



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN UN TRANSFORMADOR DE 500
KVA DE LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera

Héctor Eduardo Cisternas Meza

Christian Javier Olivares Rodríguez

Copiapó, Chile 2023.



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN UN TRANSFORMADOR DE 500
KVA DE LA UNIVERSIDAD DE ATACAMA**

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

Profesor guía: Jonathan Agüero Ferrera

Héctor Eduardo Cisternas Meza

Christian Javier Olivares Rodríguez

Copiapó, Chile 2023.

DEDICATORIAS

En dedicatoria a nuestras familias, parejas y a las demás personas que nos rodean en nuestro ambiente familiar, las cuales estuvieron con nosotros en todo este periodo tan extenso, dándonos espacio y apoyo para que así siguiéramos adelante hasta lograr nuestros objetivos académicos.

AGRADECIMIENTOS

Como grupo de trabajo, primero que todo, queremos agradecer a nuestro profesor guía Sr. Jonathan Agüero Ferrera, por su constante apoyo y preocupación en la realización de este proyecto. Queremos destacar su sencillez, orientación, opinión y tiempo de su parte, ante las dudas generadas al elegir el tema, la explicación de pautas y formatos del informe, el acompañamiento que hizo al momento de instalar el equipo en terreno, la resolución de dudas que se producían al desarrollar el trabajo, y a la constante motivación que expresaba para seguir adelante y mejorar el contenido de este proyecto. También, destacamos su responsabilidad, compromiso y su gran calidad humana.

Por último, queremos agradecer a todo el resto de docentes y funcionarios que entregaron y traspasaron sus conocimientos, los cuales fueron de gran ayuda para explicar, redactar y desarrollar este proyecto, cada uno desde diferentes materias y perspectivas.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación del problema.....	4
1.4. Alcance.....	5
1.5. Metodología	5
1.6. Objetivo general	6
1.7. Objetivos específicos	6

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO	7
2.1. Variables eléctricas	7
2.2. Corriente alterna CA	8
2.3. Calidad de energía eléctrica.....	9
2.4. Armónicos	10
2.4.1. Efectos causados por la distorsión armónica.....	12
2.4.2. Secuencia de los armónicos.....	13
2.4.3. Índices para la distorsión armónica	14
2.4.4. Mitigación de armónicos	15
2.4.4.1. Filtros de armónicos pasivos	15
2.4.4.2. Filtros de armónicos activos	17
2.4.4.3. Filtros de armónicos híbridos	18
2.5. Factor de potencia	19
2.5.1. Potencia Activa (P).....	19
2.5.2. Potencia Reactiva (Q).....	19
2.5.3. Potencia Aparente (S).....	20
2.5.4. Componente D.....	20
2.6. Fluctuaciones de tensión	21
2.7. Fluctuaciones de frecuencia	22

CAPÍTULO III

NORMATIVAS	23
3.1. Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución	23
3.1.1. Regulación del voltaje	24
3.1.2. Regulación de la frecuencia	24
3.1.3. Distorsión armónica de voltaje.....	25
3.1.4. Distorsión armónica de corriente	26
3.2. Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.....	27
3.2.1. Factor de potencia	27

CAPÍTULO IV

ANTECEDENTES	28
4.1. Antecedentes de la medición	28
4.1.1. Descripción del transformador	28
4.1.2. Punto común de conexión	30
4.1.3. Equipo de medición.....	30
4.2. Medición.....	31
4.2.1. Accesorios	31
4.2.2. Instalación del equipo.....	32

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y RESULTADOS	35
5.1. Análisis del voltaje	35
5.1.1. Regulación de voltaje por fase	36
5.1.2. Resultados de la regulación de voltaje	37
5.2. Análisis de las corrientes	39
5.2.1. Resultados del análisis de las corrientes.....	40
5.2. Análisis del factor de potencia promedio	41
5.2.1. Factor de potencia por fase.....	42
5.2.2. Resultados del factor de potencia.....	44
5.3. Análisis de la frecuencia promedio	45
5.4.1. Resultados del estado de la frecuencia.....	46
5.5. Análisis de la distorsión armónica de voltaje	47

5.5.1. Distorsión armónica total de voltaje.....	47
5.5.2. Distorsión armónica individual de voltaje.....	48
5.5.3. Resultados de la distorsión armónica del voltaje	49
5.5.3.1. Resultados THD _v	49
5.5.3.2. Resultados D _{vj}	50
5.6. Análisis de la distorsión armónica de la corriente.....	51
5.6.1. Distorsión armónica total de corriente	51
5.6.1.1. Distorsión armónica total de corriente por fase.....	52
5.6.2. Distorsión armónica individual de corriente	53
5.6.2.1. Armónico de tercer orden	54
5.6.2.2. Armónico de quinto orden.....	55
5.6.2.3. Armónico de séptimo orden	56
5.6.2.4. Armónico de noveno orden	57
5.6.2.5. Armónico de onceavo orden.....	58
5.6.3. Resultados de la distorsión armónica de corriente	60
5.6.3.1. Resultados de la distorsión armónica total de corriente	60
5.6.3.2. Resultados de los armónicos individuales de corriente.....	61
CAPÍTULO VI	
PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES	62
6.1. Diseño de filtro pasivo sintonizado serie RLC.....	62
6.1.1. Parámetros del filtro para eliminar la tercera armónica	63
6.1.2. Parámetros del filtro para eliminar la quinta armónica	64
6.1.3. Respuesta a la implementación de los filtros de armónicos.....	66
CAPÍTULO VII	
CONCLUSIÓN.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Onda sinusoidal en sistema trifásico.....	8
Figura 2.2. Formas de onda de los distintos tipos de cargas.	10
Figura 2.3. Distorsión armónica.	11
Figura 2.4. Filtro pasivo paralelo a una carga no lineal.	16
Figura 2.5. Filtro Shunt paralelo a una carga no lineal.	16
Figura 2.6. Esquema de conexión de filtros paralelo y serie en cargas no lineales.....	17
Figura 2.7. Triángulo de potencias.	19
Figura 2.8: Triángulo de potencias con componente D.....	20
Figura 2.9. Variaciones en la onda de voltaje.	21
Figura 3.1. Límites para regulación de tensión.	24
Figura 3.2. Intervalos para las variaciones de frecuencia.....	25
Figura 3.3. Límites para la Distorsión Armónica Individual de voltaje.	25
Figura 3.4. Límites para la Distorsión Armónica de corriente.	26
Figura 4.1. Ubicación de la medición en Google Maps.	28
Figura 4.2. Transformador analizado.	29
Figura 4.3. Tablero general.....	29
Figura 4.4. PCC designado.....	30
Figura 4.5. Equipo de medición.	30
Figura 4.6. Accesorios del equipo de medición.....	32
Figura 4.7. Configuración del equipo.....	32
Figura 4.8. Sondas de corrientes.	33
Figura 4.9. Sondas de tensión.....	33
Figura 4.10. Equipo de medición.	34
Figura 5.1. Gráfico del Voltaje.	36
Figura 5.2. Gráfico de las corrientes.	39
Figura 5.3. Gráfico del Factor de potencia promedio.....	42
Figura 5.4. Gráfico del Factor de potencia por fase.	43
Figura 5.5. Gráfico de la frecuencia promedio.....	45
Figura 5.6. Gráfico THD _v promedio.....	48
Figura 5.7. Gráfico de Armónicos individuales de voltaje.....	49

Figura 5.8. Gráfico THD_I promedio.	52
Figura 5.9. Gráfico THD_I por fase.....	53
Figura 5.10. Gráfico de Armónicos individuales de corriente.	54
Figura 5.11. Gráfico Armónico de corriente H3.....	55
Figura 5.12. Gráfico Armónico de corriente H5.	56
Figura 5.13. Gráfico Armónico de corriente H7.	57
Figura 5.14. Gráfico Armónico de corriente H9.	58
Figura 5.15. Gráfico Armónico de corriente H11.....	59
Figura 6.1. Gráfico de armónicos individuales de corriente con filtro.....	66
Figura 6.2. Gráfico THD_I promedio con filtro.	66
Figura 6.3. Gráfico THD_I por fase con filtro.....	67

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1. Valores de frecuencias y secuencias por orden de armónicos.	13
Tabla 5.1. Valores de voltaje entre fase y neutro.	35
Tabla 5.2. Resultados de regulación de voltaje.	38
Tabla 5.3. Corrientes del sistema.	39
Tabla 5.4. Valores factor de potencia.	41
Tabla 5.5. Resultado del factor de potencia.	44
Tabla 5.6. Valores de la frecuencia.	45
Tabla 5.7. Estado de la frecuencia.	46
Tabla 5.8. THD _V	47
Tabla 5.9. Resultados THD _V promedio.	49
Tabla 5.10. Resultados D _{Vj} promedio.	50
Tabla 5.11. THD _I	51
Tabla 5.12. Resultados THD _I promedio.	60
Tabla 5.13. Resultados D _{Ij}	61

RESUMEN

La ejecución de este proyecto consistió en la obtención de datos e información de una medición eléctrica en el transformador principal ubicado en el área norte de la Universidad de Atacama, con un equipo analizador de energía instalado al tablero general de distribución durante 7 días, midiendo ininterrumpidamente.

Según el objetivo se realizó un análisis para cada variable eléctrica que forma parte de los registros obtenidos por el equipo, para luego compararlas con las exigencias que indican las diferentes normas eléctricas vigentes a la fecha. Estas son de suma importancia considerar, ya que determinaron que la red eléctrica cumple solo en algunos aspectos con los requerimientos mínimos de eficiencia tanto para el consumidor, como para la red de la empresa distribuidora de energía. Estas normas son indicadas, mencionadas y definidas correspondientemente para cada variable eléctrica en su determinado capítulo, ya que sirvieron como patrón para determinar si cumple con los valores indicados en la misma.

Para este proyecto es importante que el lector conozca los diferentes conceptos técnicos que son necesarios para entender el desarrollo de este mismo, por lo que en el marco teórico se definen conceptos claves que ayudaran a comprender los demás capítulos. Luego se presentan los antecedentes del caso que describen las características del equipo, los tableros y la instalación en terreno, detallando el procedimiento de conexión, resguardos, y la forma de toma de registros. Posteriormente se realizó el análisis de los datos registrados a través de la medición, elaborando gráficos e identificando tendencias para observar los valores obtenidos y compararlos con la norma correspondiente, y así determinar si las variables cumplen con cada exigencia indicada. Por último, se emitieron una serie de propuestas, mejoras y recomendaciones con las variables eléctricas presentes que afectan negativamente en la red, para reducir o mitigar los impactos de la insuficiente calidad de energía del establecimiento.

ABSTRACT

La execution of this project involved obtaining data and information from an electrical measurement in the main transformer located in the northern area of the University of Atacama, with a power analyzer installed at the main distribution panel for 7 days, continuously measuring.

According to the objective, an analysis was conducted for each electrical variable that is part of the records obtained by the equipment, and then compared with the requirements indicated by the different electrical standards in force at the date. These are of utmost importance to consider, as they determined that the electrical network complies only in some aspects with the minimum efficiency requirements for both the consumer and the energy distribution company's network. These standards are indicated, mentioned, and defined correspondingly for each electrical variable in its specific chapter, as they served as a standard to determine if it complies with the values indicated in it.

For this project, it is important that the reader is familiar with the different technical concepts that are necessary to understand the development of it, so in the theoretical framework, key concepts are defined that will help understand the other chapters. Then, the background of the case is presented, describing the characteristics of the equipment, panels, and on-site installation, detailing the connection procedure, safeguards, and the method of data collection. Subsequently, the analysis of the data recorded through the measurement was carried out, creating graphs and identifying trends to observe the values obtained and compare them with the corresponding standard, and thus determine if the variables meet each indicated requirement. Finally, a series of proposals, improvements, and recommendations were issued with the electrical variables present that negatively affect the network, to reduce or mitigate the impacts of the insufficient energy quality of the establishment.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Actualmente los conceptos de calidad de energía y eficiencia energética, son términos que con el pasar del tiempo van cobrando importancia para las empresas de los distintos rubros. Cada vez estas organizaciones buscan un objetivo en común, el cual es generar más productos con menos recursos, es decir, aprovechar al máximo cada variable eléctrica para que implique un menor costo de producción, motivo por el cual hoy en día, las empresas invierten en diferentes tecnologías que permitan generar un ahorro energético y una calidad que optimice el rendimiento de cada equipo necesario para el funcionamiento del establecimiento, en el mediano y largo plazo.

La calidad de energía eléctrica se relaciona con las alteraciones que pueden tener las variables eléctricas, tales como una frecuencia estable, variaciones de voltaje, balance de cargas, valores de potencia activa y reactiva, distorsión de la forma de la onda, entre otras. Por lo que, en este estudio, se desea instalar un equipo analizador de calidad de energía en un transformador de 500 KVA, el cual es el encargado de suministrar energía eléctrica en el área norte de la Universidad de Atacama, con esto se busca observar y analizar el comportamiento eléctrico del sistema y así proponer soluciones que puedan contribuir a mejorar la calidad de la energía de la red.

Estas posibles soluciones podrían traer diferentes beneficios como por ejemplo una mayor confiabilidad del sistema eléctrico para los estudiantes y docentes del establecimiento, un mejor aprovechamiento de la energía permitiendo menores pérdidas de potencias, y por lo tanto un menor consumo de electricidad lo que se ve reflejado en un ahorro monetario para la universidad, como también evitar sanciones por contaminaciones a la red eléctrica. Además, es importante mencionar que se produce una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la huella de carbono, lo que contribuye con un impacto ambiental positivo al planeta. Estas son las principales motivaciones para realizar este proyecto.

El proyecto se compone de diferentes capítulos, los cuales cada uno contiene una parte importante del proceso, los cuales se detallarán a continuación:

El capítulo 2 se basa en el marco teórico, en el cual se mencionan y definen los conceptos necesarios para una mejor comprensión de los demás capítulos. En este se dan a conocer conceptos tales como las variables eléctricas principales que se manejaron gracias a la medición, conceptos de la calidad de la energía eléctrica como también efectos no deseados debido a la deficiencia de esta.

El capítulo 3 se basa en las normativas técnica que se utilizaran como referencias para los datos obtenidos a través de la medición. Cada artículo de las normativas se describirá de acorde a las problemáticas relacionada para este proyecto y así para saber cómo será analizada y evaluada la calidad de la energía de la universidad.

El capítulo 4 se basa en los antecedentes que permitirán el desarrollo del proyecto, en donde se detallara información importante como, por ejemplo, la ubicación de donde se realizara el estudio para el análisis de calidad de energía, los distintos tableros eléctricos que serán intervenidos, como también datos e información técnica del equipo utilizado y el tiempo configurado para la medición, todo esto junto con imágenes que evidencian lo realizado.

El capítulo 5 se basa en el análisis y resultados de los datos obtenidos por la medición a través de los rangos de referencia que entregan las diferentes normativas. En este se indican los resultados para cada variable junto a su análisis correspondiente para determinar si cumple con las condiciones exigidas.

El capítulo 6 se basa en las propuestas y recomendaciones que la universidad puede considerar para optimizar la calidad de la energía eléctrica en el establecimiento. En este se mencionan y se calculan las propuestas necesarias para corregir de cierta manera la deficiencia del sistema.

El capítulo 7 se basa en la conclusión de este proyecto, en la cual se detallarán los resultados obtenidos junto a las experiencias prácticas y teóricas adquiridas en el presente trabajo.

1.1. Antecedentes

El establecimiento de la Universidad de Atacama es un centro educacional de nivel superior en el que se imparten diferentes carreras profesionales, en las cuales asisten cientos de estudiantes como también docentes. Este establecimiento está compuesto de diferentes departamentos, cada uno de estos está encargado de una tarea específica y necesaria, por lo cual el suministro eléctrico es de suma importancia para las tareas habituales.

La energía eléctrica que demanda la Universidad de Atacama es tal, que se necesita más de un punto de suministro eléctrico, esto quiere decir que existe más de una subestacion encargada de la distribución de energía eléctrica a las diferentes zonas.

Se sabe que el suministro eléctrico hacia algunos edificios de la zona norte del establecimiento, es a través de una subestacion de 500 KVA, la cual está conectada mediante el alimentador UDA. Este sistema eléctrico está compuesto por diferentes cargas las cuales mayormente son dispositivos electrónicos utilizados para la formación académica como también equipos de iluminación.

La Universidad imparte clases en horario diurno y vespertino desde los días lunes hasta los días sábados, lo que prácticamente la hace dependiente de este recurso energético los 7 días de la semana por lo que se es necesario de un sistema eléctrico confiable, eficiente y de calidad.

1.2. Planteamiento del problema

El establecimiento requiere de un sistema eléctrico confiable, eficiente y de calidad lo cual se dificulta debido a los tipos de cargas conectadas en este sistema, las cuales son mayormente dispositivos electrónicos y equipos de iluminación.

Los dispositivos electrónicos y equipos de iluminación en grandes cantidades pueden afectar a la calidad de la energía eléctrica de diferentes maneras como por ejemplo introduciendo efectos no deseados en el sistema eléctrico.

