



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA UTILIZANDO
REGISTRADOR TRIFÁSICO EN TALLER DIVISIÓN INDUSTRIAL SATTEL
CHILE

Profesor Guía: Jonathan Ismael Agüero Ferrera

Christian Rubén Reyes Bown

Copiapó, Chile 2024



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA UTILIZANDO
REGISTRADOR TRIFÁSICO EN TALLER DIVISIÓN INDUSTRIAL SATTEL
CHILE**

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

Profesor Guía: Jonathan Ismael Agüero Ferrera

Christian Rubén Reyes Bown

Copiapó, Chile 2024

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a cada una de las personas que han estado presente en mi formación universitaria, con dedicación especial a mis padres Rubén y Sylvia que me han brindado todo su apoyo, no solo en esta etapa sino a lo largo de una vida, que con amor y esfuerzo han inculcado valores en mí, que hoy en día han sido clave para lograr mis metas.

A mi hija Dania que es mi razón principal de vivir, que me da las fuerzas para seguir y querer demostrarle que los desafíos se pueden superar, que se sienta orgullosa por los logros de su padre.

A mi pareja Jessica que me ha motivado a seguir adelante, confiando siempre en mí.

A mis hermanos Marcelo y Sebastián que siempre han estado presente, motivando y apoyando, que con su entusiasmo me incentivan a superar el desafío propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por todo lo que me ha entregado, por darme salud, amor y familia. Por estar presente en cada paso que he dado y que me han guiado por buen camino en la vida. A mi familia por estar siempre presente y su apoyo incondicional.

A mi profesor guía que con su conocimiento, paciencia y entrega ha podido iniciar, guiar y concluir este proceso, agradecer el apoyo constante durante el tiempo que ha llevado el poder lograr dar este paso tan importante.

A todos y cada uno de los profesores que han sido parte de esta etapa logrando inculcar conocimiento, valores y respeto a los estudiantes, han sido un pilar fundamental en la formación de profesionales.

Agradecer a mis compañeros de clases que al compartir tiempo de estudios nos motivamos unos a otros por sacar esta carrera adelante.

Agradecimientos a la universidad y a cada una de las personas que trabajan en esta institución ya que en el éxito de cada estudiante hay un gran grupo de personas que hacen que todo esto sea posible.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes generales.....	2
1.2. Justificación del análisis	2
1.3. Objetivo general.....	3
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Alcances y limitaciones del estudio.....	3
1.6. Resumen de capítulos	4
CAPITULO II	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Análisis de la calidad de la energía.....	7
2.2. Voltaje.....	7
2.3. Corriente eléctrica.....	10
2.4. Frecuencia	12
2.5. Factor de potencia.....	12
2.6. Triángulo de las potencias	13
2.7. Potencia de distorsión	15
2.8. Distorsión Armónica.....	16
2.9. Distorsión Armónica Total (THD)	18
2.10. Filtros armónicos: tipos y aplicaciones.....	19
2.11. Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.....	22
2.12. Niveles de frecuencia y tensión en sistemas de distribución.	23
2.13. Obligaciones de los clientes y usuarios.	23
2.14. Regulación de tensión.....	23
2.15. Regulación de frecuencia.....	24
2.16. Distorsión armónica total de tensión (THD_V).....	24
2.17. Distorsión Armónica total de Corriente (THD_I)	25
2.18. Límite del factor de potencia	27
CAPITULO III.....	28

ANTECEDENTES TÉCNICOS	28
3.1. Información y descripción de la empresa	28
3.2. Equipo registrador de calidad eléctrica.....	28
3.3. Antecedentes del lugar de medición	29
3.4. Metodología de medición	31
CAPITULO IV	32
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS REGISTRADOS	32
4.1. Análisis de niveles de voltaje	32
4.2. Análisis de niveles de corriente	37
4.3. Análisis de la frecuencia	38
4.4. Análisis De la Distorsión armónica de voltaje y corriente	40
4.5. Análisis del factor de potencia.....	44
CAPITULO V	46
PROPUESTA PLAN DE MEJORAS.....	46
5.1. Problemas de corriente por el conductor neutro.....	46
5.2. Propuesta de mejora a variables eléctricas anormales	47
CAPITULO VI.....	52
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA.....	55
ANEXOS.....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1: Caída de tensión sag.....	8
Figura N°2.2: Triángulo de las potencias.....	144
Figura N°2.3: Potencia de distorsión	155
Figura N°2.4: Forma de onda distorsionada por armónicos	177
Figura N°2.8: Límites distorsión armónica de corriente usuarios en baja tensión.....	26
Figura N°3.1: Registrador trifásico de calidad electrica.....	30
Figura N°3.2: Tablero general trifásico Sattel Chile Ltda	30
Figura N°4.1: Gráfico de número de eventos de voltaje fase R.....	33
Figura N°4.2: Gráfico de número de eventos de voltaje fase S.....	34
Figura N°4.3: Gráfico de número de eventos de voltaje fase T.....	36
Figura N°4.4: Fluctuaciones de frecuencia	399
Figura N°4.5: Fluctuaciones de distorsión armónica de voltaje	41
Figura N°4.6: Fluctuaciones distorsión armónica de corriente	43
Figura N°4.7: Variación del factor de potencia durante el tiempo en sus 3 fases.....	45
Figura N°5.1: Filtro armónico htqf-4l- 0.4/60 p, 400v, 60a, 4 hilos.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla N°2.1: Límite de la regulación de tensión.....	24
Tabla N°2.2: Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.....	24
Tabla N°4.1: Límite de valores máximos y mínimos de la línea 1	33
Tabla N°4.2: Límite de valores máximos y mínimos de la línea 2.....	35
Tabla N°4.3: Límite de valores máximos y mínimos de la línea 3.....	36
Tabla N°4.4: Valores promedios de los límites de corriente y consumo por fase.....	37
Tabla N°4.5: Valor límite y promedio de frecuencia.....	39
Tabla N°4.6: Registro de datos de frecuencia según intervalos.....	39
Tabla N°4.7: Valores promedio de THD_V.....	41
Tabla N°4.8: Valores promedio THD_I.....	42
Tabla N°4.9: Valores promedio del factor de potencia según fase.....	44
Tabla N°5.1: Valores para cálculos de ecuaciones dimensionamiento del filtro activo..	49
Tabla N°5.2: Resultados para cálculo de filtro armónico activo.....	50

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó un análisis de la calidad de la energía en la empresa Sattel Chile Ltda., con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema eléctrico mediante el estudio de variables clave como la tensión, corriente, frecuencia, factor de potencia, distorsión armónica total de voltaje (THD_V) y distorsión armónica total de corriente (THD_I). El propósito principal fue identificar posibles problemas que pudieran estar afectando el funcionamiento y la seguridad de los equipos. El análisis se llevó a cabo utilizando un registrador trifásico Fluke 1735, que midió y registró las variables durante siete días consecutivos, con intervalos de 2 minutos y 20 segundos, obteniendo un total de 4319 datos. Estos valores fueron posteriormente analizados para determinar si se ajustaban a los rangos establecidos por la normativa técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, lo que permitió identificar las anomalías presentes y proponer soluciones adecuadas. Los resultados indicaron que algunas variables eléctricas, como el voltaje, la frecuencia y la THD_V, cumplen con los estándares normativos, mientras que otras, como el THD_I, el factor de potencia y los niveles de corriente por fase, presentan valores que afectan negativamente a la instalación eléctrica. En particular, se detectó un desequilibrio de corriente que podría generar problemas operativos, un factor de potencia muy bajo, lo que implica un uso ineficiente de la energía y posibles penalizaciones económicas, y valores de THD_I superiores a los permitidos, lo que genera impactos negativos en los equipos. Además, se observó un exceso de corriente en el neutro, lo que fue atribuido a un sistema de protección de malla a tierra deficiente. Tras la identificación de estos problemas, se propuso un plan de mejoras que incluye el cálculo y dimensionamiento de un filtro armónico activo, diseñado para corregir las anomalías en el factor de potencia, la THD_I y el desequilibrio de cargas. Además, se sugiere la medición y el diseño de un sistema de protección de malla a tierra conforme a los valores normativos, con el fin de garantizar la seguridad y estabilidad del sistema.

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA – NTCSSD – DISTORSIÓN ARMÓNICA

ABSTRACT

In this project, a power quality analysis was carried out at Sattel Chile Ltda., with the objective of evaluating the performance of the electrical system by studying key variables such as voltage, current, frequency, power factor, total harmonic voltage distortion (THD_V) and total harmonic current distortion (THD_I). The main purpose was to identify possible problems that could be affecting the operation and safety of the equipment. The analysis was carried out using a Fluke 1735 three-phase recorder, which measured and recorded the variables for seven consecutive days, with intervals of 2 minutes and 20 seconds, obtaining a total of 4319 data. These values were subsequently analyzed to determine if they conformed to the ranges established by the technical standards for quality of service for distribution systems, which made it possible to identify the anomalies present and propose appropriate solutions. The results indicated that some electrical variables, such as voltage, frequency and THD_V, comply with the regulatory standards, while others, such as THD_I, power factor and current levels per phase, present values that negatively affect the electrical installation. In particular, a current unbalance was detected that could generate operational problems, a very low power factor, which implies an inefficient use of energy and possible economic penalties, and THD_I values higher than those allowed, which generates negative impacts on the equipment. In addition, excess current was observed in the neutral, which was attributed to a deficient grounding mesh protection system. Following the identification of these problems, an improvement plan was proposed that includes the calculation and sizing of an active harmonic filter, designed to correct the anomalies in power factor, THD_I and load unbalance. In addition, it is suggested the measurement and design of grounding mesh protection system according to the normative values, in order to guarantee the safety and stability of the system.

POWER QUALITY ANALYSIS - NTCSSD - HARMONIC DISTORTION

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eléctrica es una parte fundamental en el desarrollo y la operación de sistemas eléctricos en general. Por tal motivo durante su utilización es necesario garantizar una óptima operación de los equipos, ya que el suministro no solo debe ser confiable, sino que debe estar libre dentro de lo posible de perturbaciones que puedan generar fallas o bajas en el rendimiento de equipos. En las grandes industrias, donde los procesos son altamente demandados, la energía eléctrica es crucial, pero su utilización puede generar alteraciones en la calidad del suministro. A raíz de esto es que un análisis de la calidad de la energía se hace crucial para identificar los problemas, y proponer planes de mejora.

Este proyecto tiene como objetivo analizar la calidad de la energía eléctrica en la instalación del taller de la división industrial de Sattel Chile. Se ha identificado un sistema de protección de malla a tierra deficiente, lo cual, sumado al uso de equipos como soldadoras y motores de inducción, incrementa el riesgo de fallas eléctricas que podrían comprometer tanto la seguridad de las personas como el correcto funcionamiento de los equipos. Para abordar esta problemática, se llevará a cabo un análisis detallado de los parámetros eléctricos presentes en la instalación, mediante la instalación de un registrador de datos que realizará mediciones durante siete días consecutivos.

A lo largo del análisis, se abordarán conceptos teóricos esenciales sobre los parámetros eléctricos, las perturbaciones eléctricas, sus orígenes y consecuencias, así como la normativa eléctrica vigente en Chile. Esta normativa permitirá evaluar el estado actual de la instalación en relación con los límites establecidos para garantizar la calidad del servicio eléctrico. Además, se explorarán aspectos técnicos relacionados con la empresa, la descripción del taller, los equipos de medición y la metodología empleada para obtener los datos.

Una vez recopilados los datos, se procederá a un análisis detallado para determinar si los parámetros eléctricos se encuentran dentro de los límites establecidos por la

normativa, identificando posibles desviaciones o anomalías. En función de los resultados obtenidos, se presentarán medidas y planes de mejora orientados a corregir las irregularidades detectadas, con el fin de asegurar que la instalación cumpla con las normativas vigentes y optimizar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Finalmente, se presentarán las conclusiones que resumirán el impacto de las mejoras propuestas y su efectividad en la mejora de la calidad del suministro eléctrico.

1.1. Antecedentes generales

La empresa Sattel Chile, es una empresa de la región de Atacama, dedicada al diseño, desarrollo e implementación de tecnología para el sector minero, cuenta con un taller el cual se encuentra ubicado en Avenida Copayapu N°3000 y corresponde a su división industrial. Esta instalación se encuentra conectada a una red de media tensión de 13.2 kV, con un transformador trifásico cuya potencia nominal es de 15 kVA, con un voltaje primario de 13.2 [kV] y un voltaje secundario nominal de 230 [V] en cada una de sus fases.

El registro de los datos fue llevado a cabo a través de un registrador trifásico de calidad eléctrica, el que conectado al tablero general trifásico registró los parámetros eléctricos cada 2 minutos 20 segundos durante 7 días seguidos. Con los datos obtenidos se busca identificar problemas y anomalías en el suministro eléctrico.

