



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO DE CALIDAD DE ENERGÍA EN UN
TRANSFORMADOR 500 kVA QUE ALIMENTA A UN TABLERO DE
DISTRIBUCIÓN EN LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera.

Priscila Aguirre Concha.

Copiapó, Chile 2024.



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO DE CALIDAD DE ENERGÍA EN UN
TRANSFORMADOR 500 kVA QUE ALIMENTA A UN TABLERO DE
DISTRIBUCIÓN EN LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

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

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera.

Priscila Aguirre Concha.

Copiapó, Chile 2024

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Alcance	4
1.5 Metodología.....	5
1.6 Objetivo General	5
1.7 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II	7
MARCO TEORICO.....	7
2.1 Variables eléctricas.....	7
2.1.1 Corriente	7
2.1.2 Voltaje.....	7
2.1.3 Impedancia.....	7
2.1.4 Frecuencia.....	7
2.1.5 Potencia eléctrica	8
2.2 Factor de Potencia	8
2.2.1 Potencia activa	8
2.2.2 Potencia reactiva.....	9
2.2.3 Potencia Aparente	9
2.3 Armónicos	9
2.3.1 Efectos de los armónicos	10
2.3.2 Secuencia armónica	10
2.3.3 Índices para la medición de armónicos.....	12
2.3.3.1 Distorsión armónica individual	12
2.3.3.2 Distorsión armónica total	12
2.3.3.3 Distorsión de demanda total (TDD).....	13
2.3.4 Filtros armónicos	13
2.3.4.1 Filtros armónicos pasivos.....	14
2.3.4.2 Filtros de armónicos activos	17
2.3.4.3 filtros armónicos híbridos	17

CAPÍTULO III	19
NORMATIVA TÉCNICA	19
3.1 Normativa Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.....	19
3.1.1 Regulación de tensión.....	20
3.1.2 Monitoreo de frecuencia	21
3.1.3 Distorsión armónica de tensión.....	21
3.1.4 Distorsión armónica de corriente	22
3.1.5 Límite del factor de potencia	24
3.2 Norma técnica de seguridad y calidad de servicio	24
CAPÍTULO IV	25
MEDICIONES ELÉCTRICAS	25
4.1 Medición.....	25
4.2 Equipo de medición.....	26
4.3 Punto común de conexión	27
4.4 Instalación del equipo de medición	28
CAPÍTULO V	30
ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA	30
5.1 Análisis de voltaje	30
5.2 Regulación de tensión de las líneas 1, 2 y 3	31
5.3 Análisis de las corrientes.....	33
5.4 Análisis de factor de potencia	34
5.5 Análisis de frecuencia.....	39
5.6 Análisis de distorsión armónica de voltaje.....	40
5.6.1 Distorsión armónica total de voltaje	40
5.6.2 Distorsión armónica individual de voltaje	42
5.7 Análisis de distorsión armónica de corriente	44
5.8.1 Distorsión armónica total de corriente.....	44
5.8.2 Distorsión armónica individual de corriente L1 y TDD	47
5.8.3 Distorsión armónica individual de corriente L2 y TDD	49
5.8.4 Distorsión armónica individual de corriente L3 y TDD	50
5.8.5 Análisis de armónico individual de corriente	52
5.8.5.1 Tercer Armónico de corriente	52

5.8.5.2 Quinto Armónico de corriente	53
5.8.5.3 Séptimo Armónico de corriente	55
5.8.5.4 Noveno Armónico de corriente	56
5.8.5.5 Onceavo Armónico de corriente	57
5.8.5.6 Treceavo Armónico de corriente.....	59
5.8.5.7 Quinceavo Armónico de corriente	60
5.8.6 Análisis del promedio de TDD de las líneas.....	61
5.8.7 Resultados de los armónicos individuales de corriente	62
CAPÍTULO VI.....	64
PROPUESTA DE MEJORA	64
6.1 Diseño de filtro sintonizado en serie RLC	64
6.1.1 Filtro para mitigar la tercera armónica	67
6.2 Resultados del Filtro Pasivo	69
CAPÍTULO VII	72
CONCLUSIÓN.....	72

ÍNDICE DE FIGURA

Tabla 2.1 secuencia armónica	11
Figura 2.1 Filtro pasa bajos.....	14
Figura 2.2 Filtro pasa alto	15
Figura 2.3 Filtro pasa banda.....	16
Figura 2.4 Filtros activos	17
Figura 2.5 Filtro Hibrido.....	18
Figura 3.1 Límite para regulación de tensión	20
Figura 3.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia	21
Figura 3.3 Límites para índices de Distorsión individual expresados de la tensión fundamental.....	22
Figura 3.4 Límites de Distorsión armónica de corriente en el punto de conexión para usuarios en baja tensión	23
Figura 4.1 tablero de distribución	26
Figura 4.2 PowerPad III modelo 8336.....	26
Figura 4.3 Punto común de conexión.....	27
Figura 4.4 Analizador de calidad de energía AEMC 8336 conexión en sistema trifásico	28
Figura 4.5 Instalación del equipo de medición	29
Figura 5.1 voltaje RMS	31
Figura 5.2 corrientes RMS	34
Figura 5.3 Factor de potencia.....	36
Figura 5.4 Frecuencia del sistema.....	39
Figura 5.5 Distorsión armónica total de voltaje	41
Figura 5.6 Armónicos individuales de voltaje (%)	43
Figura 5.7 Distorsión armónica total de corriente.....	45
Figura 5.8 Distorsión armónica individual de corriente L1	48
Figura 5.9 Distorsión armónica individual de corriente L2.....	50
Figura 5.10 Distorsión armónica individual de corriente L3.....	51
Figura 5.11 Tercer Armónico de corriente (%).....	52
Figura 5.12 Quinto Armónico de corriente (%).....	54
Figura 5.13 Séptimo Armónicos de corriente (%).....	55

Figura 5.14 Noveno Armónicos de corriente (%).....	56
Figura 5.15 Onceavo Armónicos de corriente (%)	58
Figura 5.16 Treceavo Armónicos de corriente (%)	59
Figura 5.17 Quinceavo Armónicos de corriente (%)	60
Figura 6.1 Resultados al mitigar la tercera armónica de la L3.....	69

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1 secuencia armónica	11
Tabla 5.1 Límites de tensión	30
Tabla 5.2 Límite de tensión fase y neutro	30
Tabla 5.3 Resultados de la regulación de tensión	33
Tabla 5.4 Límite de la corriente	34
Tabla 5.5 Límite del factor de potencia	35
Tabla 5.6 Resultados del factor de potencia.....	38
Tabla 5.7 Límite de la frecuencia.....	39
Tabla 5.8 Resultados de la frecuencia.....	40
Tabla 5.9 Límite de la distorsión total de voltaje.....	41
Tabla 5.10 Resultados de distorsión armónica total de voltaje	42
Tabla 5.11 Resultados de la distorsión armónica individual de voltaje	44
Tabla 5.12 Límite de distorsión armónica de corriente.....	45
Tabla 5.13 Resultados de la distorsión armónica de total de corriente	47
Tabla 5.14 Resultados de la distorsión armónica individual de corriente L1	48
Tabla 5.15 Resultados de la distorsión armónica individual de corriente L2	49
Tabla 5.16 Resultados de la distorsión armónica individual de corriente L3	51
Tabla 5.17 Resultado del TDD de corriente.....	62
Tabla 5.18 Resultados de los armónicos individuales de corriente	63
Tabla 6.1 Porcentaje de contenido armónico	66
Tabla 6.2 Parametros de los armónico	67
Tabla 6.3 Resultado de TDD Total del sistema eléctrico.....	70

RESUMEN

El presente análisis tiene como objetivo proponer una mejora en la mitigación de la distorsión armónica en la red de suministro eléctrico de la Universidad de Atacama, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia de los dispositivos eléctricos en el recinto.

El estudio se basa en la instalación de un equipo medidor y analizador de calidad de energía, el cual se conectará aguas abajo de la protección general. Este equipo estará operando durante 7 días consecutivos, tomando muestras de las mediciones eléctricas cada 15 minutos. Los datos obtenidos serán analizados para determinar si cumplen con la normativa de calidad de energía vigente. Las variables eléctricas a analizar incluyen voltaje, corriente, potencia y armónicos, con el objetivo de identificar posibles desbalances de carga en la red eléctrica. El equipo se instalará en el área norte de la universidad, detrás de la biblioteca, en el tablero de distribución ubicado cerca del transformador de 500 kVA.

En el capítulo V se presentarán los resultados relacionados con las variables eléctricas, con énfasis en la presencia de armónicos y el factor de potencia, que son los principales problemas que afectan la calidad de energía en la red eléctrica. La presencia de cargas no lineales podría generar irregularidades en el suministro eléctrico debido a la distorsión armónica. Finalmente, el último capítulo del informe incluirá una propuesta de mejora para la mitigación de la distorsión armónica y otras posibles soluciones que contribuyan a reducir de manera efectiva los problemas identificados en el sistema eléctrico.

ABSTRACT

The purpose of this analysis is to propose an improvement in the mitigation of harmonic distortion in the electrical supply network of the University of Atacama, which will help improve the efficiency of the university's electrical devices.

The study is based on the installation of a power quality measurement and analysis equipment, which will be connected downstream of the main protection system. This equipment will operate for 7 consecutive days, taking electrical measurements every 15 minutes. The obtained data will be analyzed to determine if it complies with the current power quality standards. The electrical variables to be analyzed include voltage, current, power, and harmonics, with the goal of identifying potential load imbalances in the electrical grid. The equipment will be installed in the northern area of the university, behind the library, in the distribution panel located near the 500 kVA transformer.

In Chapter V, the results related to the electrical variables will be presented, with an emphasis on the presence of harmonics and the power factor, which are the main issues affecting power quality in the electrical network. The presence of non-linear loads could generate irregularities in the electrical supply due to harmonic distortion. Finally, the last chapter of the report will include a proposal for improvement to mitigate harmonic distortion and other potential solutions to effectively reduce the identified problems in the electrical system.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica se refiere a la correcta entrega de electricidad a los equipos y dispositivos electrónicos, garantizando que las condiciones de suministro sean adecuadas para mantener su funcionamiento continuo, sin que se vea afectado su rendimiento ni se produzcan fallas. Para que se logre una buena calidad de energía eléctrica, sus variables deben cumplir con ciertas condiciones, como una amplitud estable en el valor RMS de la tensión, la continuidad del suministro sin interrupciones, una forma de onda limpia, sin distorsión, y una frecuencia estable.

Cuando la calidad de la energía eléctrica es deficiente, se presentan perturbaciones en la red, como variaciones de voltaje, distorsión armónica y, en general, eventos transitorios en el sistema eléctrico. La mayoría de los problemas asociados con la calidad de la energía eléctrica están vinculados a fallas en las instalaciones eléctricas, más que a problemas en el suministro de energía en sí.

El presente estudio tiene como objetivo analizar la calidad de la energía eléctrica en la Universidad de Atacama. Para ello, se utilizará un equipo medidor y analizador de calidad de energía, que se instalará en un transformador de 500 kVA que suministra energía a áreas clave del establecimiento, como Finanzas, la Biblioteca y algunas salas de clases. A partir de este análisis, se pretende evaluar el comportamiento de la red eléctrica y proponer posibles mejoras para optimizar la calidad de la energía en la universidad.

El segundo capítulo de este documento presentará los conceptos clave relacionados con la calidad de la energía, tales como voltaje, corriente, potencias, factor de potencia y distorsión armónica, entre otros. En el tercer capítulo, se abordará el cumplimiento de los estándares establecidos por la norma técnica de calidad de servicios para sistemas de distribución y la norma técnica de seguridad y calidad de servicio. El cuarto capítulo describirá las características y el procedimiento de instalación del equipo medidor y analizador de calidad de energía. En el quinto capítulo, se realizará el análisis de las variables eléctricas obtenidas, y finalmente, en el último capítulo, se presentarán las propuestas de mejora para optimizar la calidad de la energía en el establecimiento.

Garantizar una buena calidad de energía eléctrica en la Universidad de Atacama trae consigo beneficios significativos, como una mayor confiabilidad en el sistema eléctrico, un mejor aprovechamiento de la energía y una mejora en la eficiencia de la red eléctrica. Esto contribuirá a una mayor estabilidad de la red y a la optimización de los procesos productivos, lo que redundará en un mejor funcionamiento general. Además, al reducir los riesgos asociados a problemas de voltaje, frecuencia y corriente, se prevendrán irregularidades en el suministro eléctrico que podrían dañar los dispositivos electrónicos, evitando así costos de reparación o reemplazo.

1.1 Antecedentes

La finalidad de este proyecto, es realizar un análisis de calidad de energía en el sector norte de la Universidad de Atacama. El recinto educacional se encuentra en funcionamiento 7 días a la semana de lunes a sábado, debido a que imparte clases para las jornadas diurnas y vespertinas por lo que el sistema enérgico es de suma importancia para las actividades para el personal que trabaja y los estudiantes.

A través de este estudio se busca conocer y analizar las condiciones en las que se encuentra la calidad de energía eléctrica, ya que la universidad está compuesta por diferentes cargas como unas de ellas son dispositivos electrónicos, iluminación de bajo consumo como luces LED, entre otros. Estas cargas no lineales mencionadas conllevan a tener armónicos en la red eléctrica por lo que pueden causar calentamiento en un sistema, lo que conlleva una pérdida y desgaste de los equipos eléctricos.

Cabe señalar que, la universidad de atacama cuenta con más puntos de subestaciones encargadas de distribuir la energía eléctrica en cada sector del recinto educacional, por lo que este estudio se enfocara solamente en dicho sector mencionado.

De esta manera, se busca que la Universidad de Atacama presente mejorías en tener una buena calidad de energía que a la vez se podrá disminuir fallas en la red e interrupciones del suministro eléctrico.

1.2 Planteamiento del problema

La Universidad de Atacama necesita un análisis técnico de calidad de energía ya que se identificó que hay dispositivos electrónicos que están conectadas al sistema eléctrico como ordenadores, impresoras, fuentes de alimentación conmutadas, aire acondicionado, luces LED, entre otros, son cargas no lineales las cuales conlleva como consecuencia la distorsión de la forma de onda sinusoidal de la corriente afectando a los equipos mencionados anteriormente ya que están conectados al sistema eléctrico y además, termina afectando la calidad de energía que tiene el recinto educacional.

Al presentar déficit en la calidad de energía conlleva la disminución de la útil de los equipos, sobrecarga de los cables, disparo falso de las protecciones eléctricas, la pérdida de eficiencia de la distribución eléctrica y mal funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

1.3 Justificación del problema

El presente análisis se enfocará en estudiar la calidad de energía en la Universidad de Atacama, ya que al realizar este análisis se podrá demostrar que en la red de suministro eléctrico se encontrará con presencia distorsión armónica ya sea de corriente y de voltaje en la red eléctrica. Así, el presente trabajo permitirá mostrar y/o presentar cambios favorables a la calidad de energía en el recinto educacional, donde se verá reflejado en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, equipos, iluminarias y la eficiencia en la red de suministro eléctrico. Además de ofrecer una mirada integral sobre el daño que provoca la distorsión en el sistema eléctrico.

También, se velará por el cumplimiento de las normativas de calidad de energía eléctrica, la cual se busca que este regularizado y se guie del cumplimiento de mejorar la eficiencia eléctrica de la red. Asimismo, mejorara la vida útil de los equipos y de los dispositivos de la universidad, y a la vez se reducirán los costos de tarifa y de mantenimiento de los equipos y/o dispositivos.

1.4 Alcance

El alcance del presente análisis de calidad de energía es dar a conocer la eficiencia energética que hay en el transformador de 500 kVA ubicado en la biblioteca Vicente Rodríguez Bull del campus Paulino de Barrio (área norte) de la Universidad de Atacama, del cual se evaluará este transformador donde se instalará un equipo de medición de variables eléctricas, del cual se obtendrá los valores de voltaje, corriente, potencias, factor de potencia y los armónicos. Este dispositivo de mediciones estará en un periodo de 7 días midiendo estas variables eléctricas en el recinto educacional.

A partir de las variables eléctricas medidas se comparará y se evaluará si está cumpliendo con las normativas de calidad de energía, en el sector norte de la Universidad de Atacama, esto dependerá si se está rigiendo y/o cumpliendo bajo normativa. Una vez evaluados los datos obtenidos de las variables eléctricas, se puede ver en que condicione se encuentra el sistema eléctrico y a partir de ello se planteará una solución.

