTCSD.

Tabla 4.5 Resultado de THD de Tensión del Sistema

Límite Establecido por NTCSD	8%
Valores Fuera de Rango	0
Valores Dentro de Rango	739
Porcentaje de Tiempo Dentro de Rango	100%
Cumple con Límite NTCSD	Cumple

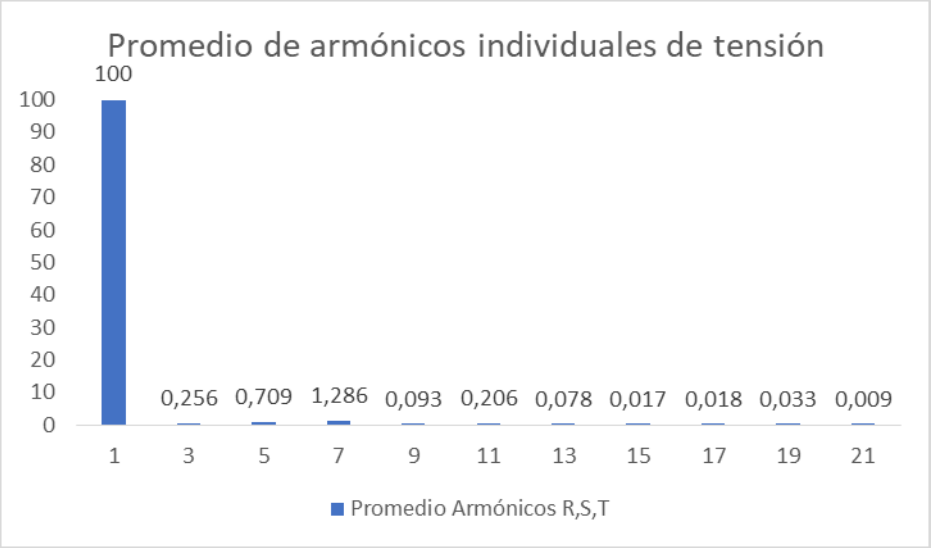
En la tabla 4.5 se puede apreciar el resultado del THD_v en el que no existe ningún valor que esté fuera del rango de 8% que está como límite impuesto por la normativa NTCSD, teniendo un porcentaje de tiempo dentro de rango de 100% al tener todos los

valores medidos dentro del rango, lo que significa que el THD_v cumple con la normativa.

4.2.2 Distorsión armónica individual de voltaje (Dvj)

Para analizar la distorsión armónica individual de voltaje también se tomará en cuenta el artículo 3-5 de la NTCSD, cuyos límites están impuestos por cada orden de armónico y también debe de respetar el 95% del tiempo total de medición. Se evaluarán los armónicos de orden impar tanto múltiplos de 3 como no múltiplos de 3, junto con el promedio de las tres fases.

Figura 4.5 Promedio de Dvj del Sistema



En la figura 4.5 se muestra el promedio de la distorsión armónica individual de tensión, de las líneas R, S y T, valores que son tan bajos que no llegan a acercarse al límite establecido por la normativa NTCSD de cada orden de armónico, manteniéndose dentro del rango impuesto por la norma y cumpliendo con los límites.

Tabla 4.6 Resultado de Dvj Promedio de Líneas R, S y T

Orden de Armónicos Impares Evaluados	Dvj H3	Dvj H5	Dvj H7	Dvj H9
Límite Establecido	**5%**	**6%**	**5%**	**1,5%**
Valores Fuera de Rango	**0**	**0**	**0**	**0**

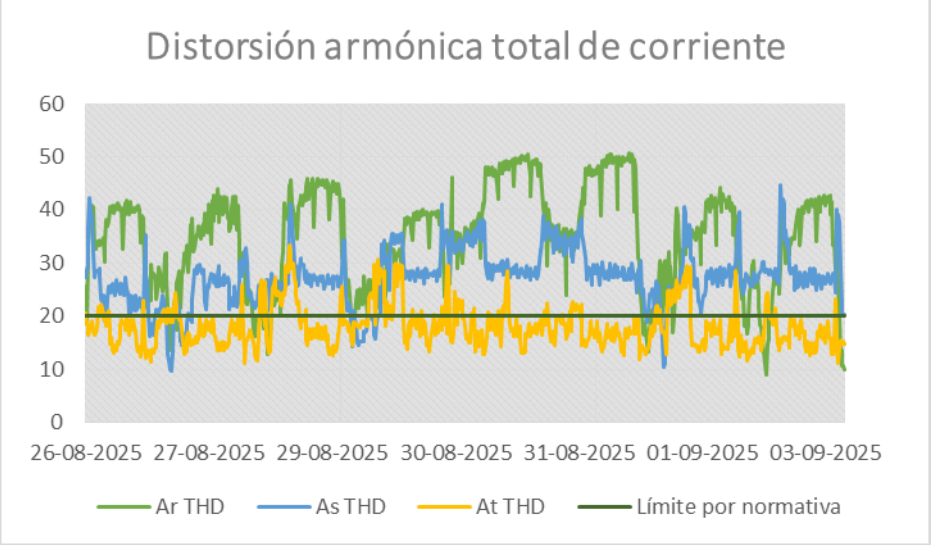
Valores Dentro de Rango	**739**	**739**	**739**	**739**
Porcentaje de Tiempo de Dentro de Rango	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**
Cumple con Límite NTCSD	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**

En la tabla 4.6 se puede apreciar cómo los armónicos individuales de voltaje se encuentran dentro del rango de medición exigido por la NTCSD para el sistema eléctrico del sector evaluado en la universidad de atacama, por lo que se encuentra cumpliendo con la normativa, los valores de la orden de armónicos de la undécima hasta la vigesimoprimer armónica se desprecian en la tabla debido a su bajo porcentaje.

4.2.3 Distorsión armónica total de corriente (THD_i)

Otro de los datos que hay que saber para evaluar la calidad de energía, es la distorsión armónica total de corriente, la cual se estará tomando de referencia el artículo 3-8 de la NTCSD para el límite máximo que es de 20% con respecto THD_i, además se tiene que cumplir el 95% del tiempo total de registro.

Figura 4.6 Gráfico de Distorsión Armónica Total de Corriente



En la figura 4.6 se muestra el gráfico del THD_i de las líneas R, S y T, en el que las ondas de las tres líneas sobrepasan varias veces el límite impuesto por la normativa, siendo la línea T la que más suele mantenerse dentro del rango del 20% máximo.

La línea R junto con la línea S son las que más lejanas estuvieron del límite establecido por la norma en algunos momentos de la medición, pero algunas veces también se encontraron debajo del 20% máximo que está como límite.

La línea R cuenta con 681 valores que sobrepasan el límite máximo de 20% impuesto por la normativa, mantiene también 54 valores que están por debajo del límite siendo este un 7,85% del tiempo de registro.

La línea S tiene 684 datos que sobrepasan el límite, contando con solo 53 valores que están por debajo del límite impuesto por la norma NTCSD lo que equivale al 7,17% del tiempo de registro.

La línea T por último tiene 160 valores que sobrepasan el límite del 20% que impone la normativa, contando con 577 datos que están por debajo del límite lo que se traduce en un 78,07% del tiempo de registro.

Tabla 4.7 Límites de Distorsión Total de Armónico de Corriente por Líneas

THD_i de Líneas	**THD_i Línea R**	**THD_i Línea S**	**THD_i Línea T**
Valores Máximos	**50,7%**	**44,6%**	**33,4%**
Valores Promedios	**35,02%**	**27,38%**	**18,06%**
Valores Mínimos	**8,9%**	**9,6%**	**11%**

En la tabla 4.7 se muestran los valores THD_i de las tres líneas tanto el máximo, mínimo como el promedio registrado por el instrumento de medición, valores que fueron representados en porcentajes lo que permite identificar que el THD_i de las tres líneas se encuentran fuera de los límites que establece el artículo 3-8 de la norma NTCSD, ya que no cumplen con el 95% del tiempo de medición y también las tres líneas tienen más valores que superan el límite de 20% establecido por la norma ya mencionada.