1.2. Justificación del análisis

Hoy en día el estudio de la calidad de la energía emerge como una necesidad ya que las perturbaciones que surgen como consecuencia del uso de equipos eléctricos pueden ocasionar pérdidas o disminución en la producción o procesos de una empresa o institución, para evitar cualquier inconveniente, este análisis puede mostrar alteraciones y con esto dar una predicción del futuro funcionamiento o deterioro de los equipos.

Al observar el estado de la instalación eléctrica esta muestra negligencias en el tablero general trifásico y en las canalizaciones, se informa de un sistema de protección de malla a tierra deficiente. Debido al uso de soldadoras de alta potencia, de equipos con motores de inducción como esmeriles de diferentes tamaños, compresores, entre otros,

se hace fundamental realizar el estudio para poder entregar un diagnóstico que pueda servir para salvaguardar la seguridad de equipos y personas como también normalizar los problemas encontrados basados en la normativa eléctrica vigente.

1.3. Objetivo general

Analizar la calidad de la energía eléctrica en taller industrial Sattel Chile con el registrador Fluke 1735 para la mejora continua del sistema eléctrico general.

1.4. Objetivos específicos

- Medir los parámetros eléctricos en la instalación eléctrica utilizando un registrador trifásico Fluke 1735.
- Comparar los datos obtenidos en relación con los índices de calidad mínimos y máximos estipulados en la normativa técnica actual.
- Proponer plan de soluciones para las anomalías detectadas en el sistema eléctrico general.
- Analizar los resultados de la medición de la calidad de la energía eléctrica.

1.5. Alcances y limitaciones del análisis

El presente estudio está enfocado en el análisis de la calidad de la energía el cual mide parámetros como: variaciones de voltaje, variaciones de corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente, distorsión armónica total de voltaje y corriente.

Muestra el método y equipo utilizado en la medición como también el análisis de los datos y el programa Excel para reagrupación de datos y gráficos.

Las limitaciones del proyecto se basan en el análisis de una instalación trifásica de baja tensión.

El análisis de armónicos es con respecto a la distorsión armónica total (THD_V) y (THD_I).

1.6. Resumen de capítulos

A continuación, se presenta un resumen estructurado de los capítulos que conforman este proyecto. Cada uno de ellos aborda temas específicos relacionados con el análisis de la calidad de la energía eléctrica, desde los antecedentes y bases teóricas hasta resultados obtenidos, su interpretación y conclusiones finales.

1.6.1. Capítulo 1: introducción

En este capítulo destaca la importancia de la calidad de la energía eléctrica para el correcto funcionamiento de los equipos. Se realizó un análisis en la empresa Sattel Chile que mostró deficiencias en su sistema de protección de malla a tierra. Además, se resalta la relevancia del marco teórico ya que proporciona las bases necesarias para entender las variables eléctricas fundamentales para interpretar los resultados.

El objetivo general es analizar la calidad de la energía, mientras los objetivos específicos incluyen la medición de parámetros eléctricos, análisis de datos, propuesta de plan de mejoras y la evaluación de resultados. Además, se muestra la justificación del trabajo y se señalan los alcances y sus limitaciones.

1.6.2. Capítulo 2: marco teórico

En este capítulo se definen las principales variables eléctricas de un análisis de la calidad de la energía como son el voltaje, la corriente, el factor de potencia y la distorsión armónica. Se nombran posibles consecuencias de que estas variables estén fuera de norma. Se destaca la importancia de comprender sus definiciones.

Además, se menciona la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución, el cual regula los límites máximos y mínimos para garantizar la estabilidad y seguridad de las instalaciones eléctricas. Este capítulo establece las bases teóricas necesarias para interpretar los resultados del estudio.

1.6.3. Capítulo 3: antecedentes técnicos

En este capítulo se presenta información relevante sobre la empresa Sattel Chile y su taller de división industrial, lugar donde se llevó a cabo el análisis de la calidad de la energía. Se mencionan tipos de equipos eléctricos usados y la metodología usada para la realización de este análisis, la cual consistió en el registro de parámetros eléctricos durante 7 días seguidos, con intervalos de 2 minutos y 20 segundos, en el cual se utilizó un registrador trifásico Fluke 1735. Los resultados obtenidos sirven como base para el desarrollo del presente proyecto.

1.6.4. Capítulo 4: análisis de los parámetros eléctricos registrados

Este capítulo se centra en el análisis de los parámetros eléctricos registrados durante la medición comparándolos con la normativa técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución. El objetivo es evaluar el estado actual de la instalación eléctrica e identificar desviaciones respecto a los rangos normados, y presentar los resultados a través de valores numéricos y gráficos que faciliten su comprensión. El análisis incluye los niveles de voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia y distorsión armónica total de corriente y voltaje, con valores máximos, mínimos y promedios. Este análisis se presenta de forma conjunta entre sus 3 fases ofreciendo una visión integral del comportamiento de las variables eléctricas de la instalación.

1.6.5. Capítulo 5: propuesta plan de mejoras

Este capítulo presenta diversas propuestas para optimizar la instalación eléctrica respecto a los valores fuera de norma encontrados. Las soluciones tienen como objetivo eliminar o reducir las anomalías como el desequilibrio de fases, factor de potencia y distorsión armónica total de corriente, para afrontar estas deficiencias se propone la instalación de un filtro armónico activo que permite reducir los tres factores mencionados en una única solución integrada, además se detalla el cálculo para el dimensionamiento del filtro armónico activo mediante ecuaciones específicas permitiendo determinar el equipo adecuado para su implementación. Además se sugiere mejorar el sistema de protección de malla a tierra para cumplir con los estándares exigidos.

1.6.6. Capítulo 6: conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis de la calidad de la energía eléctrica basado en 4319 datos recopilados durante 7 días seguidos. Los resultados mostraron desequilibrio de fases respecto a la corriente, un factor de potencia muy por debajo del mínimo exigido, como problemas de distorsión armónica total de corriente, mientras que el voltaje, la frecuencia y la distorsión armónica total de voltaje cumplieron con la normativa vigente. Se concluyó que las anomalías detectadas son consecuencia del uso de la energía por parte de la empresa Sattel y no por la calidad de la energía entregada por la compañía eléctrica. Además, se presentó un plan de mejora con el fin de reducir los problemas encontrados.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo tiene como propósito explicar de manera breve los conceptos teóricos que involucra un análisis de la calidad de la energía, definir las variables, señalar los problemas, que los origina y en que afectan en una instalación. Además, aborda los niveles mínimos de calidad que deben cumplir las variables eléctricas para asegurar que el suministro eléctrico sea estable y seguro. Estas exigencias estarán basadas en una norma técnica de la comisión nacional de energía (CNE), la cual es la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución.

2.1. Análisis de la calidad de la energía

Es un análisis exhaustivo de las variables eléctricas que afectan la calidad del suministro de energía eléctrica en una instalación. Este estudio se realiza para analizar y observar la calidad de la energía eléctrica suministrada, identificar problemas y proponer soluciones para mejorar la eficiencia, calidad y el rendimiento del sistema. El estudio de calidad de la energía es una herramienta importante para lograr un suministro eléctrico confiable y seguro tanto en entornos industriales como domiciliarios.

2.2. Voltaje

El voltaje eléctrico (conocido como tensión eléctrica o diferencia de potencial) es una de las tantas magnitudes físicas existentes para cuantificar, medir y registrar los sistemas físicos que, como en este caso, son difícilmente perceptibles por los sentidos humanos (EDP Energía, 2022). Esta magnitud física en particular sirve para asignar distintos valores a la diferencia de potencial eléctrico existente entre un punto y otro dentro de un circuito de flujo de cargas. Dicho de otro modo, el voltaje es la capacidad ofrecida por un sistema para mover la carga desde el punto A hasta el punto B.

Dentro de los problemas más comunes que se pueden encontrar con respecto al voltaje en un estudio de calidad son:

- **Variaciones de tensión:** Las variaciones de tensión son un fenómeno en el cual el voltaje de una línea eléctrica es inestable y alcanza valores mayores o menores a lo estipulado por la normativa eléctrica vigente. Estas variaciones son un fenómeno dinámico y pueden ser afectadas por el horario, lugar, tipo de carga o condiciones de la línea eléctrica.

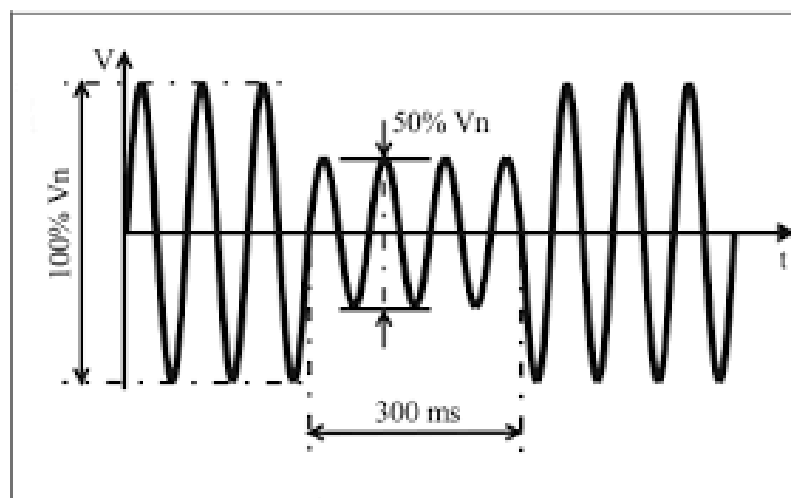
Las variaciones de tensión en una línea eléctrica provocan daños parciales o totales debido a que los equipos eléctricos y maquinaria operan en voltajes mayores o menores para los cuales fueron diseñados.

- **Caídas de tensión (sag):** Son Reducciones temporales de voltaje RMS por debajo de un límite específico en un punto de línea del suministro eléctrico.

El SAG comienza cuando el voltaje es inferior al 90 % del valor nominal y finaliza cuando los voltajes se vuelven superiores al 90 %. La duración del voltaje SAG se considera dentro de 10 ms hasta 1 minuto.

Los SAG de voltaje generalmente son causados por fallas en la red pública o en las instalaciones de los usuarios de la red, en algunos casos por sobrecargas transitorias debido a la adaptación de motores grandes o al encendido de grandes cargas. (Acquatella, 2018). La Figura N°2.1 muestra la forma de onda cuando son afectadas por la caída de tensión SAG.

Figura N°2.1 Caída de Tensión SAG



Fuente: Electrical Engineering Portal (2018)

- **Cortes o interrupciones de servicio:** Corresponde a la pérdida total del voltaje durante un lapso de tiempo determinado lo que resulta en paro total de operación en una instalación, como consecuencia puede resultar en daños o fallas de equipos.
- **Transitorios de voltaje:** Un transitorio es una sobretensión, es decir, un aumento de voltaje de muy corta duración, medido entre dos conductores de alimentación de fase a fase o entre conductor de línea y tierra. Dicho aumento de voltaje puede deberse a descargas eléctricas atmosféricas (rayos) o a procesos de conmutación o de averías (contacto a tierra o cortocircuito).
- **Flicker:** Es una variación perceptible por el ojo humano en la luminosidad e intensidad de la luz debido a fluctuaciones o variaciones de tensión en la red eléctrica. Se trata de una especie de parpadeo o reducción de la luz de manera intermitente.

La aparición de flicker está muy ligada con la calidad del suministro eléctrico, siendo más frecuentes y acentuadas cuando la calidad de la instalación es baja o tiene alguna conexión defectuosa o averiada.

- **Desbalance de fases:** En sistemas trifásicos un desbalance en el voltaje de las fases puede originar sobrecargas en los equipos conectados, generar calentamiento y por ende reducir la vida útil de los equipos. Algunos motivos por el que ocurre este fenómeno son:
 - Falta de simetría en las líneas de transmisión.
 - Grandes cargas monofásicas, como hornos de arco o soldadores.
 - Alta corriente en rectificadores y motores trifásicos.
 - Desequilibrio de la corriente que circula por los conductores neutros.
 - Funcionamiento defectuoso del equipo de corrección del factor de potencia.
 - Suministro eléctrico desequilibrado o inestable.

- Cargas monofásicas distribuidas de forma desigual en la misma red eléctrica.
- Fallas a tierra monofásica no identificadas.
- Conectores o contactores sueltos, corroídos o picados.

2.3. Corriente eléctrica

Se llama corriente eléctrica al flujo de carga eléctrica a través de un material conductor, debido al desplazamiento de los electrones que orbitan el núcleo de los átomos que componen al conductor. (Coluccio, 2021)

La intensidad de la corriente eléctrica viene determinada por la cantidad de carga que pasa por un conductor en una unidad de tiempo. La intensidad se mide en Culombios por segundo (C/s), que equivale a un Amperio [A].