Los dispositivos como las computadoras, fuentes de alimentación conmutadas y equipos de iluminación con reguladores electrónicos, son cargas no lineales las cuales unos de los efectos no deseados que pueden provocar, son la distorsión de la forma de onda sinusoidal de la corriente afectando la calidad de la energía en la red.

Tener una mala calidad de la energía eléctrica es sinónimo de deficiencias en la red, las cuales pueden provocar la degradación prematura de equipos esenciales, pérdida de eficiencia en la distribución de la energía, un mal funcionamiento en los dispositivos electrónicos, interrupciones e irregularidades del suministro eléctrico.

1.3. Justificación del problema

Asegurar una buena calidad de la energía eléctrica dentro de la Universidad de Atacama es esencial ya que afecta directamente al funcionamiento de los equipos y dispositivos electrónicos, la seguridad de las personas y la eficiencia del sistema eléctrico.

Mantener una buena calidad de la energía eléctrica es fundamental para garantizar la operación confiable de los dispositivos electrónicos utilizados para la formación académica dentro de la universidad, como, por ejemplo, los equipos de laboratorios, computadores y proyectores, por lo que tener una estabilidad en el suministro eléctrico asegura un flujo constante de enseñanza y aprendizaje para los estudiantes. También asegura una iluminación estable en las salas de clases y en espacios de actividades, mejorando el ambiente de aprendizaje y reduciendo la fatiga visual.

Para garantizar la seguridad del establecimiento y de las personas es necesario la no interrupción del suministro eléctrico por lo que una calidad de energía confiable es esencial para los sistemas de seguridad, como cámaras de vigilancia y sistemas de alarma.

El cumplimiento de normativas relacionadas a la calidad de la energía eléctrica fomenta la eficiencia energía y sostenibilidad de la red, también reduce los costos de mantenimiento asociados a un sistema deficiente.

1.4. Alcance

Para saber cuáles serán los alcances de este trabajo, se definirán los límites necesarios para las acciones en torno al análisis de calidad de energía del sistema eléctrico que se presenta en el transformador de 500 KVA del sector norte de la Universidad de Atacama.

Se realizará una medición con un analizador de calidad de energía durante un periodo de 7 días en el lado de baja tensión del transformador, para obtener distintas variables como, por ejemplo, voltajes, corrientes, potencias, factor de potencia y armónicos del sistema eléctrico.

Mediante las diferentes normativas nacionales se evaluarán los rangos permitidos de las variables con las variables obtenidas a través de la medición, esto permitirá conocer el estado en el que se encuentra la calidad de energía de la zona norte de la Universidad de Atacama. Dependiendo del estado en el que se encuentre la calidad de energía eléctrica se formularan posibles soluciones y recomendaciones mejorar el estado de esta.

1.5. Metodología

Para la elaboración de este proyecto se realizará una serie de pasos, los cuales se describirán de manera cronológica:

Se instalará un equipo analizador de calidad de energía al tablero general del transformador encargado de la distribución de suministro eléctrico en el área norte de la universidad. El equipo de medición será configurado de tal manera para que tome muestras de las variables eléctricas cada 10 minutos durante un periodo de 7 días. Al finalizar la medición se obtendrán los datos registrados por el equipo para analizar cada variable que influye en el sistema, que mediante través de diferentes normativas nacionales serán estudiadas y comparadas para establecer el estado en el que se encuentra parte del sistema eléctrico de la universidad. Una vez determinado el estado de la calidad de la energía eléctrica se recomendará posibles soluciones y mejoras para corregir de cierta manera la deficiencia que se encontró en el sistema a través del análisis de datos.

1.6. Objetivo general

Analizar la calidad de energía eléctrica en un transformador de 500 KVA en el área norte de la Universidad de Atacama, y así proponer mejoras y/o soluciones al sistema eléctrico.

1.7. Objetivos específicos

- Medir las variables eléctricas del transformador mediante la instalación de un analizador de calidad de energía.
- Clasificar los datos obtenidos en una planilla Excel para tener registro y respaldo de cada variable en cada periodo.
- Determinar si los parámetros obtenidos mediante la medición se encuentran dentro de los valores determinados según su normativa.
- Proponer posibles cambios y/o mejoras en el sistema eléctrico para optimizar la calidad de la energía eléctrica.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

En el presente capítulo se darán a conocer diferentes fundamentos teóricos en los cuales se busca establecer una base que permita un correcto análisis de los siguientes capítulos.

2.1. Variables eléctricas

Las variables eléctricas son magnitudes físicas que se asocian a las propiedades eléctricas de los sistemas y circuitos eléctricos. Estas magnitudes describen y cuantifican diversos aspectos de la electricidad.

Estas variables eléctricas son fundamentales para el análisis y diseño de circuitos eléctricos, así como para comprender el comportamiento de los sistemas eléctricos en general. Su comprensión y medición adecuadas son esenciales para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los dispositivos y sistemas eléctricos.

Algunas de las variables eléctricas con su respectiva unidad de medida que trabajaremos en este proyecto son:

- **Corriente eléctrica:** La corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas a través de un área de sección transversal en un tiempo de 1 segundo (Floyd 2007). Su unidad de medida es el Ampere (A).
- **Voltaje:** La tensión o voltaje se define como una fuerza denominada FEM (fuerza electromotriz) a esta cantidad se le conoce como diferencia de potencial que se tienen entre dos puntos. Mientras mayor sea la diferencia de potencial entre dos puntos mayor será la fuerza con la que las cargas fluyan. Su unidad de medida es el Volt (V).
- **Frecuencia:** La frecuencia se define como el número de ciclos que una onda sinusoidal completa en un tiempo de 1 segundo. Por lo tanto, mientras mayor sea la frecuencia, mayor será la cantidad de ciclos completados en un periodo de 1 segundo. Su unidad de medida es el Hertz (Hz).

2.2. Corriente alterna CA

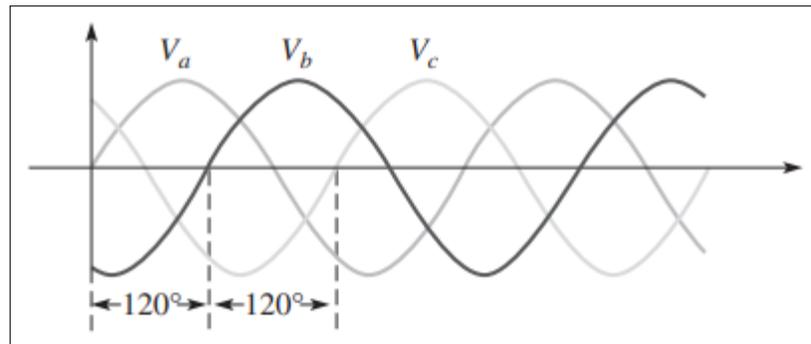
Un sistema eléctrico de corriente alterna se caracteriza normalmente por su forma de onda, la cual tiene una forma de senoide, en esta se describe el comportamiento tanto de la corriente y el voltaje.

Se abarcarán los dos tipos de configuraciones de corriente alterna:

- Corriente monofásica
- Corriente trifásica

La corriente monofásica tiene solo un conductor activo, en cambio en la corriente trifásica se compone de tres conductores activos. En ambos sistemas, la tensión y corriente se comportan de forma sinusoidal, pero en el trifásico existe un desfase de 120° entre fases.

Figura 2.1. Onda sinusoidal en sistema trifásico.



Fuente: Floyd (2007).

2.3. Calidad de energía eléctrica

El tema de calidad de energía ha adquirido actualmente una relevancia por la concientización cada vez mayor. Esta se relaciona directamente con las perturbaciones que pueden afectar a las condiciones eléctricas del suministro y ocasionar el mal funcionamiento de equipos y/o de procesos.

La normativa internacional “IEC 61000-4-30” define la “Calidad de Energía Eléctrica” como las características de la electricidad en un punto dado de la red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia. En palabras simples la calidad de energía eléctrica sería: medida estándar que se conozca del producto o servicio, lo que nos permite establecer si el producto es de calidad o no.

El término de calidad de energía es muy amplio y va variando con respecto al país, algunas de sus características dependen del distribuidor de electricidad, como de los fabricantes de equipos y del usuario final.

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

- Armónicos
- Un mal factor de potencia
- Fluctuaciones de voltaje y frecuencia

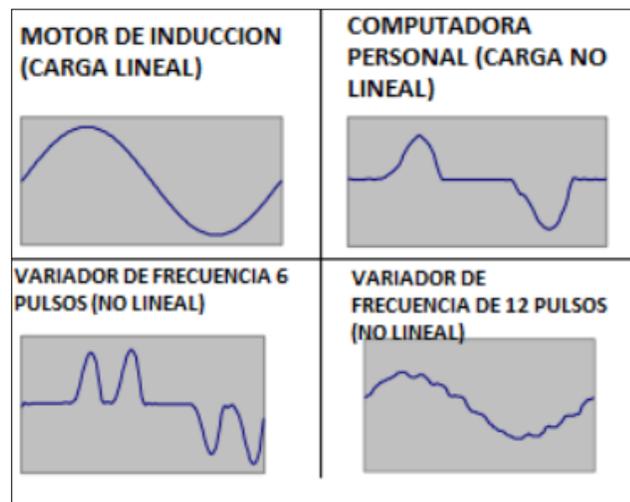
2.4. Armónicos

Anteriormente se dijo que la corriente alterna se describe como el comportamiento de una onda sinusoidal. Cuando esta onda ya no es completamente sinusoidal y esta deformada se dice que contiene un contenido armónico, a esta deformación también se le conoce como distorsión armónica y aplica tanto como para la corriente y la tensión.

En un sistema eléctrico existen cargas clasificadas en cargas lineales y no lineales:

- **Carga lineal:** Sucede cuando se conecta una carga al sistema eléctrico, y la forma de onda del voltaje y la corriente del equipo conectado siguen siendo iguales. Generalmente pasa al arrancar motores de inducción (asíncronos), equipos de iluminación incandescentes, calefactores, etc.
- **Carga no lineal:** Una carga se considera no lineal cuando la forma de la onda de la corriente no es igual a la del voltaje, es decir, la corriente pierde la forma sinusoidal. Esto sucede porque contienen corrientes armónicas que interactúan con la impedancia de la red, generando una distorsión de la onda para la carga, como para el sistema de distribución.

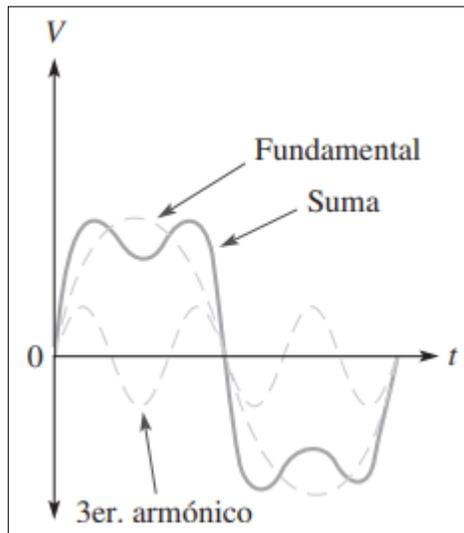
Figura 2.2. Formas de onda de los distintos tipos de cargas.



Fuente: Electricaplicada

El teorema de Fourier permite analizar la distorsión armónica mediante la descomposición de una onda periódica no sinusoidal través de la suma de ondas sinusoidales como se aprecia en la figura 2.3.

Figura 2.3. Distorsión armónica.



Fuente: Floyd (2007).

En la figura 2.3 se aprecia la onda sinusoidal de la frecuencia fundamental y también un 3er armónico, el cual es múltiplo de esta misma. El resultado de la suma de estas dos ondas, se ve reflejado en la distorsión armónica de la fundamental.

Las principales fuentes de armónicos son:

- Ballast electromagnéticos y electrónicos de iluminación.
- La corriente Inrush de los transformadores.
- Variadores de frecuencia.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Convertidores DC a AC (inversores)

2.4.1. Efectos causados por la distorsión armónica

Algunos de los efectos causados por la distorsión armónica son:

- **Efecto skin:** Este efecto es causado en los conductores ya que en corriente alterna a medida que aumenta la frecuencia, el campo electromagnético cambian rápidamente de dirección entonces esto causa que la corriente en el núcleo del conductor sea repelida hacia la superficie de este.
- **Efectos en los transformadores:** Los armónicos de corriente en los transformadores puede resultar en un aumento de la temperatura debido a pérdidas adicionales por efecto Joule, lo que puede acortar su vida útil. Además, pueden reducir la capacidad de carga nominal, generar ruido y vibraciones, disminuyendo la eficiencia del transformador.
- **Efectos en los motores:** Los armónicos de voltaje en las maquinas rotativas afectan directamente al torque y a la eficiencia de estas. Los armónicos de corriente al igual que en los transformadores provocan aumento de las pérdidas y el calentamiento del motor, lo que puede reducir su vida útil. También generan vibraciones y ruidos.
- **Efectos en los condensadores:** Los armónicos de corriente pueden sobrecargar los condensadores afectando la vida útil y el rendimiento de estos mismos. Disminuyen la eficacia de los condensadores en la corrección del factor de potencia, aumentando el consumo de energía reactiva. Los armónicos también pueden ocasionar en los condensadores el efecto de resonancia, el cual ocasiona que las corrientes y voltaje armónicos aumenten en un valor considerable.
- **Efectos en otros equipos:** Los equipos electrónicos son susceptible a operaciones incorrectas, es decir su correcto funcionamiento se ve afectado por los armónicos.

2.4.2. Secuencia de los armónicos

Existe una progresión de frecuencia de los armónicos, donde se multiplica los 50 Hz de la frecuencia fundamental por el número de armónico que estamos trabajando, generando así una secuencia para cada orden de armónico. Esto se resume en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de frecuencias y secuencias por orden de armónicos.

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 se dividen en tres tipos:

- **Secuencia directa o positiva:** La dirección en la que circulan es igual al de la componente fundamental, es decir R - S - T. Los efectos que producen son la creación de campos giratorios que conllevan una aceleración en el mismo sentido de giro de las maquinas rotatorias, generando un aumento en las pérdidas. Aplica para armónicos de orden 7, 13, 19, etc.
- **Secuencia inversa o negativa:** La dirección en la que circulan es contrario al de la componente fundamental, es decir R - T - S. Producen efectos de desaceleración o freno en las máquinas rotativas, aumentando el consumo de la propia. Aplica para armónicos de orden 5, 11, 17, etc.
- **Secuencia cero u homopolar:** Los vectores R - S - T apuntan en la misma dirección y sentido a la vez. El principal efecto que produce es el retorno de la corriente que circula por el neutro, el cual triplica su valor por una línea, aun cuando el sistema se encuentre perfectamente equilibrado. Aplica para armónicos de orden 3, 9, 15, etc.

2.4.3. Índices para la distorsión armónica

Algunos indicadores que permiten conocer el nivel de distorsión armónica tanto como de la corriente y del voltaje son:

Distorsión armónica individual: Es un valor en porcentaje de un determinado armónico, respecto al valor fundamental.

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

Donde:

- D_j : Es la distorsión armónica individual
- X_n : Es el valor de un determinado armónico.
- X_1 : Es el valor del armónico de frecuencia fundamental.

Distorsión armónica total: Es un valor en porcentaje que resulta entre la componente RMS armónica con respecto a la fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n X_k^2}}{X_1} \times 100\% = \frac{\sqrt{X_2^2 + X_3^2 + X_4^2 + \dots X_n^2}}{X_1} \times 100\%$$

Donde:

- THD: Es el valor en porcentaje de la distorsión armónica total.
- X_k : Es el valor de un determinado armónico.
- X_1 : Es el valor del armónico de frecuencia fundamental.

2.4.4. Mitigación de armónicos

Al tener un valor elevado de distorsión armónica, se vuelve necesario e indispensable elaborar soluciones para reducir el impacto de esta variable. Además de generar pérdidas en el sistema, este fenómeno provoca otros sucesos, como el disparo de protecciones eléctricas, reducción de la vida útil de los equipos, y la aparición de calentamiento en los conductores, junto a las vibraciones de motores eléctricos que pueden producirse en una industria. Además de esto, esta tecnología puede corregir el factor de potencia. Para esto, existen dos tecnologías que pueden aplicarse para mitigar este efecto: los filtros de armónicos pasivos, y filtro de armónicos activos.

2.4.4.1. Filtros de armónicos pasivos

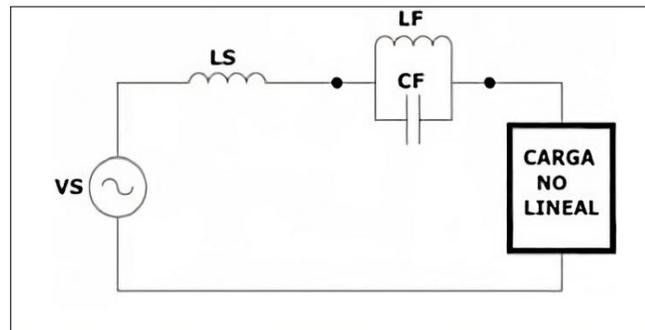
Esta tecnología utiliza componentes pasivos como inductores, condensadores y resistencias para atenuar o eliminar selectivamente ciertas frecuencias de armónicos, es decir reduce significativamente componentes indeseadas y deja pasar componentes deseadas. Estos filtros están diseñados para responder a las frecuencias específicas de armónicos presentes en el sistema y proporcionar una impedancia adecuada para reducir su impacto. Los filtros pasivos son una opción común para el control de armónicos en sistemas eléctricos, pero su eficacia puede depender de factores como la carga del sistema, la topología de la red y la distribución de armónicos. La inclusión de un filtro pasivo debe ser estudiada cuidadosamente, puesto que puede introducir un problema de resonancia en el sistema. Por último, tienen la ventaja de ser más baratos en comparación con los filtros activos.