Tabla 4.8 Resultado de THD de Corriente del Sistema

Líneas	R	S	T
Valores Fuera de Rango	681	684	160
Valores Dentro de Rango	54	53	577
Porcentaje de Tiempo Dentro de Rango	7,30%	7,17%	78,07%
Porcentaje de Tiempo Fuera de Rango	92,7%	92,83%	21,93%
Cumple con Límite NTCSD	No Cumple	No Cumple	No Cumple

En la tabla 4.8 se muestran los resultados del THD_i del sistema, en el que los porcentajes que están dentro del rango de tiempo de registro, no alcanzan a cumplir con el 95% impuesto por la normativa NTCSD, por lo que no cumplen con los estándares que impone la norma ya mencionada.

4.2.4 Distorsión armónica individual de corriente (Dij)

La distorsión armónica individual de corriente de las líneas R, S y T, de acuerdo a lo mostrado por los gráficos del espectro de Fourier de las figuras 3.27 al 3.29 tiene valores que dejan evaluar si cada orden de armónico de cada línea del sistema de distribución, cumple con los límites impuestos por la normativa NTCSD.

Tabla 4.9 Resultado de Dij de la Línea R

Armónicos Impares	Límite Establecido (%)	Promedio (%)	Promedio $(\%)^2$	Cumple Limite NTCSD
1		100		
3	16,6	30,47	928,5	NO
5	12	15,5	240,3	NO

7	**8,5**	**5,9**	**35,1**	**NO**
9	**2,2**	**7,14**	**51,05**	**NO**
11	**4,3**	**8,81**	**77,77**	**NO**
13	**3**	**6,46**	**41,76**	**NO**
15	**0,6**	**2,87**	**8,28**	**NO**
17	**2,7**	**1,03**	**1,06**	**SI**
19	**1,9**	**2,24**	**5,04**	**NO**
21	**0,4**	**1,91**	**3,65**	**NO**

Se sabe que desde la tercera armónica de corriente hasta la decimoquinta orden de armónica, los valores promedios superan al límite establecido por la normativa NTCSD, al igual que desde la decimonovena armónica hasta la vigesimoprimer orden de armónica de corriente tampoco cumplen con la normativa NTCSD, siendo solo la decimoséptima orden de armónica de corriente la que cumple con el límite de la NTCSD al tener un promedio debajo del porcentaje límite que impone la norma, toda esta evaluación se puede apreciar de mejor manera en la figura 3.27 en el que se muestra el gráfico de los promedios de los armónicos de corrientes de la línea R junto al límite de cada armónica de corriente impuesta por la normativa.

Tabla 4.10 Resultado de Dij de la Línea S

Armónicos Impares	**Límite Establecido (%)**	**Promedio (%)**	**Promedio** $(\%)^2$	**Cumple Limite NTCSD**
1		**100**		
3	**16,6**	**23,1**	**533,4**	**NO**
5	**12**	**5,54**	**30,75**	**SI**
7	**8,5**	**8,17**	**66,77**	**SI**
9	**2,2**	**8,31**	**69,12**	**NO**
11	**4,3**	**6,36**	**40,51**	**NO**
13	**3**	**2,63**	**6,94**	**SI**
15	**0,6**	**2,23**	**4,99**	**NO**
17	**2,7**	**1,78**	**3,18**	**SI**
19	**1,9**	**2,27**	**5,16**	**NO**
21	**0,4**	**1,44**	**2,09**	**NO**

En la tabla 4.10 se puede apreciar los resultados de la distorsión armónica individual de corriente de la línea S, en el que la tercera orden de armónica de corriente junto con la novena, undécima, decimoquinta, decimonovena y vigesimoprimer orden de armónicos de corrientes, tienen un porcentaje que supera al límite establecido por la normativa NTCSD por lo que no cumplen con los estándares impuestos por la norma

ya mencionada, mientras que la quinta armónica junto con la séptima, decimotercera y decimoséptima orden de armónico de corriente, si cumplen con los estándares impuestos por la norma ya mencionada, al igual que los resultados de la línea R, los resultados de la distorsión armónica individual de corriente de la línea S se pueden apreciar de mejor manera en el gráfico de la figura 3.28 del capítulo 3 de este proyecto.

Tabla 4.11 Resultado de Dij de la Línea T

Armónicos Impares	Límite Establecido (%)	Promedio (%)	Promedio $(\%)^2$	Cumple Limite NTCSD
1		100		
3	16,6	14,08	198,2	SI
5	12	6,03	36,44	SI
7	8,5	3,02	9,14	SI
9	2,2	4,36	19,01	NO
11	4,3	4,43	19,63	NO
13	3	2,78	7,77	SI
15	0,6	1,50	2,26	NO
17	2,7	1,37	1,87	SI
19	1,9	1,32	1,76	SI
21	0,4	1,28	1,64	NO

Finalmente en la tabla 4.11 se muestran los resultados de la distorsión armónica individual de corriente de la línea T, en el que en comparación a las otras dos líneas anteriores, en esta línea la tercera armónica de corriente si cumple con los estándares de la normativa NTCSD al tener un porcentaje menor al límite que impone la norma ya mencionada, esto se repetiría junto con la quinta armónica, la séptima, la decimotercera, la decimoséptima y la decimonovena orden de armónica de corriente, mientras que la novena armónica junto con la undécima, decimoquinta y vigesimoprimer orden de armónica de corriente tendrían un porcentaje mayor al límite impuesto por la normativa, por lo que no cumplirían con los estándares de la normativa NTCSD, esta evaluación se puede apreciar de mejor manera en el gráfico de la figura 3.29 del capítulo 3 de este proyecto.

4.2.5 Distorsión de demanda total (TDD_i) líneas R, S y T

Una vez que ya se evaluaron las distorsiones de armónicos individuales de corriente de cada línea y teniendo una corriente de carga estimada de 100 A, se puede calcular la distorsión de demanda total de las líneas R, S y T. Teniendo en cuenta que los porcentajes promedios de cada armónico de corriente fueron elevados al cuadrado, el TDDi de cada línea será calculado a continuación comenzando por la línea R.

- TDD_i de la línea R.

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{928{,}5 + 240{,}3 + 35{,}1 + 51{,}05 + 77{,}77 + 41{,}76 + 8{,}28 + \cdots + 3{,}65}}{100}$$

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{1392{,}51}}{100} \times 100 = 37{,}31\%$$

Tabla 4.12 Resultados del TDD_i Línea R

Armónicos Impares	**Promedio** $(\%)^2$	**TDD_i (%)**
1		**37,31**
3	**928,5**	
5	**240,3**	
7	**35,1**	
9	**51,05**	
11	**77,77**	
13	**41,76**	
15	**8,28**	
17	**1,06**	
19	**5,04**	
21	**3,65**	

En la tabla 4.12 se puede apreciar el promedio de todos los armónicos que se ocuparon para el cálculo de la distorsión de demanda total de la línea R, junto con el resultado en porcentaje.

- TDD_i de la línea S

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{533{,}4 + 30{,}75 + 66{,}77 + 69{,}12 + 40{,}51 + 6{,}94 + 4{,}99 + \cdots + 2{,}09}}{100}$$

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{762{,}91}}{100} \times 100 = 26{,}62\%$$

Tabla 4.13 Resultados del TDD_i Línea S

Armónicos Impares	**Promedio** $(\%)^2$	**TDD_i (%)**
1		**26,62**
3	**533,4**	
5	**30,75**	
7	**66,77**	
9	**69,12**	
11	**40,51**	
13	**6,94**	
15	**4,99**	
17	**3,18**	
19	**5,16**	
21	**2,09**	

En la tabla 4.13 se puede apreciar el promedio de todos los armónicos que se ocuparon para el cálculo de la distorsión de demanda total de la línea S, también con el resultado de su TDD_i.