1.5 Metodología

El presente análisis de calidad de energía corresponde a un proyecto del cual se instalará el equipo de medición PowerPad III modelo 8336, a través de este equipo se obtendrá datos de variables eléctricas y la conexión de dicho equipo, será al interior del tablero de distribución y el punto común de conexión (PCC) será el lado de baja tensión del transformador de 500 kVA que está ubicado en el sector norte de la Universidad de Atacama. Las mediciones se irán registrando cada 15 minutos durante un periodo de 7 días, luego de obtener estos datos se procederá a la realización del análisis, el cual estos valores serán comparados bajo normativa para verificar si está cumpliendo bajo normativa de calidad de energía, finalmente de comparar, evaluar y ver en qué condiciones están, se presentará mejoras al sistema eléctrico, a lo que conlleva una mejora a la eficiencia a eléctrica de la Universidad de Atacama.

1.6 Objetivo General

Analizar la calidad de energía en un transformador de 500 kVA que alimenta a un tablero de distribución en el área norte de la Universidad de Atacama y exponer soluciones al sistema eléctrico.

1.7 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros eléctricos que se presentara de calidad de energía.

- Calcular las variables eléctricas obtenidas a través del instrumento de medición en el transformador.
- Comparar los resultados obtenidos de la medición con la normativa.
- Presentar mejoras a la red de suministro eléctrico para hacer más eficiente la calidad energía.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

El presente capítulo se presentarán conceptos claves y profundizar temas para poder llevar a cabo el análisis técnico de calidad de energía en la Universidad de Atacama.

2.1 Variables eléctricas

Las variables eléctricas son magnitudes físicas de las cuales se pueden medir, ya sea en circuito eléctrico, un equipo y/o dispositivo electrónico. Los principales parámetros son la corriente, el voltaje, la impedancia, la potencia y frecuencia.

2.1.1 Corriente

Corriente eléctrica es el movimiento de electrones que circulan a través de un conductor, en un tiempo de 1 segundo. Su unidad de medida es el Ampere (A).

2.1.2 Voltaje

Es fuerza que se ejerce sobre los electrones, para que se desplacen a través de circuito. También se le denomina diferencia de potencial, y su unidad de medida es el Volt (V).

2.1.3 Impedancia

La impedancia es la oposición al paso de los electrones a través de un circuito. Entre ellas se puede encontrar la resistencia que es un elemento pasivo y la reactancia que está conformada por una inductancia y capacitancia, se les denomina como elemento activo.

2.1.4 Frecuencia

La frecuencia es el número de ciclos que una onda sinusoidal completa en un tiempo de 1 segundo. Su unidad de medida es Hertz (Hz).

2.1.5 Potencia eléctrica

La potencia se define como la energía consumida o producida en un determinado tiempo. La unidad de medida es en Watt (W).

La potencia eléctrica se puede clasificar en varios tipos, dependiendo de cómo se utilice y se transfiera la energía en el sistema eléctrico.

2.2 Factor de Potencia

El factor de potencia es importante para poder determinar si el sistema eléctrico que opera en corriente alterna está siendo eficiente en términos energéticos, es decir, si está convirtiendo la energía de manera eficiente, o todo lo contrario si está operando de manera ineficiente por lo que da como resultado energía desperdiciada. Cuanto más cerca de 1 el valor del factor de potencia mayor será la eficiencia energética de la instalación, lo que significa que gran parte de la energía utilizada se está convirtiendo en trabajo, mientras que un factor de potencia bajo indica que la energía no se está utilizando plenamente. (Thiago, 2020).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

2.2.1 Potencia activa

La potencia activa o también conocida como la potencia útil, viene representada por una P y es la energía que se necesita para realizar un trabajo. Esta potencia es la que enciende luces, hace mover equipos y alimenta los dispositivos electrónicos. Su unidad de medida es el Watt (W) y en unidades más grandes como Kilowatt (kW), megawatt (MW), entre otras.

2.2.2 Potencia reactiva

La potencia reactiva viene representada por una Q , y es la energía que aparece en las instalaciones eléctricas cuando se utilizan aparatos que necesitan crear campos magnéticos y eléctricos para funcionar. Es decir, que tienen bobinas y condensadores. Esta potencia reactiva no realiza ningún trabajo útil, pero es esencial para el funcionamiento de equipos, como motores y transformadores. Su unidad de medida es voltamperios reactivos (VAr) y en unidades más grandes como Kilovoltamperios reactivos (kVAr), megavoltamperios reactivos (MVar) o gigavoltamperios reactivos (GVar).

2.2.3 Potencia Aparente

La potencia aparente viene representada por una S , es una potencia consumida en un equipo o sistema eléctrico. Es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva y es la capacidad total de un sistema eléctrico para realizar cargas o trabajo y mantener la energía almacenada. Su unidad de medida es Voltiamper (VA) y en unidades más grandes como Kilovoltiamper (kVA), megavoltiamper (MVA) o gigavoltiamper (GVA).

2.3 Armónicos

Se conoce como distorsión armónica a la deformación de una de la onda sinusoidal, esto se dice que contiene armonios en la red eléctrica. Los armónicos son tensiones o corrientes están formadas por un componente fundamental de frecuencia (50Hz), más una serie de corrientes superpuestas de frecuencias, múltiplos de la fundamental, denominado armónicos eléctricos.

El resultado es una deformación de la corriente, y como consecuencia de la tensión, conlleva una serie de efectos secundarios asociados.

2.3.1 Efectos de los armónicos

Los efectos más comunes que se presentan en las redes eléctricas son las siguientes:

- Disminución del factor de potencia, producto del aumento de la potencia aparente.
- Disparo falso de las protecciones eléctricas.
- Sobrecargas en conductores.
- Vibraciones y sobrecargas en máquinas rotatorias.
- Inestabilidad del sistema eléctrico.
- Mal funcionamiento de los relés de protección.
- Mediciones erróneas en equipos de medidas.
- Perturbaciones en equipos de control.
- Aumento de temperatura en conductores (efecto Joule)
- Aumento de pérdidas técnicas en alimentadores, producto de la sobrecarga y del aumento de la potencia aparente.
- Sobrecargas y/o descalificación de transformadores.
- Pérdidas de capacidad en líneas de distribución de energía.

Estos efectos mencionados por los armónicos, conlleva a la reducción en el rendimiento de los sistemas de generación, transporte y utilización de la energía. También ocasionan un envejecimiento del aislamiento de la red eléctrica, y como consecuencia, la reducción de la energía.

Es evidente la necesidad de limitar o mitigar los armónicos y las perturbaciones eléctricas producidas por los usuarios y por el sistema eléctrico de distribución, para que los problemas antes mencionados sean eliminados o reducidos a niveles aceptables recomendados por normas.

2.3.2 Secuencia armónica

Las redes de secuencia son una herramienta matemática que se utiliza en el área de Ingeniería Eléctrica basadas en el Teorema de Fortescue de las componentes simétricas

que se utiliza en el estudio de sistemas polifásicos que se encuentran desbalanceados, por ello son utilizados para la detección de fallas en el sistema eléctrico de potencia. La secuencia de red de una onda de un armónico es con secuencia de desfase que existe entre de dicho armónico y la onda de frecuencia de la fundamental.

La secuencia armónica se clasifica por tres parámetros, orden, frecuencia y secuencia. El orden presenta el número del armónico y empieza con la frecuencia de 50 Hz y cada vez que va aumentando de orden, se irá aumentando la frecuencia, por lo tanto, se irá multiplicando el orden del armónico con la frecuencia, en este caso con los 50Hz (la frecuencia fundamental en Chile es 50Hz).

A continuación, se explicará de forma más sencilla en una tabla los tres parámetros:

Tabla 2.1 secuencia armónica

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

Los armónicos presentan distintas secuencias de fase de las cuales son:

- **La secuencia positiva:** Para esta secuencia positiva tiene la misma rotación de las fases que la tensión aplicada, por lo tanto, sigue la misma secuencia de giro original (L1-L2-L3).
- **La secuencia negativa:** Para la secuencia negativa tiene rotación de fase opuestas, por lo que su secuencia es opuesta al giro original (L1-L3-L2).
- **La secuencia cero u homopolar:** Para una red de secuencia cero u homopolar, los fasores de voltaje o corriente se encuentran en fase, por esa razón estos en una conexión en estrella no se van a restar, sino que se van a sumar. Por lo que sus vectores tendrán el mismo sentido y dirección.

2.3.3 Índices para la medición de armónicos

Para analizar los efectos producidos por los armónicos se utilizan generalmente unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Para el análisis los índices son comparados con valores límites dados por las normas o con valores de soportabilidad de los equipos.

A continuación, se presentan las definiciones de los índices, más utilizados de nivel de distorsión armónicos, como el de distorsión armónica individual y distorsión armónica total, tanto como de corriente y de voltaje.

2.3.3.1 Distorsión armónica individual

Se representa en porcentaje que hay de una cantidad de armónicos, ya sea en corriente o en voltaje, respecto al valor fundamental. El índice de distorsión armónica individual se define mediante la siguiente ecuación.

$$D_j = \frac{X_n}{X_1} * 100$$

Donde:

- D_j : Distorsión armónica individual.
- X_n : Valor de un determinado armónico.
- X_1 : Valor del armónico de la frecuencia fundamental.

2.3.3.2 Distorsión armónica total

Es la relación entre el componente armónico total y el componente fundamental. Los índices de distorsión armónica total se definen como:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^n X_j^2}}{X_1} * 100\%$$

Donde:

- THD: Valor en porcentaje de la distorsión armónica total.
- X_j : Valor de un determinado armónico.
- X_1 : Valor del armónico de frecuencia fundamental.

2.3.3.3 Distorsión de demanda total (TDD)

La distorsión de demanda total (TDD) es un parámetro que evalúa la relación que hay entre la corriente armónica y la demanda máxima de corriente de carga. Se utiliza para establecer los límites aceptables de distorsión.

La TDD se basa en el punto común de conexión (PCC), que es el punto desde el que cada usuario recibe energía de la fuente de alimentación. Solamente se utiliza para el cálculo de corriente.

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

Donde:

- TDD: Distorsión de demanda Total (%).
- I_j : magnitud de la armónica de la corriente de suministro.
- I_L : demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.
- n : número de armónico.

2.3.4 Filtros armónicos

Los filtros de armónicos son dispositivos diseñados para reducir la presencia de armónicos en la red eléctrica y prevenir distorsiones armónicas. Además, que favorecen

una vida útil y prolongada de los equipos, reducen los costos de mantenimiento y disminuyen los riesgos de fallos en los sistemas. Entre ellos podemos encontrar los filtros pasivos, activos y híbridos.

2.3.4.1 Filtros armónicos pasivos

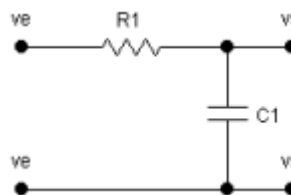
Son circuitos que controlan la señal de salida en función de la frecuencia, se utilizan principalmente para separar un grupo de frecuencias de otras. Estos circuitos los componen solo componentes pasivos (Resistencias, Bobinas y Condensadores), recibiendo el nombre de filtros pasivos. Además, decir que en temas monetarios son más baratos que un filtro activo.

Estos tipos de filtro, se utilizan para atenuar señales por lo que no son muy recomendables para trabajar con señales débiles, además no son precisos, pero se utilizan más y son más fáciles de diseñar.

Entre ellos podemos encontrar cuatro tipos y son:

- **Filtro pasa bajos:** Un filtro pasa baja consta de poner una resistencia en serie con un capacitor. Permite el paso de señales con baja frecuencia, eliminando las frecuencias altas. Por lo tanto, a frecuencias bajas la reactancia capacitiva será menor y en frecuencia altas la reactancia capacitiva será mayor.

Figura 2.1 Filtro pasa bajos



Fuente: Any (2020)

Como se puede observar en la figura 2.1 se puede decir que, R1 y C1 forman un divisor de tensión, al disminuir el valor de X_c disminuye el valor de la tensión de salida cuando la frecuencia aumenta

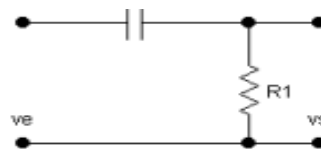
La ecuación del filtro pasa baja es la siguiente:

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

Donde:

- X_c = Reactancia del condensador o capacitiva
 - ω = Frecuencia angular
 - C= Capacidad.
 - F= frecuencia
-
- **Filtro pasa alto:** Un filtro pasa alto consta de poner un condensador en serie con una resistencia. (esta configuración es inversa a la pasa alto). Permite el paso de señales con alta frecuencia, eliminando las frecuencias bajas.

Figura 2.2 Filtro pasa alto

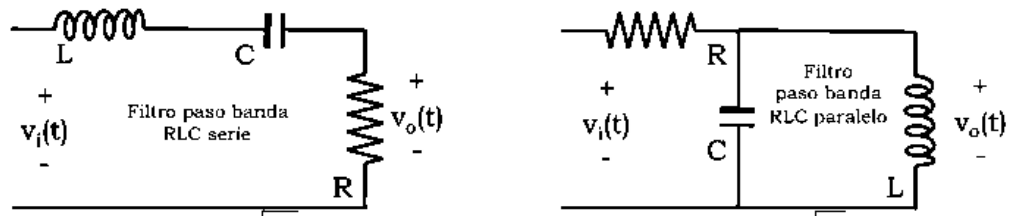


Fuente: Any (2020)

Como se puede observar en la figura 2.2 se puede decir que, R_1 y C_1 forman un divisor de tensión, al disminuir el valor de X_c aumenta el valor de la tensión de salida cuando la frecuencia aumenta.

- **Filtro pasa banda:** Este filtro se define en la construcción de un circuito como RLC, este puede estar en serie o en paralelo. Permite el paso de señales con unas determinadas frecuencias, eliminando el resto de frecuencia.

Figura 2.3 Filtro pasa banda



Fuente: Enrique (2023)

En la figura 2.3 se puede observar que el filtro pasa banda, se puede representar ya sea en serie o en paralelo.

También decir que hay otra forma de construir un filtro pasa banda que la unión de un circuito pasa alta y un pasa bajas.

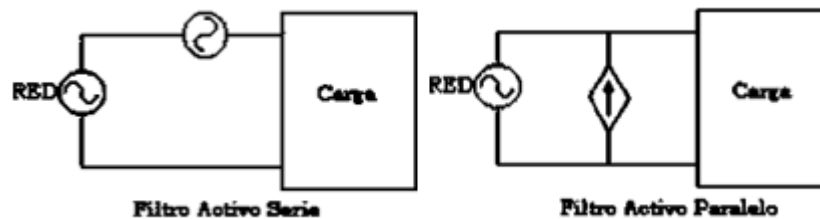
- **Filtro rechaza banda:** Un filtro rechaza banda también llamado "filtro elimina banda" o "filtro notch". Para tener una idea de este tipo de filtros, tenemos que decir que los filtros rechaza banda son totalmente opuestos a los pasa banda, por lo que elimina el paso de señales con unas determinadas frecuencias. Un filtro de rechaza banda se obtiene conectando en paralelo un filtro pasa altos y uno pasa bajos.

2.3.4.2 Filtros de armónicos activos

Los filtros activos están conformados por resistencias, capacitores y amplificadores operaciones. Dichos filtros tienen el poder de prohibir o permitir el paso de señales a determinados valores de rango de frecuencias. Además, de tener componentes activos (Transistor o Amplificador Operacional) que regeneran la señal y por lo tanto podemos tener una tensión de salida para una determinada frecuencia mayor que la de entrada. En filtros pasivos la tensión de salida siempre es menor que la de entrada.

Entre sus múltiples ventajas respecto a los sistemas de filtrado pasivo podemos destacar su precisión. Es capaz de inyectar la corriente armónica exacta para compensar la existente en la red en cada armónico, sin depender de la variabilidad de la carga. Una de sus desventajas es ser más costoso que un filtro pasivo, ya que ofrecen mayor control en el sistema. Este filtro es igual que el filtro pasivo, se puede conectar en serie o ya sea en paralelo.