Estos tipos de filtros los podemos encontrar en:

- **Filtro pasivo serie:** La conexión que se realiza es en serie a la carga, utilizando componentes pasivos (resistencias, inductancias y capacitancias), para atenuar ciertas frecuencias de la señal. La idea es que los elementos instalados entre en resonancia a la frecuencia del armónico que queremos eliminar, así la componente indeseada encontrará una rama de mínima impedancia y se irá a tierra. Para la frecuencia

fundamental el filtro debe tener una impedancia de gran valor, con el fin de no incrementar demasiado la corriente adicional provocada por este nuevo elemento.

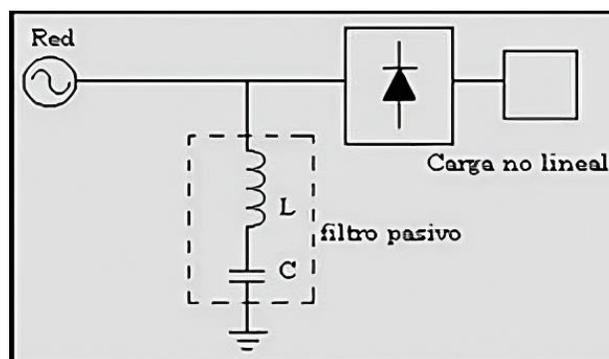
Figura 2.4. Filtro pasivo paralelo a una carga no lineal.



Fuente: Palomino y Mendoza (2019).

- **Filtro paralelo o shunt:** Los filtros pasivos shunt o paralelo proveen un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, está compuesto por una rama RLC en serie, que se conecta en paralelo con la barra o sistema de alimentación.

Figura 2.5. Filtro Shunt paralelo a una carga no lineal.

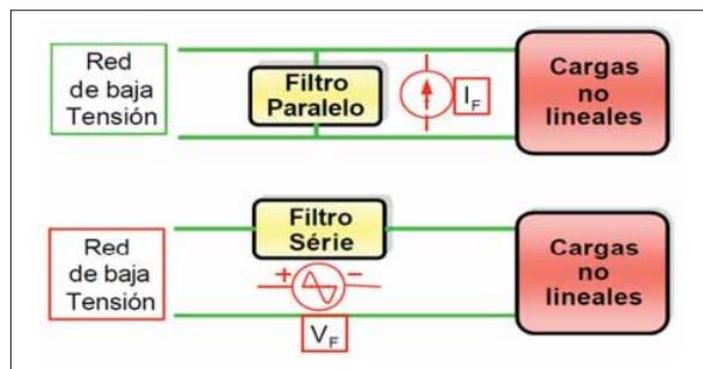


Fuente: Patricio Concha UBB

2.4.4.2. Filtros de armónicos activos

Estos tipos de filtros tienen la capacidad de monitorear la forma de onda de la corriente o el voltaje en tiempo real, y generan una corriente o tensión opuesta para cancelar los armónicos no deseados. Son capaces de adaptarse dinámicamente a las variaciones en la carga y en las condiciones de la red eléctrica, lo que les confiere una mayor flexibilidad en comparación con los filtros pasivos. Los filtros activos de armónicos son eficaces para abordar armónicos de orden variable y para proporcionar corrección en tiempo real. Pueden utilizarse en una variedad de aplicaciones, desde sistemas de distribución de energía hasta instalaciones industriales con cargas no lineales significativas. La elección entre un filtro activo y uno pasivo dependerá de los requisitos específicos del sistema y las características de las cargas presentes. Es importante tener en cuenta que los filtros activos de armónicos suelen ser más complejos y costosos que los filtros pasivos, pero ofrecen un mayor grado de control y adaptabilidad. Además, suelen ser más eficientes en términos de reducción de armónicos en comparación con los filtros pasivos, especialmente en sistemas donde las condiciones operativas varían con el tiempo. Este tipo de filtro, al igual que los filtros pasivos, pueden ser conectados en serie o paralelo al sistema.

Figura 2.6. Esquema de conexión de filtros paralelo y serie en cargas no lineales



Fuente: Palomino y Mendoza (2019).

2.4.4.3. Filtros de armónicos híbridos

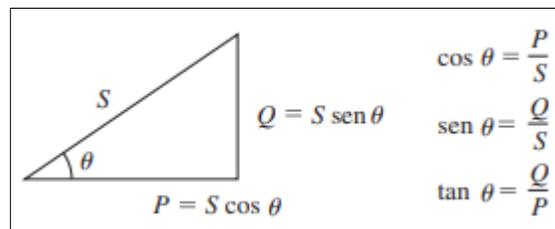
El filtrado híbrido consta de un sistema de filtrado pasivo convencional apoyado por un filtro activo situado en diferentes posiciones en relación con el filtro pasivo. Esta combinación optimiza el sistema de cancelación pasiva, evita los problemas de resonancias entre los componentes del filtro pasivo y la impedancia de línea y permite potencias de filtrado elevadas a un coste inferior al del filtrado activo puro. Estos se dividen en:

- **Filtro activo en serie con la línea:** El filtro activo se comporta como una impedancia variable situada entre la línea y la carga, de tal modo que la impedancia es nula para la componente fundamental y de carácter resistivo y elevado para los armónicos. El filtro activo actúa como un "aislador de armónicos". Como la sección de filtro activo se instala en serie con la red, y bloquea el paso de armónicos desde y hacia ella, los armónicos generados en la carga necesariamente circularán por el filtro pasivo. De este modo la tensión en el lado de línea del filtro activo serie es teóricamente la correspondiente a la frecuencia fundamental.
- **Filtro activo en serie con un filtro pasivo:** Este es un método similar al anterior en donde la sección correspondiente al filtro activo está situada en serie con el filtro pasivo. Este filtro presenta impedancia nula a la componente fundamental y variable para las componentes armónicas.
- **Filtro activo en paralelo con el filtro pasivo:** El sistema principal de filtrado es pasivo, sintonizado con los armónicos más bajos y de mayor contenido. En paralelo con el filtro pasivo hay un filtro activo de corriente o tensión encargado de eliminar los armónicos de frecuencias más elevadas.

2.5. Factor de potencia

El factor de potencia o f.p. es una relación matemática para circuitos de corriente alterna, entre la potencia activa (P), y la potencia aparente (S). Esto establece cuanta potencia es la que realmente se está aprovechando, y es considerada una de las variables más importantes en conceptos de que tan efectivo es el equipo conectado a una red eléctrica. Se considera ideal que “f.p.=1”, esto sucede cuando la carga es puramente resistiva, y en casos para nada ideales que “f.p.=0” que sucede cuando la carga es puramente inductiva.

Figura 2.7. Triángulo de potencias.



Fuente: Chapman (2012).

2.5.1. Potencia Activa (P)

Es la potencia que realmente es utilizada para realizar el trabajo de un equipo o carga eléctrica. Este valor debe ser idealmente más cercano a 1 (el máximo valor), para que así el sistema sea eficiente y presente pocas pérdidas. Su unidad de medida es el “Watt” (W) y también puede usarse múltiplos para cantidades elevadas de esta variable, como el “Kilowatt” (KW), o el “Megawatt” (MW).

2.5.2. Potencia Reactiva (Q)

Es la potencia que no es realmente aprovechada, es decir, no produce trabajo útil. Es considerada una pérdida en el sistema eléctrico. Idealmente, este valor debe ser muy bajo, para que así el sistema sea eficiente. Su unidad de medida es el “Voltampere reactivo” (VAr) y también puede usarse múltiplos para cantidades elevadas, como el “Kilovoltampere reactivo” (KVAR), o el “Megavoltampere reactivo” (MVAR).

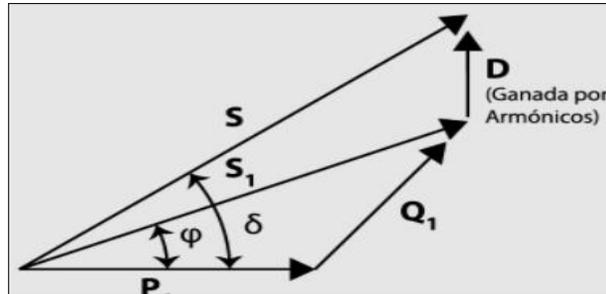
2.5.3. Potencia Aparente (S)

Es la cantidad total de potencia que consume un equipo eléctrico. Idealmente, la potencia aparente debe ser igual a la potencia activa ($P=S$), para así considerarse un sistema totalmente eficiente Su unidad de medida es el “Voltampere” (VA) y también puede usarse múltiplos para cantidades elevadas de esta variable, como el “Kilovoltampere” (KVA), o el “Megavoltampere” (MVA).

2.5.4. Componente D

Este caso se utiliza solo en cargas no lineales, sucede cuando la forma de onda no es perfectamente sinusoidal por las corrientes armónicas. Cuando esto sucede, la potencia aparente no está solamente compuesta por la potencia activa y reactiva, sino que también aparece una tercera componente, suma de todas las potencias que genera la distorsión de la onda. A esta componente se llama D. Por este motivo, en cargas no lineales, $f.p \neq \cos\theta$.

Figura 2.8: Triángulo de potencias con componente D.



Fuente: SyZ Cominsa.

En este caso, el factor de potencia es:

$$f.p. = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Mientras que $\cos \theta$ se calcula sin armónicos (Componente D):

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

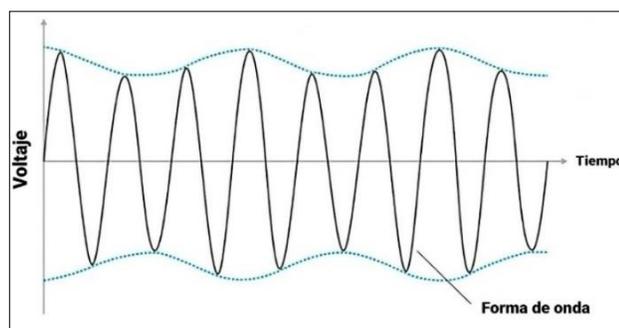
2.6. Fluctuaciones de tensión

Las fluctuaciones de tensión, es uno de los mayores problemas de regulación de tensión en la industria eléctrica. Se trata de variaciones de voltaje producida por alteraciones de las cargas, las que son generados principalmente por arranque de motores, máquinas de soldar, hornos de arco eléctrico, entre otros. Tienen una duración entre varios milisegundos y su amplitud de variación no supera $\pm 10\%$ del voltaje nominal.

Estas variaciones dan vida al concepto de flicker, lo cual se define como una variación perceptible por el ojo humano en la luminosidad e intensidad de la luz, sobre todo en luminarias incandescentes, generando malestares o dolores de cabeza en las personas. (Illuminet, 2018).

También, al haber variaciones de voltajes más severas, puede afectar directamente a los equipos que un usuario tiene conectado a la red. Se han visto casos que pueden generar daños a los artefactos, incluso hasta dejarlo inutilizable. Es por esto que la empresa distribuidora de energía, debe tener un margen en la red ante un evento de esta circunstancia, la cual es posible verificar realizando inspecciones y mantenciones preventivas cada cierto periodo de tiempo, para así evitar multas, cobros o demandas por parte del cliente, al no prestar un servicio eficiente de venta de energía eléctrica.

Figura 2.9. Variaciones en la onda de voltaje.



Fuente: Tecsá (2020)

2.7. Fluctuaciones de frecuencia

Se dice que existen variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico cuando se produce una alteración del equilibrio entre carga y generación. En condiciones normales de funcionamiento existe un equilibrio entre la capacidad generadora y la demanda de carga, aunque este equilibrio se puede descompensar por variaciones bruscas de carga, para ello, en la red de distribución se mantiene una reserva de energía rodante, es decir, una capacidad no utilizada que puede compensar estas variaciones bruscas y mantener la frecuencia dentro de los márgenes del apartado anterior. No obstante, son posibles condiciones excepcionales en las que se produzca un desequilibrio importante entre la generación y la carga, dando lugar a una variación de la frecuencia. Como efectos producidos por esta eventualidad, destacan la variación de velocidad en máquinas rotativas, mayor o menor potencia transmitida en motores, iluminación, alteraciones a filtros de armónicos, problemas en instalaciones autogeneradoras, etc.

CAPÍTULO III

NORMATIVAS

En el presente capítulo se definirán los documentos jurídicos nacionales llamados “Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución y Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio”, los cuales establecen valores estándares para diferentes variables eléctricas que servirán para regir nuestro análisis de calidad de energía y así conocer el estado en el que se encuentra.

3.1. Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución

Esta normativa tiene por objetivo principal establecer las exigencias y estándares de calidad de servicio para los sistemas de distribución de energía eléctrica, permitiendo el correcto funcionamiento de estos mismos. Esta normativa también establece exigencias y estándares respecto de la Calidad de Producto para equipos e instalaciones de Usuarios.

Algunas de las exigencias para esta normativa son:

- **Artículo 1-5:** Establece que la magnitud de la frecuencia nominal en Sistemas de Distribución es de 50Hz y el voltaje nominal estándar en sistemas de tres o cuatro conductores y tres fases será de 220 Volts entre fase y neutro.
- **Artículo 1-6:** Establece que los sistemas de distribución serán clasificados con un índice, el cual permite conocer la dificultad de entregar servicio de distribución en la zona. Dicho índice para la zona en cual se realizó este estudio es clasificado como densidad media para la comuna de Copiapó.
- **Artículo 2-2:** Establece que los usuarios deberán cumplir con las exigencias establecidas en la presente normativa técnica respecto de sus instalaciones conectadas en la Red de Distribución.

Esta normativa también establece algunos estándares para las variables eléctricas, las cuales permitirán conocer el estado en el que se encuentra el sistema eléctrico.

3.1.1. Regulación del voltaje

Según el artículo 3-1, se utilizará indicador para evaluar la regulación de voltaje en un punto de la Red, el cual es:

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

Donde:

- ΔV_k : Regulación de tensión en el punto k, en %
- V_k : Tensión de suministro en el punto k promedio de las medidas.
- V_n : Tensión nominal en el punto k.

Durante el 95% del tiempo de la medición y registro, los valores eficaces de tensión en el punto de conexión, deberán ser tales que la regulación de tensión se mantenga dentro de los límites de la figura 3.1.

Figura 3.1. Límites para regulación de tensión.

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

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

Todos los valores eficaces de la tensión, promediados 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. Regulación de la frecuencia

Según el artículo 3-4, la frecuencia de la tensión suministrada se deberá medir y ser registrada en la cabecera de los alimentadores, promediada en intervalos de 10 minutos, de manera de elaborar una estadística que permita identificar el porcentaje del tiempo en que la frecuencia se encuentra dentro de los intervalos de la figura 3.2.

Figura 3.2. Intervalos para las variaciones de frecuencia.

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

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

3.1.3. Distorsión armónica de voltaje

Según el artículo 3-5, para evaluar la distorsión armónica de voltaje se utilizarán estos dos indicadores expresados en %:

- Distorsión armónica total del voltaje (THD_V)
- Distorsión armónica individuales de voltaje (D_{Vj})

En estado normal y durante el 95% del tiempo de los 7 días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión promediados, deberán ser tales que la distorsión armónica total de tensión no supere el 8%, tanto en BT como en MT.

Adicionalmente en estado normal y durante el 95% del tiempo de los 7 días corridos de medición y registro, los valores eficaces de cada tensión armónica individual, promediados deberán ser menores o iguales a los límites en % indicados en la figura 3.3.

Figura 3.3. Límites para la Distorsión Armónica Individual de voltaje.

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 Servicio para Sistemas de Distribución.

3.1.4. Distorsión armónica de corriente

Según el artículo 3-8, para evaluar la distorsión armónica de corriente se utilizarán estos dos indicadores expresados en %:

- Distorsión armónica total de corriente (THD_I)
- Distorsión armónica individuales de corriente (D_{ij})

En estado normal y durante el 95% del tiempo de los 7 días corridos de medición y registro, los valores eficaces de las corrientes promediada, deberán ser tales que la distorsión armónica de corriente cumpla con los límites establecidos en la figura 3.4 para los diferentes usuarios de BT.

Figura 3.4. Límites para la Distorsión Armónica de corriente.

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 Servicio para Sistemas de Distribución.

3.2. Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio

Esta normativa tiene como objetivo es establecer las exigencias de seguridad y calidad de servicio de los sistemas interconectados. Se divide en diversos artículos que serán utilizados para evaluar el sistema eléctrico y para el análisis posterior, solo necesitaremos el antecedente de una sola variable.

3.2.1. Factor de potencia

Según en el artículo 5-18, se establecen valores máximos para el factor de potencia para las instalaciones de clientes regulados en cualquier condición de carga conectados al punto de control del cliente. En el caso para los usuarios con un nivel de tensión inferior a 30 kV, se establece un valor de factor de potencia 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo.