Dentro de los problemas más comunes que se pueden encontrar con respecto a la corriente en un estudio de calidad son:

- **Corriente de neutro elevadas:** En sistemas trifásicos con cargas desbalanceadas, las corrientes de neutro pueden ser excesivas lo que origina calentamientos y puede afectar los conductores del neutro aumentando las posibilidades de fallas en la instalación.
- **Crecientes demandas de corriente (inrush):** Los valores elevados de corriente de inrush, pueden causar una serie de efectos nocivos tanto para el sistema eléctrico que lo alimenta como para el propio transformador, tales como caídas momentáneas de tensión, sobretensiones armónicas temporales, estrés electromecánico en los devanados, deterioro del aislamiento.
- **Sobrecargas de corriente:** Es un exceso de carga que pasa a través de los conductores y circuitos. Por lo tanto, la potencia que necesitan varios dispositivos conectados a la vez en un mismo circuito, puede llegar a exceder la

capacidad del sistema. Existen dos tipos de sobrecargas: transitorias (duran mili segundos) y continuas (a causa de una mala instalación). La sobrecarga puede causar un calentamiento excesivo del cableado, lo que puede llevar a la degradación del aislamiento y aumentar el riesgo de cortocircuitos.

- **Corrientes de fuga:** Son pequeñas corrientes que fluyen a través de conductores a tierra o rutas no deseadas, como consecuencia de problemas de aislación de cables y/o equipos. Algunos de los efectos de la corriente de fuga son:
 - **Seguridad eléctrica:** Una corriente de fuga excesiva puede representar un peligro para la seguridad al aumentar el riesgo de descarga eléctrica.
 - **Pérdida de energía:** Las corrientes de fuga resultan en pérdidas de energía, lo que conduce a una disminución de la eficiencia eléctrica general.
 - **Generación de calor aumentada:** Las corrientes de fuga generan calor a medida que fluyen a través de materiales aislantes y rutas no deseadas. Esta generación de calor puede hacer que los componentes y dispositivos se sobrecalienten, lo que lleva a una vida útil reducida o incluso a fallas.
- **Corriente de cortocircuito:** El cortocircuito es un fenómeno eléctrico que describe una situación donde un flujo de corriente eléctrica toma una ruta no deseada, causando potencialmente daños y riesgos de seguridad. (imaginaenergía, 2022)
- **Factor de cresta:** Es la relación entre la corriente de pico y la corriente cuadrática media (RMS). Es una medida de la amplitud de la forma de onda de la corriente y desempeña un papel crucial en la medición y supervisión precisas de las cargas eléctricas. Este factor está relacionado con las cargas no lineales. Cuando el factor de cresta esta elevado indica que la corriente tiene puntos pick altos que pueden generar problemas en la operación de los equipos.

2.4. Frecuencia

La frecuencia de la CA es el número de ciclos por segundo de una onda sinusoidal de corriente alterna. Dicho de otra forma, la frecuencia es la velocidad a la que la corriente cambia de sentido por segundo. Se mide en hercios [Hz], una unidad internacional de medida donde 1 hercio es igual a 1 ciclo por segundo. (Glen A. Mazur 2021). Dentro de los problemas más comunes que se pueden encontrar con respecto a la frecuencia en un estudio de calidad son:

- **Variaciones de frecuencia:** La frecuencia eléctrica es un parámetro eléctrico que debe permanecer constante 50 [Hz] en Chile (artículo 3-4 Norma técnica de calidad de servicio para sistema de distribución 2019) por lo que variaciones, aunque sean pequeñas puede resultar en que equipos eléctricos se vean afectados, además de producir inestabilidad en el sistema. Si la frecuencia es baja los equipos como motores pueden trabajar de manera ineficiente y se refleje disminución en el rendimiento, por el contrario, si la frecuencia es alta los equipos conectados pueden trabajar a revoluciones más altas lo que reduce la vida útil.
- **Oscilaciones de frecuencia:** estas pueden causar inestabilidad en la red eléctrica y los equipos conectados a ella.
- **Impacto en sistemas de protección:** existen dispositivos de protección que están diseñados para operar bajo un rango definido de frecuencia, si esta frecuencia baja o sube fuera del rango establecido los dispositivos de protección pueden operar de manera ineficiente o simplemente no operar lo que como consecuencia puede generar cortes de energía o fallas en la instalación o equipo.

2.5. Factor de potencia

El factor de potencia es una medida de eficiencia de nuestro sistema eléctrico. Es decir, es un indicador que mide el aprovechamiento de la energía. Es la relación directa que existe entre la potencia aparente y la potencia activa. Lo ideal es que siempre la potencia activa se acerque lo mayormente posible a la potencia aparente. Es decir, a

mayor potencia activa y menor potencia reactiva, tendremos un factor de potencia más cercano a 1. (Risoul, 2021)

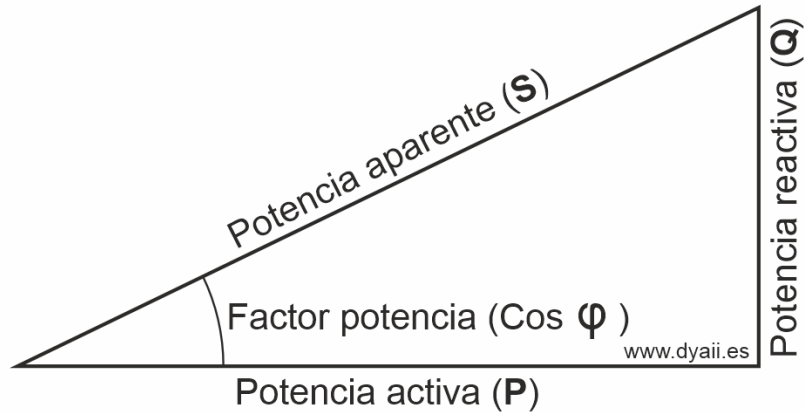
2.6. Triángulo de las potencias

El triángulo de potencias es utilizado para ver en forma de gráfica el factor de potencia. Para ello se hace uso de la estrecha relación entre los tres tipos de potencias, lo cual se puede demostrar de manera muy sencilla.

- **Potencia aparente:** La potencia aparente es la cantidad total de potencia que consume un circuito eléctrico. Se obtiene sumando de forma vectorial la potencia activa y la potencia reactiva, y se identifica con la letra S y se mide en kVA.
- **Potencia activa:** También conocida como potencia útil, es la potencia que necesita consumir el circuito para transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía (térmica, lumínica, mecánica, etc.). Se identifica con la letra P y se mide en kW.
- **Potencia reactiva:** Esta potencia no supone ningún consumo real para el circuito, ya que su función es crear campos magnéticos o eléctricos en diversos componentes del equipo eléctrico, como pueden ser condensadores o bobinas. Se identifica con la letra Q y se mide en kVAR. Un valor elevado de energía reactiva es sancionado por parte de la compañía eléctrica.

En la figura N°2.2 se puede observar la relación entre las diferentes formas de potencia.

Figura N°2.2 Triángulo de las potencias



Fuente: dyaii (2019)

El bajo factor de potencia puede ser causado por la presencia de cargas inductivas o capacitivas, la presencia de armónicos, el sobredimensionamiento de equipos y conductores, diseños inadecuados y el uso de equipos obsoletos.

- **Cargas inductivas:** Las cargas inductivas son dispositivos que utilizan bobinas o elementos inductivos en su funcionamiento. Estos dispositivos generan campos magnéticos al pasar corriente eléctrica a través de las bobinas, lo que provoca el almacenamiento y la liberación de energía magnética y hacen que las cargas inductivas consuman potencia reactiva, lo que a su vez afecta el factor de potencia del sistema eléctrico. Algunos ejemplos son: motores eléctricos, transformadores, balastos de lámpara, fluorescentes y electroimanes.
- **Cargas capacitivas:** Las cargas capacitivas son dispositivos que contienen capacitores en su funcionamiento. Estos dispositivos almacenan energía eléctrica en forma de campo eléctrico cuando se les suministra corriente eléctrica, lo que provoca que consuman potencia reactiva. Algunos ejemplos comunes de cargas capacitivas son: compensadores de energía reactiva, equipos electrónicos, iluminación con tecnología led.

Las consecuencias de operar con un bajo factor de potencia pueden llegar a afectar la producción y la eficiencia del sistema. Algunas consecuencias son:

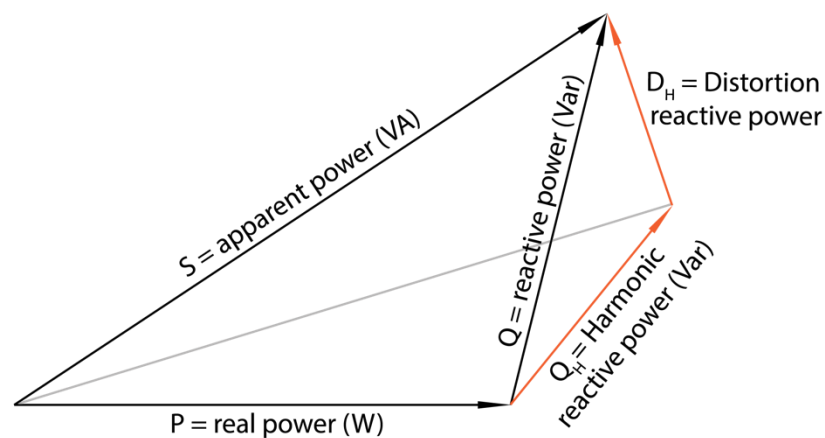
- Mayor demanda de corriente.
- Incremento en las pérdidas de potencia.
- Penalizaciones económicas.
- Desgaste y envejecimiento prematuro de equipos.

2.7. Potencia de distorsión

Es una forma de potencia eléctrica que aparece cuando existen armónicos en el sistema eléctrico, es decir que la onda sinusoidal en corriente o voltaje no es pura y esto es a consecuencia de cargas no lineales. Cuando esto ocurre la potencia aparente no está conformada únicamente por potencia activa y potencia reactiva, sino que se le añade un componente adicional conocido como componente D, por lo que en cargas no lineales el factor de potencia no es igual al $\cos \theta$.

En la figura N°2.3 se puede observar la relación de las diferentes potencias y la potencia distorsionante.

Figura 2.3 Potencia de Distorsión



Fuente: Dewesoft (2023)

En la ecuación N°2.1 se puede determinar la potencia aparente cuando no existen armónicos:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.1)$$

Dónde:

S = Potencia Aparente (VA)

P = Potencia Activa (W)

Q = Potencia Reactiva (VAR)

En la ecuación N°2.2 se puede determinar la potencia aparente con la presencia de armónicos:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.2)$$

Dónde:

S = Potencia Aparente [VA]

P = Potencia Activa [W]

Q = Potencia Reactiva [VAr]

D = Potencia Distorsionante [VAr]

2.8. Distorsión Armónica

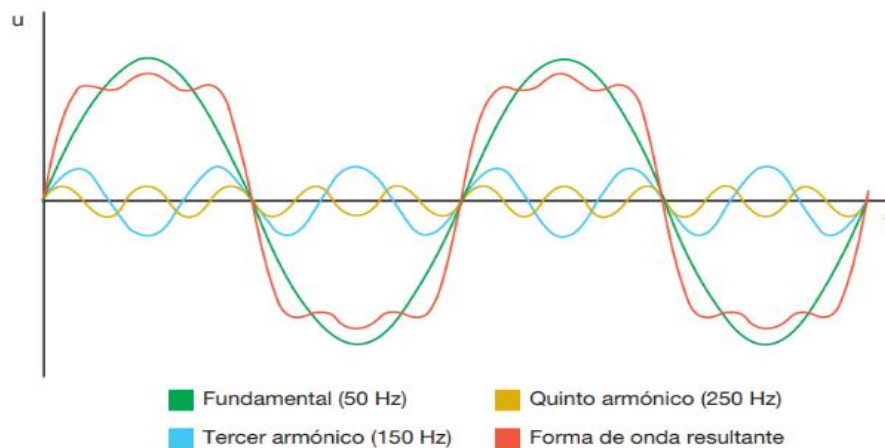
La distorsión armónica se refiere a la deformación periódica de la señal de voltaje (THD_V) o la señal de Corriente (THD_I), que influye en la calidad de energía, ocasionando que la corriente no llegue en su forma sinusoidal ideal lo que provoca daños en equipos y por consecuencia pérdidas. Esta distorsión se presenta debido al uso de cargas no lineales, como son: computadoras, inversores, variadores de frecuencia, robots, iluminación LED, entre otras.

“Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para

operar. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia” (Universidad politécnica Salesiana, 2008).

En la figura N°2.4 se muestra un ejemplo de una onda resultante cuando es afectada por armónicos.

Figura 2.4 Forma de Onda Distorsionada por Armónicos



Fuente: Cuaderno Técnico ABB (2023)

La presencia de armónicos en una instalación puede provocar diversos efectos negativos como son:

- Sobrecalentamiento de conductores, en especial el conductor neutro por efecto pelicular.
- Disparos intempestivos de interruptores automáticos y diferenciales.
- Disminución del factor de potencia en una instalación.
- Pérdida de vida útil de baterías de condensadores usadas en su corrección.
- Deterioro de la forma de onda de la tensión, por lo cual se genera un mal funcionamiento en equipos eléctricos.
- Daños en motores asíncronos por calentamiento y degradamiento.