Figura 2.4 Filtros activos



2.3.4.3 filtros armónicos híbridos

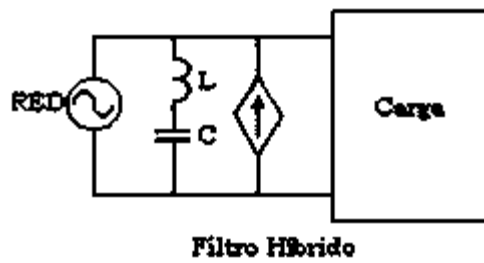
Las corrientes armónicas inyectadas por cargas no lineales van a producir sobretensiones en las cargas, es por ello, que equipos funcionen adecuadamente y sin averiarse deben ser suministradas una correcta tensión sinusoidal, pero a causa de los armónicos se tendrá una tensión totalmente distorsionada.

Los filtros híbridos tienen como objetivo mitigar el efecto de las corrientes armónicas en todas las frecuencias, pero la parte correspondiente a los filtros pasivos se encargará de

atenuar las corrientes armónicas de las frecuencias predominantes, y la otra parte los filtros activos se encargarán de atenuar las corrientes armónicas del resto de las frecuencias.

En un filtro híbrido la componente pasiva se encargará de recibir las distorsiones armónicas a la frecuencia predominante y los filtros activos inyectan corriente opuestas a las corrientes armónicas para mitigar la distorsión del resto de frecuencias.

Figura 2.5 Filtro Híbrido



CAPÍTULO III

NORMATIVA TÉCNICA

En el presente capítulo, se definirá la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución y la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, que ambas establecen los valores deseados que se deben regir, por lo tanto, servirá para un correcto análisis técnico de calidad de energía y verificar si están cumpliendo bajo Normativa Técnica (NT).

3.1 Normativa Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución

La norma técnica de calidad de servicios para sistema de distribución tiene como objetivo general permitir el correcto funcionamiento de sector eléctrico, para lo cual deberá regular los aspectos técnicos, de seguridad, coordinación, calidad, información y económicos del funcionamiento de dicho sector. En particular, la presente Norma técnica tiene como objetivo principal establecer las exigencias y estándares de Calidad de Servicio para los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica.

Esta norma técnica se conforma por 7 capítulos, los cuales son Terminología y Exigencias generales, Obligaciones funciones, después siguen los 3 capítulos asociados a calidad de servicios que son calidad de producto, calidad comercial y calidad de suministro, luego viene el capítulo de sistema de Medida y Monitoreo y anexo de sistema de medida, monitoreo y control que se relaciona ambos y finalmente, hay un nuevo capítulo de auditorías y disposiciones transitorias.

Mencionar algunos de los artículos relevantes de la norma técnica son:

Artículo 1-5 Niveles de frecuencia y Tensión en sistemas de Distribución: procurando que la magnitud de la frecuencia nominal en Sistemas de Distribución es de 50Hz.

Tratándose de tensiones, las magnitudes nominales deberán ser las siguientes:

- Baja Tensión en Distribución (BT): Tensiones iguales o inferiores a 1 kV. El voltaje nominal estándar en sistemas de tres o cuatro conductores y tres fases será de 220 Volts entre fase y neutro.
- Media Tensión en Distribución (MT): Tensiones superiores a 1 kV e inferiores o iguales a 23kV.

Artículo 2-2 obligaciones de los clientes usuarios: clientes y usuarios deben Cumplir con las exigencias establecidas en la presente Norma técnica respecto de sus instalaciones conectadas en la Red de Distribución.

3.1.1 Regulación de tensión

En el artículo 3-1 (capítulo 3 de la norma técnica) se evalúa la regulación de tensión en un punto de la Red de distribución, se utilizará el siguiente indicador:

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

Donde:

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

De acuerdo a la norma técnica dice que 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 en el punto de conexión de los Usuarios, promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la regulación de tensión se mantenga dentro de los siguientes límites figura 3.1

Figura 3.1 Límite para regulación de tensión

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

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución

Se señala que, en Estado Normal o Estado Anormal, todos los valores eficaces de la tensión, promediados en 15 minutos para todos los tipos de redes, en BT y MT, deberán situarse dentro del intervalo $V_n - 15\%$ y $V_n + 10\%$

3.1.2 Monitoreo de frecuencia

De acuerdo al artículo 3-4 menciona el monitoreo de la frecuencia de tensión, señala que las Empresas Distribuidoras deberán monitorear la frecuencia de la tensión de suministro, para lo cual, mensualmente, deberán medir y registrar la frecuencia en la Cabecera de los Alimentadores, promediada en intervalos de 15 minutos, de manera de elaborar una estadística que permita identificar el porcentaje del tiempo en que la frecuencia se encuentra dentro de los siguientes intervalos de la figura 3.2.

Figura 3.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia

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

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución

3.1.3 Distorsión armónica de tensión

Como señala el artículo 3-5 distorsión armónica de tensión, para evaluar la Distorsión Armónica en un punto de la Red de Distribución se utilizarán los siguientes indicadores:

- Distorsión armónica individual de la tensión.
- Distorsión armónica total de la tensión.

La norma técnica señala que 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 cada tensión armónica individual, promediados en 15 minutos, deberán ser menores o iguales a los límites indicados en la siguiente figura 3.3.

Figura 3.3 Límites para índices de Distorsión individual expresados de la 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: Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución

Cabe señalar que valores eficaces de la tensión promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica total de tensión no supere el 8%, tanto en BT como en MT.

3.1.4 Distorsión armónica de corriente

Como señala los artículos 3-7 y 3-8 de distorsión armónica de corriente para usuarios en baja tensión, para evaluar la Distorsión Armónica en un punto de la Red de Distribución se utilizarán los siguientes indicadores:

- Distorsión armónica individual de corriente.
- Distorsión de demanda total (TDD).
- Distorsión armónica total de corriente.

De acuerdo al artículo 3-7 la distorsión de demanda total (TDD) señala que, para la aplicación del presente artículo, se entenderá que el Punto Común de Conexión (PCC) de un Usuario corresponde al punto de la Red de Distribución más cercano a él y donde otros Usuarios se conectan a dicha red. Mencionar que se debe cumplir un 20% de TDD por normativa técnica.

La norma técnica señala que 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 corriente consumida o inyectada por un Usuario conectado en BT, medidos en el Punto de Conexión y promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la Distorsión Armónica cumpla con los siguientes límites de la figura 3.4.

Figura 3.4 Límites de Distorsión armónica de corriente en el punto de conexión para usuarios en baja tensión

Orden de la armónica (n)	Usuarios de tarifa BT1	Usuarios de tarifas BT, excepto BT1
	Corriente armónica máxima, en (A)	Corriente armónica máxima, en (%) de la corriente fundamental
Armónicos Impares No Múltiplos de 3		
5	2,28	12,0
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3,0
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,20	1,6
25	0,18	1,6
>25	4,5/n	0,2+0,8*25/n
Armónicos Impares Múltiplos de 3		
3	4,60	16,6
9	0,80	2,2
15	0,30	0,6
21	0,21	0,4
>21	4,5/n	0,3
Armónicos Pares		
2	2,16	10,0
4	0,86	2,5
6	0,60	1,0
8	0,46	0,8
10	0,37	0,8
12	0,31	0,4
>12	3,68/n	0,3
THD_I	No Aplica	20

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución

3.1.5 Límite del factor de potencia

De acuerdo al artículo 3-10 a la norma técnica, el límite El Factor de Potencia medido en el punto de conexión del Cliente y representativo de un mes de medición, deberá mantenerse dentro de los límites que se indican que deber ser menor o igual a 0,95 capacitivo (CAP) y mayor o igual a 0,93 inductivo (IND).

3.2 Norma técnica de seguridad y calidad de servicio

La normativa técnica de seguridad y calidad de servicio establece como objetivo general de las exigencias de Seguridad y Calidad de Servicio de los sistemas interconectados. Señala diversos artículos para la evaluación de sistemas eléctricos los cuales establece estándares y exigencias que se deben cumplir.

De acuerdo al artículo 5-18, señala que las Instalaciones de Clientes Regulados deberán presentar un factor de potencia calculado en intervalos integrados de 15 minutos, en cualquier condición de carga, medido en sus respectivas Instalaciones de Conexión conectadas a los Puntos de Control del Cliente, según nivel de tensión como se indica a continuación:

- 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo en los Puntos de Control con tensión nominal inferior a 30 (kV).

Dicho lo anterior la Normativa Técnica de Seguridad y Calidad, afirma límites casi semejantes a la norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución para el factor de potencia.

CAPÍTULO IV

MEDICIONES ELÉCTRICAS

En el presente capítulo, se dará a conocer el procedimiento de medición que se realizó, su duración y cada cuanto tiempo estará tomando registros. También se mencionará el tipo de equipo de medición que se utilizó para la obtención de datos de las variables eléctricas, el punto común de conexión (PCC) y cómo fue la instalación del equipo de medición con sus componentes.

4.1 Medición

La medición eléctrica que se realizó tiene con la finalidad de analizar e identificar las características eléctricas que se presentaran en el sistema. Estos parámetros eléctricos serán el voltaje, corriente, armónicos, las potencias y a la frecuencia. Es por ello que, a través de un equipo analizador y medidor, será capaz de medir las cantidades eléctricas mencionadas.

El equipo analizador se encontraba situado al interior del tablero de distribución de la Universidad de Atacama como se presenta en la figura 4.1. Este equipo se instalará el día 25 de septiembre de 2024 a las 10:30am horas hasta el día 2 de octubre a las 10:30am horas, obteniendo una totalidad de 674 datos tomados, pero se tomarán en cuenta 667 por el corte de suministro de energía. Los 7 datos restantes, no se tomarán en cuenta ya que tienen valores insignificantes. Por lo tanto, el rol que cumplirá el equipo es que estará midiendo durante 7 días consecutivos, y cada 15 minutos irá presentando muestras de las mediciones eléctricas.

Figura 4.1 tablero de distribución



Todo este procedimiento fue realizado al interior de la Universidad de Atacama a un transformador de 500 kVA que está ubicado en el área norte (atrás de biblioteca)

4.2 Equipo de medición

El equipo de medición que se utilizó para la realización de análisis de calidad de energía en la Universidad de Atacama, fue el PowerPad III modelo 8336 de la marca AEMC como se presenta en la siguiente figura 4.2.

Figura 4.2 PowerPad III modelo 8336



Fuente: Manual PowerPad III Modelo 8336

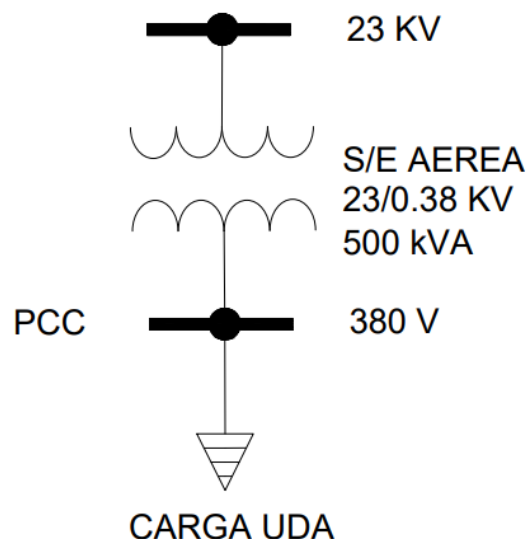
El equipo de medición de la figura 4.2 tiene diversas características y funciones que puede realizar, entre ellas las que se utilizó para este análisis de calidad de energía son las siguientes:

- Medidas de armónicos (referidas al valor fundamental o RMS) para voltaje, corriente o potencia, hasta el 50° armónico.
- Cinco terminales de entrada de voltaje y cuatro de corriente
- Medida de potencia activa, reactiva y aparente por fase y su respectiva suma total.
- Muestra y captura armónicos de voltaje, corriente y potencia hasta el orden 50, incluida la dirección en tiempo real.
- Visualización en tiempo real de diagramas de fasores con valores y ángulos de fase.
- Frecuencia nominal de 40 a 70 Hz.

4.3 Punto común de conexión

El punto común de conexión (PCC) se designó en el lado de baja tensión del transformador de 500 kVA, como se presenta en la figura 4.3 exactamente ubicado en el tablero general de distribución, aguas abajo de la protección general.

Figura 4.3 Punto común de conexión

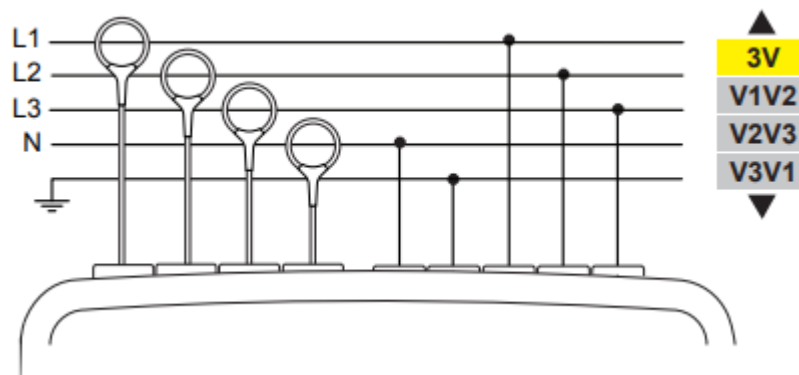


4.4 Instalación del equipo de medición

El procedimiento de instalación del equipo analizador de calidad de energía AEMC 8336, se instaló al interior del tablero general de distribución de la universidad, el cual se encuentra cerrado bajo llave y solo se puede abrir por personal autorizado del recinto educacional.

La conexión del equipo de medición se conectó en la configuración trifásica de 5 hilos como se observa en la figura 4.4

Figura 4.4 Analizador de calidad de energía AEMC 8336 conexión en sistema trifásico

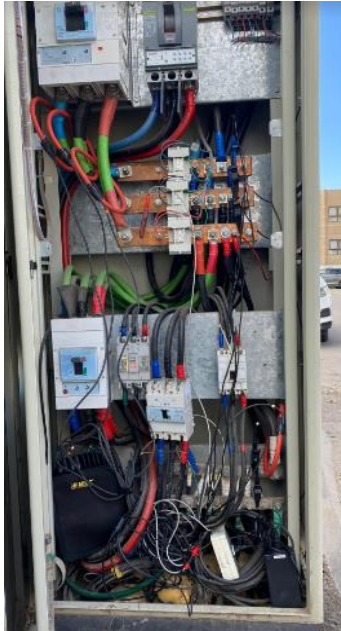


Fuente: Manual PowerPad III Modelo 8336

Como se aprecia en la figura 4.4 la configuración del equipo de medición se conectaron 4 sondas de medición de corrientes que están conectadas por cada fase y el neutro del sistema eléctrico (L1, L2, L3 y N) por último, se conectó 5 sondas de medición para la tensión por cada fase, el neutro y tierra (L1, L2, L3, N y GND). Cabe señalar que toda esta conexión se realizó en el tablero general de distribución aguas bajo de la protección general.

A continuación, en la figura 4.5 se mostrará como quedó instalado el equipo con las sondas de mediciones de corriente y voltaje.

Figura 4.5 Instalación del equipo de medición



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA

En el presente capítulo se analizará las variables eléctricas obtenida durante en el periodo de medición. Estas variables eléctricas serán comparadas con la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución, con la finalidad de saber en qué condiciones esta la calidad de energía del sistema eléctrico de la Universidad de Atacama.

5.1 Análisis de voltaje

Para dar inicio al análisis de voltaje, se deberá tener en cuenta el artículo 3-1 de la Normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la cual establece que se debe regir una regulación de voltaje para usuarios de baja tensión en la red y con una densidad media, es de $\pm 7,5\%$ para el voltaje.

La tensión en el punto común de conexión (PCC) es de 220 V nominal entre fase y neutro, por lo tanto, la tensión de la red es baja tensión. A continuación, se presentará la tabla 5.1 donde señala los límites de regulación de tensión.

Tabla 5.1 Límites de tensión

Límite superior	236,5 V
Tensión nominal	220 V
Límite inferior	203,5 V

Dicho lo anterior, en la siguiente tabla 5.2 se puede observar los límites de tensión entre fase y neutro de las líneas 1, 2 y 3.