La exigencia del factor de potencia medido deberá cumplirse en al menos un 98% del tiempo.

CAPÍTULO IV

ANTECEDENTES

En este capítulo se darán a conocer los antecedentes de la medición en el transformador estudiado y se le describirá el punto común de conexión (PCC) designado, también se detallarán los recursos utilizados, como el equipo de medición y sus complementos.

4.1. Antecedentes de la medición

El análisis de calidad de energía tiene lugar en el transformador ubicado en el área norte del campus Paulino del Barrio de la Universidad de Atacama, ciudad de Copiapó, región de Atacama, Chile. Coordenadas universales: -27.357490, -70.352306. Este es el punto común donde se distribuye la energía eléctrica a las distintas aulas, oficinas y espacios del sector norte del establecimiento.

Figura 4.1. Ubicación de la medición en Google Maps.



4.1.1. Descripción del transformador

El estudio de calidad de energía se le realizó a un transformador de distribución, el cual se observa en la figura 4.2. el cual cuenta con una potencia nominal de 500 kVA, a este se le suministra energía eléctrica a través del alimentador UDA de 23 kV en su línea de media tensión.

Figura 4.2. Transformador analizado.



En la figura 4.2. se observa que el transformador se encuentra instalando en altura soportado por vigas de acero entre dos estructuras de media tensión, además cuenta con un equipo compacto de medida para la lectura de datos. Debajo en las mismas estructuras se encuentra ubicado el tablero general correspondiente con su respectiva protección de baja tensión en la cual llegan dos alimentadores por fase como se observa en la figura 4.3.

Figura 4.3. Tablero general.

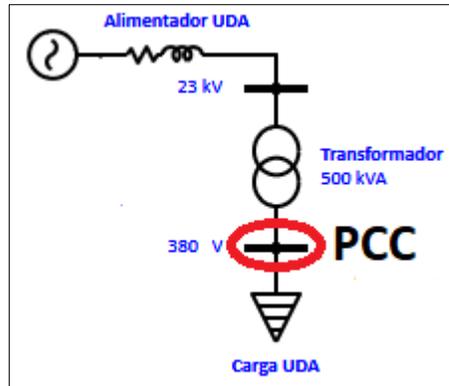


A los costados del tablero de la figura 4.3. también se encuentran otros que se encargan de distribuir los circuitos para cada edificio correspondiente a la zona norte de la universidad, los cuales su alimentador proviene desde este tablero.

4.1.2. Punto común de conexión

El punto común de conexión o PPC se designó en lado de baja tensión del transformador como se observa en la figura 4.4. específicamente en el tablero general, a la salida de la protección general.

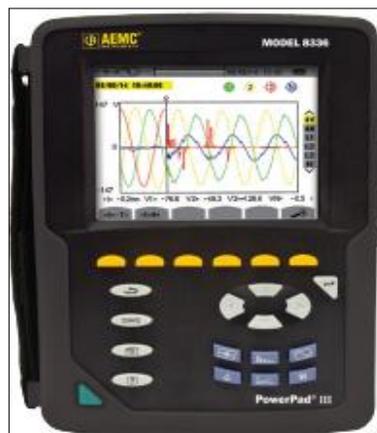
Figura 4.4. PCC designado.



4.1.3. Equipo de medición

El equipo de medición que se utilizó para este estudio en la universidad es un analizador de calidad de la energía (Powerpad III) de la marca AEMC modelo 8336 el cual se observa en la figura 4.5.

Figura 4.5. Equipo de medición.



Fuente: Manual PowerPad® III Modelo 8336

Este equipo de la figura 4.5. tiene diferentes características entre las que más destacan para este análisis de calidad de energía son:

- Cinco terminales de entrada de voltaje y cuatro de corriente los cuales permiten diferentes configuraciones de medición.
- Medidas de armónicos (referidas al valor fundamental o RMS) para voltaje, corriente o potencia, hasta el 50 ° armónico.
- Monitorea el valor promedio de cualquier parámetro, calculado por un período de 1 segundo a 2 horas.
- Medida de potencia activa, reactiva y aparente por fase y su respectiva suma total.

4.2. Medición

La medición se inició el día lunes 4 de septiembre del 2023 a las 8:00 PM realizando muestras en un intervalo de cada 10 minutos culminando el día lunes 11 de septiembre del 2023 a las 8:20 PM obteniendo una cantidad 1011 datos en total. En resumen, la medición duro un periodo de 7 días registrando 1011 datos los cuales servirán para conocer el estado de la calidad de la energía en el sistema eléctrico de la zona norte de la Universidad de Atacama.

4.2.1. Accesorios

Los accesorios requeridos para la medición contemplan tantos como los implementos necesarios del equipo como también los necesarios para resguardar la seguridad de las personas al ejecutar esta medición, estos son:

- Sondas de medición para corriente y tensión
- Conectores tipo banana
- Elementos de protección personal específicos tales como guantes clase 0 y básicos como bototos aislantes y lentes de seguridad, etc.

Estos implementes descritos anteriormente se muestran en la figura 4.6. en la cual presenta todos los accesorios necesarios.

Figura 4.6. Accesorios del equipo de medición.

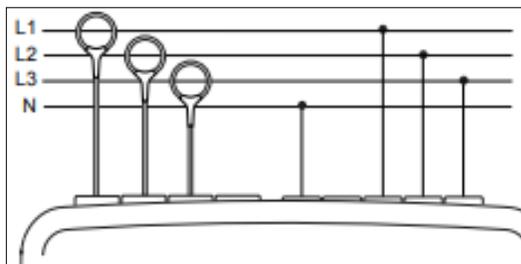


4.2.2. Instalación del equipo

El equipo analizador de calidad de energía fue instalado con un tablero sellado con candado y con señalética correspondiente para la no intervención de terceros. Este tablero se instaló en la misma estructura de soporte del transformador al costado del tablero general quedando anclado y fijo.

Las sondas tanto como de corriente y voltaje del equipo se conectaron en una configuración denominada trifásica de 4 hilos como se observa en la figura 4.7.

Figura 4.7. Configuración del equipo.



Fuente: Manual PowerPad® III Modelo 8336

Esta configuración como se aprecia en la figura 4.7. está compuesta por 3 sondas de corrientes y 4 sondas de voltaje.

Las sondas de corrientes del equipo de medición se instalaron en cada fase correspondiente, en el tablero general aguas abajo de la protección general como se observa en la figura 4.8.

Figura 4.8. Sondos de corrientes.



Las sondas de voltaje del equipo de medición se instalaron en cada fase y también hacia el neutro del sistema eléctrico, estas en un tablero aguas abajo del tablero general, en una barra común como se observa en figura 4.9.

Figura 4.9. Sondos de tensión.



El equipo como anteriormente se mencionó, quedo resguardado durante todo el tiempo de la medición en un tablero aparte, a como se observa en la figura 4.10.

Figura 4.10. Equipo de medición.



CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se evaluarán las variables eléctricas que influyen en el sistema eléctrico del transformador de distribución de 500 KVA. Estas variables serán comparadas con la “Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución y Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio”, todo esto para saber el estado de la calidad de energía en el sistema eléctrico.

5.1. Análisis del voltaje

En el artículo 3-1 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, establece que la regulación de voltaje para usuarios de baja tensión en la red y con una densidad media, es de un $\pm 7,5\%$ para el voltaje, según la figura 3.1.

La tensión en el punto común de conexión (PPC) designado es de 220 V nominal entre fase y neutro, por lo tanto, los límites de estos serían de:

- Límite superior: 236,5 V
- Límite inferior: 203,5 V

El artículo también nos indica que cuando la red se encuentre en estado normal la tensión deberá estar un 95% del tiempo dentro de estos límites de regulación de voltaje.

Los valores del voltaje entre fase y neutro para cada línea se aprecian en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores de voltaje entre fase y neutro.

Valores de voltaje entre fase y neutro (V)			
Condición	R	S	T
Mínimo	184,7	186,2	185,6
Promedio	232,217	232,670	232,983
Máximo	238,5	239,3	239,7

Según el indicador establecido en el artículo 3-1, se calculará la regulación de voltaje para cada fase para saber si se encuentran dentro de los límites y tiempo establecido por esta norma.

5.1.1. Regulación de voltaje por fase

En la tabla 5.1. se tienen los valores promedios de voltaje para cada una de las fases que se obtuvieron a través de la medición.

El valor nominal del voltaje según lo establecido por la norma es de 220 V entre fase y neutro, por lo que la regulación de voltaje para cada línea es:

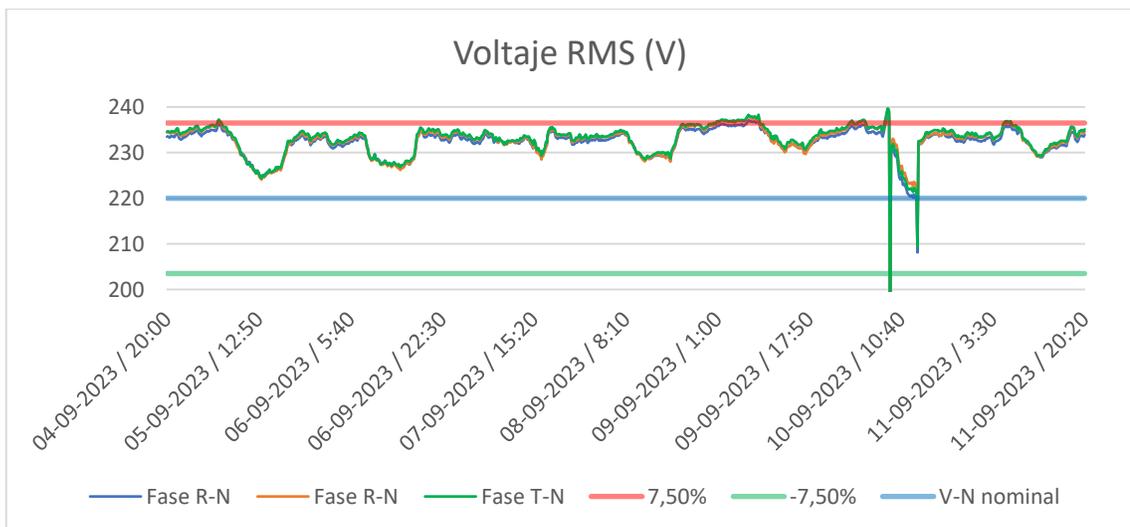
$$Fase R \Delta V_k = \frac{|232,217 V - 220 V|}{220 V} \times 100\% = 5,55\%$$

$$Fase S \Delta V_k = \frac{|232,670 V - 220 V|}{220 V} \times 100\% = 5,76\%$$

$$Fase T \Delta V_k = \frac{|232,983 V - 220 V|}{220 V} \times 100\% = 5,9\%$$

Según la regulación de voltaje que se calculó para cada una de las líneas se encontraron dentro de los límites de $\pm 7,5\%$ cumpliendo con unos de los puntos establecidos por la norma. Sin embargo, se debe saber si esto se cumple durante el 95% del tiempo de la medición por lo que el comportamiento del voltaje durante el periodo de la medición se ve reflejado en la figura 5.1. en la cual se observan el comportamiento de voltaje para las 3 líneas del lado de baja tensión de la subestacion.

Figura 5.1. Gráfico del Voltaje.



En la figura 5.1. en la cual se describe el comportamiento del voltaje correspondiente a cada fase durante el periodo de medición, específicamente en el día 10/09/2023 aproximadamente a las 08:40 AM, se observó que el voltaje para las 3 fases decayó a 0 durante un lapso de 10 a 15 minutos. Esto fue debido a un corte programado del suministro eléctrico.

También en la figura 5.1. se observa que el voltaje con respecto al neutro para cada fase tiende mucho a la variación por lo que es no estable con respecto a los 220 V nominal. El comportamiento entre las fases es similar entre ellas a simple vista, sin embargo, cada línea representa un porcentaje de tiempo diferente en el que se encuentran dentro de los límites de $\pm 7,5\%$ de voltaje.

Los porcentajes del tiempo en los cuales se mantuvieron dentro de los límites para cada línea son:

- En la fase R se tiene 1 dato por debajo del límite inferior y 17 datos por encima del límite superior con un total de 18 datos fuera de rango, es decir que hay 993 datos dentro de rango lo que representa un porcentaje del tiempo de 98,22%.
- En la fase S se tiene 1 dato por debajo del límite inferior y 65 datos por encima del límite superior con un total de 66 datos fuera de rango, es decir que hay 945 datos dentro de rango lo que representa un porcentaje del tiempo de 93,47%.
- En la fase T se tiene 1 dato por debajo del límite inferior y 82 datos por encima del límite superior con un total de 83 datos fuera de rango, es decir que hay 928 datos dentro de rango lo que representa un porcentaje del tiempo de 91,79%.

5.1.2. Resultados de la regulación de voltaje

Según lo estipulado en el artículo 3-1 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, solamente la fase R se encontró dentro de los valores establecidos como se observa en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Resultados de regulación de voltaje.

Regulación de voltaje			
Condiciones	Fase		
	R	S	T
Rango permitido	± 7,5%		
Datos fuera de rango	18	66	83
Datos dentro del rango	993	945	928
% de tiempo de datos dentro del rango	98,22%	93,47%	91,79%
Cumple con la normativa	Si	No	No

En la tabla 5.2. se aprecia que la fase S y T los datos dentro de rango están por debajo de los 95% del tiempo de la medición, es decir tanto como la fase S y T no cumple con lo estipulado en el artículo 3-1 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución.

5.2. Análisis de las corrientes

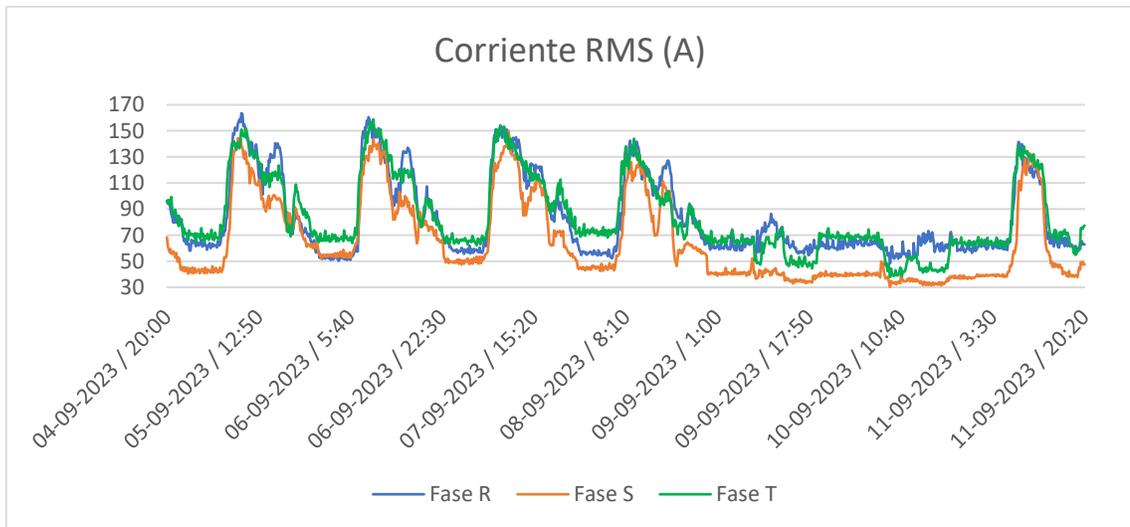
Para conocer si existe un posible desbalance de cargas del transformador, se tienen los valores de corrientes nominales y a plena carga del sistema para cada fase como se observa en la tabla 5.3. estos valores se obtuvieron a través del registro de medición.

Tabla 5.3. Corrientes del sistema.

Valores de corriente (A)			
Condición	R	S	T
Mínimo	48,48	30,23	37,84
Promedio	82,831	64,645	84,43
Máximo	163,56	149,99	158,91

En la tabla 5.3. se aprecia que los valores nominales promedio de las corrientes del sistema tuvieron una variación cuando el sistema se encontró en plena carga, esta variación en porcentaje para la línea R fue de 50,64 %, línea S de 43,1% y línea T 53,13%. Por lo tanto, las variaciones de corrientes cuando el sistema se encontró a plena carga fue la mitad más de valor nominal promedio para cada una de las fases, este comportamiento se observa en la figura 5.2.

Figura 5.2. Gráfico de las corrientes.



En la figura 5.2. se aprecia un leve desbalance de cargas, el cual se analiza cuando el sistema se encontró a plena carga. Este desbalance es indicando en porcentaje cuyos valores son:

- Entre línea R y S = 8,3%
- Entre línea R y T = 2,84%
- Entre línea S y T = 5,61 %

5.2.1. Resultados del análisis de las corrientes

Según los valores indicados anteriormente la fase S se encontró un desbalance de carga mayor a las demás fases, sin embargo, estos valores son bastante bajos, lo que nos indica que las cargas del sistema eléctrico se encuentran correctamente distribuidas.

5.2. Análisis del factor de potencia promedio

En el artículo 5-18 de la normativa Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio establece límites respecto al factor de potencia, los cuales son 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo para usuarios regulados con un nivel de tensión inferior a 30kV. Estos límites deberán respetarse el 98% del tiempo.