- TDD_i de la línea T

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{198.2 + 36.44 + 9.14 + 19.01 + 19.63 + 7.77 + 2.26 + \cdots + 1.64}}{100}$$

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{297{,}72}}{100} \times 100 = 17{,}25\%$$

Tabla 4.14 Resultados del TDD_i Línea T

Armónicos Impares	Promedio $(\%)^2$	TDD_i (%)
1		17,25
3	198,2	
5	36,44	
7	9,14	
9	19,01	
11	19,63	
13	7,77	
15	2,26	
17	1,87	
19	1,76	
21	1,64	

En la tabla 4.14 se puede apreciar el promedio de todos los armónicos que se ocuparon para el cálculo de la distorsión de demanda total de la línea T, con su respectivo resultado en porcentaje.

- TDD_i del sistema

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{928{,}5 + 240{,}3 + 66{,}77 + 69{,}12 + 77{,}77 + 41{,}76 + 8{,}28 + \cdots + 3{,}53}}{100}$$

$$\mathrm{TDD}_i = \frac{\sqrt{1463{,}38}}{100} \times 100 = 38{,}25\%$$

Tabla 4.15 Resultados del TDD_i del Sistema

Armónicos Impares	Promedio ($\%^2$)	TDD_i (%)
1		38,25
3	928,51	
5	240,29	
7	66,76	
9	69,12	
11	77,77	
13	41,76	
15	8,28	
17	3,18	
19	5,16	
21	3,65	
23	2,48	
25	1,07	
27	1,47	
29	0,31	
31	0,89	
33	0,65	
35	0,85	
37	0,77	
39	0,47	
41	1,23	

43	**2,07**	
45	**2,02**	
47	**1,09**	
49	**3,53**	

Finalmente en la tabla 4.15 se puede apreciar los valores de los armónicos impares junto con los promedios en porcentajes y el TDD_i del sistema completo el cual supera con creces al límite de 20% que impone la normativa NTCSD.

4.3 Análisis del factor de potencia

Otro de los datos entregados por el instrumento de medición power pad III AEMC, es el factor de potencia el cual como ya se observó en el capítulo anterior, se encontraba muy por debajo de lo estandarizado por la normativa NTCSD en las tres líneas la mayor parte del tiempo.

De acuerdo al artículo 5-18 de la normativa NTCSD, los límites mínimos para el factor de potencia son de 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo para los usuarios regulados que tengan un nivel de voltaje menor a 30 kV, lo que significa que dichos datos deben de ser respetados en un 98% del tiempo. Por lo que a continuación se mostrarán los factores de potencias de las líneas R, S y T que fueron entregados por el equipo de medición Power Pad III AEMC.

Tabla 4.16 Límites del Factor de Potencia

Fp de Líneas	**Fp Línea R**	**Fp Línea S**	**Fp Línea T**	**Fp Total**
Valores Máximos	**0,994**	**0,99**	**0,998**	**0,983**

Valores Promedios	**0,921**	**0,928**	**0,852**	**0,899**
Valores Mínimos	**0,855**	**0,789**	**0,723**	**0,814**

En la tabla 4.15 se muestran los valores máximos, mínimos y promedios del factor de potencia de las tres líneas del sistema de distribución, valores que solamente los promedios, mínimos y totales se encuentran debajo de los estándares impuestos por la normativa NTCSD, mientras que los valores máximos superan al límite mínimo.

La línea R cuenta con 272 datos sobre el límite mínimo impuesto por la normativa y tiene 464 valores que están por debajo del estándar de la norma NTCSD, manteniendo un total de 3 valores que son iguales al límite mínimo del 0,93 que impone la normativa.

La línea S tiene 422 valores que se encuentran por encima del límite mínimo de los 0,93 impuesto por la normativa NTCSD, contando con 309 datos que están por debajo del estándar de la norma ya mencionada y manteniendo un total de 8 valores que son iguales al límite mínimo que impone la norma.

La línea T cuenta con 124 valores que están por encima del límite mínimo impuesto por la norma, teniendo 606 datos que están por debajo del estándar de la normativa NTCSD y quedando con 9 valores que son iguales al límite mínimo que tiene de estándar la norma.

Teniendo las cantidades exactas de los valores que están por encima y por debajo del límite mínimo que impone la normativa NTCSD, se puede calcular el porcentaje que permite ver si cumplen con los límites del 98% del tiempo de medición.

La línea R tiene un total de 736 datos que se encuentran fuera de rango, junto con un total de 739 valores que fueron medidos por el power pad.

$$x = \left(\frac{736}{739}\right) \times 100\% = 99{,}59\%$$

De acuerdo a lo calculado se sabe que solo el 0,41% de los valores están fuera del rango y el 99,59% de los datos se encuentran dentro de rango, por lo que si cumple con la normativa NTCSD.

La línea S cuenta con un total de 731 valores que están fuera de rango, junto con el total de 739 datos que fueron medidos por el power pad.

$$x = \left(\frac{731}{739}\right) \times 100\% = 98{,}91\%$$

Gracias a lo calculado se sabe que solo el 1,09% de los valores están fuera del rango y el 98,91% de los datos se encuentran dentro de rango, por lo que si cumple con la NTCSD.

La línea T finalmente tiene un total de 730 valores que se encuentran fuera de rango, junto con un total de 739 valores que fueron medidos por el power pad.

$$x = \left(\frac{730}{739}\right) \times 100\% = 98{,}78\%$$

De acuerdo a lo calculado anteriormente se sabe que el 1,22% de los valores están fuera del rango, mientras que el 98,78% de los datos se encuentran dentro de rango por lo que si cumple con la norma NTCSD.

Al haber calculado los porcentajes del tiempo de medición de los factores de potencias, teniendo en cuenta el artículo 5-18 de la normativa NTCSD, el promedio del factor de potencia está dentro del rango del 98% de tiempo de medición.

Tabla 4.17 Resultados del Factor de Potencia

Fp de Líneas	**Fp Línea R**	**Fp Línea S**	**Fp Línea T**	**Fp Total**
Valores Fuera de Rango	**736**	**731**	**730**	**734**

Valores Dentro de Rango	**3**	**8**	**9**	**5**
Porcentaje de Tiempo Fuera de Rango	**0,41%**	**1,09%**	**1,22%**	**0,68%**
Porcentaje de Tiempo Dentro de Rango	**99,59%**	**98,91%**	**98,78%**	**99,32%**
Cumple con Límite NTCSD	**Si Cumple**	**Si Cumple**	**Si Cumple**	**Si Cumple**

En la tabla 4.16 se puede apreciar los resultados del factor de potencia de las tres líneas, en el que vemos que el porcentaje de tiempo de medición se encuentra dentro de rango en cada línea por lo que sí cumple con los estándares de la normativa NTCSD.

Cabe destacar que el promedio total del factor de potencia del sistema es de 0,899, quedando por debajo del 0,93 inductivo el cual es el estándar de la normativa NTCSD para el factor de potencia.

4.4 Análisis de potencias

Otra parte fundamental para evaluar la calidad de energía es el análisis de las potencias, ya sean activas, reactivas y aparentes, al haber un factor de potencia debajo del límite mínimo impuesto por la normativa NTCSD, se requiere hacer este análisis para las potencias involucradas.

4.4.1 Evaluación de potencia activa

El instrumento de medición Power Pad III AEMC analizó los 739 datos para las tres potencias ya sea en la línea R, S y T, sumado a la potencia promedio, los datos que midió el equipo sobre la potencia activa se mostrarán a continuación.