Tabla 5.2 Límite de tensión fase y

Líneas de tensión	L1	L2	L3
Máximo	243,3 V	237,6 V	236,8 V
Promedio	235,42 V	230,53 V	230,38 V
Mínimo	103,4 V	101,2 V	101,1 V

5.2 Regulación de tensión de las líneas 1, 2 y 3

La regulación de tensión que se presentará a continuación servirá para controlar la tensión y estabilizar las variaciones de voltaje del sistema de suministro eléctrico de la Universidad de Atacama. Por lo tanto, se procederá a calcular la regulación de tensión, en la tabla 5.2 se muestran los promedios de los voltajes para cada una de las fases que se obtuvieron de la medición realizada.

$$\text{Linea 1 } \Delta V_k = \frac{|235,42 \text{ V} - 220 \text{ V}|}{220 \text{ V}} * 100\% = 7,01 \%$$

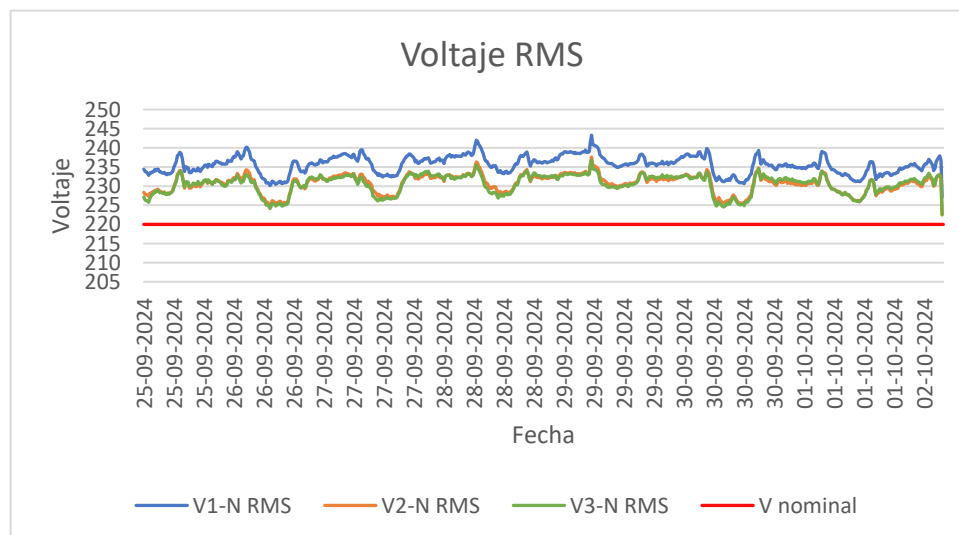
$$\text{Linea 2 } \Delta V_k = \frac{|230,53 \text{ V} - 220 \text{ V}|}{220 \text{ V}} * 100\% = 4,79 \%$$

$$\text{Linea 3 } \Delta V_k = \frac{|230,38 \text{ V} - 220 \text{ V}|}{220 \text{ V}} * 100\% = 4,72 \%$$

La regulación de tensión de las líneas L1, L2 y L3 según lo calculo se puede decir que la se encuentran dentro de los límites que rige la norma de $\pm 7,5\%$, lo cual está cumpliendo con uno de los puntos que se establece con la normativa técnica (NT).

A continuación, en la figura 5.1, se puede observar el comportamiento del voltaje RMS de las líneas L1, L2 y L3, durante el periodo de medición.

Figura 5.1 voltaje RMS



Se puede observar en la figura 5.1, que el voltaje con respecto al neutro se tiende a variar con respecto al límite superior de tensión, por lo que no es estable a los 220 v nominal. Las líneas 2 y 3 tienden a tener un comportamiento similar, mientras que la línea 1 varía el comportamiento de voltaje. Cabe señalar que la regulación de voltaje de cada línea se encuentra dentro del rango de $\pm 7,5\%$. Aunque los resultados pueden variar entre líneas, todas se mantienen dentro de los límites establecidos por la normativa técnica.

Para cada una de las líneas fueron variando según a sus resultados, los cuales algunas se describirán a continuación:

- Para la L1 se tiene 1 dato por debajo del límite inferior que son los 203,5 V y 228 datos por encima del límite superior que son los 236,5 V con un total de 229 datos que se encuentran fuera de rango, por lo tanto, hay 438 datos que están dentro de rango.
- Para la L2 se tiene 1 dato por debajo del límite inferior que son los 203,5 V y 1 datos por encima del límite superior que son los 236,5 V con un total de 2 datos que se encuentran fuera de rango, por lo tanto, hay 665 datos que están dentro de rango.
- Para la L3 se tiene 1 dato por debajo del límite inferior que son los 203,5 V y 1 datos por encima del límite superior que son los 236,5 V con un total de 2 datos que se encuentran fuera de rango, por lo tanto, hay 665 datos que están dentro de rango.

Sin embargo, dicho lo anterior ciertos datos calculados se encuentran en dentro de los límites de regulación de voltaje, por lo que ahora se procederá a calcular los porcentajes de cada línea de tensión, para verificar si cumplen con los estipulado de la Normativa Técnica que deben estar un 95% del tiempo de medición.

Para la línea 1 (L1) hay un total de 229 datos fuera de rango y un total de 667 datos obtenidos en la medición.

$$x = \left(\frac{229}{667}\right) * 100\% = 34,33\%$$

Esto nos señala que solo un 65,67% de los datos medidos están dentro del rango y 34,33% de datos que se encuentran fuera del rango. Por ende, No cumple con la Normativa Técnica.

Para las líneas 2 y 3 (L2 y L3) hay un total de 2 datos fuera de rango y un total de 674 datos obtenidos en la medición

$$x = \left(\frac{2}{667} \right) * 100\% = 0,3\%$$

Esto nos señala que solo un 99,7 % de los datos medidos están dentro del rango y 0,3% de datos que se encuentran fuera del rango. Por ende, Si cumple con la Normativa Técnica.

Tabla 5.3 Resultados de la regulación de tensión

Líneas de tensión	L1	L2	L3
Total, de datos medidos	667		
Datos fuera del rango	229	2	2
Datos dentro del rango	438	665	665
% de tiempo de datos dentro de tiempo	65,67%	99,7%	99,7%
Cumple con N.T.	No	Si	Si

En la tabla 5.3 se puede decir que la línea 1 los datos obtenidos están por debajo de los 95% del tiempo de la medición, por lo tanto, no estaría cumpliendo con lo que se establece en el artículo 3-1 de la Normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución.

5.3 Análisis de las corrientes

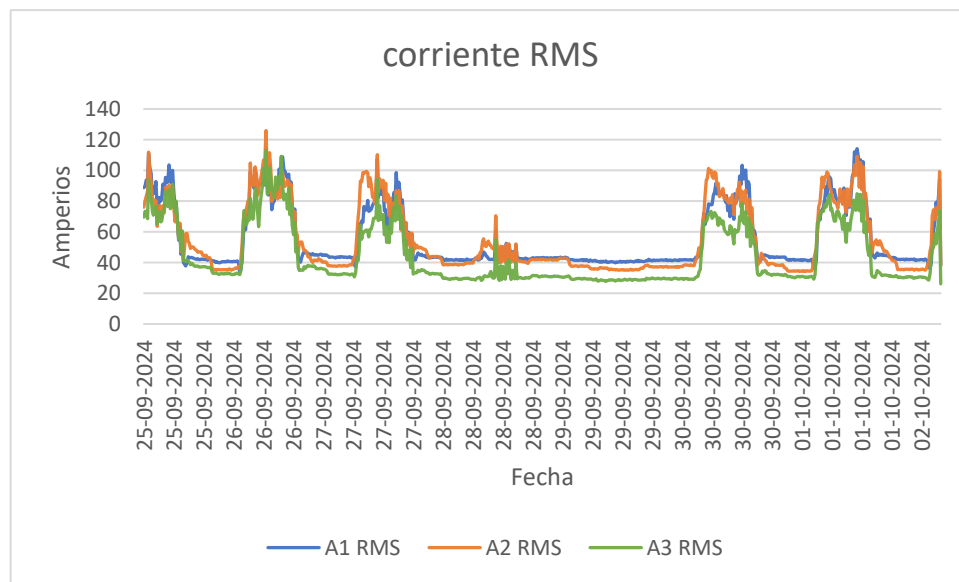
Para el análisis de corriente de procederá a calcular los valores para ver si existen un posible desbalance de cargas del transformador. A continuación, en la tabla 5.4 se muestran los valores máximo, promedio y mínimo de las corrientes de cada línea.

Tabla 5.4 Límite de la corriente

Líneas	L1	L2	L3
Máximo	114,2 A	125,95 A	112,98 A
Promedio	55,57 A	54,85 A	44,35 A
Mínimo	33,69 A	34,17 A	26,14 A

En la figura 5.4 se puede decir que hubo un desbalance de cargar, pero fue por motivos del corte de suministro eléctrico que fue programado alrededor de las 09:15am hasta las 10:45am, a consecuencia de esto se eliminaron 7 datos quedan con un total de 667 datos que se tomaran en cuenta, pero a pesar del corte de energía las cargas del sistema eléctrico se encuentran correctamente distribuidas.

Figura 5.2 corrientes RMS



5.4 Análisis de factor de potencia

Para comenzar con el análisis del factor de potencias a las líneas L1, L2 y L3, se debe regir a los límites y exigencias que establece la Norma técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. El cual el artículo 5-18 de dicha Norma Técnica establece límite respecto al factor de potencia, el cual son 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo para usuarios

regulados con un nivel de tensión inferior a 30kV, por lo tanto, estos valores respetarse el 98% del tiempo

También, señalar que en el artículo 3-11 indica que cuando la empresa distribuidora detecta un incumplimiento del FP, debe notificar al cliente junto con la próxima factura, informando el FP calculado, la diferencia respecto al límite establecido, una estimación del cargo adicional que se aplicaría.

A continuación, en la tabla 5.5 se mostrarán los datos del factor de potencia por cada línea y el promedio que se tuvieron durante el tiempo de medición, los cuales son los siguientes:

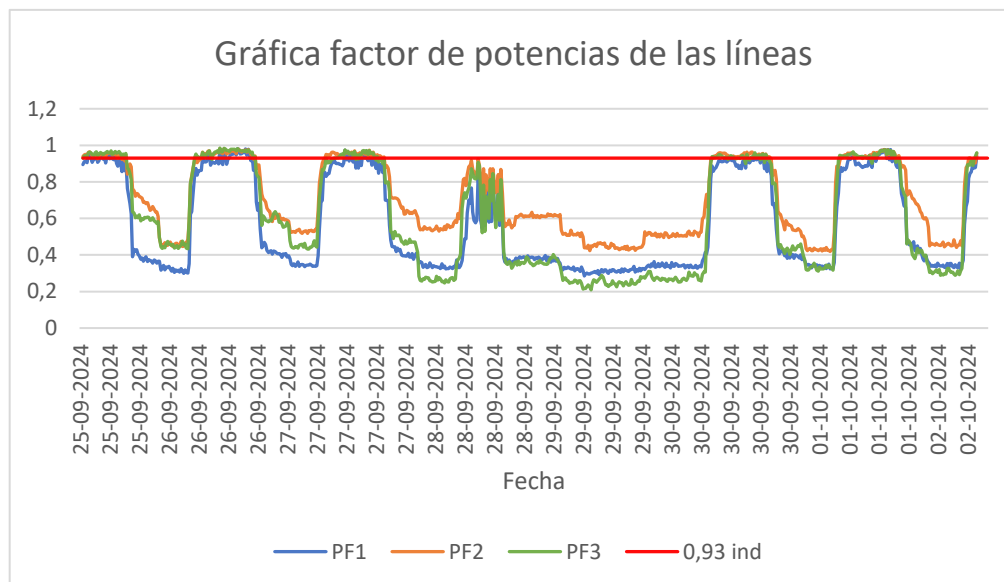
Tabla 5.5 Límite del factor de potencia

Líneas	L1	L2	L3	Total
Máximo	0,981	0,982	0,985	0,981
Promedio	0,572	0,709	0,602	0,629
Mínimo	0,285	0,419	0,209	0,318

En la tabla 5.5 se observa que el factor de potencia promedio total de las líneas está por debajo a los 0,93 establecido por la norma técnica, esto debe a ver sido por el corte de suministro eléctrico programado el cual los valores fueron decayendo, porque mirando los valores máximos son superiores a lo que rige la NT.

A continuación, en la figura 5.3 se podrá reflejar en un a grafica el factor de potencia por cada línea, para ver su comportamiento del sistema eléctrico del recinto.

Figura 5.3 Factor de potencia



En la figura 5.3 se puede observar el comportamiento del factor de potencia para las líneas, se puede ver el día 27 de octubre del presente año, alrededor de las 07:00pm el factor de potencia decae progresivamente para las 3 líneas donde llegan por debajo del mínimo establecido que es 0,93, pero el día 28 de octubre a las 09:15am empieza a estabilizarse el sistema eléctrico.

A continuación, se detallarán los porcentajes del tiempo en que el factor de potencia de cada línea con los que establece la NT que son los 0,93 inductivo, son los siguientes:

- Para la línea L1 se tiene 597 datos medidos que están por debajo del mínimo establecido, y se tiene 69 datos que están por encima de lo que se estable la NT, por lo tanto, hay 1 datos que se encuentran dentro del límite establecido.
- Para la línea L2 se tiene 465 datos medidos que están por debajo del mínimo establecido, y se tiene 199 datos que están por encima de lo que se estable la NT, por lo tanto, hay 3 datos que se encuentran dentro del límite establecido.
- Para la línea L3 se tiene 487 datos medidos que están por debajo del mínimo establecido, y se tiene 174 datos que están por encima de lo que se estable la NT, por lo tanto, hay 6 datos que se encuentran dentro del límite establecido.

Sin embargo, dicho lo anterior ciertos datos calculados, ahora se procede a verificar si cumplen con los estipulado de la Normativa Técnica que deben estar un 98% del tiempo de medición.

Para la línea 1 (L1) hay un total de 666 datos fuera de rango y un total de 667 datos obtenidos en la medición.

$$x = \left(\frac{666}{667}\right) * 100\% = 99,85\%$$

Esto nos señala que solo un 1,19 %de los datos medidos están dentro del rango y 99,85% de datos que se encuentran fuera del rango. Por ende, Si cumple con la Normativa Técnica.

Para la línea 2 (L2) hay un total de 666 datos fuera de rango y un total de 667 datos obtenidos en la medición.

$$x = \left(\frac{664}{667}\right) * 100\% = 100\%$$

Esto nos señala que solo un 0 %de los datos medidos están dentro del rango y 100 % de datos que se encuentran fuera del rango. Por ende, Si cumple con la Normativa Técnica.

Para la línea 3 (L3) hay un total de 666 datos fuera de rango y un total de 674 datos obtenidos en la medición.

$$x = \left(\frac{661}{674}\right) * 100\% = 99,10\%$$

Esto nos señala que solo un 0,9 %de los datos medidos están dentro del rango y 99,10 % de datos que se encuentran fuera del rango. Por ende, Si cumple con la Normativa Técnica.

De acuerdo a los señalado anterior, según lo que establece el artículo 5-18, el factor de potencia promedio se encuentra en los valores aceptables que son los 98% del tiempo de medición, como se puede observar en la siguiente tabla 5.6

Tabla 5.6 Resultados del factor de potencia

Líneas	L1	L2	L3	Prom. Total
Datos fuera de rango	666	664	661	664
Datos dentro del rango	1	3	6	3
% de tiempo de datos dentro del rango	99,85 %	100 %	99,10%	99,55%
Cumple con la N.T.	Si	Si	Si	Si

En tabla 5.6 se puede observar que el factor de potencia promedio del sistema eléctrico de la Universidad de Atacama, se encuentra dentro de los valores exigidos del tiempo de medición, por lo cual se encuentra dentro del 98% que establece la normativa de técnica de seguridad y calidad de servicio.

También decir que de manera individual el factor de potencia para las líneas L1, L2 Y L3, se encontraron en buenas condiciones, por ende, si están cumpliendo con lo que rige la NT.

Señales que el valor promedio del factor de potencia del sistema eléctrico dio como resultado un 0,629 lo que indica que el recinto educacional se encuentra con cargo monetario, porque está por debajo de 0,93 inductivo que es lo establece la NT para el factor de potencia.

5.5 Análisis de frecuencia

Para dar comiendo al análisis de frecuencia del sistema eléctrico de la Universidad de Atacama, el artículo 1-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, establece que la frecuencia nominal de un sistema de distribución es de 50Hz, y el artículo 3-4 de misma NT, establece intervalos de frecuencia en estado normal que son $49,5 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$.