El Diario Oficial con fecha 27 de julio de 2012 indica los precios de nudo para suministro de electricidad, el cual establece que la facturación por consumos efectuados en instalaciones, cuyo factor de potencia medio mensual sea inferior a 0,93, se cargará en un 1% por cada 0,01 en que dicho factor baje de 0,93.

Los valores para cada fase y el promedio para el factor de potencia en el sistema eléctrico que se obtuvieron mediante la medición en el punto común de conexión son:

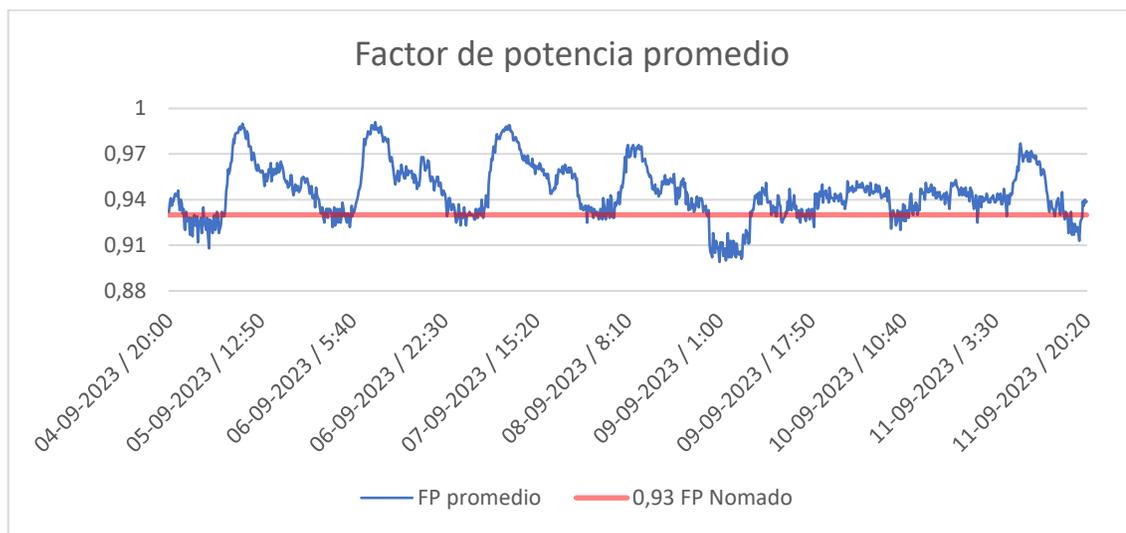
Tabla 5.4. Valores factor de potencia.

Factor de potencia				
Condición	R	S	T	FP total
Mínimo	0,942	0,716	0,902	0,899
Promedio	0,978	0,892	0,947	0,945
Máximo	0,996	0,993	0,994	0,991

En la tabla 5.4. se aprecia que el factor de potencia promedio total para las fases es superior a los 0,93 establecidos por la normativa, como también las líneas R y T, sin embargo, la línea S el valor promedio de factor de potencia se encontró por debajo de los 0,93. Estos valores descritos anteriormente deben respetarse el 98% del tiempo de la medición por lo cual se analizó el comportamiento de este indicador.

El comportamiento promedio para el factor de potencia del sistema eléctrico se ve reflejado en la figura 5.3. en la cual se detallan las variaciones durante el periodo de medición.

Figura 5.3. Gráfico del Factor de potencia promedio.



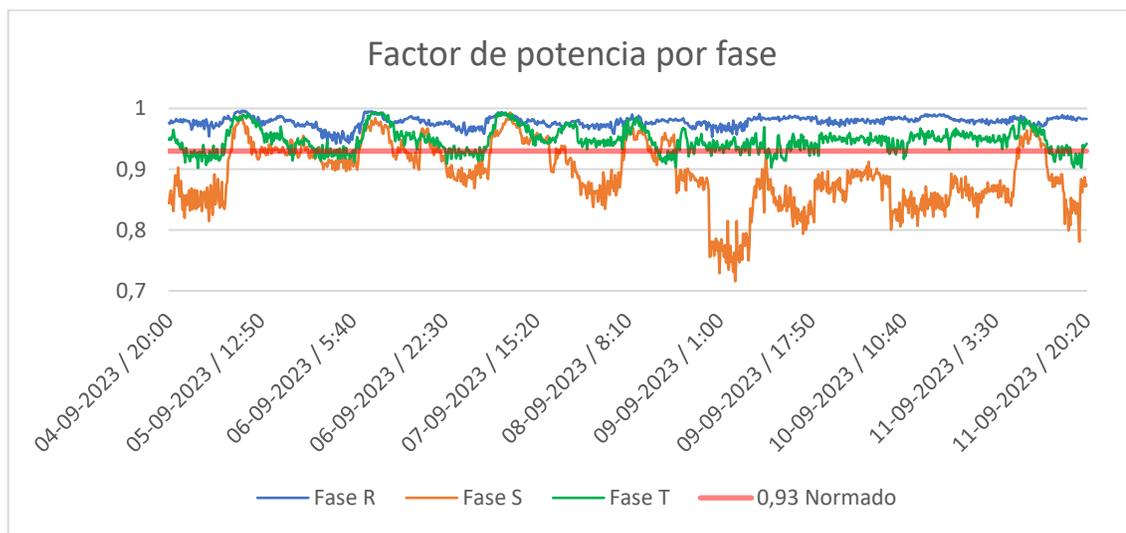
En la figura 5.3. se aprecia a simple vista que el comportamiento promedio para el factor de potencia en el sistema eléctrico se encontró la mayoría del tiempo por encima de los 0,93. Sin embargo, se debe saber si el porcentaje de tiempo es superior a los 98% del tiempo de la medición.

Mediante la medición se encontraron 171 datos por debajo de los 0,93 lo cual significa que 840 datos están por encima, lo que representa un porcentaje del tiempo de 83,09%. Este porcentaje de tiempo de la medición en el que se encuentran los valores por encima de los 0,93, para el promedio del factor de potencia es inferior a los 98% descritos anteriormente, debido a esto se realizó un análisis para cada una de las fases para saber cuál de estas es la más afectada.

5.2.1. Factor de potencia por fase

El comportamiento del factor de potencia para cada una de las fases del sistema eléctrico se ve reflejado en la figura 5.4. en la que se aprecian distintos casos para cada una de las líneas.

Figura 5.4. Gráfico del Factor de potencia por fase.



En la figura 5.4. se aprecia que el comportamiento del factor de potencia para la línea S se encontró la mayoría del tiempo por debajo del mínimo establecido que es 0,93. La línea T tuvo un comportamiento diferente en la que se sostuvo casi todo el periodo de la medición por encima del mínimo permitido y con respecto a la línea R fue la única que se encontró todo el tiempo por encima de los 0,93.

Los porcentajes del tiempo en el que el factor de potencia para cada línea se mantuvo por encima del mínimo establecido para un sistema inductivo son:

- En la fase R se tienen 0 datos por debajo del mínimo establecido, por lo que se tienen 1011 datos por encima de los 0,93, lo que representa un porcentaje del tiempo de 100%.
- En la fase S se tienen 735 datos por debajo del mínimo establecido, por lo que se tienen 276 datos por encima de los 0,93, lo que representa un porcentaje del tiempo de 27,3%.
- En la fase T se tienen 181 datos por debajo del mínimo establecido, por lo que se tienen 830 datos por encima de los 0,93, lo que representa un porcentaje del tiempo de 82,1%.

5.2.2. Resultados del factor de potencia

Según lo estipulado en el artículo 5-18 de la normativa Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, el factor de potencia promedio se encontró por debajo de los 98% del tiempo de medición para el valor exigido, lo cual se observa en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Resultado del factor de potencia.

Factor de potencia				
Condiciones	FP			
	Fase			Prom. total
	R	S	T	
Rango permitido	0,93			
Datos fuera de rango	0	735	181	171
Datos dentro del rango	1011	276	830	840
% de tiempo de datos dentro del rango	100%	27,3%	82,1%	83,09%
Cumple con la normativa	Si	No	No	No

En la tabla 5.5. se aprecia que el factor de potencia promedio se encontró dentro de los valores exigidos durante un 83,09% del tiempo de la medición, lo cual es un porcentaje menor a los 98% del tiempo mínimo exigido, por lo que no cumple con lo estipulado en el artículo 5-18 de la normativa Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, como también de manera individual el factor de potencia de las líneas S y T que se encontraron con un porcentaje de tiempo más bajo. Sin embargo, la línea R sostuvo un porcentaje de tiempo del 100% dentro de los valores exigidos, lo que significa que el factor de potencia cumple con lo estipulado con la normativa

Según los datos observado en la tabla 5.4. el valor promedio del factor de potencia del sistema eléctrico de la subestacion estudiada es 0,945, por lo cual el establecimiento se encuentra libre de cargos monetarios adicionales por factor de potencia.

La línea más afectada con un comportamiento deficiente del factor de potencia es la fase S la cual se aprecia a simple vista en la figura 5.4. y también según la tabla 5.5. nos dice que esta línea se encontró 27,3% del tiempo de la medición dentro de los valores exigidos por la normativa.

5.3. Análisis de la frecuencia promedio

En 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 50 Hz, por lo que el artículo 3-4 de esta normativa, establece intervalos para clasificar el estado de la frecuencia.

Los valores obtenidos de la frecuencia del sistema a través de la medición en el punto común de conexión se observan en la tabla 5.6.

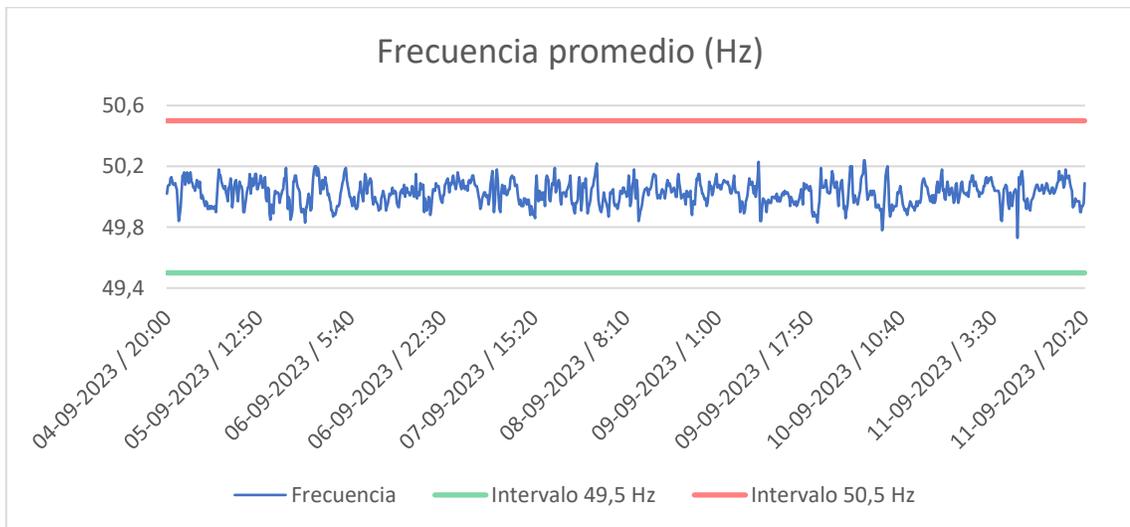
Tabla 5.6. Valores de la frecuencia.

Frecuencia (Hz)		
Mínimo	Promedio	Máximo
49,73	50,026	50,24

Los valores reflejados en la tabla 5.6. demuestra que la frecuencia tuvo un comportamiento cercano al valor nominal de 50 Hz establecido por el artículo.

El comportamiento durante el periodo de la medición de la frecuencia del sistema se ve reflejado en la siguiente figura 5.5.

Figura 5.5. Gráfico de la frecuencia promedio.



En la figura 5.5. se aprecia que durante los 7 días de medición la frecuencia del sistema se encontró dentro del intervalo $49,5 \leq f \leq 50,5$.

5.4.1. Resultados del estado de la frecuencia

Según lo estipulado en el artículo 3-4 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la frecuencia se encontró en estado normal durante el todo el periodo de la medición.

Tabla 5.7. Estado de la frecuencia.

Regulación de la frecuencia	
Condiciones	Frecuencia del sistema
Rango permitido	49,5 Hz - 50,5 Hz
Datos fuera de rango	0
Datos dentro del rango	1011
% de tiempo de datos dentro del rango	100%
Estado de la frecuencia según normativa	Normal

En la tabla 5.7. se aprecia que los 1011 datos registrados para la frecuencia del sistema se encontraron 100% del tiempo dentro del intervalo $49,5 \leq f \leq 50,5$ esto quiere que decir, que según la figura 3.2. se encontró en esta normal durante todo el tiempo de la medición según lo indicado en el artículo 3-4 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

5.5. Análisis de la distorsión armónica de voltaje

Según lo estipulado en el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la distorsión armónica de voltaje se evaluará en dos indicadores, los cuales son THD_v y D_{vj} .

Los valores de estos indicadores se obtuvieron mediante el registro de medición de 7 días corridos en el punto común de conexión (PCC).

5.5.1. Distorsión armónica total de voltaje

En el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución nos establece un límite máximo de un 8% para la distorsión armónica total de voltaje (THD_v), este deberá respetarse el 95% del tiempo total del registro.

Los valores promedios de este indicador registrados en la medición para cada fase son:

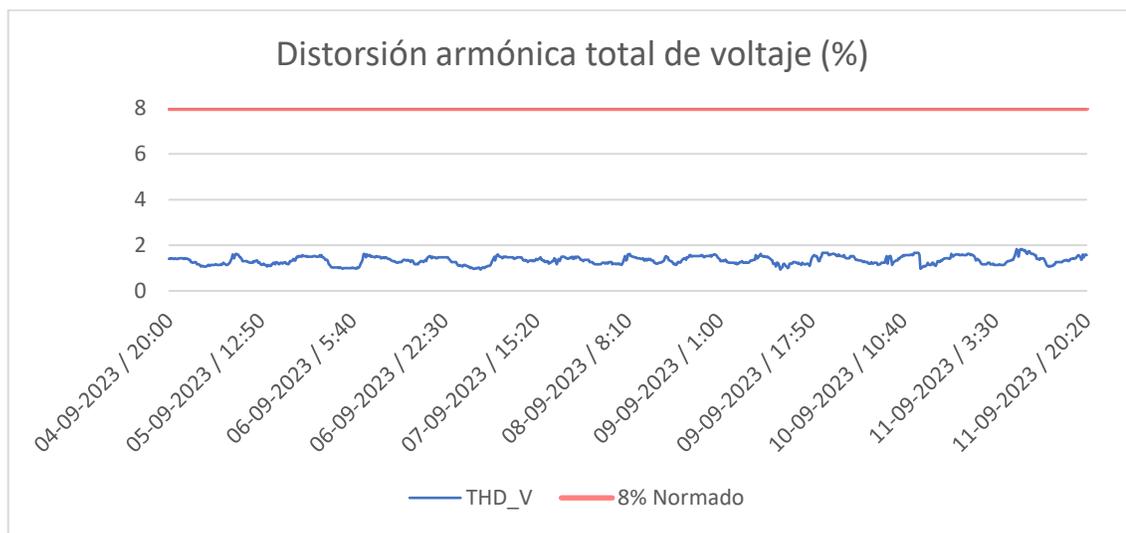
Tabla 5.8. THD_v .

Distorsión armónica total de voltaje				
Condición	R	S	T	THD_v Total
Mínimo	0,9%	0,9%	0,9%	0,933%
Promedio	1,338%	1,329%	1,35%	1,339%
Máximo	1,8%	1,8%	2,1%	1,833%

En la tabla 5.8. se aprecia que el total promedio de la distorsión armónica total de voltaje del sistema está por debajo de los 8% normados, sin embargo, se debe saber si estos valores se mantuvieron dentro del rango durante el 95% del tiempo de la medición.

El comportamiento promedio de las 3 fases durante el periodo de medición para este indicador se ve reflejado en la figura 5.6.

Figura 5.6. Gráfico THD_v promedio.



En la figura 5.6. se observa que durante todo el periodo de la medición el promedio de la distorsión armónica total de voltaje en el sistema se encontró por debajo de los 8%.