Tabla 4.18 Límites de la Potencia Activa

P de Líneas (kW)	P (kW) Línea R	P (kW) Línea S	P (kW) Línea T	P (kW) Total
Valores Máximos	11,99 kW	11,51 kW	10,33 kW	27,58 kW
Valores Promedios	4,59 kW	4,12 kW	4,23 kW	12,95 kW
Valores Mínimos	1,94 kW	1,04 kW	2,14 kW	5,58 kW

En la tabla 4.17 se muestran los límites de la potencia activa, los valores máximos, mínimos y promedios de las tres líneas y el total con respecto a la potencia activa. La línea R es la que más consumo tuvo de acuerdo al valor promedio que se muestra siendo este de 4,59 kW aunque sigue sin ser mucha la diferencia con respecto al consumo de las otras líneas y el total es de 12,95 kW en promedio siendo esta potencia la que realmente está siendo ocupada en el sistema.

4.4.2 Evaluación de potencia reactiva

Al igual que la potencia anterior, el equipo de medición entregó los 739 datos respectivos de la potencia reactiva para las tres líneas junto con el total que sería del sistema completo, mostrando finalmente los valores máximos, mínimos y promedios de la potencia reactiva.

Tabla 4.19 Límites de la Potencia Reactiva

Q de Líneas (kVAr)	Q (kVAr) Línea R	Q (kVAr) Línea S	Q (kVAr) Línea T	Q (kVAr) Total
Valores Máximos	**19,18 kVAr**	**0,015 kVAr**	**2,9 kVAr**	**20,96 kVAr**
Valores Promedios	**0,252 kVAr**	**-0,809 kVAr**	**1,98 kVAr**	**1,43 kVAr**
Valores Mínimos	**-1,31 kVAr**	**-2,35 kVAr**	**0,021 kVAr**	**-1,63 kVAr**

En la tabla 4.18 se muestran los límites de la potencia reactiva, en el que la línea R tiene mayor consumo con un valor máximo de 19,18 kVAr, pero teniendo un valor promedio menor al de la línea T y al total. Los valores mínimos de las líneas R, S y del sistema completo, junto con el valor promedio de la línea S, se encuentran en valores negativos lo que significa que están suministrando energía.

4.4.3 Evaluación de potencia aparente

Finalmente se encuentran los valores de la potencia aparente que al igual que las otras potencias, el power pad entregó los 739 valores de esta potencia con respecto a las tres líneas y al sistema completo, mostrando una vez más los valores máximos, mínimos y promedios de estos datos.

Tabla 4.20 Límites de la Potencia Aparente

S de Líneas (kVA)	S (kVA) Línea R	S (kVA) Línea S	S (kVA) Línea T	S (kVA) Total
Valores Máximos	**12,07 kVA**	**11,92 kVA**	**10,52 kVA**	**28,47 kVA**
Valores Promedios	**4,93 kVA**	**4,37 kVA**	**4,84 kVA**	**14,16 kVA**
Valores Mínimos	**2,12 kVA**	**1,31 kVA**	**2,65 kVA**	**6,64 kVA**

En la tabla 4.19 se encuentra los límites de la potencia aparente en el que la línea R tiene más consumo que las otras dos líneas, con un valor promedio de 4,93 kVA mientras que el total tiene un valor promedio de 14,16 kVA siendo esta la potencia aparente con la que trabaja el sistema.

4.5 Análisis de frecuencia

Finalmente la frecuencia es otro de los factores que son fundamentales para evaluar la calidad de energía de un sistema de distribución, el equipo de medición Power Pad III AEMC se encargó de entregar los 739 valores de la frecuencia del sistema eléctric. De acuerdo al artículo 1-5 de la normativa NTCSD la frecuencia nominal del sistema es de 50 Hz, además el artículo 3-4 de la norma ya mencionada, indica que los intervalos en estado normal son de 49,5 Hz $\leq$ f < 50,5 Hz, teniendo dichos límites de referencia, a continuación se muestran los límites entregados por el equipo de medición.

Tabla 4.21 Límites de la Frecuencia

Valor Máximo	**50,17 Hz**
Valor Promedio	**50,02 Hz**
Valor Mínimo	**49,83 Hz**

En la tabla 4.20 se pueden apreciar los límites de la frecuencia, valores que registró el equipo de medición en el que se encuentran los 50,17 Hz como dato máximo, los 50,02 Hz como dato promedio del sistema y finalmente los 49,83 Hz como dato mínimo, manteniéndose dentro del estándar establecido por la norma NTCSD.

Tabla 4.22 Resultados de la Frecuencia

Valores por Normativa NTCSD	**49,5 Hz ≤ f ≤ 50,5 Hz**
Datos Fuera de Normativa NTCSD	**0**
Datos Dentro de Normativa NTCSD	**739**
Porcentaje de Tiempo Dentro de Rango	**100%**

En la tabla 4.21 finalmente se puede apreciar con exactitud que no hay ningún dato que esté fuera del rango que tiene de estándar la normativa NTCSD, cumpliendo la frecuencia de este sistema con los límites impuestos por la norma ya mencionada.

CAPÍTULO V

PROPUESTA DE MEJORA

En el presente capítulo 5 de este proyecto, se entregarán las propuestas de las mejoras posibles para la calidad de energía de este sistema de distribución, todo de acuerdo a las condiciones que se han presentado en los capítulos anteriores, con el objetivo de mitigar la armónica de corriente dominante que sobrepasa el límite impuesto por la normativa NTCSD, siendo para este caso la armónica de corriente de tercer orden para las líneas R y S, logrando así mejorar la calidad de energía del transformador de 250 kVA.

5.1 Diseño de filtro armónico sintonizado en serie RLC

Antes de diseñar el filtro armónico, se debe de saber cuáles son finalmente los problemas que tiene el sistema eléctrico, que afectan a la calidad de energía que tiene, los primordiales serían los armónicos de corrientes de tercer orden de la línea R y S que superan los límites en porcentaje, que impone la normativa NTCSD lo que podría provocar problemas a futuros fallas eléctricas como sobrecargas, disminución de la vida útil de equipos, sobrecalentamientos en los conductores o desbalances de corrientes y voltajes. El otro problema sería el bajo factor de potencia que tiene el sistema, ya que no cumple con el estándar mínimo de la norma NTCSD de acuerdo a lo evaluado en el capítulo anterior, debido a estos problemas principales es que se propone teóricamente el filtro armónico sintonizado en serie RLC que ayudaría a regular tanto el factor de potencia como el armónico dominante que sería la de tercera orden.

Cabe resaltar que otro de los problemas que tiene este sistema es que los TDDi de las líneas R y S sobrepasan el límite de 20% máximo impuesto por la normativa NTCSD, teniendo la línea R un TDD_i de 37,22% mientras que la línea S tiene un TDD_i de 27,62% siendo esta línea más baja que la anterior pero sigue estando por encima del límite ya mencionado, además el TDD_i del sistema también sobrepasa el límite del 20% al contar con un TDD_i de 38,25% siendo mayor que cualquiera de las otras líneas.

La solución que entrega este proyecto de forma teórica es el diseño e implementación de un filtro armónico pasivo sintonizado en serie RLC, el cual ayudaría a mitigar los armónicos que sobrepasen los límites establecidos por la normativa NTCSD, en este caso se centrará en mitigar los armónicos de corrientes más elevados siendo este la de tercera orden en las líneas R y S, como también regularía el TDD_i tanto del sistema como de las líneas R y S, porcentajes que sobrepasan los límites. Esto con la finalidad de mejorar el factor de potencia el cual tiene los valores promedios tanto de las tres líneas como del sistema, debajo del mínimo de 0,93 inductivo que establece la NTCSD.