Los valores obtenidos de la medición de la frecuencia del sistema eléctricos se pueden observar en la tabla 5.7.

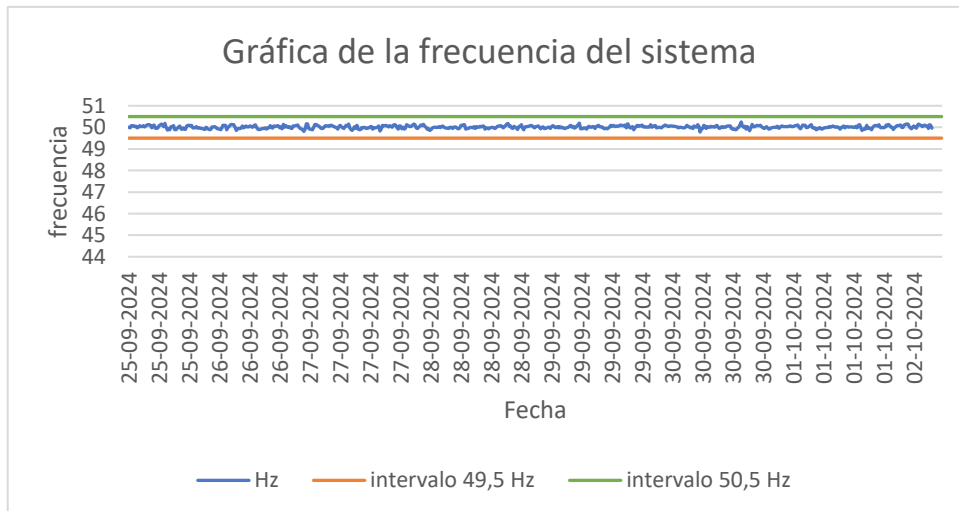
Tabla 5.7 Límite de la frecuencia

Máximo	50,25 Hz
Promedio	49,97 Hz
Mínimo	44,82 Hz

Los datos obtenidos de la tabla 5.7 representa que la frecuencia tuvo un comportamiento cercano al valor norma de 50 Hz establecido por el artículo de la NT

A continuación, en la figura 5.4 mostrará el comportamiento de la frecuencia durante el periodo de medición

Figura 5.4 Frecuencia del sistema



Se puede observar que durante los días de mediciones la frecuencia del sistema eléctrico se mantuvo estable dentro de los intervalos $49,5 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$, por ende cumple con lo estipulado de la NT.

Por ende, de acuerdo al artículo 3-4 de la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Distribución la frecuencia se encontró en estado normal.

Tabla 5.8 Resultados de la frecuencia

Intervalos permitidos	$49,5 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$.
Datos fuera del intervalo	0
Datos dentro del intervalo	667
% de tiempo de datos dentro del tiempo	100%

En la tabla 5.8 se puede decir que a pesar del corte de suministro eléctrico se registró un 100 % del tiempo dentro del cumplimiento de los intervalos deseados de la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.

5.6 Análisis de distorsión armónica de voltaje

Para dar inicio al análisis de distorsión armónica de voltaje, el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, señala que evaluara con dos indicadores que son la distorsión armónica total (THD_V) y la distorsión armónica individual (D_{V_j}), para usuarios de baja tensión.

5.6.1 Distorsión armónica total de voltaje

Para la distorsión armónica total el artículo 3-5 normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, señala que el máximo para la distorsión armónica

total de voltaje (THD_V) debe ser un límite máximo de 8%, lo que deberá reasentarse el 95% del tiempo total del registro.

A continuación, la tabla 5.9 presentará los datos de los indicadores mencionado que fueron obtenidos durante el periodo de medición de cada línea:

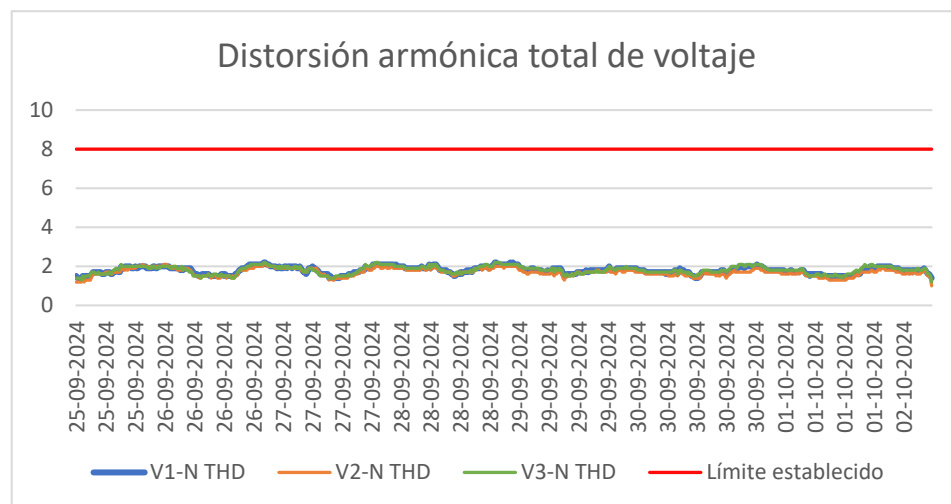
Tabla 5.9 Límite de la distorsión total de voltaje

Líneas	L1	L2	L3
Máximo	2,2%	2,1%	2,2%
Promedio	1,795%	1,697%	1,808%
Mínimo	1,4%	1%	1,2%

Se puede observar en la tabla 5.9 que la distorsión armónica total de voltaje es por debajo de los 8% que indica la NT, por lo tanto, está cumpliendo con lo establecido.

El comportamiento de la distorsión armónica total de voltaje de las líneas se ve reflejado en la siguiente figura 5.5

Figura 5.5 Distorsión armónica total de voltaje



En la figura 5.5 se puede observar que durante el periodo de medición el promedio de la distorsión armónica total de voltaje en el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama se encontró por debajo de los 8%. Por ende, según bajo artículo 3-5 de la normativa de técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la distorsión armónica total de voltaje se encuentra dentro los límites máximos establecidos.

Tabla 5.10 Resultados de distorsión armónica total de voltaje

Límite establecido	8%
Datos fuera del rango	0
Datos dentro del rango	667
% de tiempo de datos dentro del rango	100%
Cumple con la NT	Si

En la tabla 5.10 se puede decir que los valores se mantuvieron dentro del rango durante el 95% del tiempo de la medición, que los 667 datos obtenidos a través de la medición cumplen con el 100% de tiempo de datos dentro del límite establecido, lo que se puede decir que cumple con el límite máximo de 8% y 95% del tiempo de la medición.

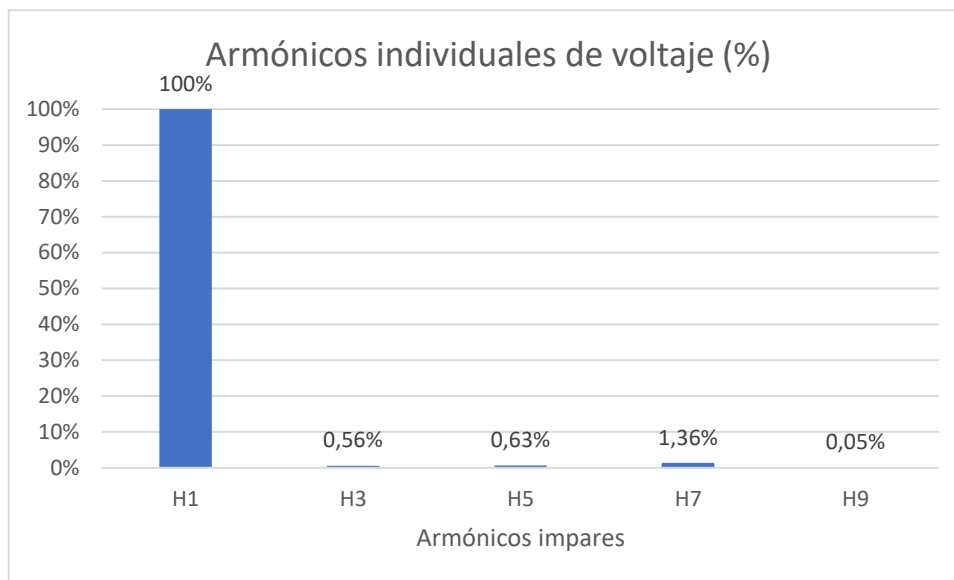
5.6.2 Distorsión armónica individual de voltaje

Para el análisis de distorsión armónica individual de voltaje, el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, también establece límites, pero de forma individual estos límites se pueden observar en la figura 3.3 donde también se debe respetar el 95% del tiempo total de medición.

Los datos de los armónicos individuales de voltaje a evaluar será los armónicos impares.

A continuación, se representará en una gráfica de barra los promedios de las 3 fases para cada armónico individual de voltaje registradas durante el periodo de medición, como se puede observar en la siguiente figura 5.6

Figura 5.6 Armónicos individuales de voltaje (%)



Como se puede observar en la figura 5.6 los valores promedios para los armónicos individuales de voltajes obtenidos en el tiempo de medición, los valores se encuentran por debajo de los valores normados en la figura 3.3 que establece la NT.

Además, señalar que solamente se tomó en consideración hasta el armónico de orden 9, porque después los valores empezaron a descender, lo que significa que ya son valores insignificantes.

Los resultados a través de este análisis de los armónicos individuales de voltaje se indicarán en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Resultados de la distorsión armónica individual de voltaje

N° de armónicos Impares	H3	H5	H7	H9
Límite establecido	5%	6%	5%	1,5%
Datos fuera del rango	0	0	0	0
Datos dentro del rango	667	667	667	667
% de tiempo de datos del rango	100%	100%	100%	100%
Cumple con la NT	Si	Si	Si	Si

En la tabla 5.11 se puede observar que los armónicos individuales de voltaje se encuentran dentro del rango medición y que están cumpliendo el 100% del tiempo de la medición dentro de los límites establecidos según el 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución los armónicos individuales de voltaje del sistema eléctrico de la Universidad de Atacama, por lo que están cumpliendo bajo normativa técnica (NT).

5.7 Análisis de distorsión armónica de corriente

Para dar inicio al análisis de distorsión armónica de corriente, en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, señala que evaluara con dos indicadores que son la distorsión armónica total (THD_I) y la distorsión armónica individual (D_{Ij}), para usuarios de baja tensión.

5.8.1 Distorsión armónica total de corriente

Para la distorsión armónica total de corriente, en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, señala que el límite máximo debe ser un 20% con respecto a la distorsión armónica, donde se debe cumplir el 95% del tiempo total del registro.

A continuación, en la figura 5.12 presentará los límites de la distorsión armónica de corriente de cada línea.

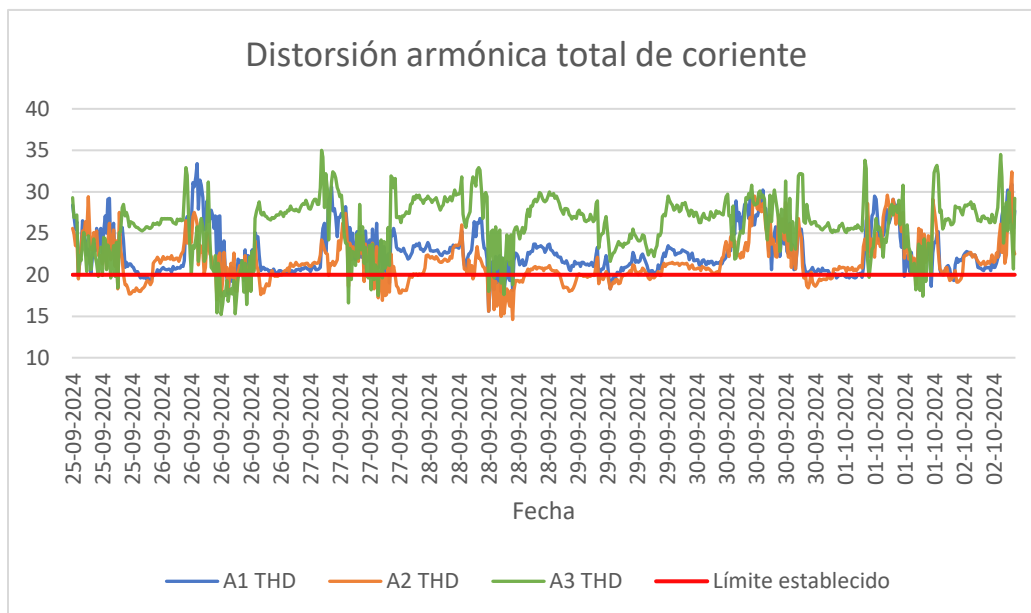
Tabla 5.12 Límite de distorsión armónica de corriente

Líneas	L1	L2	L3
Máximo	33,4%	32,4%	35%
Promedio	22,714%	21,548%	26,049%
Mínimo	15,6%	14,6%	15,2%

Como se puede observar en la tabla 5.12 los valores calculados de cada línea, la distorsión armónica total de corriente para las 3 líneas se encuentra por encima del 20% normalizado por la NT.

Dicho lo anterior, se evaluará el comportamiento de la distorsión armónica total de corriente para cada una de las fases, como se presentará en la figura 5.7.

Figura 5.7 Distorsión armónica total de corriente



Como se puede observar en la figura 5.7 que la distorsión armónica total de corriente para la L1, L2 y L3 se encontraron por encima del límite de 20%, aunque en ciertos tiempos la línea L1 y L2 estuvieron cercanos al límite establecido de la NT.

Para los porcentajes de tiempo de medición cada una de las líneas fueron variando según a sus resultados, los cuales algunas se describirán a continuación:

- Para la L1 se tiene 601 datos por encima del límite del 20 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 66 datos que están dentro, lo que representa un 9,89 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 479 datos por encima del límite del 20% establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 188 datos que están dentro, lo que representa un 28,19 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 624 datos por encima del límite del 20% establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 43 datos que están dentro, lo que representa un 6,45 % de tiempo.

De acuerdo, el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la distorsión armónica total de corriente se encuentra fuera de los valores establecidos.

Por lo tanto, los resultados obtenidos a través de medición de la distorsión armónica total de corriente se muestran en la figura 5.7, lo que se aprecia que los datos de la distorsión total se encuentran fuera de los límites establecidos de la NT, lo que nos da como respuesta que la L1, L2 y L3 no están cumpliendo normativa y no cumplen con el indicador del 95 % del tiempo de la medición que es lo estipulado en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución.

Tabla 5.13 Resultados de la distorsión armónica de total de corriente

Líneas	L1	L2	L3
Datos fuera de rango	601	479	624
Datos dentro del rango	66	188	43
% de tiempo de datos dentro del rango	9,98 %	28,19 %	6,45 %
Cumple con la N.T.	No	No	No

Se puede concluir respecto a la tabla 5.13 que la L3 fue la que obtuvo el porcentaje más bajo con respecto a las demás, por lo que señala que esta línea es la más afectada por la distorsión armónica total de corriente dándose a conocer que puede contener gran parte de cargas no lineal.

5.8.2 Distorsión armónica individual de corriente L1 y TDD

La distorsión armónica individual de corriente para la L1 presento cumplimiento con los límites establecidos del artículo 3-8 de la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.

El séptimo armónico hasta el quinceavo armónico orden superan los límites establecidos, solo la armónica de tercer y de quinto orden cumple bajo normativa técnica. Cabe señalar que se considerará hasta el quinceavo armónico, las demás son despreciables.