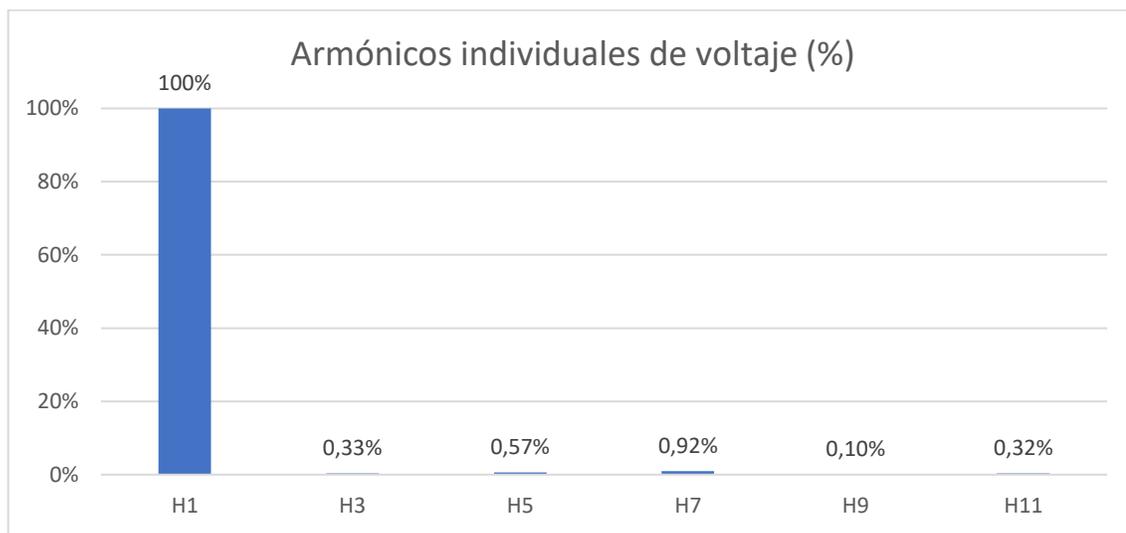
5.5.2. Distorsión armónica individual de voltaje

El artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución también establece límites, pero en este caso para cada tensión armónica individual (D_{Vj}). Estos límites expresados en porcentaje se observan en la figura 3.3. los cuales deberán respetarse el 95% del tiempo total del registro.

Los armónicos individuales de voltaje estudiados serán los impares y se tendrán en consideración hasta el armónico de orden 11.

Los valores promedios de las 3 fases para cada armónico individual de voltaje registrados durante la medición se observan en la figura 5.7.

Figura 5.7. Gráfico de Armónicos individuales de voltaje.



En la figura 5.7. se observa que los valores promedios para los armónicos individuales de voltaje se encontraron por debajo de los valores normados establecidos en la figura 3.3.

5.5.3. Resultados de la distorsión armónica del voltaje

Según lo estipulado en el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la distorsión armónica de voltaje se encuentra dentro de los valores establecidos.

5.5.3.1. Resultados THD_v

Los resultados de la distorsión armónica total de voltaje se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Resultados THD_v promedio.

Distorsión armónica total de voltaje	
Condiciones	THD_v
Rango permitido	8%
Datos fuera de rango	0
Datos dentro del rango	1011
% de tiempo de datos dentro del rango	100%
Cumple con la normativa	Si cumple

En la tabla 5.9. se aprecia que los 1011 datos dentro de rango representan el 100% del tiempo de la medición, por lo que la distorsión armónica total de voltaje del sistema eléctrico cumple con lo estipulado en el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución.

5.5.3.2. Resultados D_{vj}

Los resultados de los armónicos individuales de voltaje se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10. Resultados D_{vj} promedio.

Armónicos individuales de voltaje					
Condiciones	Orden de armónicos				
	H3	H5	H7	H9	H11
Rango permitido	5%	6%	5%	1,5%	3,5%
Datos fuera de rango	0	0	0	0	0
Datos dentro del rango	1011	1011	1011	1011	1011
% de tiempo de datos dentro del rango	100%	100%	100%	100%	100%
Cumple con la normativa	Si	Si	Si	Si	Si

En la tabla 5.10. se aprecia que los armónicos individuales de voltaje se encontraron el 100% del tiempo de la medición dentro de los rangos permitidos para cada uno, lo que según el artículo 3-5 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución los armónicos individuales de voltaje del sistema eléctrico cumplen con esta normativa.

5.6. Análisis de la distorsión armónica de la corriente

En el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución nos indica dos indicadores para usuarios de baja tensión que nos permitirá evaluar la distorsión armónica de corriente en el sistema eléctrico, los cuales son THD_I y D_{Ij} .

Los valores de estos indicadores se obtuvieron mediante el registro de medición de 7 días corridos en el punto común de conexión (PCC).

5.6.1. Distorsión armónica total de corriente

En el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución nos indica un límite máximo de un 20% con respecto a la distorsión armónica total de corriente (THD_I), el cual deberá respetarse el 95% del tiempo total del registro. Este límite se muestra en la figura 3.4.

Algunos de los valores obtenidos mediante la medición para este indicador son:

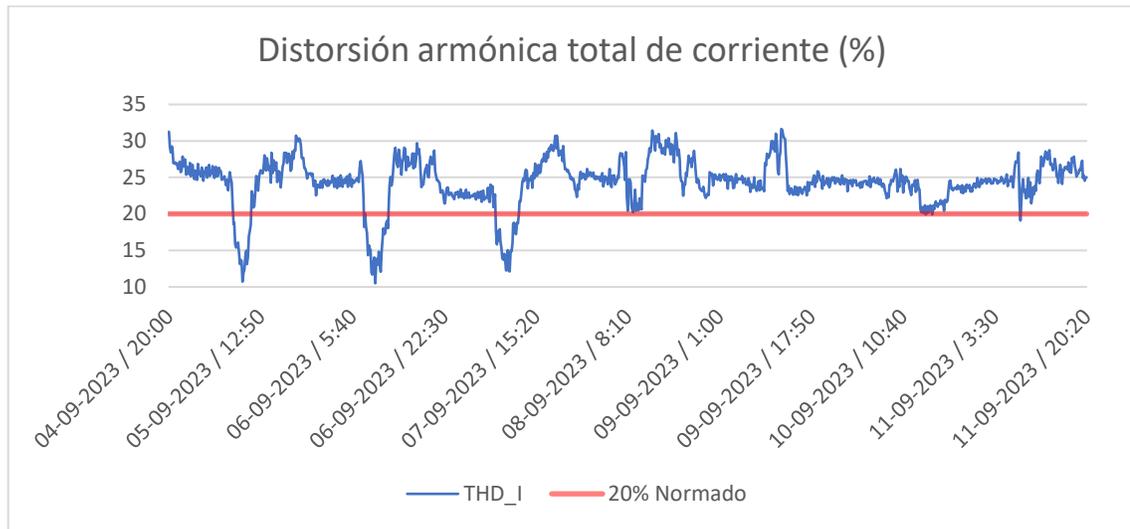
Tabla 5.11. THD_I .

Distorsión armónica total de corriente				
Condición	R	S	T	THD_I Total
Mínimo	6,5%	10,5%	8,6%	10,5%
Promedio	18,455%	31,475%	23,167%	24,365%
Máximo	25,9%	43,6%	42,8%	31,633%

En la tabla 5.11. se observa que los valores obtenidos para la distorsión armónica total de corriente tanto como para las fases S y T se encuentra por encima de los 20% normados, al igual que el total promedio para las 3 fases.

El comportamiento promedio para las 3 fases que se registró en la medición para este indicador se ve reflejado en la figura 5.8.

Figura 5.8. Gráfico THD_I promedio.



En la figura 5.8. se aprecia que el comportamiento promedio de la distorsión armónica total de corriente en el sistema eléctrico se encontró la mayoría del tiempo por encima del rango de 20%.

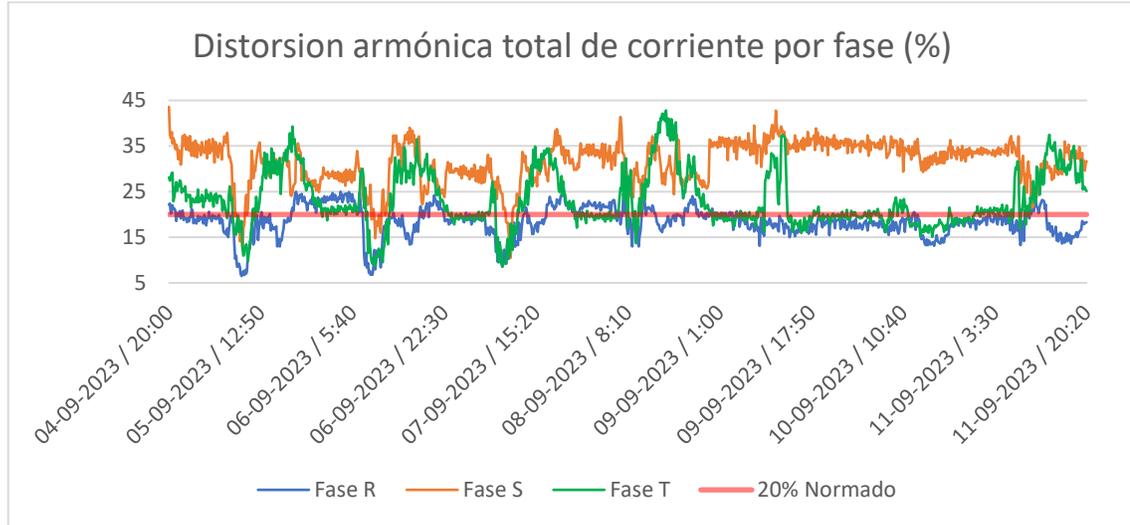
Mediante la medición se encontraron 936 datos por encima del rango normado del total de 1011, teniendo 75 datos dentro del rango lo que representa un porcentaje del tiempo de 7,42%. Este porcentaje de tiempo de la medición en el que se encuentran los valores dentro del rango normado para el promedio de la distorsión armónica total de corriente es bastante inferior a los 95% descritos anteriormente.

Debido a que el comportamiento promedio de este indicador se encontró por debajo de lo establecido, se realizó el análisis para cada una de las fases a lo que se refiere con la distorsión armónica total de corriente, con esto buscando cual es la más afectada por este problema.

5.6.1.1. Distorsión armónica total de corriente por fase

El comportamiento de la distorsión armónica total de corriente para cada una de las fases se ve reflejado en la figura 5.9.

Figura 5.9. Gráfico THD_I por fase.



En la figura 5.9. se aprecia que para este indicador las líneas S y T se encontraron la mayoría del tiempo por encima del límite de 20%, sin embargo, la línea R tuvo un comportamiento más cercano al valor establecido por la normativa.

Los porcentajes del tiempo en los cuales se mantuvieron dentro del límite de 20% para la distorsión armónica total de corriente para cada línea son:

- En la fase R se tienen 283 datos por encima del límite normado por lo que se tienen 728 datos dentro de este, lo que representa un porcentaje del tiempo de 72,01%.
- En la fase S se tienen 982 datos por encima del límite normado por lo que se tienen 29 datos dentro de este, lo que representa un porcentaje del tiempo de 2,87%.
- En la fase T se tienen 639 datos por encima del límite normado por lo que se tienen 372 datos dentro de este, lo que representa un porcentaje del tiempo de 36,8%.

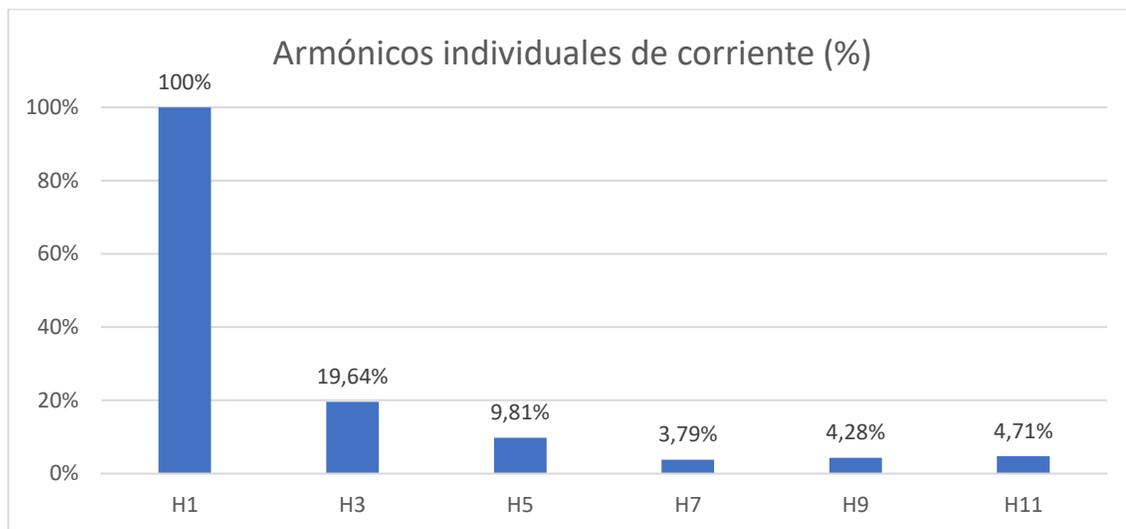
5.6.2. Distorsión armónica individual de corriente

En el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución nos indica límites para cada armónico individual de corriente (D_{Ij}) como se aprecia en la figura 3.4. el cual deberá respetarse el 95% del tiempo total del registro.

Los armónicos individuales de corriente estudiados serán los impares y se tendrán en consideración hasta el armónico de orden 11.

Los valores promedios de las 3 fases para los armónicos individuales de corriente registrados durante la medición se observan en la figura 5.10.

Figura 5.10. Gráfico de Armónicos individuales de corriente.



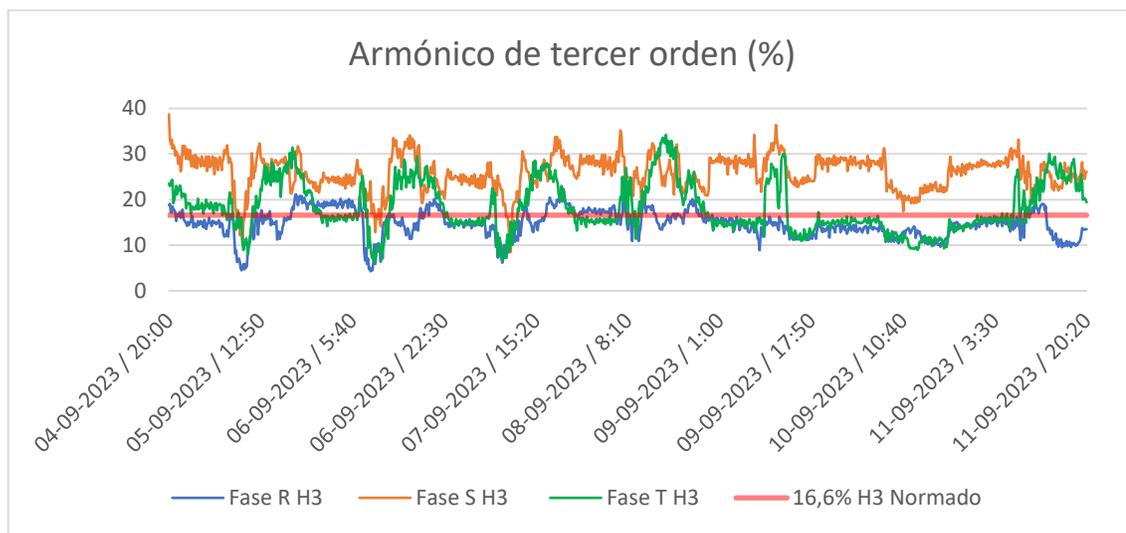
En cuanto a lo expuesto en la figura 5.10. los valores promedios de los armónicos individuales de corriente, específicamente el de tercer, noveno y onceavo orden, se encuentran por encima de los valores normados establecidos en la figura 3.4. Los demás armónicos es decir el quinto y séptimo orden se encuentran dentro de los valores establecidos. Sin embargo, los armónicos anteriormente mencionados deben cumplir un 95% del tiempo de la medición dentro de los valores normados, por lo que se estudiaran de manera individual por fase para saber cuánto tiempo están fuera del rango normado.

5.6.2.1. Armónico de tercer orden

En la figura 5.10. se ve reflejado el promedio del tercer armónico de corriente del sistema, este representa un porcentaje mayor a los demás armónicos, esto quiere decir que este es el que mayormente predomina en el sistema.

El comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición de este armónico se ve reflejado en la figura 5.11.

Figura 5.11. Gráfico Armónico de corriente H3.



En la figura 5.11. se aprecia a simple vista que el comportamiento de este armónico durante el periodo de la medición para las fases S y T se mantuvo sobre los 16,6% normados la mayoría del tiempo, sin embargo, la fase R tuvo un comportamiento más cercano a lo establecido por la norma.