El filtro pasivo tiene una reactancia capacitiva conectada en serie a una reactancia inductiva, los cuales pueden sintonizarse a la frecuencia que se requiera en el sistema, además de que cuenta con la posibilidad de proporcionar una potencia reactiva que sea necesaria para el sistema eléctrico presente. Este filtro entrega una disminución mayor para los armónicos que estén sobrepasando los límites de la NTCSD, cuenta con pocas pérdidas con respecto a la resistencia del inductor y además es de bajo costo.

A continuación se presentarán los datos recopilados por el equipo de medición power pad III AEMC, los cuales representan a los valores del sistema.

- Voltaje de línea: 380 V
- Potencia activa: 12,95 kW
- Factor de potencia actual: 0,899
- Frecuencia: 50 Hz

El factor de potencia al estar muy debajo del mínimo establecido por la normativa, se tiene como objetivo mejorarlo a 0,98 por lo que para ello se deben calcular los ángulos requeridos para hallar la potencia reactiva requerida para el filtro armónico.

$$\cos \varphi_0 = 0{,}899 \text{ (Valor inicial)}$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}98 \text{ (Valor final)}$$

Al despejar las ecuaciones podemos encontrar los ángulos de los factores de potencias tanto inicial como final.

$$\varphi_0 = \cos^{-1}(0{,}899) = 25{,}97°$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0{,}98) = 11{,}47°$$

Teniendo los ángulos, se puede encontrar la potencia reactiva necesaria para el filtro armónico de acuerdo a las especificaciones del sistema, esto con la siguiente ecuación.

$$Q_c = P \times (\tan(\varphi_0) - \tan(\varphi_1))$$

$$Q_c = 12950 \times (\tan(25{,}97°) - \tan(11{,}47°))$$

$$Q_c = 3680{,}09\ \text{VAr}$$

Se puede apreciar de acuerdo a la potencia reactiva calculada anteriormente que representa a la cantidad de compensación necesaria para mejorar el factor de potencia, que al tener un factor de potencia inicial no tan bajo y tampoco muy distante al factor de potencia mínimo impuesto por la normativa NTCSD, la potencia reactiva necesaria para el filtro no es tan alta en comparación a la potencia activa con la que cuenta el sistema eléctrico.

5.1.1 Diseño de filtro para reducir tercer armónico

La armónica de corriente de tercera orden para las líneas R y S, cuentan con los siguientes porcentajes entregados por el equipo de medición junto al porcentaje de energía reactiva de corrección.

Tabla 5.1 Parámetros del Armónico de Corriente de Tercera Orden

Armónico de Corriente de Tercer Orden			
Líneas	**Frecuencia (Hz)**	**Porcentaje Promedio**	**Porcentaje de Energía Reactiva de Corrección**
R	**150 Hz**	**30,47%**	**55%**
S	**150 Hz**	**23,1%**	**55%**

En la tabla 5.1 se puede apreciar cada parámetro de las líneas R y S con respecto a la tercera armónica de corriente, ya sea los valores de frecuencia impuesto por la

normativa NTCSD sin olvidar los 50 Hz de la frecuencia nominal, como los porcentajes promedios dados por el equipo de medición y el porcentaje de energía reactiva de corrección.

Al contar con la potencia reactiva calculada, se puede proseguir con el diseño del filtro para reducir en específico la tercera armónica de corriente, comenzando por calcular la potencia reactiva necesaria para la armónica de corriente con la ecuación que será utilizada a continuación.

$$Q_3 = \frac{55\% \times Q_c}{3 \text{ fases}}$$

$$Q_3 = \frac{55\% \times 3680{,}09 \text{ VAr}}{3} = \frac{(\frac{55}{100}) \times 3680{,}09 \text{ VAr}}{3}$$

$$Q_3 = 674{,}68 \text{ VAr}$$

Con la potencia reactiva por fase del filtro ya diseñado, el cual es de 674,68 VAr se puede calcular la reactancia efectiva con la siguiente formula teniendo en cuenta el valor del voltaje de línea.

$$\text{Xefec} = \frac{\left(\frac{V^2}{3}\right)}{Q_3}$$

$$\text{Xefec} = \frac{\left(\frac{380^2 \text{ V}}{3}\right)}{674{,}68}$$

$$\text{Xefec} = 71{,}34 \ \Omega$$

Además para seguir diseñando el filtro armónico para la tercera orden de armónico de corriente se requiere calcular la reactancia del capacitor, el cual puede hallarse con la siguiente formula teniendo en cuenta el número de orden de armónico con el que se está trabajando.

$$X_c = \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

$$X_c = \frac{3^2}{3^2 - 1}$$

$$X_c = 1{,}125\ \Omega$$

Esto con la finalidad de encontrar el valor del capacitor con el que estará funcionando el filtro armónico, dato que servirá para encontrar la impedancia requerida para el filtro, el capacitor se puede hallar con la siguiente formula teniendo en cuenta el valor de la reactancia del capacitor que ya fue encontrado anteriormente, junto con la frecuencia fundamental.

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

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 1{,}125\ \Omega}$$

$$C = 2829{,}42\ \mu\text{F}$$

Con el valor del capacitor encontrado, falta encontrar el valor de la reactancia inductiva para el filtro de armónico, dato que se puede encontrar con la siguiente ecuación en el que se debe de seguir teniendo en cuenta el número de orden de armónica con el que se está trabajando, junto al valor de la reactancia del capacitor que ya fue calculado anteriormente.

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

$$X_L = \frac{1{,}125\ \Omega}{3^2}$$

$$X_L = 0{,}125\ \Omega$$

Teniendo el valor de la reactancia inductiva lista, solo queda encontrar el valor de la capacidad de la inductancia sintonizada, necesaria para el filtro de armónico, esto con la siguiente ecuación en el que se debe de tener en cuenta el valor de la frecuencia fundamental, junto con el valor del capacitor que de igual manera fue calculada anteriormente.

$$L = \frac{1}{(2 \times \pi \times f \times 3)^2 \times C}$$

$$L = \frac{1}{(2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 3)^2 \times 2829{,}42\ \mu\text{F}} = 0{,}3979\ \text{mH}$$

Quedaría verificar que los valores como la reactancia inductiva junto con la reactancia capacitiva del filtro armónico, sean equivalentes o iguales entre sí para la armónica de tercer orden, esto se puede verificar con la siguiente ecuación en el que se deben de tener en cuenta los valores de la frecuencia fundamental junto con la capacidad de la inductancia sintonizada que fue calculada anteriormente y el número del armónico con el que se está trabajando.

$$X_{L_3} = 2 \times \pi \times f \times n \times L$$

$$X_{L_3} = 2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 3 \times 0{,}3939\ \text{mH}$$

$$X_{L_3} = 0{,}3750\ \Omega$$

El mismo caso sería para calcular la reactancia capacitiva, con el cual se debe de tener en cuenta la frecuencia fundamental junto con el número de armónico con el que se está trabajando y con el valor del capacitor que ya fue calculado anteriormente.

$$X_{C_3} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times n \times C}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 3 \times 2829{,}42\ \mu\text{F}}$$

$$X_{C_3} = 0{,}3750\ \Omega$$

Con todos los datos calculados se puede comparar y evaluar si cumple con la igualdad para poder terminar de diseñar el filtro armónico con la siguiente ecuación de igualdad en el que se deben de tener en cuenta los dos valores calculados de reactancia ya sea inductiva como capacitiva.

$$X_{L_3} = X_{C_3}$$

$$0{,}3750\ \Omega = 0{,}3750\ \Omega$$

Al cumplir con la igualdad, se puede seguir con el último cálculo el cual se trata de la impedancia del filtro, valor que se puede hallar con la siguiente ecuación en el cual se

deben de tener en cuenta datos como la frecuencia fundamental, el capacitor y la capacidad de la inductancia sintonizada ya calculados anteriormente.