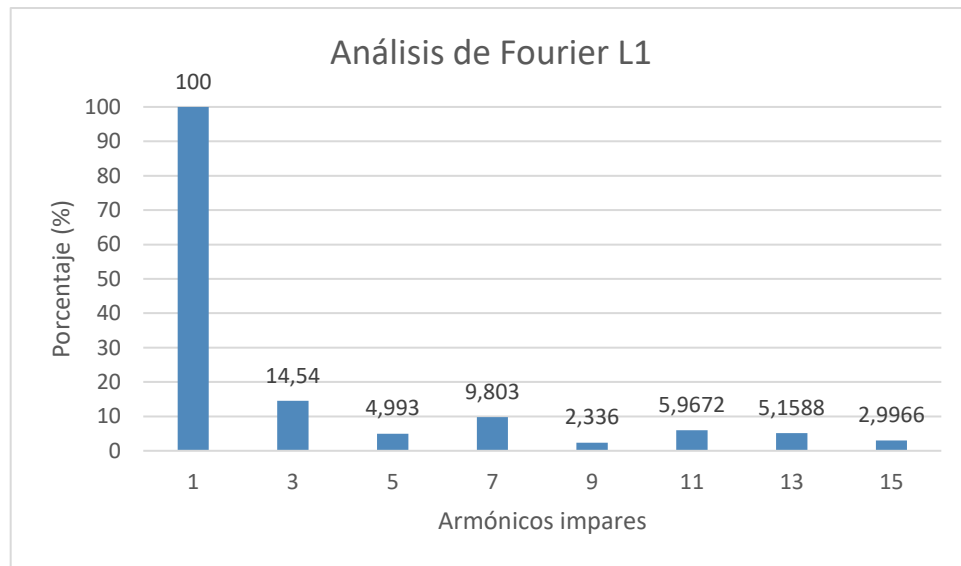
El total de demanda de distorsión (TDD) es de 20,22% esto quiere decir que está cumpliendo con el límite permitido de NT que es un 20%. En la tabla 5.14 se presentará los valores calculados para cada armónico de la L1

Tabla 5.14 Resultados de la distorsión armónica indidual de corriente L1

Armónicos Impares	Límite establecido	promedio (%)	Cumple N.T.	Promedio ^2	TDD
1		100			20,22616273
3	16,6	14,54	Si	211,4116	
5	12	4,993	Si	24,930049	
7	8,5	9,803	No	96,098809	
9	2,2	2,336	No	5,456896	
11	4,3	5,9672	No	35,60747584	
13	3	5,1588	No	26,61321744	
15	0,6	2,9966	No	8,97961156	

En la figura 5.8 se podrá observar detalladamente los porcentajes de armónicos de corriente para la L1, donde se puede apreciar que el tercer y quinto armónico son los que están dentro del límite establecido de la NT.

Figura 5.8 Distorsión armónica individual de corriente L1



5.8.3 Distorsión armónica individual de corriente L2 y TDD

La distorsión armónica individual de corriente para la L2 presento cumplimiento con los límites establecidos del artículo 3-8 de la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.

El séptimo armónico hasta el quinceavo armónico supera los límites establecidos, solo la armónica de tercer y de quinto orden cumple bajo normativa técnica. Cabe señalar que se considerará hasta el quinceavo armónico, las demás son despreciables.

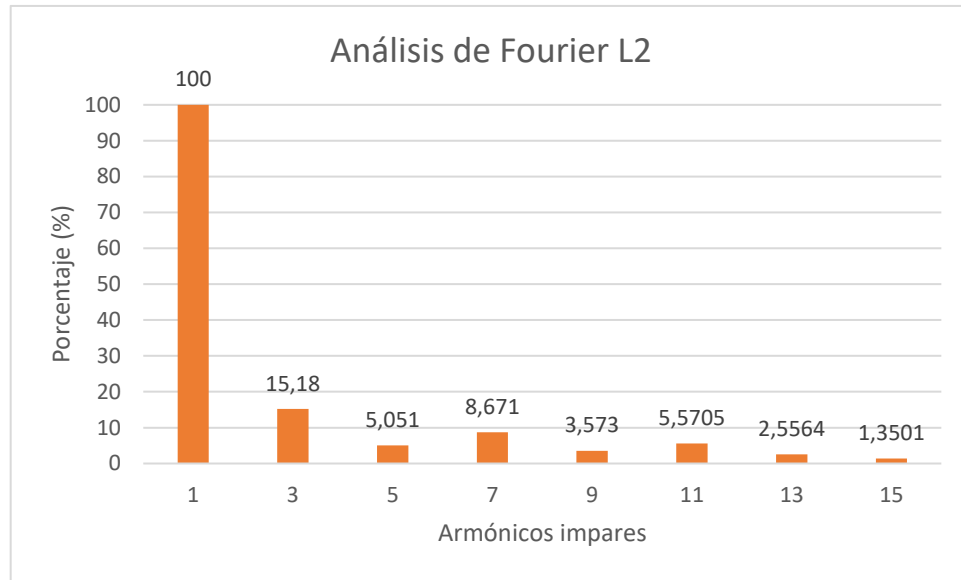
El total de demanda de distorsión (TDD) es de 19,58% esto quiere decir que está cumpliendo con el límite permitido de NT que es un 20%. Señalar que la L2 es la que presento un TDD bajo que las demás líneas. En la tabla 5.15 se presentará los valores calculados para cada armónico de la L2.

Tabla 5.15 Resultados de la distorsión armónica indivial de corriente L2

Armónicos Impares	Límite establecido	promedio (%)	Cumple N.T.	Promedio ^{^2}	TDD
1		100			19,57769119
3	16,6	15,18	Si	230,4324	
5	12	5,051	Si	25,512601	
7	8,5	8,671	No	75,186241	
9	2,2	3,573	No	12,766329	
11	4,3	5,5705	No	31,03047025	
13	3	2,5564	No	6,53518096	
15	0,6	1,3501	No	1,82277001	

En la figura 5.9 se podrá observar detalladamente los porcentajes de armónicos de corriente para la L2, donde se puede apreciar que el tercer y quinto armónico son los que están dentro del límite establecido de la NT.

Figura 5.9 Distorsión armónica individual de corriente L2



5.8.4 Distorsión armónica individual de corriente L3 y TDD

La distorsión armónica individual de corriente para la L3 presenta un mayor incumplimiento del límite establecido del artículo 3-8 de la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.

El tercer, séptimo y hasta quinceavo armónico superan los límites establecidos, solo el quinto armónico cumple bajo normativa técnica. Cabe señalar que se considerará hasta el quinceavo armónico, las demás son despreciables.

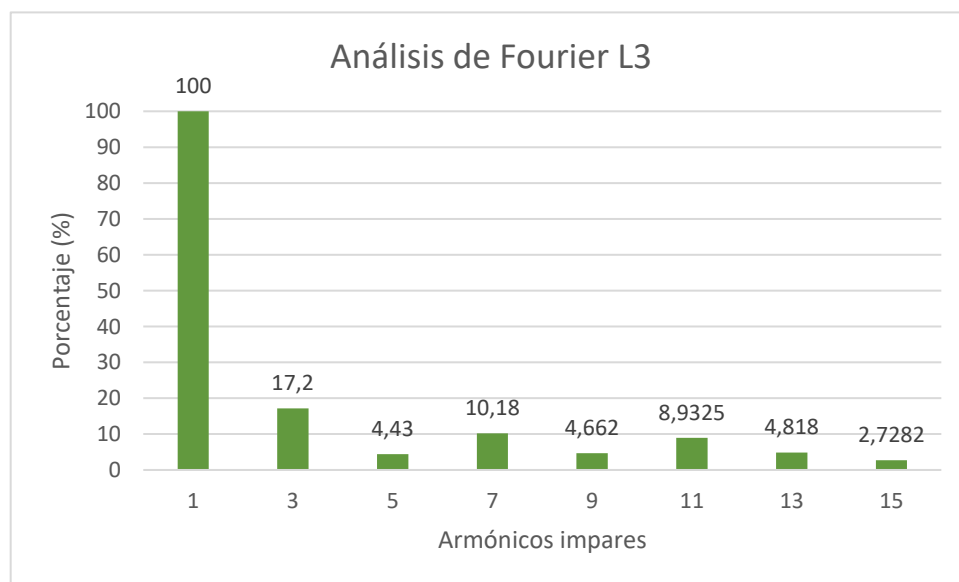
El total de demanda de distorsión (TDD) es de 23,48% esto quiere decir que no está cumpliendo con el límite permitido de NT que es un 20%. Señalar que la L3 es la que presento un TDD más que las demás líneas. En la tabla 5.16 se presentará los valores calculados para cada armónico de la L3.

Tabla 5.16 Resultados de la distorsión armónica individual de corriente L3

Armónicos Impares	Límite establecido	promedio (%)	Cumple N.T.	Promedio ^{^2}	TDD
1		100			23,47929512
3	16,6	17,2	No	295,84	
5	12	4,43	Si	19,6249	
7	8,5	10,18	No	103,6324	
9	2,2	4,662	No	21,734244	
11	4,3	8,9325	No	79,78955625	
13	3	4,818	No	23,213124	
15	0,6	2,7282	No	7,44307524	

En la figura 5.10 se podrá observar detalladamente los porcentajes de armónicos de corriente para la L3, que está incumpliendo la normativa y es la línea que tiene elevados porcentajes de armónicos corriente. El TDD de esta línea no cumple bajo NT y es el más que las demás líneas. Señalar que el armónico de quinto orden está dentro del límite establecido de la NT.

Figura 5.10 Distorsión armónica individual de corriente L3



5.8.5 Análisis de armónico individual de corriente

Se evaluará los armónicos individuales de corriente encontrados en este estudio de calidad de energía, que son el armónico de tercer orden hasta el armónico de quinceavo orden, porque fueron los que presentaron variaciones en el sistema eléctrico.

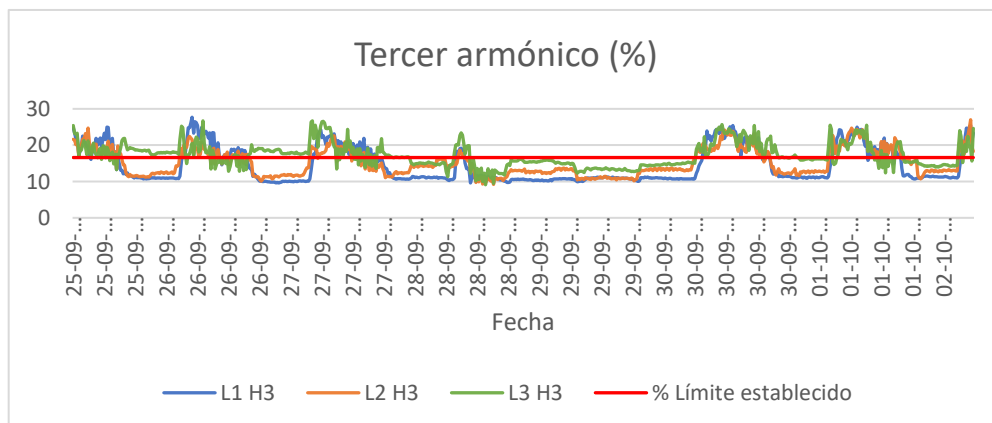
Se tomaron en consideración solamente los armónicos mencionados, porque los demás armónicos de corriente presentaron valores bajos. También decir que se analizara el comportamiento de cada armónico en las líneas para evaluar el comportamiento que tuvo durante el tiempo de medición, y ver si cumplen con el 95% del tiempo de registro de medición que indica la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.

5.8.5.1 Tercer Armónico de corriente

El tercer armónico individual de corriente, se observa que hubo lapsos que se mantuvo sobre el límite establecido, pero hubo días que las líneas pasaron el límite establecido que es un 16,6% como se muestra en la figura 5.11. Por ende, se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada línea durante el periodo de medición para el armónico de tercer orden, como se muestra en la figura 5.11

Figura 5.11 Tercer Armónico de corriente (%)



En la figura 5.11 se puede concluir que el tercer armónico mostró un comportamiento en el que las fases se mantuvieron en su mayoría por debajo del límite porcentual establecido del 16,6 %, según lo indicado por la norma NT. Sin embargo, en ciertos días de medición, los valores superaron el límite establecido.

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de tercer orden, para cada línea.

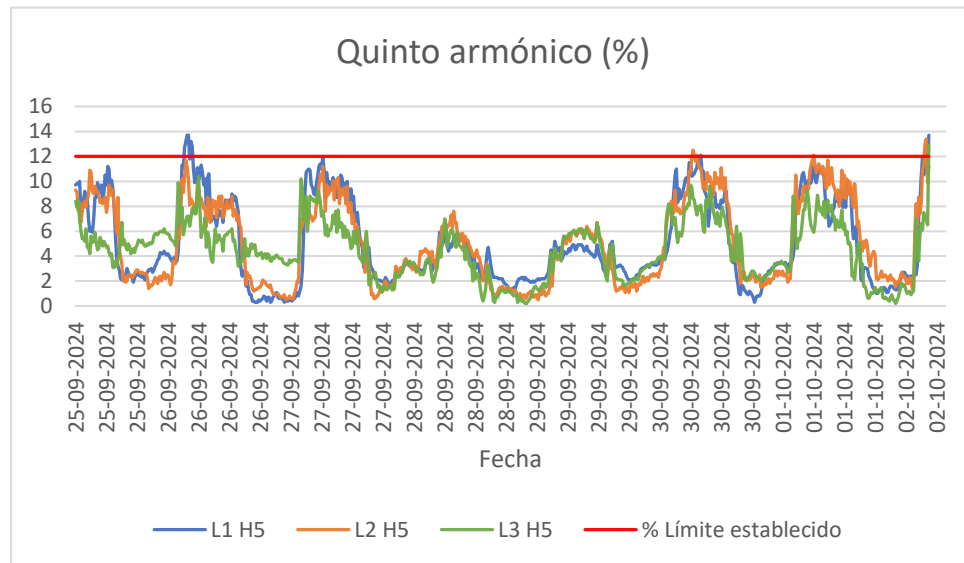
- Para la L1 se tiene 224 datos por encima del porcentaje de límite de un 16,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 443 datos que están dentro, lo que representa un 64,92 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 226 datos por encima del porcentaje de límite de un 16,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 441 datos que están dentro, lo que representa un 66,12 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 334 datos por encima del porcentaje de límite de un 16,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 333 datos que están dentro, lo que representa un 50,07 % de tiempo.

5.8.5.2 Quinto Armónico de corriente

El quinto armónico individual de corriente, se observa que el comportamiento en las tres líneas el armónico de quinto orden se encontró dentro del porcentaje de límite establecido que es un 12% como se muestra en la figura 5.12 pero, se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual de cada línea durante el periodo de medición para el armónico de quinto orden, como se muestra en la figura 5.12

Figura 5.12 Quinto Armónico de corriente (%)



En la figura 5.12 se puede concluir que el quinto armónico presentó un comportamiento estable en el sistema, con mínimas variaciones en las tres líneas durante el período de medición. Los valores se mantuvieron en su mayoría por debajo del límite establecido del 12 %, según lo estipulado por la norma NT.

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de quinto orden, para cada línea.

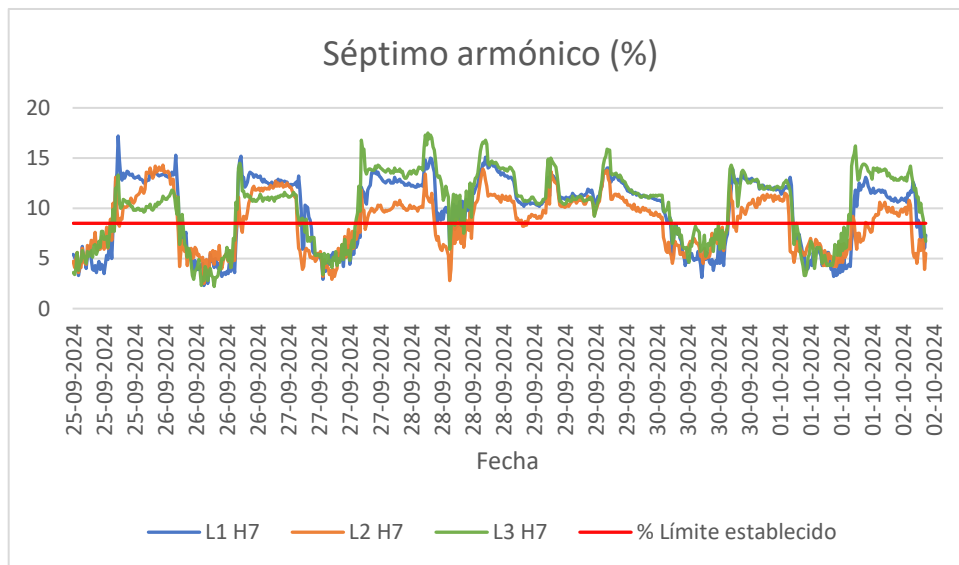
- Para la L1 se tiene 10 datos por encima del porcentaje de límite de un 12 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 657 datos que están dentro, lo que representa un 98,50 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 6 datos por encima del porcentaje de límite de un 12 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 661 datos que están dentro, lo que representa un 99,10 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 1 datos por encima del porcentaje de límite de un 12 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 333 datos que están dentro, lo que representa un 99,85 % de tiempo.