- Degradamiento del aislamiento de los transformadores, pérdida de capacidad de suministro de potencia en los mismos.

2.9. Distorsión Armónica Total (THD)

Es la relación entre el componente armónico total y el componente fundamental. El THD se puede utilizar como un índice para comprender fácilmente los armónicos presentes en la forma de onda de la fuente de alimentación. Expresa la distorsión de la forma de onda como un valor único. Por lo tanto, THD se puede utilizar como uno de los parámetros para evaluar los armónicos en la fuente de alimentación.

La distorsión armónica total se puede medir a partir de la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\Sigma \text{Potencia de los armónicos}}{\text{Potencia de la frecuencia fundamental}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.3)$$

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.4)$$

Dónde:

- **THD_v**: Distorsión armónica total de voltaje.
- **V₁**: Componente fundamental de voltaje [V].
- **V₃, V₅, V₇**: Componentes armónicos individuales de voltaje [V].
- **V_n**: Número total de armónicos considerados.

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.5)$$

Dónde:

- **THD_I**: Distorsión armónica total de corriente.
- **I₁**: Componente fundamental de corriente [A].
- **I₃, I₅, I₇**: Componentes armónicos individuales de corriente [A].
- **I_n**: Número total de armónicos considerados.

Las ecuaciones N°2.4 y N°2.5 describen la forma de calcular el porcentaje de distorsión armónica de las variables de voltaje y corriente presentes en la red.

2.10. Filtros armónicos: tipos y aplicaciones

Los filtros armónicos son un dispositivo para mitigar o reducir los armónicos a niveles aceptables en un sistema eléctrico de potencia. Se usa en puntos estratégicos del circuito en operación para eliminar o reducir la distorsión armónica y la resonancia. Generalmente, la primera ocurre por un exceso de corriente de entrada y de salida en los equipos. Este tipo de filtro evita que una gran cantidad de armónicos dañen equipos, además de que reduce los costos de operación. Por esta razón, es ampliamente usado en una gran cantidad de industrias. Su objetivo es disminuir la distorsión desviando las corrientes armónicas dentro de los carriles de menor impedancia. Estos filtros son capacitivos en la frecuencia básica, por lo que se utilizan para generar la potencia reactiva necesaria a través de convertidores, y también para la corrección del factor de potencia. (Tecsa, 2022)

A continuación, los tres tipos principales de filtros de armónicos son:

2.10.1. Filtro armónico activo

Un filtro activo es un generador de corrientes armónicas que es capaz de inyectar corrientes armónicas en contrafase con las existentes en la red, consiguiendo así anularlas. Se usan en instalaciones comerciales con cargas menores a 400 [kW].

Entre sus múltiples ventajas respecto a los sistemas de filtrado pasivo podemos destacar su precisión. Es capaz de inyectar la corriente armónica exacta para compensar la existente en la red en cada armónico, sin depender de la variabilidad de la carga. (Circuitor, 2022). Como funciones principales se puede señalar:

- **Filtrado de armónicos:** Elimina los armónicos para limpiar la forma de onda de la instalación y reducción de las corrientes armónicas hasta el orden 50.

- **Compensación energía reactiva:** Ayuda a evitar penalizaciones por consumo de energía reactiva, compensación de la potencia reactiva tanto en consumo como en generación.
- **Equilibrado de fases:** Disminuye la circulación de corriente de neutro evitando calentamientos, pérdidas de aislamiento y disparos intempestivos. Ayuda en la corrección del desequilibrio de corrientes, mejorando el consumo entre fases de la instalación. El modelo de cuatro hilos reduce la corriente de neutro.

Existen varios tipos de filtros de armónicos activos, que incluyen:

- Filtro activo de fuente de corriente.
- Filtros activos de fuente de tensión.
- Filtro activo Serie.
- Filtro activo Shunt.
- Filtros activos adaptativo.

2.10.2. Filtro armónico pasivo

Los filtros pasivos de armónicos son dispositivos eléctricos diseñados para reducir o eliminar las distorsiones causadas por las corrientes armónicas en los sistemas de distribución de energía. Dichos equipos están conformados por elementos reactivos como inductores (bobina) y condensadores. Estos se encuentran conectados de manera que resuenan en frecuencias específicas, lo que permite la eliminación o atenuación de los armónicos no deseados. Están diseñados para que se instalen en serie-paralelo con la carga. De esta forma, actúan como un camino de baja impedancia para los armónicos, desviándolos y evitando así que se distribuyan por el resto del sistema eléctrico (Reguladores, 2024). Se usan en instalaciones industriales en donde las cargas son mayores a 400 [kW].

Los filtros pasivos de armónicos tienen varias funciones esenciales en los sistemas eléctricos:

- **Reducción de armónicos:** su principal función es reducir las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales. Al hacerlo, mejoran la calidad de la energía al disminuir la distorsión armónica total (THD) en el sistema eléctrico.
- **Protección de equipos:** los armónicos pueden generar sobrecalentamientos en transformadores, motores y otros dispositivos eléctricos. Los filtros pasivos protegen los equipos sensibles, ya que reducen los niveles de corriente armónica.
- **Eficiencia energética:** al disminuir las pérdidas causadas por los armónicos en el sistema, los filtros pasivos mejoran la eficiencia energética general. Esto se traduce en un menor consumo de energía y menores costos operativos.
- **Estabilidad del sistema:** la presencia de armónicos puede afectar la estabilidad del sistema eléctrico y generar fluctuaciones de voltaje y corriente. Los filtros pasivos mejoran la estabilidad general al reducir la distorsión armónica.

Los tipos de filtros pasivos más comunes son:

- **Filtros sintonizados:** están diseñados para eliminar armónicos de frecuencias específicas. Son los más simples y efectivos para mitigar armónicos de bajo orden, como el tercer o quinto armónico.
- **Filtros de banda ancha:** en lugar de sintonizarse a una frecuencia específica, estos filtros tienen la función de atenuar una gama más amplia de frecuencias armónicas.

2.10.3. Filtro armónico híbrido

Para extender el rango de aplicación de los compensadores activos, y mejorar las funcionalidades de los filtros pasivos, las nuevas técnicas permiten combinar ambas tecnologías dentro del mismo equipo. El filtro pasivo se sintoniza en la frecuencia armónica predominante, y entrega la energía reactiva requerida. El compensador activo se dedica al resto de los armónicos. Esta solución permite un alto nivel de funcionalidad, dado al gran número del orden armónico cubierto. El uso del filtro pasivo dedicado a la frecuencia del orden predominante permite cubrir un rango más amplio de potencia. Las aplicaciones típicas de los filtros híbridos son las mismas aplicaciones de los filtros

pasivos, es decir, para instalaciones de potencia media y potencia alta (cargas mayores a 400 kW). Además, se usan en aplicaciones que demandan corrección del factor de potencia, además de la funcionalidad de eliminar armónicos de diferentes órdenes. Conforman un sistema que combina filtros pasivos y activos. El filtro híbrido es una nueva solución que acumula las ventajas de ambas tecnologías, y tienen un rango más amplio de aplicaciones posibles. Esta tecnología permite obtener altas funcionalidades de filtrado sobre un amplio rango de potencia, más accesible que la pura solución activa. (Rafael Vásquez, 2024). Sus ventajas principales son:

- Eficiencia en reducción de armónicos.
- Reducción de costos.
- Menor tamaño y peso.
- Mayor fiabilidad.
- Menor consumo de energía.
- Flexibilidad y adaptabilidad.

Sus desventajas principales son:

- Complejidad de diseño y control.
- Costo inicial.
- Problema de compatibilidad.
- Mantenimiento especializado.

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

La presente norma técnica tiene como objetivo principal establecer las exigencias y estándares de calidad de servicio para los sistemas de distribución de energía eléctrica, de esta manera, se establecen las exigencias que deberán cumplir los concesionarios de servicio público de distribución de electricidad y las empresas que sean propietarias, arrendatarias, usufructuarias o que operen, a cualquier título, instalaciones de distribución de energía eléctrica. Adicionalmente, se establecen exigencias y estándares respecto de la calidad de producto para equipos e instalaciones de usuarios.

2.12. Niveles de frecuencia y tensión en sistemas de distribución.

En el Titulo 1-3 “exigencias generales”, en su artículo 1-5 señala lo siguiente:

- La magnitud de la frecuencia nominal en sistemas de distribución es de 50 [Hz].
- La tensión nominal en baja tensión igual o inferior a 1 [kV] ya sea en sistemas de tres o cuatro conductores y tres fases será de 220 [V] entre fase y neutro.

2.13. Obligaciones de los clientes y usuarios.

En el Titulo 2-1 “Obligaciones y funciones”, en su artículo 2-2 señala lo siguiente:

- Cumplir con las exigencias establecidas en la norma técnica respecto de sus instalaciones conectadas en la red de distribución.
- En el caso de los clientes, sus instalaciones deberán cumplir con los límites y estándares establecidos respecto de la calidad de producto.

2.14. Regulación de tensión

En el artículo 3-1 “regulación de tensión” la norma técnica señala que en un punto de la red de distribución se utilizara el siguiente indicador:

$$\Delta V_k = \frac{|V_k - V_n|}{V_n} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.6)$$

Dónde:

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

En Estado Normal y durante el 95 % del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión en el punto de conexión de los Usuarios, promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la regulación de tensión se mantenga dentro de los siguientes límites.

La tabla N°2.1 muestra los límites máximos y mínimos de regulación en baja y media tensión.

Tabla N°2.1 Límite de la regulación de tensión.

Baja Tensión	± 7,5%	± 10,0%
Media Tensión	± 6,0%	± 8,0%

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2019)

2.15. Regulación de frecuencia

En el artículo 3-4 sobre monitoreo de frecuencia se señala que las Empresas Distribuidoras deberán monitorear la frecuencia de la tensión de suministro, para lo cual, mensualmente, deberán medir y registrar la frecuencia en la cabecera de los alimentadores, promediada en intervalos de 15 minutos, de manera de elaborar una estadística que permita identificar el porcentaje del tiempo en que la frecuencia se encuentra dentro de los siguientes intervalos:

Tabla N°2.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.

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

Fuente: Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (2019)

2.16. Distorsión armónica total de tensión (THD_V)

En el artículo 3-5 sobre distorsión armónica de tensión se señala que para evaluar la distorsión armónica en un punto de la red de distribución se utilizará el siguiente indicador:

Distorsión Armónica total de la tensión (THD_V):

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} V_j^2}}{V_1} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.7)$$

Dónde:

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

Adicionalmente, en estado normal y durante el 95 % del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la tensión promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica total de tensión no supere el 8 %, tanto en BT como en MT.

2.17. Distorsión Armónica total de Corriente (THD_I)

En el artículo 3-8 sobre distorsión armónica de corriente que produce un cliente o usuario conectado a un sistema de distribución será determinada de acuerdo a la siguiente expresión:

Distorsión armónica total de corriente (THD_I):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{I_1} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.8)$$

Dónde:

- THD_I : Distorsión Armónica Total de Corriente, en [%].
- I_j : j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].
- I_1 : Componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

En Estado Normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la corriente consumida o inyectada por un usuario conectado en BT, medidos en el punto de conexión y promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la distorsión armónica cumpla con los siguientes límites:

Figura N°2.5 Límites distorsión armónica de corriente en el punto de conexión de los usuarios en baja tensión.

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

2.18. Límite del factor de potencia

En el artículo 3-10 sobre límites del factor de potencia señala que el factor de potencia medido en el punto de conexión del cliente y representativo de un mes de medición, deberá mantenerse dentro de los límites que se indican a continuación:

$$0,95 \text{ CAP} \leq FP \leq 0,93 \text{ IND}$$

En el capítulo 5 artículo 5-18 de la “NORMA TÉCNICA DE SEGURIDAD Y CALIDAD DE SERVICIO” señala que:

Las Instalaciones de Clientes Regulados deberán presentar un factor de potencia calculado en intervalos integrados de 15 minutos, en cualquier condición de carga, medido en sus respectivas Instalaciones de Conexión conectadas a los Puntos de Control del Cliente, según nivel de tensión como se indica a continuación:

“0,93 inductivo y 0,96 capacitivo en los Puntos de Control con tensión nominal inferior a 30 [kV], y que la exigencia del factor de potencia medido deberá cumplirse en al menos un 98 % del tiempo estadístico de cada mes.”

CAPITULO III

ANTECEDENTES TÉCNICOS

Este capítulo presenta los antecedentes técnicos del estudio comenzando con la información de la empresa, el equipo de medición utilizado, los antecedentes del lugar y la metodología utilizada, detallando cada uno de los aspectos mencionados.

3.1. Información y descripción de la empresa

Sattel Chile Ltda. Es una empresa de la región de Atacama, dedicada al diseño, desarrollo e implementación de tecnología para el sector minero, con casa matriz en la ciudad de Copiapó. Nace en abril del año 2010 por la visión de crear una empresa de servicios integrales, capaz de cubrir las necesidades de distintos actores del ámbito minero, como también sobresalir por la calidad de los productos y/o servicios y la calidad humana.