$$Z = R_f + J\left(2 \times \pi \times f \times L - \left(\frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}\right)\right)$$

$$Z = J\left(2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 0{,}3979\ \text{mH} - \left(\frac{1}{2 \times \pi \times 50\ \text{Hz} \times 2829{,}42\ \mu\text{F}}\right)\right)$$

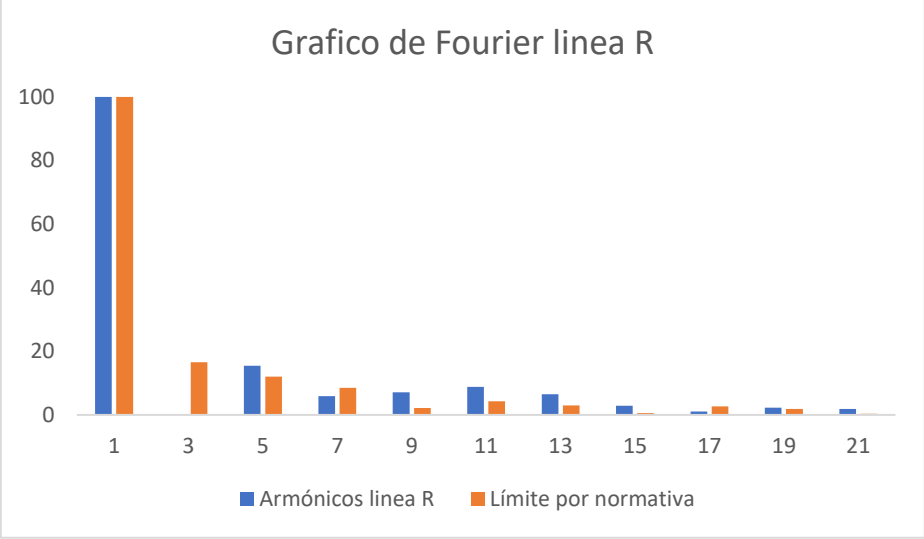
$$Z = -J0{,}9766\ \Omega \approx -j1\ \Omega$$

Finalmente con la impedancia total encontrada, se puede verificar los resultados de la implementación del filtro pasivo en el sistema eléctrico para mitigar la tercera armónica de corriente.

5.2 Resultados del filtro pasivo en el sistema eléctrico

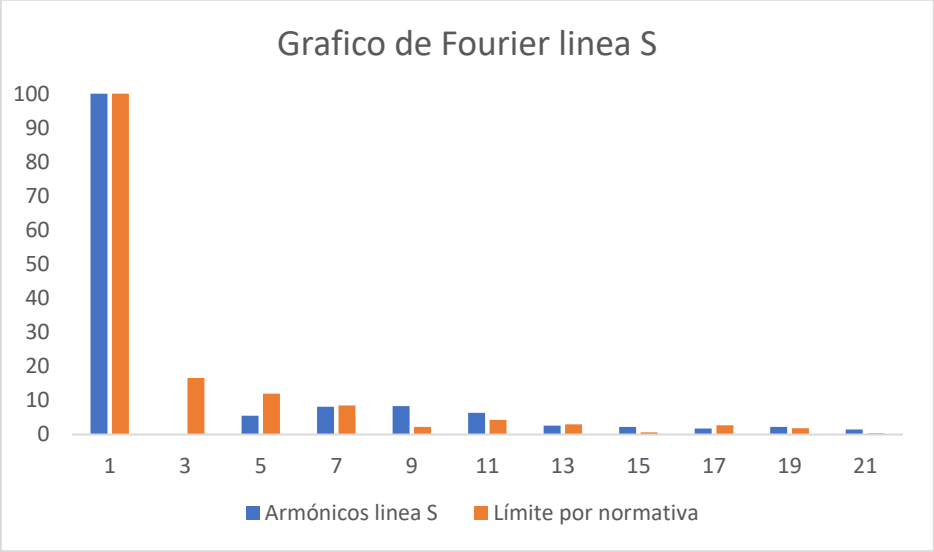
Al haber calculado los parámetros necesarios para diseñar el filtro pasivo sintonizado en serie RLC, al implementarlo en las líneas R y S el armónico de corriente de tercer orden es mitigado lo que permite que su porcentaje promedio no supere al límite establecido por la normativa NTCSD, al igual que disminuye significativamente el porcentaje del TDD_i tanto de las líneas R y S, como del sistema eléctrico en general.

Figura 5.1 Resultados de Armónicas de Corrientes de Línea R con Filtro



En la figura 5.1 se muestran los resultados de los armónicos de corrientes de la línea R, en el que el tercer orden de armónico está completamente mitigado siendo ahora la quinta armónica la que está por encima de todas las otras órdenes de armónicos de corrientes.

Figura 5.2 Resultados de Armónicas de Corrientes de Línea S con Filtro



Al igual que en el caso anterior, en la figura 5.2 se puede apreciar el resultado de la implementación del filtro de armónico de en la tercera orden de armónica de corriente de la línea S, con el cual terminaría por mitigar por completo la tercera armónica y quedando finalmente la novena orden de armónica de corriente como la más alta en porcentaje y la que más supera el límite impuesto por la normativa NTCSD.

Como los armónicos disminuyeron, los TDD_i tanto del sistema eléctrico en general como de las líneas R y S también lo hicieron, pasando de tener porcentajes que sobrepasaban con creces los límites impuestos por la NTCSD, a porcentajes que respetan dichos límites.

- Línea R

$$TDD_i = 37{,}22\% \text{ (Inicial)}$$

$$TDD_i = 21{,}54\% \text{ (Con filtro armónico)}$$

- Línea S

$$\text{TDD}_i = 27{,}62\% \text{ (Inicial)}$$

$$\text{TDD}_i = 15{,}14\% \text{ (Con filtro armónico)}$$

Tabla 5.2 Resultados del TDD_i del Sistema con Filtro Armónico

Armónicos Impares	**Promedio** ($\%^2$)	**TDD_i (%)**
1		**23,12**
3		
5	**240,29**	
7	**66,76**	
9	**69,12**	
11	**77,77**	
13	**41,76**	
15	**8,28**	
17	**3,18**	
19	**5,16**	
21	**3,65**	
23	**2,48**	
25	**1,07**	
27	**1,47**	
29	**0,31**	
31	**0,89**	
33	**0,65**	
35	**0,85**	

37	**0,77**	
39	**0,47**	
41	**1,23**	
43	**2,07**	
45	**2,02**	
47	**1,09**	
49	**3,53**	

En la tabla 5.2 se puede apreciar el cambio que tuvo el TDD_i del sistema eléctrico con la implementación del filtro armónico para la tercera orden de armónico de corriente, teniendo una reducción significativa que la hace mantenerse cercana al límite del 20% establecido por la NTCSD, con lo cual también se espera a que mejorará el factor de potencia superando el 0,93 inductivo mínimo que impone la norma ya mencionada con anterioridad. Sin embargo el TDD_i tanto del sistema como de la línea R, siguen estando por encima del límite del 20% establecido por la normativa NTCSD, esto debido a un desbalance de cargas provocadas por un consumo excesivo en una sola fase de las tres que tiene el sistema, cargas que en el área de medición se encuentran aparatos eléctricos y electrónicos como computadores, ups, impresoras 3D, variadores de frecuencias y reguladores de voltajes, con el cual pudo haber afectado en los armónicos de corrientes de la línea R mediante los taps del mismo regulador de voltaje.

Para seguir buscando la manera de tener un porcentaje que esté bajo los límites que impone la norma NTCSD en cuanto a los TDD_i tanto de la línea R como del sistema, se hará otra propuesta la cual consiste en redistribuir las excesivas cargas que tiene la línea R, en las otras líneas del sistema eléctrico.