5.8.5.3 Séptimo Armónico de corriente

El séptimo armónico individual de corriente, se observa que hubo días que sobrepaso lo permitido, lo que se encontró por fuera del porcentaje de límite establecido que es un 8,5 % como se muestra en la figura 5.13 pero, además se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada línea durante el periodo de medición para el armónico de séptimo orden, como se muestra en la figura 5.13

Figura 5.13 Séptimo Armónicos de corriente (%)



En la figura 5.13 se puede concluir que el séptimo armónico mostró un comportamiento en el que las tres líneas superaron el límite porcentual establecido del 8,5 %, según lo indicado por la norma NT. Sin embargo, cabe destacar que en ciertos días de medición, los valores se mantuvieron por debajo del límite establecido.

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de séptimo orden, para cada línea.

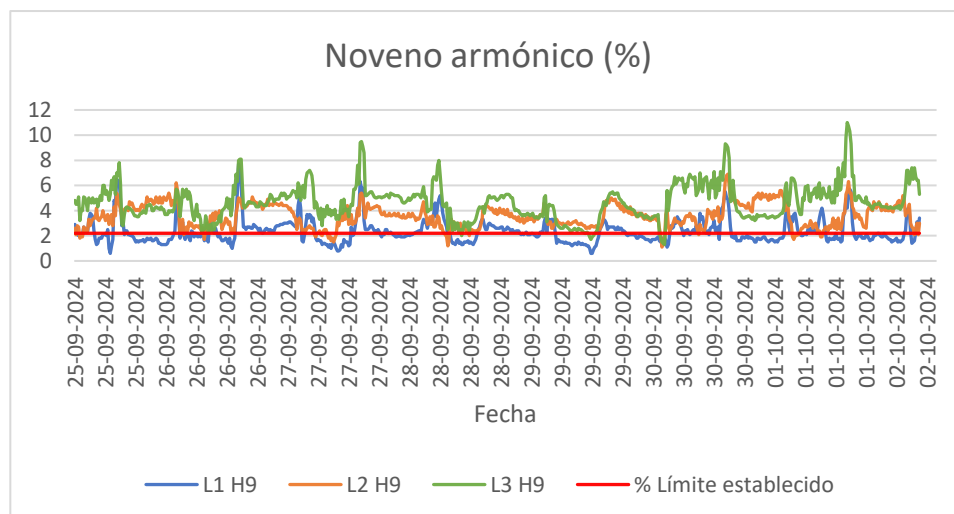
- Para la L1 se tiene 442 datos por encima del porcentaje de límite de un 8,5 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 225 datos que están dentro, lo que representa un 33,73 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 380 datos por encima del porcentaje de límite de un 8,5 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 287 datos que están dentro, lo que representa un 43,03 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 459 datos por encima del porcentaje de límite de un 8,5 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 208 datos que están dentro, lo que representa un 31,18 % de tiempo.

5.8.5.4 Noveno Armónico de corriente

El noveno armónico individual de corriente, se observa que el armónico se encontró fuera de los establecido, especialmente en la línea tres que fue la que se encuentra por encima del porcentaje de límite establecido que es un 2,2 % como se muestra en la figura 5.14 pero, además se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada línea durante el periodo de medición para el armónico de noveno armónico, como se muestra en la figura 5.14

Figura 5.14 Noveno Armónicos de corriente (%)



En la figura 5.14 se puede concluir que el noveno armónico mostró un comportamiento en el que las líneas superaron en gran medida el límite porcentual establecido del 2,2 %, según lo indicado por la norma NT. Se observa que la fase L3 experimentó un aumento más pronunciado en comparación con las demás, mientras que la fase L1, en ciertos días de medición, se mantuvo por encima del límite establecido

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de noveno orden, para cada línea.

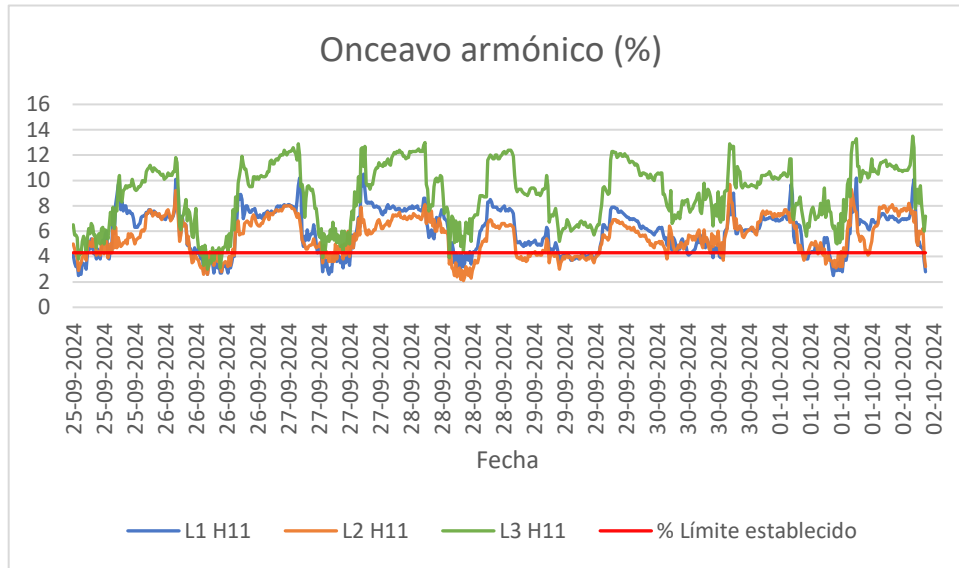
- Para la L1 se tiene 229 datos por encima del porcentaje de límite de un 2,2 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 438 datos que están dentro, lo que representa un 65,67 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 623 datos por encima del porcentaje de límite de un 2,2 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 44 datos que están dentro, lo que representa un 6,59 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 652 datos por encima del porcentaje de límite de un 2,2 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 15 datos que están dentro, lo que representa un 2,25 % de tiempo.

5.8.5.5 Onceavo Armónico de corriente

El onceavo armónico individual de corriente, se observa que las tres líneas se encontraron por fuera del porcentaje, pero la línea L3 se observa que hubo días que sobrepasó el límite establecido que es un 4,3 % como se observa en la figura 5.15 pero, además se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada línea durante el periodo de medición para el armónico de onceavo orden, como se muestra en la figura 5.15

Figura 5.15 Onceavo Armónicos de corrinete (%)



En la figura 5.15 se puede concluir que el onceavo armónico mostró un comportamiento en el que las líneas superaron significativamente el límite porcentual establecido del 4,3 %, según lo establecido por la norma NT. Además, se observa que la fase L3 presentó un aumento más pronunciado en comparación con las demás, mientras que las fases L1 y L2 se mantuvieron cerca del límite establecido en ciertos días de medición

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de onceavo orden, para cada línea.

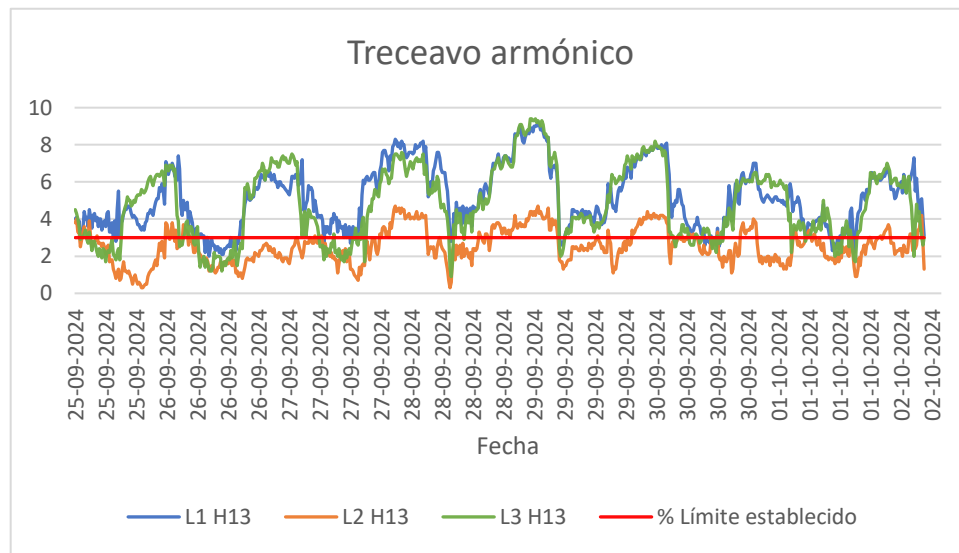
- Para la L1 se tiene 515 datos por encima del porcentaje de límite de un 4,3 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 152 datos que están dentro, lo que representa un 22,79 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 495 datos por encima del porcentaje de límite de un 4,3 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 172 datos que están dentro, lo que representa un 25,79 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 653 datos por encima del porcentaje de límite de un 4,3 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 14 datos que están dentro, lo que representa un 2,1 % de tiempo.

5.8.5.6 Treceavo Armónico de corriente

El treceavo armónico individual de corriente, se observa que el armónico se encontró fuera del porcentaje de límite establecido y las líneas la L1 y L3 presentaron mayor elevación del límite permitido que es un 3,0 % como se muestra en la figura 5.16 pero, además se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición para el armónico de treceavo orden, como se muestra en la figura 5.16.

Figura 5.16 Treceavo Armónicos de corriente (%)



En la figura 5.16 se puede observar que el treceavo armónico mostró un comportamiento en el que las líneas superaron en gran medida el límite porcentual establecido, el cual es del 3,0 %, según lo indicado por la norma NT. Además, se destaca que las fases L1 y L3 experimentaron un incremento más pronunciado en comparación con las demás, mientras que L2, en ciertos días de medición, se mantuvo por debajo del límite establecido, mostrando valores más bajos que las otras fases.

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de treceavo orden, para cada línea.

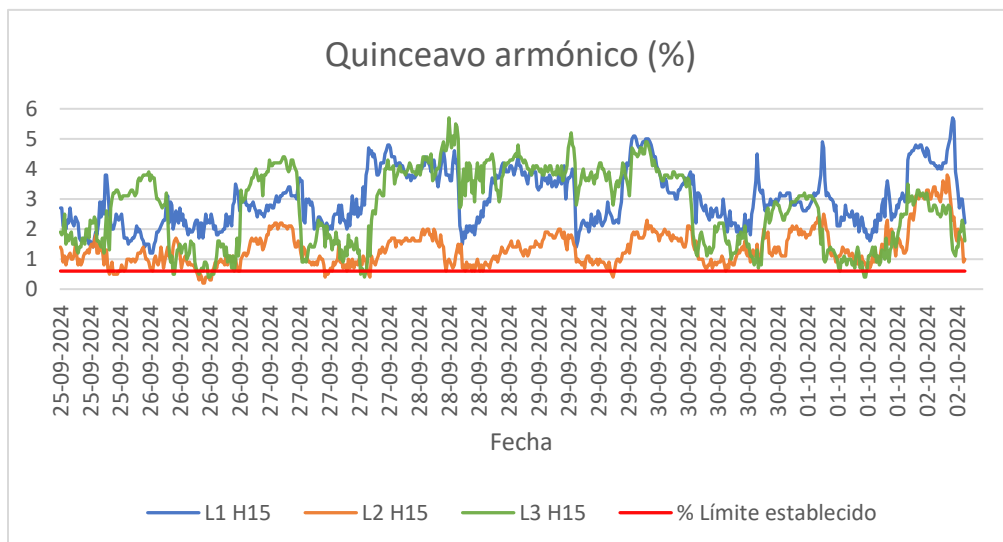
- Para la L1 se tiene 594 datos por encima del porcentaje de límite de un 3,0 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 73 datos que están dentro, lo que representa un 10,94 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 189 datos por encima del porcentaje de límite de un 3,0 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 478 datos que están dentro, lo que representa un 71,66 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 510 datos por encima del porcentaje de límite de un 3,0 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 14 datos que están dentro, lo que representa un 23,54 % de tiempo.

5.8.5.7 Quinceavo Armónico de corriente

El quinceavo armónico individual de corriente, se observa que el armónico se encontró que las tres líneas están fuera del porcentaje de límite establecido que es un 0,6% como se muestra en la figura 5.17 pero, además se debe saber si se encuentra dentro del 95 % del tiempo de registro de medición.

A continuación, se presentará el comportamiento individual para cada línea durante el periodo de medición para el armónico de quinceavo orden, como se muestra en la figura 5.17

Figura 5.17 Quinceavo Armónicos de corriente (%)



En la figura 5.17 se puede concluir que el quinceavo armónico mostró un comportamiento en el que las líneas superaron considerablemente el límite porcentual establecido del 0,6 %, según lo indicado por la norma NT. Se observa que la fase L1 se mantuvo muy por encima del límite establecido, mientras que las fases L2 y L3 presentaron días en los que sus valores estuvieron cerca del límite normativo.

Se procede a calcular el porcentaje de tiempo del registro de medición del armónico de quinceavo orden, para cada línea.

- Para la L1 se tiene 667 datos por encima del porcentaje de límite de un 0,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 0 datos que están dentro, lo que representa un 0 % de tiempo.
- Para la L2 se tiene 623 datos por encima del porcentaje de límite de un 0,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 44 datos que están dentro, lo que representa un 6,6 % de tiempo.
- Para la L3 se tiene 647 datos por encima del porcentaje de límite de un 0,6 % establecido por la Norma Técnica, por lo que se tiene 20 datos que están dentro, lo que representa un 2,1 % de tiempo.

5.8.6 Análisis del promedio de TDD de las líneas

El análisis de la distorsión de demanda total (TDD) se evaluará las intensidades de armónicas que se está produciendo en el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama. Los valores de armónicos están basados en el punto común de conexión (PCC) que es el punto común desde el que cada usuario recibe energía de la fuente de alimentación

El TDD del sistema eléctrico es de un 25,15% lo que está superando al máximo permitido de 20% de la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, es de gran importancia bajar el TDD de corriente para mejorar la calidad energética del recinto educacional.

En la tabla 5.17 se muestra los valores promedios de los armónicos de corriente y el valor promedio total de TDD de corriente de las líneas L1, L2 y L3 del sistema eléctrico

Tabla 5.17 Resultado del TDD de corriente

Armónicas impares	porcentaje	TDD
1	100	25,147272
3	295,9	
5	25,52	
7	103,7	
9	21,73	
11	79,79	
13	26,613	
15	8,9793	
17	19,564	
19	37,051	
21	3,3692	
23	2,0001	
25	0,609	
27	1,4857	
29	1,1456	
31	0,4701	
33	3,564	
35	0,1884	
37	0,3127	
39	0,0331	
41	0,1541	
43	0,1046	
45	0,0055	
47	0,0014	
49	0,0945	

5.8.7 Resultados de los armónicos individuales de corriente

Se procederá a evaluar los resultados obtenidos de los armónicos individuales de corrientes anteriormente mencionados, se mostrarán en la tabla 5.18 y se puede observar que la gran mayoría de los armónicos individuales no están cumpliendo con lo establecido en el artículo 3-8 de la normativa. También señalar que algunos no se encontraron dentro del 95% del tiempo de registro de medición.

Tabla 5.18 Resultados de los armónicos individuales de corrinete

N° de armónicos Impares	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15
Límite establecido	16,6	12%	8,5%	2,2%	4,3%	3,0%	0,6%
L1							
Datos dentro del límite	443	657	225	438	152	73	0
% de tiempo dentro del límite (95 %)	64,92%	98,50%	33,73%	65,67%	22,79%	10,94%	0%
Cumple con la NT	No	Si	No	No	No	No	No
L2							
Datos dentro del límite	441	661	287	44	172	478	44
% de tiempo dentro del límite (95 %)	66,12%	99,10%	43,03%	6,59%	25,79%	71,66%	6,6%
Cumple con la NT	No	Si	No	No	No	No	No
L3							
Datos dentro del límite	333	333	208	15	14	14	20
% de tiempo dentro del límite (95 %)	50,77%	99,85%	31,18%	2,25%	2,1%	23,54%	2,1%
Cumple con la NT	No	Si	No	No	No	No	No

Como se puede concluir en la tabla 5.18 que el único armónico que cumplió con la normativa fue el armónico individual de corriente de quinto orden, cumple con el 95% de tiempo de registro de medición que está dentro de los límites establecido de la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Distribución.