Sattel Chile Ltda. Tiene como misión brindar soluciones tecnológicas e innovadoras a la mediana y gran minería nacional e internacional, garantizando productos y servicios de calidad con enfoque en mejorar la productividad y eficiencia de nuestros clientes, incorporando productos con energías renovables.

Cuenta con oficinas comerciales ubicadas en Nueva uno N°164 Santa Elvira, además la empresa cuenta con su división industrial en el cual destaca una propiedad usada como taller industrial ubicada en Avenida Copayapu N°3000, lugar donde se realiza la fabricación de gabinetes metálicos, integración de gabinetes, carros solares, fabricación de tableros eléctricos, entre otros.

3.2. Equipo registrador de calidad eléctrica

Para el análisis de la calidad de la energía se utilizó un registrador trifásico de calidad eléctrica Fluke 1735 Power Logger. La figura N°3.1 muestra el equipo utilizado y los accesorios incluyendo los cables de conexión.

Figura N°3.1 Registrador Trifásico Fluke 1735.



Fuente: Express instrument hire (2020)

El registrador trifásico de datos eléctricos Fluke 1735, es la herramienta de análisis de energía y calidad eléctrica más versátil y polivalente del mercado por su precio y es ideal para realizar estudios de energía y registros básicos de la calidad de la energía. Es capaz de medir la inmensa mayoría de los parámetros de energía eléctrica como: Tensión, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, potencia de distorsión, energía activa, energía reactiva, THD V y THD A. Los usos más comunes son en:

- Estudios de carga
- Evaluaciones de energía
- Medidas de los armónicos
- Captura de eventos de voltaje

3.3. Antecedentes del lugar de medición

La medición de los parámetros eléctricos se da lugar en el taller de su división industrial, entre sus diferentes máquinas de trabajo resalta el uso de una plegadora hidráulica, una cizalla guillotina hidráulica, soldadoras, compresores, esmeriles, taladros, entre otros. (Ver Anexo N°1)

El taller es alimentado por un transformador trifásico cuya potencia nominal es de 15 [kVA], con un voltaje primario de 13.2 [kV] y un voltaje secundario nominal de 220 [V] en cada una de sus fases, que deriva en un tablero general trifásico que es donde se instala el equipo de medición. La figura N°3.2 muestra el estado del tablero general trifásico donde se conecta el registrador trifásico utilizado.

Figura N°3.2 Tablero General Trifásico Sattel Chile Ltda.



3.4. Metodología de medición

Para el registro de datos se instaló el registrador en el tablero general comenzando con la conexión de las sondas de corriente flexibles, primera sonda en neutro y luego en orden por sondas línea 1, 2 y 3 respectivamente, respetando la dirección del flujo de la corriente según lo señala cada sonda. A continuación, se conectaron los cables pinzas a las líneas de voltaje iniciando nuevamente por la primera pinza en conductor neutro y luego en orden por línea 1, 2 y 3 respectivamente.

Una vez realizada las conexiones se enciende el equipo y se configura para dar inicio a la medición de datos. El equipo es configurado para realizar un registro de los parámetros de: Tensión, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, cos phi, potencia de distorsión, energía activa, energía reactiva, THD_V y THD_A.

A continuación, se indica las características de datos obtenidos:

- Fecha inicio: 09 de septiembre 2024
- Hora de inicio 12:25 pm.
- Fecha término: 16 de septiembre 2024
- Hora de término: 12:20 pm.

En total se registraron un total de 4319 mediciones con intervalos de tiempo de 2 minutos y 20 segundos, los que registraron en cada una de las mediciones el valor mínimo, valor medio y valor máximo de cada parámetro en cada una de las fases.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS REGISTRADOS

Este capítulo estará enfocado en analizar los registros de los parámetros eléctricos obtenidos en la medición, comparándolos con la “Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución” para comprender el estado actual de la instalación, ver que tan fuera de norma se encuentra, interpretar datos con valores, tablas y gráficos para una mejor comprensión.

4.1. Análisis de niveles de voltaje

Por normativa los usuarios de BT con alta o media densidad de la red - Copiapó es designado en media densidad - tienen como límite una regulación de voltaje $\pm 7.5\%$. En este caso el voltaje nominal es de 220 [V] medidos entre cada fase y neutro, por lo tanto, el límite superior e inferior es:

- Límite máximo: 236,5 [V]
- Límite mínimo: 203,5 [V]

A continuación, se realizarán los cálculos de regulación de voltaje con los valores de tensión media registrados para cada una de las fases y el neutro. Para evaluar la regulación de tensión en un punto de la red de distribución se utilizará el siguiente indicador:

$$\Delta V_k = \frac{|V_k - V_n|}{V_n} * 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.1)$$

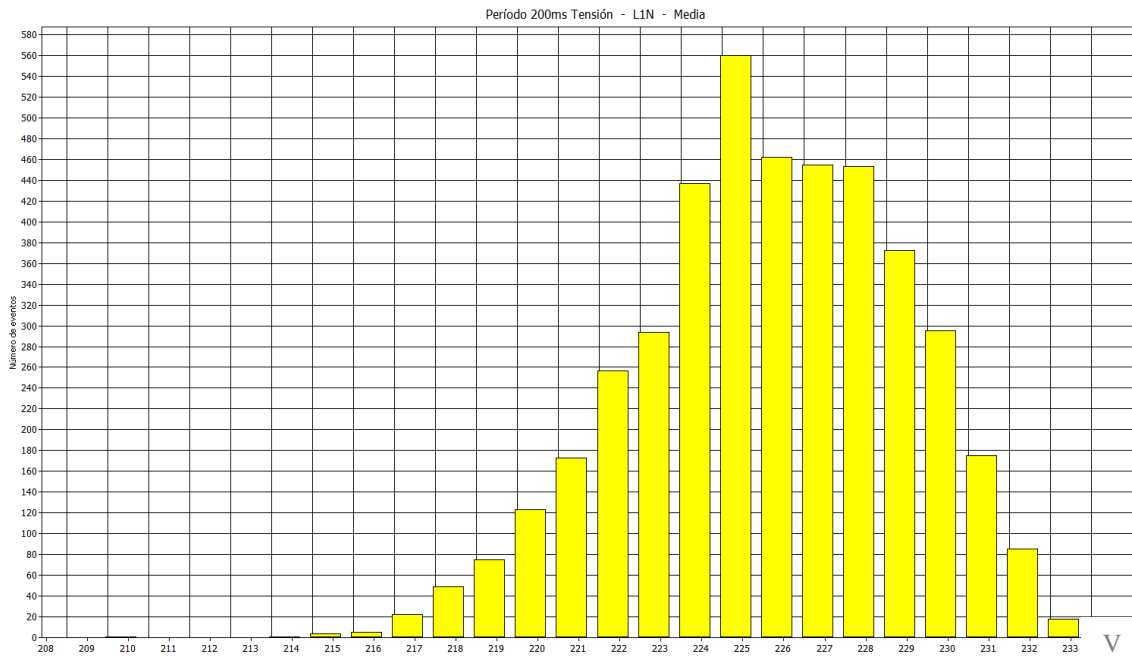
Dónde:

- ΔV_k : Regulación de Tensión en el punto k [%].
- V_k : Tensión de suministro en el punto k [kV].
- V_n : Tensión Nominal en el punto k, en [kV].

4.1.1. Regulación de voltaje línea 1 (Fase R)

El gráfico de la figura N°5.1 muestra la cantidad de registros por cada nivel de voltaje, donde el eje Y representa la frecuencia de registro por rango de voltaje y el eje X representa los diferentes valores de voltaje que se han medido. Se puede apreciar que el valor más repetido en el tiempo corresponde a 225 [V] aproximadamente y además se aprecia que la mayor parte de los valores están en un rango cercano a este voltaje.

Figura N°4.1 Gráfico de número de eventos de voltaje fase R.



La tabla N°4.1 muestra los valores promedio de voltaje en la fase R, el cual es de 225,1 [V], además muestra el porcentaje de regulación de voltaje con su nivel máximo y mínimo, y por último muestra la cantidad de datos fuera de los límites establecidos.

Tabla N°4.1 Límite de valores máximos y mínimos de la línea 1.

Línea 1	Promedio[V]	Mínimo [V]	Máximo [V]	< 203,5 [V]	> 236,5 [V]	% datos dentro del tiempo
Valores	225,10	209,8	233,1	0	0	100,00
Regulación	2,32	4,63	5,94	%		

A continuación, se calcula la regulación de voltaje con la fórmula de la ecuación N°4.1 ingresando los valores de la tabla N°4.1:

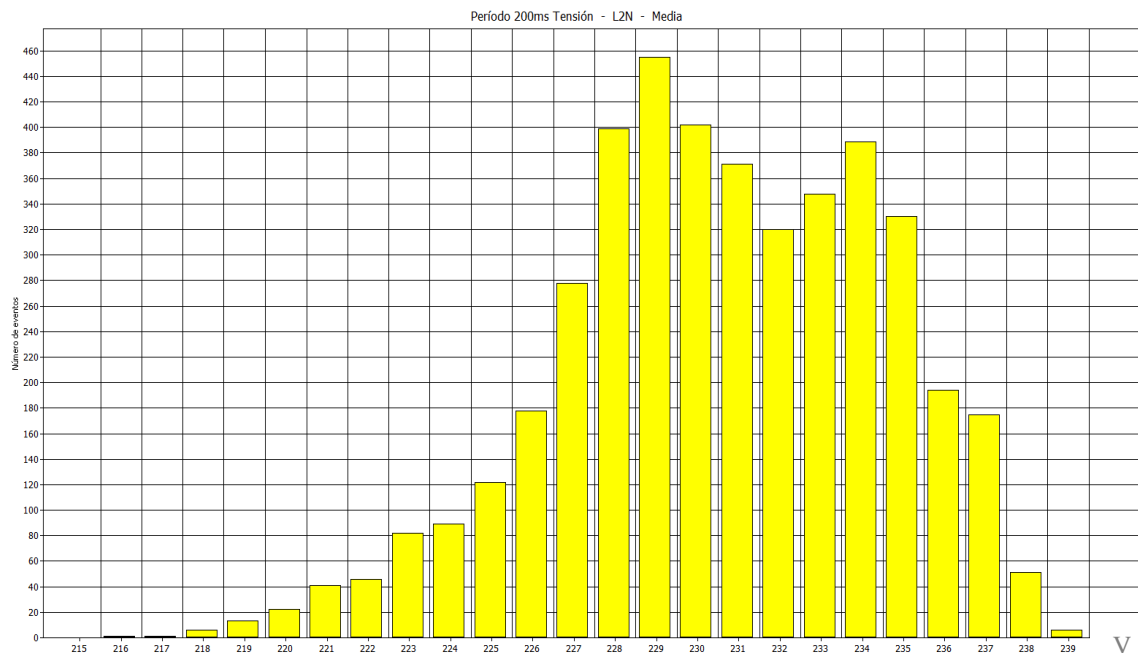
$$\Delta V_k = \frac{|225,1V - 220V|}{220V} * 100\% = 2,32 \%$$

La regulación de voltaje promedio para la línea 1 es de 2,32 % por lo tanto se encuentra dentro de los límites de $\pm 7,5 \%$ del voltaje nominal. Además, el análisis muestra que el 100 % de los valores registrados en el tiempo especificado supera el mínimo exigido que es un 95 %, por lo tanto, el sistema de la línea 1 está operando dentro de los límites normativos.

4.1.2. Regulación de voltaje línea 2 (Fase S)

El gráfico de la figura N°4.2 muestra la cantidad de registros por cada nivel de voltaje, donde el eje Y representa la frecuencia de registro por rango de voltaje y el eje X representa los diferentes valores de voltaje que se han medido. Se aprecia que el valor más repetido en el tiempo corresponde a 229 [V] aproximadamente, además se aprecia que un mayor número de datos se agrupa por encima del valor más alto, y que si existen valores que sobrepasan el límite superior que es 236,5 [V].

Figura N°4.2 Gráfico de número de eventos de voltaje fase S.



La tabla N°4.2 muestra los valores promedio de voltaje en la fase S, el cual es de 230 [V], además muestra el porcentaje de regulación de voltaje con su nivel máximo y mínimo, y por último muestra la cantidad de datos fuera de los límites establecidos.

Tabla N°4.2 Límite de valores máximos y mínimos de la línea 2.