5.3 Redistribución de cargas

Si se quiere conseguir una redistribución de cargas para regular las altas demandas de corrientes en una línea, primeramente se debe de tener en cuenta los valores necesarios que se deben de utilizar en las ecuaciones que existen para encargarse de la redistribución de las cargas ya sea de la línea R, S o T que tiene el sistema.

Tabla 5.3 Límites de Corrientes de Líneas R, S y T

I_{RMS} de Líneas (A)	**I_{RMS} (A) Línea R**	**I_{RMS} (A) Línea S**	**I_{RMS} (A) Línea T**
Valores Máximos	**52,01 A**	**51,57 A**	**45,9 A**
Valores Promedios	**21,082 A**	**18,71 A**	**20,776 A**
Valores Mínimos	**9,12 A**	**5,68 A**	**11,53 A**

En la tabla 5.3 se muestran los límites de las corrientes rms de cada línea del sistema, en la que se pueden verificar los valores promedios con los que se puede calcular con la siguiente ecuación, la corriente promedio del sistema.

$$\mathrm{I_{Promedio}} = \frac{I_{Línea\ R} + I_{Línea\ S} + I_{Línea\ T}}{N°_{Líneas}}$$

$$\mathrm{I_{Promedio}} = \frac{21{,}082 + 18{,}71 + 20{,}776}{3} = 20{,}192\ \mathrm{A}$$

Con la corriente promedio del sistema calculado, se puede encontrar el nivel de porcentaje de desbalance de carga que tiene cada línea del sistema eléctrico, con la siguiente ecuación la cual permitirá ver si cada línea sobrepasa el límite establecido por la norma IEEE 1159.

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|\mathrm{I_{Línea}} - \mathrm{I_{Promedio}}|}{\mathrm{I_{Promedio}}} \times 100\%$$

- Línea R

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|21{,}082 - 20{,}192|}{20{,}192} \times 100\% = 4{,}40\%$$

- Línea S

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|18{,}71 - 20{,}192|}{20{,}192} \times 100\% = 7{,}33\%$$

- Línea T

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|20{,}776 - 20{,}192|}{20{,}192} \times 100\% = 2{,}84\%$$

Para calcular el desbalance de carga del sistema, se utilizará la siguiente ecuación de la cual se tendrá en cuenta los valores máximos y mínimos de corrientes del sistema completo, en el que se evalúan las mismas corrientes promedios mostradas en las líneas R, S o T.

- Sistema

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|\text{I}_{\text{Máximo}} - \text{I}_{\text{Mínimo}}|}{\text{I}_{\text{Promedio}}}$$

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|21{,}082 - 18{,}71|}{20{,}192} \times 100\% = 11{,}74\%$$

Al tener altos consumos de corrientes, los porcentajes de desbalances de cargas son de muy bajo nivel, destacando la línea S que tiene la menor cantidad de carga pero también tiene un mayor nivel de desbalance de carga.

Tabla 5.4 Límites de Desbalances de Corrientes

Líneas	Corrientes Promedios (A)	Desbalances de Corrientes (%)
R	**21,082 A**	**4,40**
S	**18,71 A**	**7,33**
T	**20,776 A**	**2,84**
Sistema	**20,19 A**	**11,74**

En la tabla 5.4 se pueden apreciar los límites de desbalances de corrientes que entregaron los cálculos realizados con anterioridad, con respecto a las líneas R, S y T, junto con el desbalance de carga del sistema en general.

Si bien tanto las líneas como el sistema en general tienen un porcentaje de desbalance de carga que está por debajo del límite de 30% que impone la normativa IEEE 1159, la línea S sigue teniendo un porcentaje de desbalance de carga elevado en comparación a

la las otras líneas del sistema eléctrico, sin olvidar que las líneas R y S tienen un porcentaje de tiempo de medición fuera de rango del THD muy elevados, quedando solo la línea T con un porcentaje bajo de 21,93% aunque sigue sobrepasando el límite del 20% establecido por la normativa NTCSD.

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, lo óptimo será redistribuir las cargas estableciendo un límite de 10% de desbalance para la línea R, para que las cargas sobrantes puedan traspasarse a las líneas restantes. Para hallar la nueva carga para la línea R se hará una acción óptima en la que se calculará la corriente encargada de distribuirse en la línea que tiene la corriente más alta, junto con la línea que tiene la corriente más baja.

- Carga ΔI_{R-S}

$$\Delta \mathrm{I_{R-S}} = 21{,}082 - 18{,}71 = 1{,}46\ \mathrm{A}$$

- Nueva línea R

$$\mathrm{I_R} = 21{,}082 - 1{,}46 = 19{,}622\ \mathrm{A}$$

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|19{,}622 - 20{,}192|}{20{,}192} \times 100 = 2{,}83\%$$

- Nueva línea S

$$\mathrm{I_S} = 18{,}71 + 1{,}46 = 20{,}17\ \mathrm{A}$$

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|20{,}17 - 20{,}192|}{20{,}192} \times 100 = 0{,}108\%$$

Ahora para calcular el nuevo desbalance de carga del sistema, se tendrá en cuenta la línea que pasó a ser la que tiene la mayor cantidad de corriente, siendo esta la línea T junto con la nueva línea que pasó a tener la menor cantidad de corriente siendo esta la línea R.

- Nuevo sistema

$$\text{Desbalance de carga} = \frac{|20{,}78 - 19{,}622|}{20{,}192} \times 100 = 5{,}73\%$$

Tabla 5.5 Resultados de los Desbalances de Corrientes

Líneas	Corrientes Promedios Originales (A)	Desbalances de Corrientes Originales (%)	Corrientes Promedios Nuevos (A)	Desbalances de Corrientes Nuevos (%)
R	**21,082 A**	**4,40**	**19,622 A**	**2,83**
S	**18,71 A**	**7,33**	**20,17 A**	**0,108**
T	**20,776 A**	**2,84**	**20,776 A**	**2,84**
Sistema	**20,192 A**	**11,74**	**20,192 A**	**5,73**

En la tabla 5.5 se pueden apreciar los resultados de los corrientes promedios y de los desbalances de corrientes antes y después de hacer la redistribución de cargas, tabla en la que claramente se pueden ver que las líneas R y S junto con el sistema, disminuyeron sus porcentajes de desbalances de corrientes luego de aplicar la redistribución de cargas estando más por debajo del 10% establecido por la normativa IEEE 1159 en comparación a antes.

Gracias a la propuesta de esta redistribución de cargas, existe un balance de cargas en el que fue posible reducir la corriente de la línea R lo que por consiguiente mejorarían los armónicos de corrientes tanto de la misma línea mencionada como del sistema en general.

5.4 Filtro armónico en el mercado

Cotizando los filtros armónicos pasivos sintonizados en series RLC, de acuerdo a las especificaciones que fueron calculadas y evaluadas por cada fase del sistema eléctrico, junto con los detalles calculados para el filtro que podría soportar cada fase, el filtro armónico que más se asemeja al calculado anteriormente y que está en el mercado es el que se presentará a continuación. Este modelo sirve para un sistema trifásico desbalanceado con márgenes seguros en corriente, voltaje y potencias activas, reactivas

y aparentes, reducirá armónicos de alta frecuencia y mejorará la eficiencia de los equipos junto con la calidad de energía del sistema.

Figura 5.3 Filtro Armónico Pasivo Sintonizado en Serie RLC Comercial

Fuente: RS (s.f.)

En la figura 5.3 se puede apreciar el filtro de armónico fabricado por Allen Bradley (RS, s.f.), filtro cuyas especificaciones son las que se entregarán a continuación, teniendo un tipo de montaje en panel junto con terminales de tornillo.