El porcentaje de tiempo del registro de medición en el cual se cumple el límite de 16,6% para cada línea es:

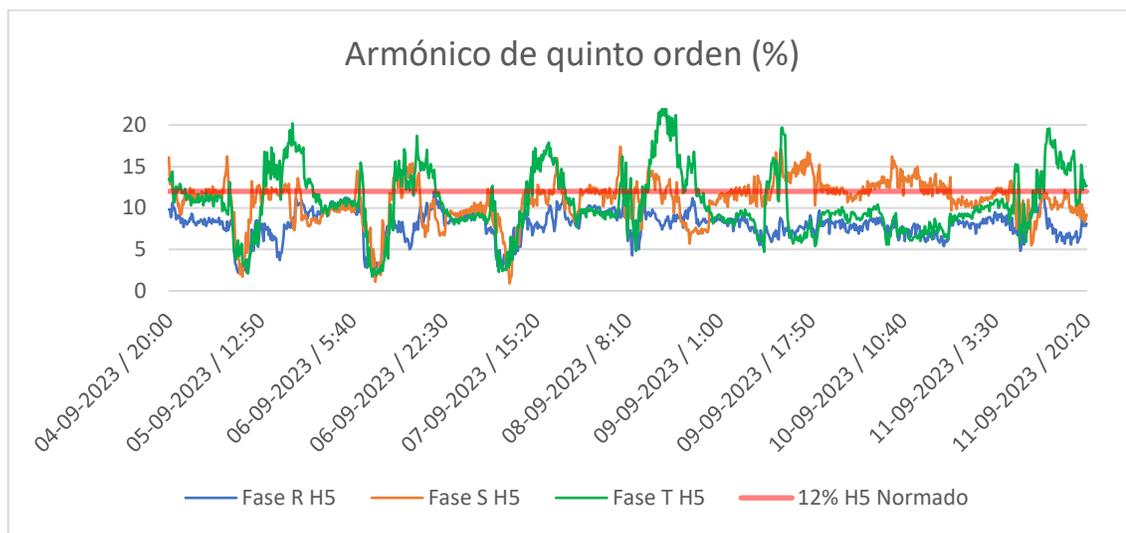
- Fase R con un total de 744 datos dentro del límite lo que representa un 73,59%
- Fase S con un total de 19 datos dentro del límite lo que representa un 1,88%
- Fase T con un total de 522 datos dentro del límite lo que representa un 51,63%

5.6.2.2. Armónico de quinto orden

En la figura 5.10. se observa que el promedio del armónico de quinto orden se encontró dentro del valor normado el cual es de un 12%, sin embargo, este rango debe respetarse durante el 95% de tiempo de la medición.

El comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición de este armónico se ve reflejado en la figura 5.12.

Figura 5.12. Gráfico Armónico de corriente H5.



En la figura 5.12. se observa que la fase R se encontró por debajo del límite de 12% durante todo el periodo de medición, sin embargo, las fases S y T en ciertos periodos del día sobrepasó el valor normado para este armónico.

El porcentaje de tiempo del registro de medición en el cual se cumple el límite de 12% para cada línea es:

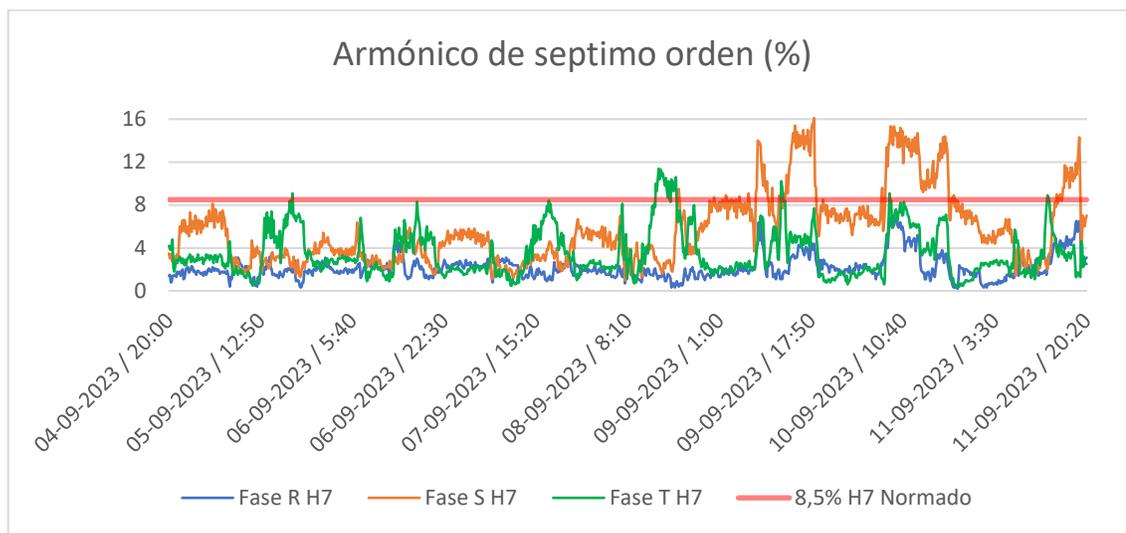
- Fase R con un total de 1011 datos dentro del límite lo que representa un 100%
- Fase S con un total de 704 datos dentro del límite lo que representa un 69,63%
- Fase T con un total de 717 datos dentro del límite lo que representa un 70,92%

5.6.2.3. Armónico de séptimo orden

En la figura 5.10. se observa que el promedio del armónico de séptimo orden se encontró dentro del valor normado el cual es de un 8,5%, sin embargo, este rango debe respetarse durante el 95% de tiempo de la medición.

El comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición de este armónico se ve reflejado en la figura 5.13.

Figura 5.13. Gráfico Armónico de corriente H7.



En la figura 5.13. se aprecia que la fase R durante todo el tiempo de la medición se encontró por debajo de los 8,5%, como casi también las fases S y T que pocas veces sobrepasaron el límite normado.

El porcentaje de tiempo del registro de medición en el cual se cumple el límite de 8,5% para cada línea es:

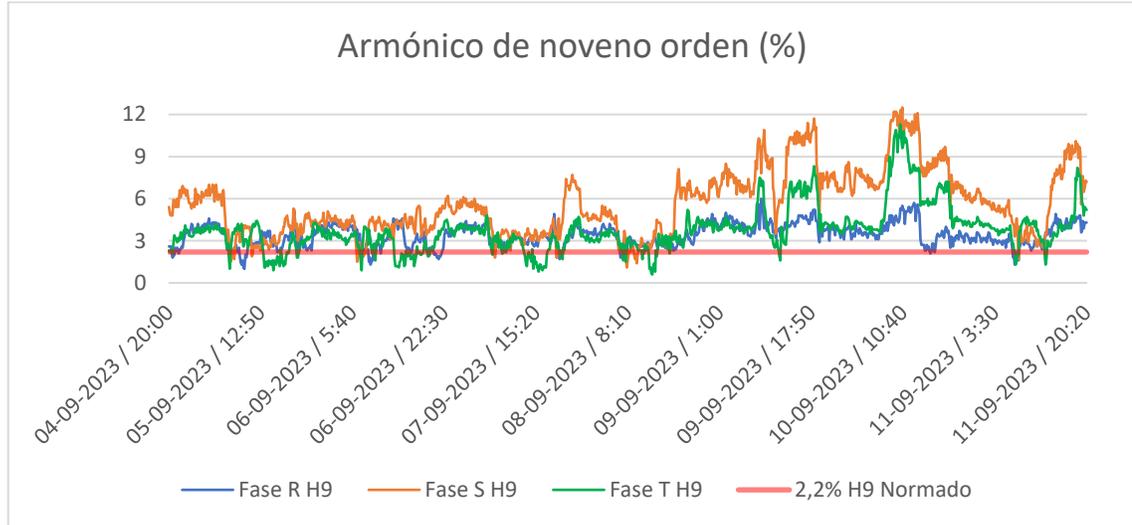
- Fase R con un total de 1011 datos dentro del límite lo que representa un 100%
- Fase S con un total de 856 datos dentro del límite lo que representa un 84,67%
- Fase T con un total de 983 datos dentro del límite lo que representa un 97,23%

5.6.2.4. Armónico de noveno orden

En la figura 5.10. se observa que el promedio del armónico de noveno orden se encontró por encima del valor normado el cual es de un 2,2%.

El comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición de este armónico se ve reflejado en la figura 5.14.

Figura 5.14. Gráfico Armónico de corriente H9.



En la figura 5.14. se comprobó que el comportamiento de este armónico para las 3 fases fue superior al límite establecido por la normativa durante todo el periodo de la medición.

El porcentaje de tiempo del registro de medición en el cual se cumple el límite de 2,2% para cada línea es:

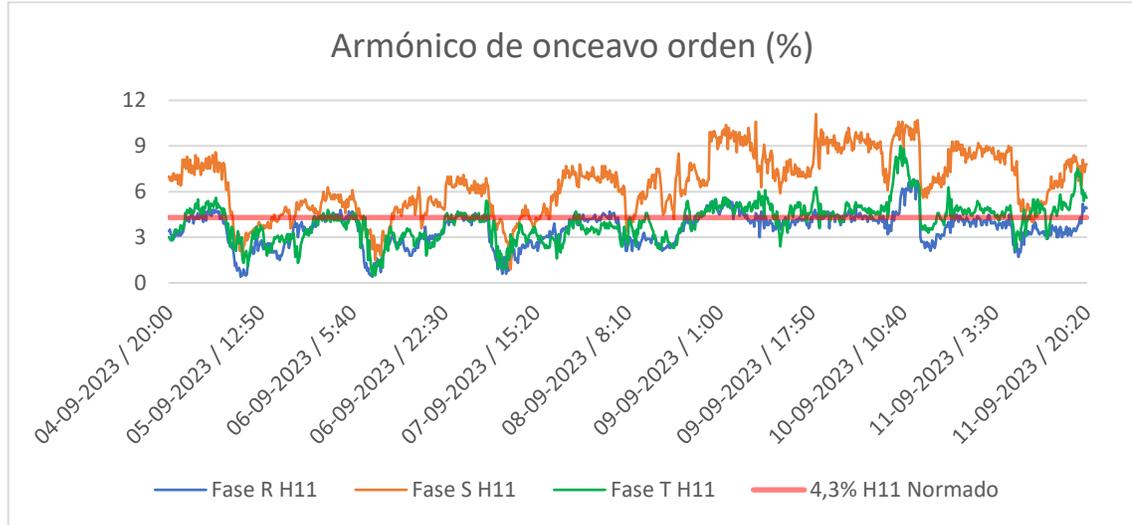
- Fase R con un total de 71 datos dentro del límite lo que representa un 7,02%
- Fase S con un total de 26 datos dentro del límite lo que representa un 2,57%
- Fase T con un total de 129 datos dentro del límite lo que representa un 12,76%

5.6.2.5. Armónico de onceavo orden

En la figura 5.10. se observa que el promedio del armónico de onceavo orden se encontró levemente por encima del valor normado el cual es de un 4,3%.

El comportamiento individual para cada fase durante el periodo de medición de este armónico se ve reflejado en la figura 5.15.

Figura 5.15. Gráfico Armónico de corriente H11.



En la figura 5.15. se aprecia que las fases R y T estuvieron más cerca del valor normado, sin embargo, la fase S la mayoría del tiempo sobrepaso el valor establecido por la normativa.

El porcentaje de tiempo del registro de medición en el cual se cumple el límite de 4,3% para cada línea es:

- Fase R con un total de 793 datos dentro del límite lo que representa un 78,44%
- Fase S con un total de 155 datos dentro del límite lo que representa un 15,33%
- Fase T con un total de 563 datos dentro del límite lo que representa un 55,69%

5.6.3. Resultados de la distorsión armónica de corriente

Según lo estipulado en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, la distorsión armónica de corriente se encuentra fuera de los valores establecidos.

5.6.3.1. Resultados de la distorsión armónica total de corriente

Los resultados de la distorsión armónica total de corriente se muestran en la tabla 5.12. y en esta se aprecia que los valores de la distorsión armónica total de corriente se encontraron fuera de rango durante un periodo mayor al permitido por la normativa, esto quiere decir que tanto como las 3 fases y el promedio total de estas no cumplen con los valores dentro de rango para este indicador durante el 95% del tiempo de la medición el cual se encuentra estipulado en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución.

Tabla 5.12. Resultados THD_I promedio.

Distorsión armónica total de corriente				
Condiciones	THD_I			
	Fase			Prom. total
	R	S	T	
Rango permitido	20%			
Datos fuera de rango	283	982	639	936
Datos dentro del rango	728	29	372	75
% de tiempo de datos dentro del rango	72,01%	2,87%	36,80%	7,42%
Cumple con la normativa	No	No	No	No

En la tabla 5.12. también se observa que la fase S fue la que se encontró con el porcentaje más bajo respecto al tiempo para los datos dentro de rango, lo cual nos señala que esta línea es la más afectada por la distorsión armónica dándonos a conocer que posiblemente esta contenga más cargas de tipo no lineal.

5.6.3.2. Resultados de los armónicos individuales de corriente

Los resultados de los armónicos individuales de corriente se muestran en la tabla 5.13. y en esta se aprecia que la mayoría de los armónicos individuales tanto como para cada fase y el promedio de estos no cumplen con lo estipulado en el artículo 3-8 de la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución. Esto debido a que los armónicos no se encontraron dentro de los límites establecidos para cada uno durante el 95% del tiempo de la medición.

Tabla 5.13. Resultados D_{ij}.

Armónicos individuales de corriente					
Condiciones	Orden armónico				
	H3	H5	H7	H9	H11
Rango permitido	16,6%	12%	8,5%	2,2%	4,3%
Fase R					
% de tiempo de datos dentro del rango	73,59%	100%	100%	7,02%	78,44%
Cumple con la normativa	No	Si	Si	No	No
Fase S					
% de tiempo de datos dentro del rango	1,88%	69,63%	84,67%	2,57%	15,33%
Cumple con la normativa	No	No	No	No	No
Fase T					
% de tiempo de datos dentro del rango	51,63%	70,92%	97,23%	12,76%	55,69%
Cumple con la normativa	No	No	Si	No	No
Promedio					
% de tiempo de datos dentro del rango	42,37%	80,18%	93,97%	7,45%	49,82%
Cumple con la normativa	No	No	No	No	No

En la tabla 5.13. se aprecia que los armónicos de quinto y séptimo orden de la fase R cumplen con el 95% de tiempo dentro de los límites establecidos, como también el armónico séptimo de la fase T, sin embargo, el promedio de las fases para los armónicos individuales ninguno cumple con la normativa.

Los armónicos de corriente precisamente el de tercer, noveno y onceavo orden son los que mayor se encontraron fuera de los límites establecidos por la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistema de Distribución según su artículo 3-8.

CAPÍTULO VI

PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

A través de los resultados que se obtuvieron gracias al análisis de las distintas variables eléctricas del sistema, se buscara plantear en este capítulo diferentes propuestas y recomendaciones que permitan optimizar el estado de la calidad de la energía eléctrica.

6.1. Diseño de filtro pasivo sintonizado serie RLC

Se encontró que unos de los problemas que más afecta a la calidad de la energía eléctrica en el establecimiento fue la distorsión armónica de la corriente, que, según los índices para medir este efecto no deseado, está por encima de los rangos normados.

Con el fin de mitigar los efectos de la distorsión armónica de la corriente, se propone el diseño de dos filtros de tipo pasivo sintonizado en serie RLC, los cuales serán diseñados para eliminar los armónicos individuales de tercer y quinto orden que son los que mayormente predominan en el sistema eléctrico.

Unas de las ventajas que tiene diseño es que es de bajo costo con respecto a otras estrategias de compensación, ya que no solo transporta las corrientes para las cuales fue sintonizado, sino también proporciona una compensación de potencia reactiva en el sistema, lo que se traduce en el mejoramiento para el factor de potencia.

Para el diseño de los parámetros de estos dos filtros se hace referencia a la Guía para Aplicaciones y Especificaciones de Filtros Armónicos, IEEE Std 1531™ - 2003, que, en completo con los datos obtenidos a través de la medición, se calcularán los parámetros necesarios que componen la impedancia para cada uno de los filtros.

La impedancia de los filtros a diseñar es:

$$Z = R_F + j \left(\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right)$$

Los cálculos de los parámetros de los filtros serán calculados con una sintonización a un 6% menos de la frecuencia armónica, de acuerdo a la norma IEEE-1531-2003.