Línea 2	Promedio [V]	Mínimo [V]	Máximo [V]	< 203,5 [V]	> 236,5 [V]	% datos dentro del tiempo
Valores	230,00	215,0	238,8	0	128	97,04
Regulación	4,55	2,29	8,52	%		

A continuación, se calcula la regulación de voltaje con la fórmula de la ecuación N°4.1 ingresando los valores de la tabla N°4.2:

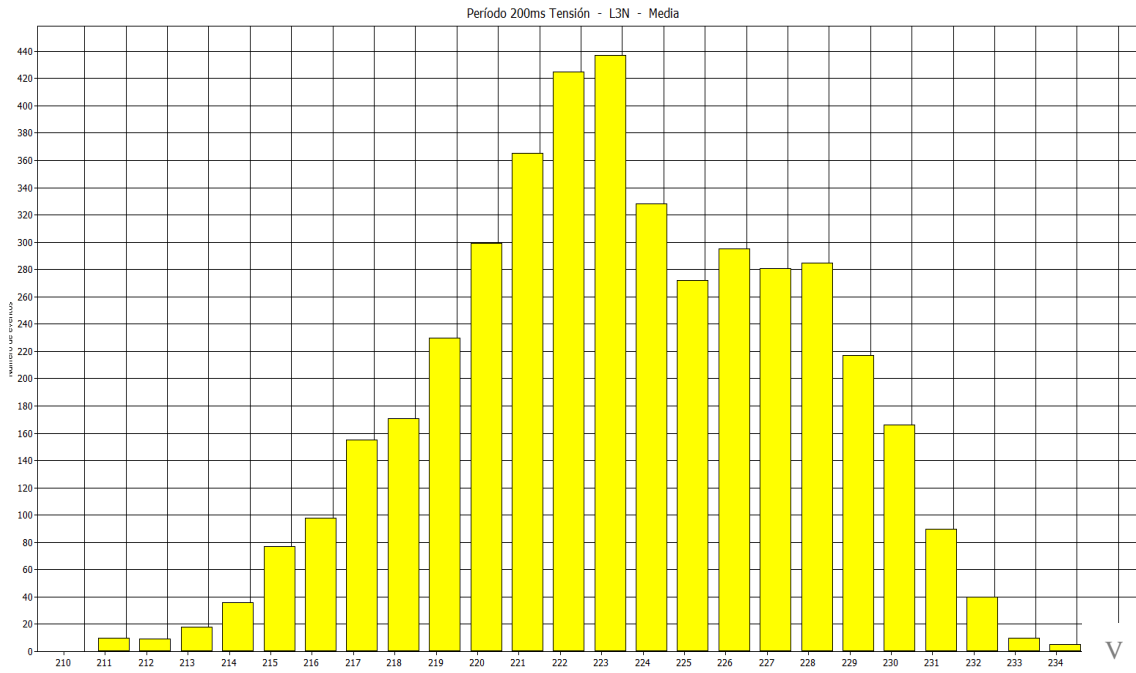
$$\Delta V_k = \frac{|230V-220V|}{220V} * 100\% = 4,55 \%$$

La regulación de voltaje promedio para la línea 2 es de 4.55 % por lo tanto se encuentra dentro de los límites de $\pm 7,5$ % del voltaje nominal. Además, el análisis muestra que 128 registros están por sobre el límite máximo permitido lo que representa que un 97,04 % de los valores registrados en el tiempo especificado superando el mínimo exigido que es un 95 %, por lo tanto, el sistema de la línea 2 está operando dentro de los límites normativos.

4.1.3. Regulación de voltaje Línea 3 (Fase T)

El gráfico de la figura N°4.3 muestra la cantidad de registros por cada nivel de voltaje, donde el eje Y representa la frecuencia de registro por rango de voltaje y el eje X representa los diferentes valores de voltaje que se han medido. Se puede apreciar que el valor más repetido en el tiempo corresponde a 223 [V] aprox y además se aprecia que los datos se agrupan en valores cercanos al valor mas alto, y que no existen valores que sobrepasan el límite superior ni inferior.

Figura N°4.3 Gráfico de número de eventos de voltaje fase T.



La tabla N°4.3 muestra los valores promedio de voltaje en la fase T, el cual es de 222,98 [V], además muestra el porcentaje de regulación de voltaje con su nivel máximo y mínimo, y por último muestra la cantidad de datos fuera de los límites establecidos.

Tabla 4.3 Límite de valores máximos y mínimos de la línea 3.

Línea 3	Promedio [V]	Mínimo [V]	Máximo [V]	< 203,5 [V]	> 236,5 [V]	% datos dentro del tiempo
Valores	222,98	210,2	233,5	0	0	100,00
Regulación	1,35	4,45	6,13	%		

A continuación, se calcula la regulación de voltaje con la fórmula de la ecuación N°4.1 ingresando los valores de la tabla N°4.3:

$$\Delta V_k = \frac{|222,98V - 220V|}{220V} * 100\% = 1,35\%$$

La regulación de voltaje promedio para la línea 3 es de 1,35 % por lo tanto se encuentra dentro de los límites de $\pm 7,5\%$ del voltaje nominal. Además, el análisis

muestra que el 100 % de los valores registrados en el tiempo especificado supera el mínimo exigido que es un 95 %, por lo tanto, el sistema de la línea 3 está operando dentro de los límites normativos.

4.2. Análisis de niveles de corriente

Para analizar si existe un desequilibrio de corriente se utilizará los datos obtenidos de la corriente promedio, corriente máxima y mínima de cada fase, para comparar entre ellas y así determinar si el desequilibrio supera los márgenes aceptables en la instalación.

Según la tabla N°4.4 se puede apreciar que el promedio de la corriente RMS de la fase T está por encima del promedio de la fase R en aproximadamente 5 veces y por encima del promedio de la fase S en 11 veces. Además, la fase T representa un 77,5 % del consumo total del sistema eléctrico versus un 15,4 % de la fase R y un 7,1 % de la fase S, lo que indica que solo la fase T está por encima en consumo casi 3,5 veces por sobre ambas fases juntas. Con respecto a los valores máximos y mínimos se aprecia que el valor máximo de corriente es alcanzado en la fase T con 19,46 [A]. Lo que significa que las fases se encuentran desequilibradas con respecto a la corriente RMS.

Tabla N°4.4. Valores promedios de los límites de corriente y consumo por fase.

Línea 1 (R)	Promedio [A]	Mínimo [A]	Máximo [A]	Consumo total (kA)	% consumo
Valor	0,62	0,2	12,5	2,67	15,4
Línea 2 (S)	Promedio [A]	Mínimo [A]	Máximo [A]	Consumo total (kA)	% consumo
Valor	0,28	0,14	9,46	1,23	7.1
Línea 3 (T)	Promedio [A]	Mínimo [A]	Máximo [A]	Consumo total (kA)	% consumo
Valor	3,10	0,78	19,46	13,41	77.5
Neutro	Promedio [A]	Mínimo [A]	Máximo [A]	Total Consumo (kA)	17,30
Valor	2,21	0,40	16,92		

En los datos de la tabla N°4.4 respecto a la corriente que circula por el neutro en el circuito eléctrico analizado, se puede apreciar que el promedio es de 2,21 [A] lo que es superior al promedio de la fase R y fase S respectivamente, además con respecto a los valores mínimos y máximos del conductor neutro se aprecia que está por encima de los valores registrados en la fase R y fase S.

4.2.1. Resultados del análisis de la corriente

Los resultados mencionados con respecto a la corriente que circula por la instalación eléctrica muestran que las fases R, S y T están desequilibradas debido a que las cargas conectadas a estas fases no son iguales y muestran una marcada diferenciación entre ellas. Otro motivo de que el circuito eléctrico esta desbalanceado se muestra por la gran cantidad de corriente pasando por el conductor neutro, esto debido a que en un sistema trifásico balanceado no hay corriente en el neutro, y en un sistema trifásico desbalanceado si circula una corriente residual por el neutro para compensar el desbalance de las fases.

Este desequilibrio puede estar causado por una distribución inadecuada de las cargas lo cual fue visto mientras se realizaba la medición, lo que puede generar sobrecalentamientos y daños en equipos y sistema en general.

4.3. Análisis de la frecuencia

La frecuencia en Chile es de 50 [Hz] con un margen tolerable de $\pm 0,5$ [Hz], lo que significa que debe estar entre el rango de 49,5 [Hz] y 50,5 [Hz] en condiciones normales de operación para mantener la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

Esta regulación se encuentra estipulada en la normativa Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución en su artículo 3-4, a continuación, se analizaron los datos de la frecuencia media de los 4319 registros realizados en la medición, lo que arrojó lo siguiente:

Tabla N°4.5. Valor límite y promedio de frecuencia.

Frecuencia	Mínimo	Promedio	Máximo
Hz	49,69	50,0	50,3

Figura N°4.4. Fluctuaciones de frecuencia.

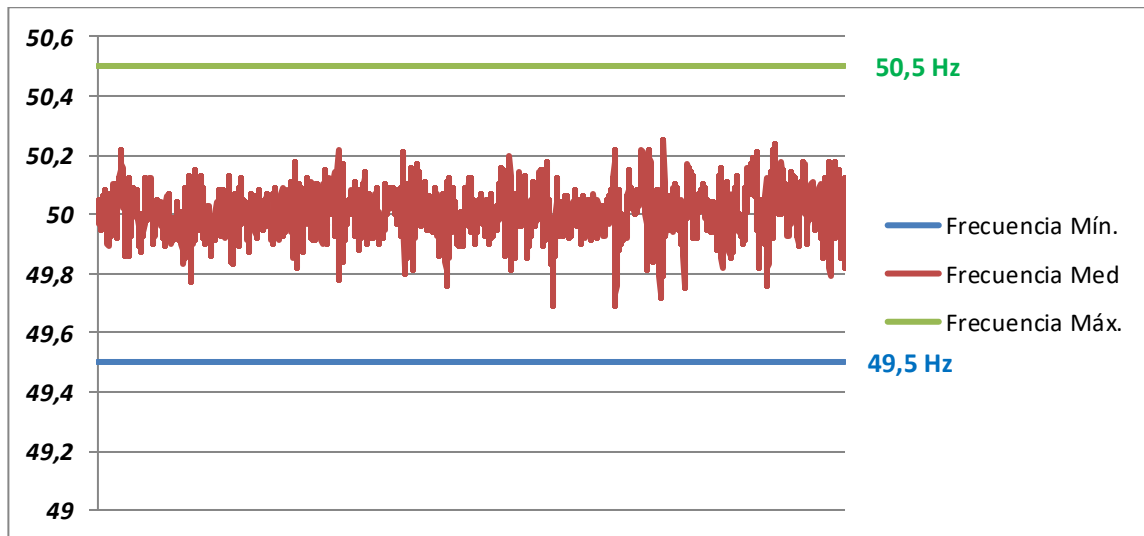


Tabla N°4.6. Registro de datos de frecuencia según intervalos.

Estado de la frecuencia	Intervalo de frecuencia [Hz]	Valores Encontrados por rango
Sub-frecuencia Extrema	$f < 47,0$	0
Sub-frecuencia	$47,0 \leq f < 49,5$ Hz	0
Normal	$49,5 \leq f < 50,5$ Hz	4319
Sobre frecuencia	$50,5 \leq f < 52,0$	0
Sobre frecuencia Extrema	$52,0 \leq f$	0

4.3.1. Resultados de la regulación de frecuencia

Los resultados del análisis de los datos de la frecuencia señalan que todos los valores en cada una de sus mediciones se mantienen dentro de los límites permitidos, sin

fluctuaciones fuera de rango, según tabla N°4.6. La totalidad de los 4319 datos están dentro de un estado de frecuencia normal.

4.4. Análisis De la Distorsión armónica de voltaje y corriente

El análisis de la distorsión armónica nos ayuda a visualizar como las ondas de voltaje y corriente afectan la calidad de la energía. Por este motivo al analizar los 4319 registros obtenidos en la medición nos permite comparar los resultados con la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución y de esta manera tener un diagnóstico que nos permita ejecutar acciones que den como resultado niveles de armónicos dentro de rangos aceptables.