- Corriente nominal máxima: 30 A.
- Tensión nominal máxima: 240 V.
- Frecuencias de funcionamiento: 47 a 63 Hz.
- Serie: 4983-PF.
- Precio: 2.152.000 pesos chilenos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Al terminar el periodo de medición de siete días en el sistema eléctrico que tiene un transformador de 250 kVA, ubicado en la Universidad de Atacama, se realizó un análisis de la calidad de energía de la zona de talleres del establecimiento ya mencionado, teniendo en cuenta los datos obtenidos por el instrumento de medición Power Pad III AEMC 8336 por cada variable eléctrica como el voltaje rms, la corriente rms, las potencias activas, reactivas y aparentes, los factores de potencias, las frecuencias, las distorsiones armónicas de voltajes y de corrientes tanto individuales de la orden número 1 hasta la 50, como distorsiones armónicas totales, de cada línea del sistema, es decir R, S y T, para verificar que dichas variables eléctricas estuvieran cumpliendo con los límites impuestos por las normativas técnicas chilenas como la NTCSD 2024, NTSyCS 2025, o las normativas técnicas internacionales como las IEEE 1159, IEC 61000-4-30 o IEC 61000-3-13.

Las tensiones de líneas junto con las tensiones de fase y neutro promedio, fueron las primeras variables eléctricas en ser analizadas en este proyecto, en el que ninguna de las tres fases del sistema eléctrico cumple con los límites impuestos por la normativa NTCSD y sobrepasan el rango de ±7,5% de acuerdo a los 220 V, además tampoco cumplen con los tiempos de medición que deben ser del 95% el cual es lo que permite la norma NTCSD. Pero las distorsiones armónicas de tensión tanto total (THD_v) como individual (dvj), sí cumplen con los límites establecidos por la normativa NTCSD por las tres fases del sistema eléctrico.

La segunda variable eléctrica que fue analizada en este proyecto fue la corriente eléctrica, en el que el consumo por cada fase era ciertamente elevado, pero la fase R fue la que más consumo tuvo en comparación a las otras dos fases, por lo que fue necesaria una redistribución de cargas entre la fase R y la fase S para equilibrar el sistema eléctrico de manera en que las distorsiones armónicas demandadas totales (TDD_i) junto con las distorsiones armónicas totales de corrientes (THD_i), de todas las fases del sistema eléctrico, pudieran cumplir con el límite del 20% impuesto por la

normativa NTCSD. Las distorsiones armónicas individuales de corrientes (dij) de las fases R y S en su mayoría no cumplen con los límites impuestos por la normativa NTCSD, siendo la fase T la diferencia al tener más armónicos de corrientes que si cumplieron con los límites impuestos por la norma ya mencionada.

Sus distorsiones de armónicos totales de corrientes (THD_i) no cumplieron con el límite del 20% ni con el 95% del tiempo de medición impuesto por la normativa NTCSD, además las distorsiones armónicas demandadas totales de corrientes (TDD_i) de la fase R y la fase S tampoco cumplieron con los límites del 20% que impone la norma, siendo nuevamente la fase T la que únicamente cumplió con el límite de la distorsión armónica demandada total de corriente que impone la normativa. La distorsión armónica demandada total de corriente (TDD_i) del sistema por ende tampoco cumplió con el límite impuesto por la normativa NTCSD, lo que podría provocar fallas eléctricas en el sistema como sobrecargas o acortamiento de vida útil de los equipos electrodomésticos.

La tercera variable que fue analizada en este proyecto fue el factor de potencia de cada fase, los cuales tampoco cumplieron con los límites del 0,93 que impone la normativa NTCSD aunque estuvieron muy cercano a dicho límite, a diferencia del tiempo de medición en el que las tres fases si cumplieron con el 98% que impone la normativa. Mientras que la cuarta variable que fue analizada en este proyecto fue la potencia que había en el sistema eléctrico, ya sea la potencia activa, como la potencia reactiva o la potencia aparente, en el que se pudo evaluar que la fase R fue la que más potencia activa y potencia aparente consumió a diferencia de las otras dos fases, mientras que con la potencia reactiva se registraron cargas capacitivas en la fase S, esto probablemente se deba al uso de cargas como ups, variadores de frecuencias, reguladores de voltajes con los taps o impresoras 3D durante el periodo de medición.

Finalmente la quinta variable que fue analizada en este proyecto fue la frecuencia con la que trabajó este sistema eléctrico, en el que se pudo observar que cumplió con los límites impuestos por la normativa NTCSD al contar el sistema eléctrico con una frecuencia promedio de 50,02 Hz.

En conclusión, el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama que es alimentado por el transformador de 250 kVA, no cumple del todo con las normativas técnicas, esto porque dos de sus fases cuenta con altos niveles de distorsiones armónicas de corrientes tanto individuales como totales, además de que las fases R, S y T, junto con el sistema eléctrico en general tienen un factor de potencia debajo del estándar de la normativa NTCSD, afectando negativamente la calidad de energía del sistema eléctrico. Es por eso que, para mejorar el sistema eléctrico, este proyecto entregó dos propuestas de mejoras en la que primero se realizó el diseño un filtro pasivo sintonizado en serie RLC para la línea R y S con el objetivo de mitigar el tercer armónico de corriente, la cual es la orden de armónico dominante de las dos fases ya mencionadas.

Con la implementación de este filtro, la tercera orden de armónico sería eliminada, mejorando en su mayoría la distorsión armónica de las líneas R y S, pero de todas formas sería insuficiente para que tanto la distorsión armónica demandada total de la línea R como del sistema eléctrico en general, cumplieran con el límite del 20% que establece la normativa NTCSD. Es por eso que se entregaría una segunda propuesta la cual trata sobre la redistribución de cargas, propuesta en la que se moverían cargas de la fase R hacia la fase S para equilibrar el sistema eléctrico y terminar por mejorar la calidad de energía de la Universidad de Atacama.

BIBLIOGRAFÍA

Academia Lab. (2025). *Series de Fourier.* Obtenido de https://academia-lab.com/enciclopedia/series-de-fourier/

AEMC instruments. (2014). *Power Quality Analyzer PowerPad III Model 8336.* Estados Unidos. Obtenido de https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Power-Meters-Loggers/8336_EN.pdf

Cogollo. (2016). *Fundamentos de la Teoría de Filtros.* España. Obtenido de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/b6e1b8

CTM Magnetics. (2021). *The Basics of Passive Harmonic Filters.* Obtenido de https://ctmmagnetics.com/the-basics-of-passive-harmonic-filters/

Dorf, R. (1995). *Elementos que Almacenan Energía.* Obtenido de https://es.scribd.com/document/400676299/Capitulo-7-Parte-1-Libro-Dorf

Fluke. (s.i.). *La Frecuencia.* Obtenido de https://www.fluke.com/es-cl/informacion/blog/electrica/que-es-la-frecuencia

Fraile. (2019). Obtenido de https://dspace.itsjapon.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/4119/1/Circuitos%20eléctricos%20-%20Jesús%20Fraile%20Mora.pdf

José. (2012). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos.* Obtenido de https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=C_c-DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=resistencias,+capacitancia+e+inductancia+definiciones&ots=lfMYgqFGF9&sig=ouLBIqHLeMp80u2nZBQe6JKmgW0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Miyara. (2004). *Filtros Activos.* Argentina. Obtenido de https://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/filtros-t.pdf

NTCSD. (2024). *Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.* Santiago, Chile. Obtenido de https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/NTCSDx2024-1.pdf

NTSyCS. (Septiembre de 2025). *Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.* Santiago, Chile. Obtenido de https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/09/NTSyCS-Sept20.pdf

Rosa, D. L. (2006). *Harmonics and Power Systems.* Obtenido de https://doi.org/10.1201/9781420004519

RS. (s.i.). *Filtro de armónicos.* Obtenido de https://es.rs-online.com/web/p/filtros-para-linea-de-alimentacion/7013589

YT Electric. (2022). *Cargas Eléctricas de CA.* Alemania. Obtenido de https://es.ytelect.com/blog/understanding-ac-electrical-loads-linear-vs-non-linear_b79