Para el cálculo de los parámetros de los dos filtros se tienen:

- Voltaje de línea = 380 V
- Potencia activa promedio = 51252,787 W
- Frecuencia del sistema = 50 Hz
- Factor de potencia promedio = 0,945

Para el diseño se plantea un factor de potencia final de 0,98, por lo que la potencia reactiva de los capacitores debe ser de:

$$\theta_1 = \cos^{-1}(FP1) = \cos^{-1} 0,945 = 19,091^\circ$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(FP2) = \cos^{-1} 0,98 = 11,478^\circ$$

$$\begin{aligned} Q_{eff} &= P_{media} \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) = 51.252,787 \text{ W} \times (\tan 19,091^\circ - \tan 11,478^\circ) \\ &= 7.331,583 \text{ VAr} \end{aligned}$$

Cada filtro compensará con potencia reactiva gracias a sus condensadores por lo que la distribución de potencia reactiva para cada uno será de:

$$\text{Filtro 1} = 7.331,583 \times 55\% = 4.032,371 \text{ VAr}$$

$$\text{Filtro 2} = 7.331,583 \times 45\% = 3.299,212 \text{ VAr}$$

6.1.1. Parámetros del filtro para eliminar la tercera armónica

La reactancia efectiva del filtro está dada por:

$$X_{eff} = \frac{V_{ll}^2(kV)}{Q_{eff}(MVar)} = \frac{0,38^2 \text{ kV}}{0,004032371 \text{ MVar}} = 35,81\Omega$$

La reactancia capacitiva para el filtro sintonizado a la armónica h está dada por:

$$h_{6\%} = 3 - 6\% = 2,82$$

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \times X_{eff} = \left(\frac{2,82^2}{2,82^2 - 1} \right) \times 35,81 \Omega = 40,961 \Omega$$

La capacitancia del filtro está dada por:

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \text{ Hz} \times 40,961 \Omega} = 77,71 \times 10^{-6} \text{ F}$$

La reactancia inductiva para el filtro está dada por:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{40,961 \Omega}{2,82^2} = 5,151 \Omega$$

La inductancia del filtro está dada por:

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} = \frac{5,151 \Omega}{2 \times \pi \times 50} = 16,395 \times 10^{-3} \text{ H}$$

La resistencia del filtro está dada por:

$$R = \frac{X_L \times (f_{reson})}{Q_f} = \frac{5,151 \Omega \times (2,82)}{20} = 0,726 \Omega$$

Para que el filtro pasivo serie RLC se sintonice a la frecuencia requerida, se debe cumplir la siguiente condición:

$$X_C = X_L$$

$$X_C(h = 2,82) = \frac{X_C}{h} = \frac{40,961 \Omega}{2,82} = 14,525 \Omega$$

$$X_L(h = 2,82) = X_L \times h = 5,151 \times 2,82 = 14,525 \Omega$$

6.1.2. Parámetros del filtro para eliminar la quinta armónica

La reactancia efectiva del filtro está dada por:

$$X_{eff} = \frac{V_{ll}^2 (kV)}{Q_{eff} (MVA_r)} = \frac{0,38^2 \text{ kV}}{0,003299212 \text{ MVA}_r} = 43,768 \Omega$$

La reactancia capacitiva para el filtro sintonizado a la armónica h está dada por:

$$h_{6\%} = 5 - 6\% = 4,7$$

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \times X_{eff} = \left(\frac{4,7^2}{4,7^2 - 1} \right) \times 43,768 \Omega = 45,843 \Omega$$

La capacitancia del filtro esta dado por:

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \text{ Hz} \times 45,843 \Omega} = 69,434 \times 10^{-6} \text{ F}$$

La reactancia inductiva para el filtro está dada por:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{45,843 \Omega}{4,7^2} = 2,075 \Omega$$

La inductancia del filtro está dada por:

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} = \frac{2,075 \Omega}{2 \times \pi \times 50} = 6,606 \times 10^{-3} \text{ H}$$

La resistencia del filtro está dada por:

$$R = \frac{X_L \times (f_{reson})}{Q_f} = \frac{2,075 \Omega \times (4,7)}{20} = 0,488 \Omega$$

Para que el filtro pasivo serie RLC se sintonice a la frecuencia requerida, se debe cumplir la siguiente condición:

$$X_C = X_L$$

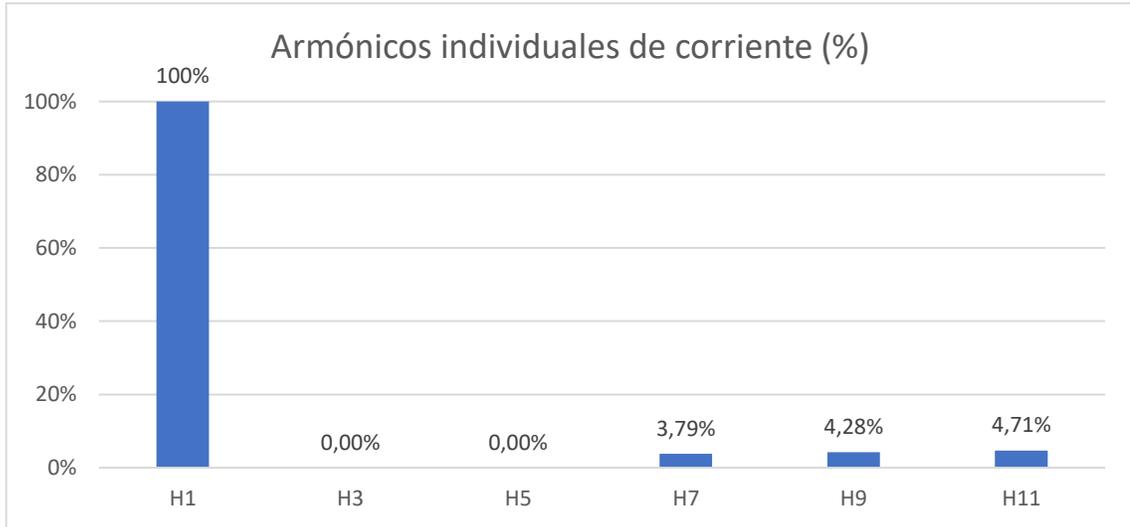
$$X_C(h = 2,82) = \frac{X_C}{h} = \frac{45,843 \Omega}{4,7} = 9,754 \Omega$$

$$X_L(h = 2,82) = X_L \times h = 2,075 \Omega \times 4,7 = 9,754 \Omega$$

6.1.3. Respuesta a la implementación de los filtros de armónicos

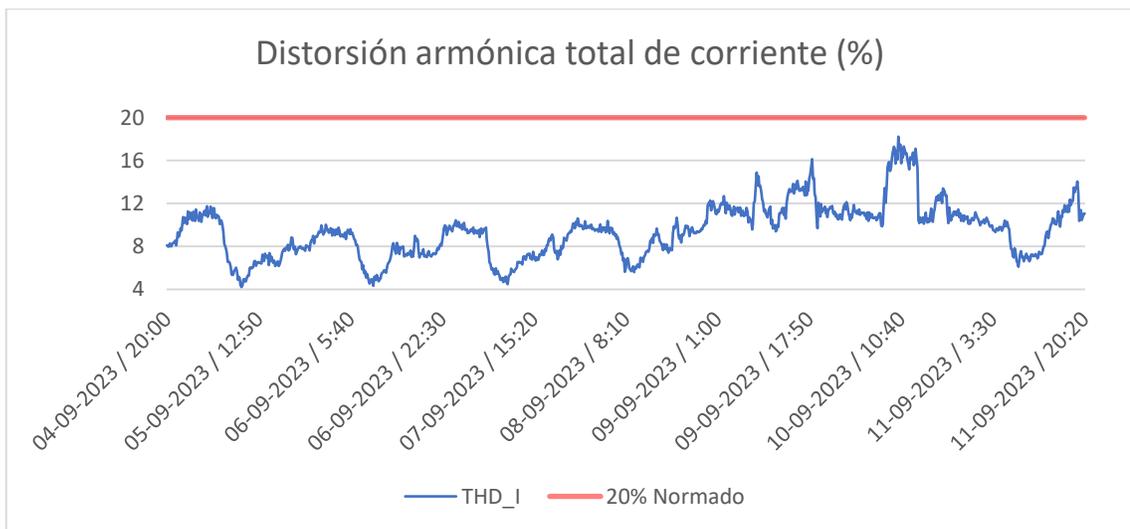
En la figura 6.1. se aprecia que, con la implementación de estos dos filtros pasivos, se pretende eliminar los armónicos individuales que mayormente predominan en el sistema.

Figura 6.1. Gráfico de armónicos individuales de corriente con filtro.



En la figura 6.2. se aprecia la proyección del comportamiento promedio de la distorsión armónica total de corriente con los filtros mitigadores de los armónicos de tercer y quinto orden.

Figura 6.2. Gráfico THD_I promedio con filtro.



En la figura 6.2. se aprecia que los filtros al eliminar los armónicos de tercer y quinto orden reducen eficazmente el índice promedio de la distorsión armónica total de la corriente, encontrándose durante todo el tiempo por debajo de los 20% normados.

La variación de porcentaje promedio corregido para este índice es:

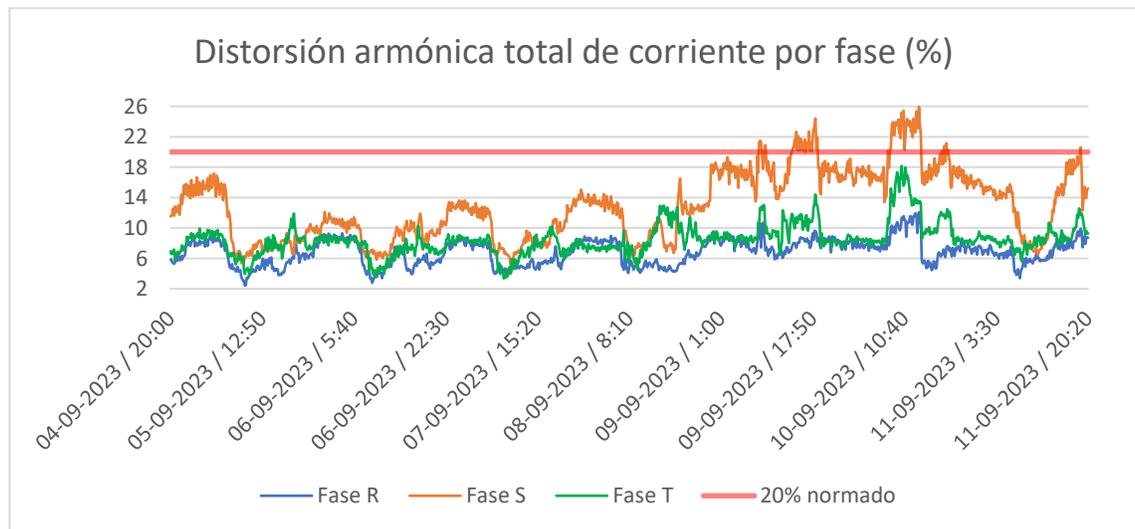
$$\Delta THD_I \% = THD_I \%_{medicion} - THD_I \%_{con\ filtro}$$

$$\Delta THD_I \% = 24,365 \% - 9,428 \% = 14,937 \%$$

Como se sabe que la implementación de este filtro es positiva para el promedio de la distorsión armónica total de corriente, se procederá a estudiar la proyección para cada una de la fase para este indicador y ver si se encuentran fuera del valor normado.

La proyección del comportamiento de la distorsión armónica total de corriente para cada una de la fase se aprecia en la figura 6.3.

Figura 6.3. Gráfico THD_I por fase con filtro.



En la figura 6.3. se aprecia que tanto como las líneas R y T se encuentran debajo del valor normado durante todo el tiempo y respecto a la fase S en ciertas ocasiones sobrepasa los 20%. Sin embargo, se encuentra un 92,28% del tiempo dentro del valor normado.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIÓN

A lo largo de este proyecto, se ha proporcionado datos, registros e información que respaldan la afirmación de que el suministro eléctrico actual en el área norte de la Universidad no cumple con varias de las exigencias establecidas en el capítulo 3 de este documento. Las normas eléctricas vigentes en Chile son claras, y más de una variable presentó valores lejanos a los óptimos, según los registros medidos por el equipo analizador de energía eléctrica.

En primera instancia, la contaminación armónica de corriente que se encontró en la red es alta, la cual presentó valores porcentuales muy elevados para la cantidad armónica individual y total. Además, los valores de porcentajes de tiempo de datos dentro del rango aceptado se encontraron lejos de los 95% establecidos, donde la fase S se encontró en un valor muy cercano a 0, por lo que se evidencia el gran problema de que en muy pocos momentos se tiene un valor aceptable, con respecto a la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

En lo que se trata de valores de armónicos de voltaje, se puede decir que los valores individuales y totales, se encontraron dentro de los valores indicados, por lo que cumple con los porcentajes de tiempos indicados con cabalidad para todas las líneas.

Los valores respecto al factor de potencia se encontraron en valores aceptables, excepto para la fase S, donde se encontró por debajo de los 0,93 establecidos. Para el requerimiento de porcentaje de tiempo, solo la fase R estuvo dentro del valor de tiempo permitido, respecto al 98% que indica la norma. Por lo tanto, solo la fase R cumple con ambos criterios. Además, para el valor promedio del factor de potencia, cumple con el 0,93 pero no con el valor del 98% del tiempo, por lo que, desde un punto de vista más amplio, no se cumple completamente con la norma, donde la fase S es la más afectada en el sistema. Aun así, como la red tiene un valor promedio de factor de potencia de un 0,945, el establecimiento se encuentra libre de multas y cargos monetarios.

Respecto a las variables proporcionadas por la empresa concesionaria, se observó que las tres líneas cumplen con la regulación de voltaje, las cuales se encontraron dentro del rango de $\pm 7,5\%$ en relación con los 220 V. No obstante, se destaca que solo la fase R cumple con el valor permitido de tiempo, representando el 95% del total de datos. En contraste, las fases S y T no estarían cumpliendo con la normativa en este aspecto. En relación al valor de la frecuencia, es importante destacar que todos los registros que se obtuvieron durante la medición, se encontraron dentro del intervalo permitido de los 50 Hz, cumpliendo así con la normativa al pie de la letra.

Finalmente, se puede concluir que el sistema en su gran mayoría, no cumple con las normas indicadas, donde los valores de distorsión armónica de corriente y factor de potencia, son dos de las variables más significativas que afectan a la red, lo que finalmente determinan que la red eléctrica de la Universidad no es de calidad. Por lo tanto, es necesario realizar una intervención al sistema a través de medios externos, por lo que se recomienda la elaboración de un filtro de armónicos pasivo que pueda instalarse en serie a las líneas del sistema, para así absorber la contaminación de los armónicos impares de orden 3 y 5, que resultan ser los más significativos y de mayor impacto al sistema.

Con la instalación de los dos filtros propuesto en el capítulo 6 de este proyecto, los valores individuales de los dos armónicos de corriente, se convierten en nulos, lo cual se reduce considerablemente los valores de THDi (Tasa de distorsión armónica de corriente). También a través de los condensadores de los filtros se compensa la potencia reactiva inductiva lo cual se ve reflejado en una mejora en el factor de potencia del sistema.

Todos estos cambios generan un impacto positivo muy significativo a la calidad de energía eléctrica al área alimentada por la subestación, ya que, con una pequeña inversión monetaria, más una correcta gestión por parte de la alta dirección y rectoría de la Universidad, se solucionarían todos los problemas descritos anteriormente, cumpliendo a la vez, con la norma eléctrica vigente, y creando un espacio más confiable y eficiente, en cuanto se refiere al suministro eléctrico.

BIBLIOGRAFÍA

- AEMC instruments. (). Manual AEMC 8336. Recuperado de <https://www.instrumart.com/assets/AEMC-8336-manual.pdf>
- Aguirre, P. (2016). Mitigación de la distorsión armónica de un SEP mediante filtros pasivos sintonizados modelado en matlab.
- Astudillo Mora, Vásquez Vega y Rojas Serrano. (2015). Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia. Instituto Politécnico Nacional Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/614/61447568001/html/#:~:text=Los%20filtros%20pasivos%20shunt%20o,barra%20o%20sistema%20de%20alimentaci%C3%B3n>
- Astudillo, Vásquez y Rojas, L, A y J. (2016). Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia.
- Boylestad, R. (2011). Introducción al análisis de circuitos. México: Pearson
- Carrera y Ordoñez, E y F. (2011). Análisis de calidad de energía en Tagsa.
- Chapman, S. (2012). Máquinas eléctricas. México: McGRAW-HILL
- Comisión Nacional de Energía. (diciembre de 2019). Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio. www.cne.cl Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/01/NTSyCS-Dic2019.pdf>
- Comisión Nacional de Energía. (diciembre de 2019). Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. www.cne.cl Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/Norma-T%C3%A9cnica-de-Calidad-de-Servicio-para-Sistemas-de-Distribuci%C3%B3n.pdf>
- Floyd, T. (2007). Principios de circuitos eléctricos. México: Pearson
- Holguin y Gomezcoello, M y D. (2010). Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana.

- IEEE. (24 noviembre 2003). Guía IEEE para aplicaciones y Especificación de filtros armónicos. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc Recuperado de <http://daltonorellana.info/wp-content/uploads/sites/493/2014/07/ieee-1531-2003.pdf>
- Jiménez y Basilio, M y G. (2010). Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos.
- Juan Camarillo Peñaranda. (24 de Julio de 2020). Corrientes armónicas: causas, consecuencias y mitigación de impactos. Dielco SAS Recuperado de <https://www.dielco.co/articulos/corrientes-armonic-as-causas-consecuencias-y-mitigacion-de-impactos#:~:text=Actualmente%20existen%20dos%20tecnolog%C3%ADas%20para,de%20potencia%20de%20la%20industria.>
- Palomino y Mendoza, W y V. (2019). Análisis de las corrientes armónicas en baja tensión y su incidencia a la calidad del producto del hospital regional del cusco -2018.
- Segovia y Cerda, J y V. (2019). Análisis de calidad de energía eléctrica de la empresa florícola agrorab cia ltda. Ubicada en el cantón pujil.
- Solís, I. (2021). Flujo de cargas en redes eléctricas de distribución con cargas no-lineales.
- Suárez, Mauro, Anaut, y Agüero, J, G, D y C. (2010). Parámetros que Afectan la Corriente de Neutro en Presencia de Armónicos. Scielo, (21), 77-89.
- SyZ Cominza. (2022). Factor de Potencia de Desplazamiento. SyZ Cominza Recuperado de <https://syzcominsa.pe/blog/factor-de-potencia-de-desplazamiento>
- Tecsa. (18 septiembre 2020). ¿Cómo afectan las fluctuaciones de tensión a las instalaciones eléctricas? Tecsaqro Recuperado de <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/fluctuaciones-de-tension/>

ANEXOS



Código QR de descarga de archivo Excel del registro de mediciones.