4.4.1. Análisis de distorsión armónica total de tensión (THD_V)

En la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución en su artículo 3-5 señala que en estado normal y durante el 95 % del tiempo 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. A continuación, se detallan los valores obtenidos de THD_V por cada fase:

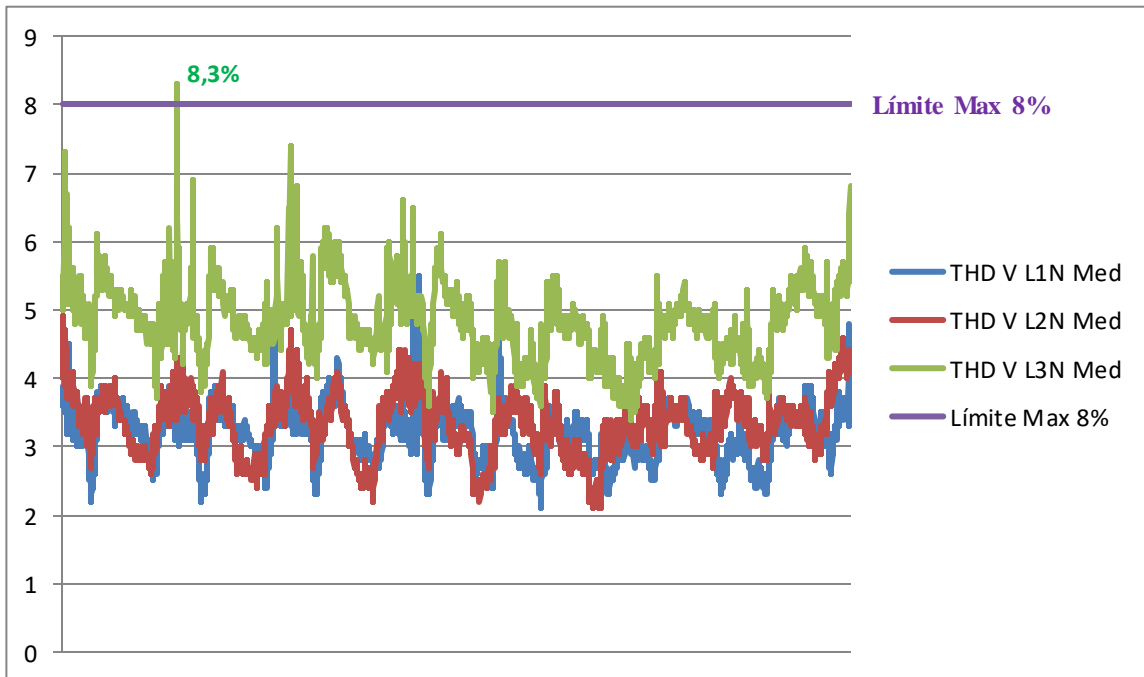
Según la tabla N°4.7 se puede apreciar que el promedio de la distorsión armónica total de voltaje de sus 3 fases es de 3.77 % el cual no supera el 8% máximo establecido, y que ninguna de sus fases de manera individual supera este valor, por lo tanto, si cumple con la normativa vigente. Además, en la tabla se puede apreciar que de los 4319 datos registrados en cada una de las 3 líneas solo 1 registro de la fase 3 está fuera de rango lo que representa solo un 0.02 % de los registros en el tiempo, por lo tanto si cumple con el 95 % mínimo exigido.

Tabla N°4.7. Valores promedio de THD_V.

THD_V	Promedio %	Mínimo %	Máximo %	Registros > 8%	% datos dentro del tiempo	Promedio línea 1, 2 y 3. (%)
Línea 1	3,19	3,7	6,3	0	100,00	3,77
Línea 2	3,32	4,5	4,9	0	100,00	
Línea 3	4,79	4,4	8,3	1	99,98	

En la figura N°4.5 se puede apreciar que el THD_V de la línea 1 y 2 se encuentran por debajo de los valores de la línea 3 pero la totalidad de valores de ambas líneas están dentro de los márgenes permitidos. Además, la línea 3 presenta un registro de 8.3 % el cual es el único valor que está fuera de los márgenes establecidos.

Figura N°4.5 Fluctuaciones de distorsión armónica de voltaje.



4.4.2. Análisis de distorsión armónica total de corriente (THD_I)

En el artículo 3-8 sobre distorsión armónica de corriente señala que en estado normal y durante el 95 % del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días corridos de medición y registro, los valores eficaces de la corriente consumida por un usuario conectado en BT, la corriente armónica máxima en % de la corriente fundamental no supere el 20 %, según la figura N°2.5.

Tabla N°4.8. Valores promedio THD_I.

THD_I	Promedio %	Mínimo %	Máximo %	Registros > 20%	% datos dentro del tiempo	Promedio línea 1, 2 y 3. (%)
Fase R	20,99	4,1	99,8	897	79,23	28,88
Fase S	22,08	0,0	99,9	805	81,36	
Fase T	43,56	5,4	85,7	4225	2,18	
Neutro	78,67	5,9	99,9	4285	0,79	

Según la tabla N°4.8 Podemos observar lo siguiente:

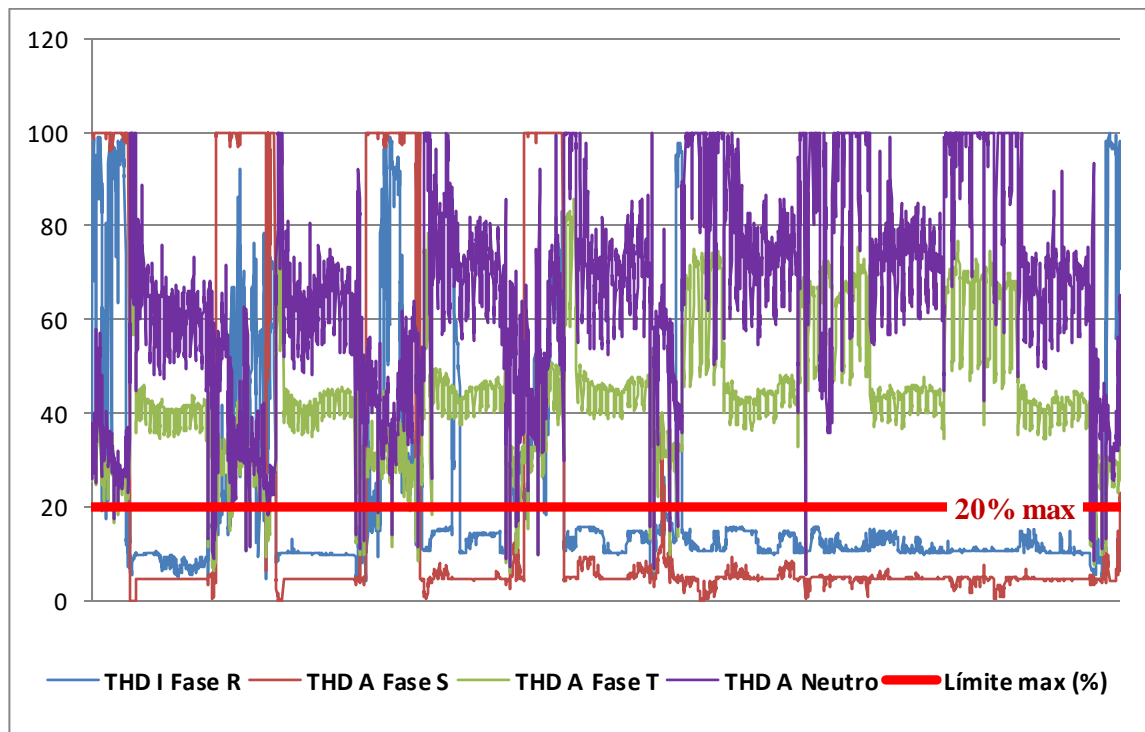
- Con respecto a la Fase R se puede apreciar que el promedio de THD_I es de 20,99 % valor que excede levemente la corriente armónica máxima permitida, además esta fase muestra que 897 datos de los 4319 registrados están por sobre el 20 % máximo exigido lo que representa que solo el 79,23 % de estos registros están dentro del margen permitido.
- Con respecto a la fase S se puede apreciar que el promedio de THD_I es de 22,08 % valor que excede la corriente armónica máxima permitida, esta fase muestra que 805 datos de los 4319 registrados están por sobre el 20 % máximo exigido lo que representa que solo el 81,36 % de estos registros están dentro del margen permitido.
- Con respecto a la fase T se puede apreciar que el promedio de THD_I es de 43,56 % valor que excede por mucho la corriente armónica máxima, esta fase muestra que 4225 datos de los 4319 registrados están por sobre el 20 % máximo exigido lo que representa que apenas un 2,18 % de estos registros están dentro del margen

permitido. Esta fase es la que se encuentra más afectada por la distorsión armónica superando en más de 2 veces la fase 1 y 2 respectivamente.

- La NTCSSD no establece un límite específico para la distorsión armónica total de corriente en el neutro, se puede observar que el promedio de los registros de THD_I en el neutro es 78,67 % lo que es un valor muy alto que puede ocasionar problemas serios en el sistema eléctrico. Este paso de corriente puede estar generado específicamente por desequilibrio de cargas y problemas de secuencia 0.
- El promedio de THD_I de las tres fases es de 28,88 %, lo que indica que la distorsión armónica de corriente de toda la instalación no cumple con la corriente armónica máxima permitida, además las 3 fases están bajo el umbral del 95 % registrado en el tiempo. Por lo tanto, se puede verificar el no cumplimiento de lo establecido en el Artículo 3-8, respecto de la distorsión armónica de corriente.

Según muestra la figura N°4.6 la gran mayoría de los valores de la fase T y neutro están muy por encima del límite máximo, mientras que los valores de la fase R y fase S mantienen una gran parte de valores por debajo de este límite, pero no en su totalidad.

Figura N°4.6 Fluctuaciones distorsión armónica de corriente.



4.5. Análisis del factor de potencia

El factor de potencia es una medida de la eficiencia o rendimiento de nuestro sistema eléctrico, este indicador señala que tan eficiente es la utilización de la energía, por lo que un bajo factor de potencia puede provocar pérdidas de energía, sobrecarga en equipos, cargos adicionales y por ende costos más altos.

En el artículo 3-10 de la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución sobre límites del factor de potencia señala que el FP medido en el punto de conexión del cliente y representativo de un mes de medición, deberá ser no menor de 0,95 capacitivo y no menor de 0,93 inductivo en los Puntos de Control con tensión nominal inferior a 30 [kV], y que la exigencia del factor de potencia medido deberá cumplirse en al menos un 98% del tiempo estadístico. Sobre un total de 4319 registros, los valores promedio y valores bajo el límite permitido se muestra en la tabla N°4.9:

Tabla N°4.9 Valores promedio del factor de potencia según fase.

Factor de Potencia	Promedio %	Registros < 0,93	% datos dentro del tiempo	Promedio línea 1, 2 y 3. (%)
Fase R	0,45	3873	10,33	0,53
Fase S	0,24	4319	0,00	
Fase T	0,89	2785	35,52	

4.5.1. Análisis comparativo del factor de potencia por fase según tabla N°4.9:

- Con respecto a la fase R se puede apreciar que el promedio del factor de potencia es 0,45. Lo que representa un uso ineficiente de la energía eléctrica, otro punto a considerar es que de los 4319 registros obtenidos 3873 están por debajo del límite mínimo exigido dando como resultado que solo un 10,33 % de los valores están dentro del rango establecido por la normativa vigente.

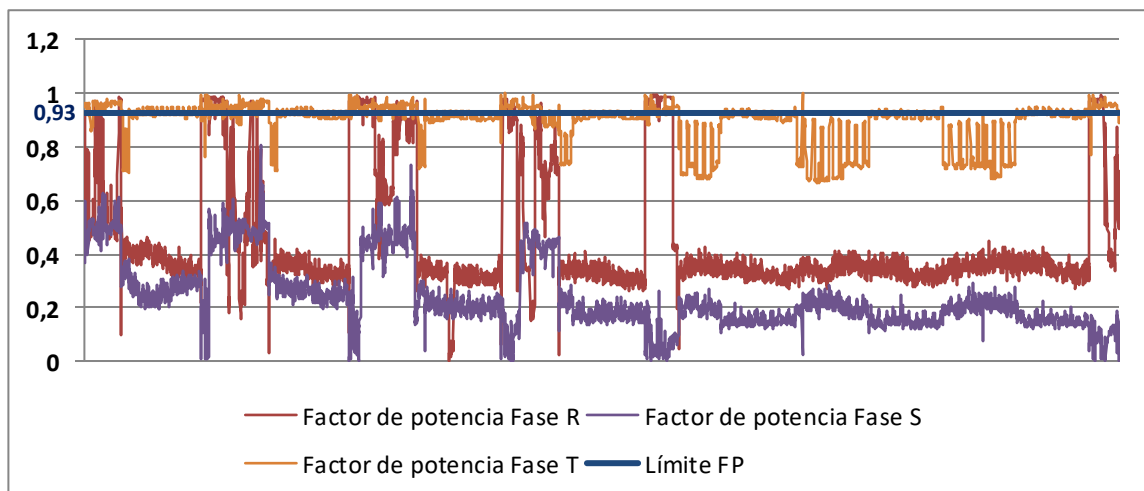
- En la fase S se puede apreciar el valor promedio más bajo del factor de potencia con 0,24. Lo que representa un uso extremadamente ineficiente de la energía eléctrica, otro punto a considerar es que la totalidad de los 4319 de los valores están fuera del rango establecido por la normativa vigente.
- En la fase T es donde se puede apreciar el valor promedio del factor de potencia más cercano al límite establecido con un 0,89, lo que representa que el sistema es moderadamente eficiente, otro punto a considerar es que de los 4319 registros obtenidos 2785 están por debajo del límite mínimo dando como resultado que solo un 35,52% de los valores están dentro del rango establecido por la normativa vigente.

4.5.2. Análisis general del factor de potencia

Según la tabla N°4.9 el promedio del factor de potencia entre sus tres fases es 0,53 lo que refleja muy baja eficiencia, lo que del total de la potencia aparente solo el 53 % es utilizado como potencia activa. Dado el bajo índice de FP la instalación requiere mayor consumo de corriente lo que puede generar sobrecargas en los conductores o equipos eléctricos. Otro factor es que el registro de datos de las tres fases no cumple la exigencia de que el factor de potencia este al menos en un 98 % del tiempo estadístico.