También señalar que los armónicos individuales de corriente de 3, 7, 9, 11, 13 y 15 orden son los que mayor parte se encuentran fuera de los límites establecidos por la NT con respecto al artículo 3-8.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA DE MEJORA

En este presente capítulo se busca presentar una mejora al sistema eléctrico a través de las variables eléctricas obtenidos en el tiempo de medición en la Universidad de Atacama y plantear una mejora a la calidad de energía del recinto.

6.1 Diseño de filtro sintonizado en serie RLC

Para dar comienzo a la propuesta, se encontró problemas en la calidad de energía eléctrica de la Universidad de Atacama, y son el bajo porcentaje del factor de potencia, la presencia de armónicos de corriente en la red eléctrica y el incumpliendo de la distorsión total de demanda (TDD) que está por encima de los porcentajes establecido de la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución.

Los datos obtenidos a través del equipo de medición de calidad de energía, se obtuvo un factor de potencia de 0,63 lo que indica que es bajo comparado con lo que establece la normativa eléctrica vigente y uno de estos problemas es que en la red eléctrica se encuentra la presencia de corrientes armónicas que es estén afectando al sistema eléctrico, esto produce una mayor circulación de corriente eléctrica en la instalación, y como consecuencia conlleva efectos de sobrecargas, variaciones de tensión, afecta al rendimiento, y el funcionamiento de los artefactos eléctricos.

Como segundo problema detectado, se encuentra la presencia de distorsión armónica en la red eléctrica actual, es por esto que se propone la instalación de un filtro pasivo sintonizado en serie RLC que mitigaría los efectos de la distorsión armónica en la corriente eléctrica, con la finalidad de eliminar el armónico individual de esta variable.

También, como tercer problema que se encuentra es que el promedio total de TDD es de un 25,147% de las líneas, lo cual sobrepasa con el porcentaje establecido de la NT que es un 20% como máximo. Una de las soluciones a este problema es la implementación de un filtro pasivo, que ayudaría a disminuir el porcentaje de TDD de la línea N°3 porque presentó un porcentaje de 23,48% superando el porcentaje establecido de la NT. Al

solucionar este problema, bajaría el TDD de la línea L3 y a la vez bajaría el promedio total TDD de las líneas, con esto se estaría cumpliendo la Norma Técnica de Calidad de Servicios para Sistemas de Distribución, también el porcentaje de armónicos se mitigará en el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama.

El diseño de este filtro pasivo sintetizado en serie RLC cumplirá con la finalidad de mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico, mitigar la tercera armónica de corriente para la L3, que es la que predomina los cálculos realizados y por último mejorar el TDD que de esta forma estará cumpliendo la NT. Este filtro pasivo consta de una reactancia capacitiva en serie con una reactancia inductiva, ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar, y la ventaja que tiene es que puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red eléctrica, proporciona una máxima atenuación para una armónica individual, tiene bajas pérdidas que está asociadas a la resistencia del inductor y es de bajo costo, a consideración de los demás diseños de filtros que existen al día de hoy.

Los datos obtenidos del equipo de medición son los siguientes:

- Potencia activa: 25,67 (kW)
- FP actual: 0,63
- V línea: 380 V
- Frecuencia: 50 Hz

Cabe señalar que el factor de potencia que se desea llegar es a un 0,96 porque el que tiene el sistema eléctrico de la universidad de Atacama es de 0,63 y nos indica que está bajo lo que establece normativa técnica.

Se procede a calcular la potencia reactiva necesaria para mejorar el $\cos\phi$, para lo cual se utiliza la ecuación que se detalla a continuación:

$$Q_c = P(tg\phi_1 - tg\phi_2)$$

Donde:

- Q_c = Potencia reactiva necesaria (kVAr)

- P = potencia activa (kW)
- $tg\varphi_1$ = Tangente inicial
- $tg\varphi_2$ = Tangente final

Sabiendo que:

$$\cos\varphi_1 = 0,63$$

$$\cos\varphi_2 = 0,96$$

Despejando

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0,63) = 51,6839$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0,96) = 16,2602$$

Finalmente, la potencia reactiva necesaria quedaría de la siguiente manera:

$$Q_c = 25667,4273 \text{ W} (tg(51,6839) - tg(16,2602))$$

$$Q_c \approx 25 \text{ kVar}$$

Esta Q_c representa la cantidad de compensación reactiva necesaria para mejorar el factor de potencia, y el armónico individual que están afectado al sistema eléctrico de la Universidad de Atacama, es el tercer armónico de la línea 3, como se muestran en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Porcentaje de contenidoo armónico

Porcentaje de contenido de armónicos L3	
3°	17,2%

Dicho lo anterior se procederá a mitigar el amónico individual que más están afectado al sistema eléctrico. En la tabla 6.2 se establecen los parámetros para el filtro que se entrara a mitigar.

Tabla 6.2 Parametros de los armónico

N°	Filtro	Hz	Porcentaje de la energía reactiva de corrección
3°	Primer filtro	150 Hz	55%

6.1.1 Filtro para mitigar la tercera armónica

La frecuencia nominal o fundamental es de 50Hz, la tercera armónica es de 150 Hz, además se utilizará el 55% de la capacidad total para compensar el factor de potencia.

$$Q_3 = \frac{55\% Q_c}{3} = \frac{\frac{55}{100} * 24.995,4997 \text{ VAr}}{3 \text{ fases}}$$

$$Q_3 = 4.582,5083 \text{ VAr}$$

La potencia reactiva por fase del filtro será de 4.582,5083 Var.

Las características que tendrá el filtro serán las siguientes, se procederá a calcular la reactancia efectiva:

$$X_{efec} = \frac{\left(\frac{v^2}{3}\right)}{Q_7} = \frac{\left(\frac{380^2}{3}\right)}{4.582,5083}$$

$$X_{efec} = 10,5037 \Omega$$

- Ahora se procede a calcular la reactancia del capacitor:

$$X_c = \frac{n^2}{n^2 - 1} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = 1,125 \Omega$$

- Luego se procede a calcular el valor del capacitor:

$$C = \frac{1}{2 * \pi * 50 * XC} = \frac{1}{2 * 3,14 * 50 * 1,125}$$

$$C = 2.829,42 \mu F$$

- Se procederá a calcular la reactancia inductiva:

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

$$X_L = 0,125 \Omega$$

- Se continua, calculando la capacidad de la inductancia sintonizada:

$$L = \frac{1}{(2 * \pi * f * n)^2 * C}$$

$$L = \frac{1}{(2 * \pi * 50 * 3)^2 * 2.829,42 \mu F}$$

$$L = 0,3979mH$$

Comprobar si los valores de reactancia capacitiva e inductancia del filtro son iguales para la tercera armónica

- Reactancia inductiva tercera armónicos

$$XL_3 = 2 * \pi * f * n * L$$

$$XL_3 = 2 * \pi * 50 * 3 * 0,3979mH$$

$$XL_3 = 0,3750 \Omega$$

- Reactancia capacitiva séptimo armónicos

$$XC_3 = \frac{1}{2 * \pi * f * n * C}$$

$$XC_3 = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 3 * 2.829,42 \mu F}$$

$$XC_3 = 0,3750 \Omega$$

Por lo tanto, se está cumpliendo que $XL_3 = XC_3$

Ahora se procede a calcular la impedancia del filtro

$$Z = Rf + J \left(2 * \pi * 50 * L - \frac{1}{2 * \pi * 50 * C} \right)$$

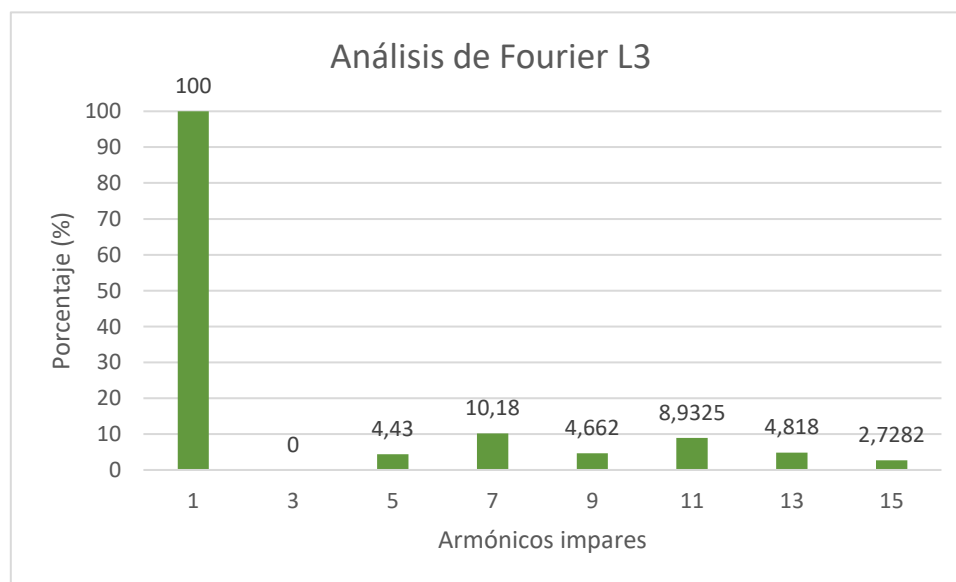
$$Z = Rf + J \left(2 * \pi * 50 * 0,3979mH - \frac{1}{2 * \pi * 50 * 2.829,42 \mu F} \right)$$

$$Z = -j0,999 \approx -j1$$

6.2 Resultados del Filtro Pasivo

Al proponer la mejora del filtro pasivo sintonizado serie RLC para la L3, se podrá mitigar la tercera armónica individual en el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama como se puede observar en la figura 6.1

Figura 6.1 Resultados al mitigar la tercera armónica de la L3



Al disminuir el valor el armónico de tercer orden de la L3, disminuiría el indicador de distorsión armónica de demanda (TDD) y de esta manera estaría cumpliendo con el límite del 20% que estable la normativa Técnica de Calidad de Servicio en Sistema de Distribución como se observa en la tabla 6.3.

Cabe señalar que en la red eléctrica se encuentran otros armónicos que sobrepasan el límite de porcentaje de armónico permitido, pero estaría cumpliendo el TDD que permite la NT.

- TDD obtenido en la medición en la L3: 23,48%
- TDD con filtro en la L3: 15,98%

Esto indica una disminución significativa con lo que se establece por normativa. Al obtener un 15,98% de TDD en la L3, se reduciría el TDD total del sistema eléctrico, como se puede observar en la figura 6.3

Tabla 6.3 Resultado de TDD Total del sistema eléctrico

Armónicos impares	porcentaje	TDD
1	100	18,343536
3	0	
5	25,52	
7	103,7	
9	21,73	
11	79,79	
13	26,613	
15	8,9793	
17	19,564	
19	37,051	
21	3,3692	
23	2,0001	
25	0,609	
27	1,4857	
29	1,1456	
31	0,4701	
33	3,564	
35	0,1884	

37	0,3127	
39	0,0331	
41	0,1541	
43	0,1046	
45	0,0055	
47	0,0014	
49	0,0945	

Como se observa en la Tabla 6.3 el TDD de las tres líneas disminuyó considerablemente, pasando del 25,15% al 18,34%, quedando por debajo del límite establecido por la normativa.

La implementación de un filtro pasivo contribuirá significativamente a la mejora del TDD (Total Demanda de Distorsión) en el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama. Esta acción también tendrá un impacto positivo en el factor de potencia, el cual se espera que aumente a 0,96, superando así el requisito normativo de 0,93.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIÓN

A partir de las variables eléctricas obtenidas durante el tiempo de medición en la Universidad de Atacama, se realizó un análisis de la calidad de energía del recinto. En este análisis, se realizaron cálculos y gráficos para representar el estado actual del sistema eléctrico. De esta manera, se logró analizar cada una de las variables eléctricas mencionadas y compararlas con la normativa técnica vigente.

Una de las primeras variables analizadas fue la tensión, donde se observó que las tres líneas cumplen con la regulación de voltaje, encontrándose dentro de los parámetros de baja tensión, sin sobrepasar el rango de $\pm 7,5\%$ respecto a los 220 V. Sin embargo, la línea 1 no cumple con el valor permitido de tiempo, que debe ser el 95% del tiempo de medición. Por el contrario, las líneas 2 y 3 cumplen con la normativa técnica en este aspecto.

El segundo análisis se centró en la frecuencia, y los resultados obtenidos durante el tiempo de medición mostraron que todos los valores se encuentran dentro del intervalo permitido de 50 Hz, cumpliendo con la normativa técnica.

En cuanto al factor de potencia, se encontró que las tres líneas se encuentran por debajo del valor mínimo permitido de 0,93, según la normativa técnica. Sin embargo, el porcentaje de tiempo de medición en que las tres líneas cumplen con los requisitos fue del 98%, lo que sugiere que, aunque no se cumple completamente con la normativa, el sistema está cerca de los límites establecidos.

En el análisis de los armónicos de voltaje, los valores individuales y totales presentaron niveles irrelevantes, indicando que se encuentran dentro de los porcentajes establecidos por la norma, por lo que se puede concluir que los armónicos de voltaje cumplen con los parámetros de cada línea.

En cuanto a los armónicos de corriente, se detectó su presencia en la red del establecimiento, con resultados elevados tanto en los armónicos individuales como en los totales. Además, no se cumplió con el porcentaje de tiempo de datos dentro del límite

establecido, ya que las mediciones estuvieron lejos del 95% de registro de tiempo señalado por la norma técnica. La línea 3 fue la que presentó los valores más bajos, con un 6,45% de los 95% requeridos. Asimismo, el sistema no cumplió con el total de demanda de distorsión (TDD) máximo permitido, que debe ser del 20%, ya que el TDD total del sistema eléctrico de la universidad fue de 25,15%. Aunque las líneas 1 y 2 estuvieron dentro de los límites establecidos pero la línea 3 superó el valor máximo con un TDD de 23,48%. Un TDD elevado puede causar corrientes altas, lo que podría generar sobrecalentamiento de los electrodomésticos y reducir la eficiencia del sistema.

En conclusión, el sistema eléctrico de la Universidad de Atacama no cumple completamente con las normativas técnicas, debido a los elevados niveles de distorsión armónica de corriente y a un factor de potencia inferior al valor establecido. Esto afecta la calidad de energía del recinto. Por lo tanto, es esencial mejorar el sistema eléctrico, proponiendo la instalación de un filtro sintonizado pasivo RLC en la línea 3, con el fin de contrarrestar y mitigar el tercer armónico. La implementación de este filtro eliminaría los valores de los armónicos de corriente, mejorando significativamente la distorsión armónica de la línea 3. Además, el filtro compensaría la potencia reactiva inductiva, lo que mejoraría el factor de potencia y mejorando la calidad de energía de la Universidad de Atacama.

BIBLIOGRAFÍA

- Any. (2020). *Filtro pasivo*. España Recuperado de <https://www.studocu.com/cases/document/universitat-politecnica-de-catalunya/electromagnetisme/h-filtros-pasivos-con-practica/32740188>.
- AEMC instruments. (). *Manual AEMC 8336*. Recuperado de https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Power-Meters-Loggers/8336_ES.pdf
- Comisión Nacional de Energía. (abril de 2024). *Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución*. www.cne.cl Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/NTCSDx2024-1.pdf>
- Comisión Nacional de Energía. (septiembre 2020). *Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio*. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/09/NTSyCS-Sept20.pdf>
- Enrique Sanchez. (24 de mayo 2023). *Análisis de circuitos lineales*. Recuperado de https://enrique.sanchez.webs.uvigo.es/PDFs/108_TemaVIII-Filtrosnotas.pdf.
- Eugenio Téllez Ramírez. (). *Distorsión armónica*. Colombia Recuperado de <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- Francesc Fornieles. (09 de Julio 2019). *Secuencia de los armónicos eléctricos*. Recuperado de <https://fornieles.es/perturbaciones-electricas/secuencia-armonicos-electricos/>
- Patricio Concha. (2020). *Filtro de armónicos*. Recuperado de <http://patricioconcha.ubb.cl/410021/WEB%20Final/7.4.htm>
- Thiago Monchetti. (2020). *Factor de potencia*. Mexico Recuperado de <https://traction.com/es/blog/que-es-el-factor-de-potencia-y-cual-su-impacto-en-los-activos-industriales>