La figura N°4.7 muestra el comportamiento del factor de potencia en cada una de sus fases durante el tiempo registrado, donde claramente es visible que la gran mayoría de datos está por debajo del 0,93 exigido.

Figura N°4.7 Variación del factor de potencia durante el tiempo en sus 3 fases.



CAPITULO V

PROPUESTA PLAN DE MEJORAS

En este capítulo se presentarán diversas propuestas de plan de mejoras relacionadas a optimizar los aspectos identificados durante el análisis previo. Las soluciones planteadas a continuación tienen como propósito reducir o eliminar las anomalías encontradas en algunas variables eléctricas en el análisis de la calidad de la energía efectuado.

Con respecto a los parámetros analizados se puede ver que existen problemas en algunos indicadores de la calidad de la energía como fases desequilibradas respecto a la corriente, distorsión armónica total de corriente THD_I y factor de potencia.

5.1. Problemas de corriente por el conductor neutro

Existen diversos motivos por el que la corriente puede circular por el conductor neutro en una instalación eléctrica trifásica, por lo que a continuación se proponen medidas de mejoramiento para disminuir o eliminar este problema:

5.1.2. Mejoramiento del sistema de protección de malla a tierra

Debido a un mal sistema de malla a tierra la corriente puede provocar un desbalance entre las fases y como consecuencia fluya corriente incorrectamente por el neutro generando problemas, además de los asociados a seguridad. La instalación eléctrica de la empresa Sattel Chile cuenta con un sistema de malla a tierra compuesto solamente por una barra Copperweld, lo que es presumiblemente insuficiente para el uso de máquinas industriales usadas en el lugar. Como mejora se propone la medición, diseño e instalación de un sistema de malla a tierra que cumpla con los estándares señalados en el Pliego Técnico Normativo RIC N°6 en su punto 6.7.3 el cual señala que “la resistencia combinada de todas las puestas a tierra resultante de la aplicación de esta exigencia no deberá exceder de 5 Ohm” (Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica, 2021). Se determina que el diseño de la malla a tierra con sus medidas y características cumpla con las normas exigidas señaladas en el reglamento antes mencionado.

Como primer paso para el mejoramiento de la malla a tierra se debe realizar la medición de resistividad del suelo, este análisis permitirá obtener los datos necesarios para su diseño. El costo aproximado de este servicio en Chile es de \$ 450.000 + IVA el cual incluye un informe con los datos de resistividad del suelo y el diseño de malla a tierra que cumpla con lo exigido por normativa. El valor de construcción e instalación de la malla dependerá del resultado de dicho informe.

5.2. Propuesta de mejora a variables eléctricas anormales

En el análisis de la calidad de la energía es primordial identificar y evaluar los parámetros que pueden afectar el desempeño de equipos en una instalación eléctrica. Según el capítulo V del presente proyecto, los valores identificados anormales en esta oportunidad corresponden a distorsión armónica total de corriente (THD_I), factor de potencia y desbalance de fases respecto a la corriente. A continuación, se propone el siguiente plan de mejora.

5.2.1. Instalación de filtro armónico activo

Un filtro armónico activo es un dispositivo avanzado que se utiliza en instalaciones eléctricas con el propósito de eliminar o reducir al mínimo las distorsiones armónicas no deseadas generadas especialmente por cargas no lineales. Este tipo de filtro es capaz de adaptarse dinámicamente a las variaciones en la carga y en las condiciones de la red eléctrica. Tiene como principales características:

- **Reducción del nivel de armónicos:** Los filtros activos monitorean continuamente la forma de onda de corriente y tensión en tiempo real para generar una corriente inversa de igual magnitud, pero en fase opuesta al armónico no deseado. Al suministrar esta corriente inversa, el filtro activo cancela o reduce el armónico no deseado, mejorando así la calidad del suministro eléctrico.
- **Equilibrio de fases:** Los filtros activos equilibran las fases en un sistema eléctrico. Las cargas desequilibradas generan corrientes y tensiones asimétricas, resultando en un aprovechamiento ineficiente de la energía y una mayor pérdida de potencia. Los filtros activos de armónicos pueden medir y controlar las diferencias de corriente y

tensión entre las fases y compensar las desviaciones existentes. Al equilibrar las fases, se mejora la eficiencia energética y se reducen las pérdidas en el sistema.

- **Corrección del factor de potencia:** Un factor de potencia bajo resulta en penalizaciones económicas por la ineficiencia energética y la sobrecarga en la red eléctrica. Los filtros activos de armónicos corrigen y mejoran el factor de potencia mediante el suministro de una corriente compensatoria en fase con la tensión de entrada. Al ajustar la relación entre la corriente y la tensión, este filtro reduce la cantidad de energía reactiva consumida y mejora el factor de potencia.

5.2.2. Dimensionamiento del filtro armónico activo

A continuación se muestra una serie de ecuaciones que nos permiten dimensionar el tamaño del filtro armónico activo, la ecuación debe ser considerada para cada una de las fases de manera independiente.

$$I_{\text{filtro activo}} = \sqrt{I_{\text{armónicos}}^2 + I_{\text{pot reactiva}}^2 + I_{\text{equilibrado de fases}}^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.1)$$

Para calcular $I_{\text{armónicos}}$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{\text{armónicos fase } x} = (I_{\text{RMS fase } x}) * \left(\sqrt{\frac{\%THD_{I_{\text{fase } x}}^2}{100^2 + \%THD_{I_{\text{fase } x}}^2}} \right) * \left(1 + \frac{THD_{V_{\text{fase } x}}}{10} \right) \left[\frac{A}{\text{fase}} \right] \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.2)$$

Dónde:

- $I_{\text{RMS fase } x}$: Valor máximo de la Corriente de fase RMS.
- $\%THD_{I_{\text{fase } x}}$: Valor máximo Distorsión armónica total de corriente.
- $\%THD_{V_{\text{fase } x}}$: Valor máximo Distorsión armónica total de tensión.
- Nota: subíndice x indica el número de la fase

Para calcular $I_{\text{pot reactiva}}$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{\text{compensación pot reactiva}} = \frac{Q_{\text{fase } x}}{V_{\text{fase } x}} \left[\frac{A}{\text{fase}} \right] \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.3)$$

Dónde:

- $Q_{\text{fase } x}$: Valor máximo de la potencia reactiva en kVAR.
- $V_{\text{fase } x}$: Valor máximo de tensión de fase RMS en kV.
- Nota: subíndice x indica el número de la fase

Para calcular $I_{\text{equilibrado de fases}}$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{\text{equilibrado de fases}} = I_{\text{máxima}} - I_{\text{promedio}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.4)$$

Dónde:

- $I_{\text{máxima}}$: Valor máximo de corriente de las 3 fases.
- I_{promedio} : Valor promedio de corriente máxima de las 3 fases.

La tabla N°5.1 muestra los valores obtenidos en la medición para el cálculo de las ecuaciones

Tabla N°5.1 Valores para cálculos de ecuaciones dimensionamiento del filtro activo.

Parámetro Eléctrico	Corriente RMS Max (A)	THD_I máx. (%)	THD_V máx. (%)	Potencia Reactiva Max (kVAR)	Tensión RMS Max (kV)	Media resultante valor máximo de corriente de las 3 fases (A)
Fase R	12,5	99,8	6,3	1,156	0,2331	13,81
Fase S	9,46	99,9	4,9	1,2	0,2288	
Fase T	19,46	85,7	8,3	9,65	0,2335	

La tabla N°5.2 muestra los resultados de las ecuaciones para el cálculo de filtro activo por cada fase según las ecuaciones mencionadas en el punto 5.2.2 Del presente capítulo.

Tabla N°5.2 resultados para cálculo de filtro armónico activo.

Parámetro Eléctrico	Valor I armónicos según ecuación 6,2 (A)	Valor I compensación potencia reactiva según ecuación 6,3 (A)	Valor I equilibrio fases según ecuación 6,4 (A)	Valor I filtro activo según ecuación 6,1 (A)
Fase R	14,4	5,0	-1,3	15,3
Fase S	10,0	5,2	-4,3	12,1
Fase T	23,2	41,3	5,7	47,7

Una vez obtenidos los valores de intensidad de cada fase se procede a calcular el valor de la intensidad total del filtro armónico a través de la siguiente ecuación

$$I_{total\ filtro\ activo} = \sqrt{I_{fase\ R}^2 + I_{fase\ S}^2 + I_{fase\ T}^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 5.5)$$

$$I_{total\ filtro\ activo} = \sqrt{15.3^2 + 12.1^2 + 47.7^2} = 51,5 \text{ [A]}$$

Según el resultado de la ecuación N°5.5 se puede determinar que el filtro armónico activo debe ser capaz de compensar al menos 51,5 [A], sin embargo, por seguridad se puede agregar un margen adicional de 10 % o 15 % lo que daría como mínimo un filtro armónico activo de 60 [A].

A partir de los resultados obtenidos se propone la instalación de un filtro armónico activo de 4 hilos (3F+N), con conexión en paralelo ya que el circuito posee neutro y este tiene altos niveles de corriente, este diseño permite una compensación efectiva tanto en las tres fases como en el neutro.

5.2.3. Modelo de filtro armónico activo propuesto

A partir de los resultados del cálculo para el dimensionamiento del filtro armónico activo se realiza la propuesta de instalación de un filtro armónico htqf-41- 0.4/60 p, 400v, 60a, 4 hilos el cual cuenta con las siguientes características:

- Conexión: 4 hilos
- Capacidad de compensación: 60 [A]
- Rango de armónico: 2nd a 25th
- Grado de protección: IP 44
- Gabinete exterior

Los filtros activos de la serie AHF también conocidos como “compensadores activos de armónicos” tiene la función de reducir los armónicos de corriente, compensar la energía reactiva y mejorar el factor de potencia. La figura N°5.1 muestra el modelo del filtro seleccionado.

Figura N°5.1 filtro armónico htqf-4l- 0.4/60 p, 400v, 60a, 4 hilos.



Fuente: Magnotek (2024)

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El presente análisis de la calidad de la energía tuvo como objetivo principal evaluar las variables eléctricas de la empresa Sattel Chile Ltda., y como estas podrían estar afectando la estabilidad del sistema eléctrico, lo que puede derivar en posibles daños a los equipos y costos operacionales.

La recopilación de los datos inició con la instalación de un registrador marca Fluke modelo 1735 en el tablero general, el cual registró 4319 datos durante 7 días seguidos correspondientes a la semana del 09 al 16 de septiembre de 2024, se evaluó el comportamiento de variables eléctricas como voltaje, corriente, frecuencia, distorsión armónica total de corriente y voltaje, y factor de potencia, mostrando que algunas de estas variables se encontraban fuera de los límites establecidos por las normas eléctricas actuales.

La regulación de voltaje según zona geográfica es de $\pm 7,5\%$, por lo que los límites máximos y mínimos quedan establecidos respecto al voltaje nominal de 220 [V] en 236,5 [V] y 203,5 [V] respectivamente. Los resultados del análisis mostraron que la instalación eléctrica presenta una regulación promedio entre sus fases de 226,03 [V] donde ninguno de los promedios de sus tres fases superó los límites tanto inferior como superior, además de que los valores normados superaron el 95% mínimo exigido en el tiempo, por lo que si cumple con los estándares de calidad de la NTCSSD.

Respecto a la corriente se concluyó la existencia de fases desequilibradas, debido a que el promedio RMS y el consumo en la fase T es está por encima de la fase R y fase T juntas por casi 3,5 veces, aunque los niveles de corriente no son altos se puede apreciar una clara diferencia entre las fases mencionadas. Además, se visualizó un alto nivel de corriente circulando por el conductor neutro lo que puede estar generado por una alta presencia de armónicos, cargas desequilibradas o un deficiente sistema de protección de malla a tierra.

Respecto a la frecuencia se estableció que el sistema eléctrico está operando de manera estable mostrando como resultado un promedio de 50 Hz y que además todos los valores registrados están dentro de los límites establecidos lo que asegura un suministro óptimo.

Respecto a la distorsión armónica total de voltaje, la NTCSSD señala como límite máximo de distorsión un 8 %, el análisis de este variable arrojó un promedio de 3,77 % entre las tres fases, además que casi el 100 % de los valores registrados en el tiempo están dentro de este límite por lo que la THD_V cumple con la normativa establecida.

Respecto a la distorsión armónica total de corriente se concluyó que todas las fases están por sobre el límite máximo del 20 % establecido por la NTCSSD donde la fase T es la que destaca por su alto índice con un 43,56 %, el promedio de THD_I de las tres fases es de un 28,88 %. Además, los valores medidos en el tiempo están muy por debajo del 95 % mínimo exigido con solo un 54,26 % donde se destaca de manera preocupante la fase T con solo alrededor de un 2 %. Además, se encontró un alto nivel de THD_I en el conductor neutro lo que implica sobrecargas en el conductor, pérdidas de energía y posibles daños a equipos.

Respecto al factor de potencia la NTCSSD señala como límite mínimo un 0,93 inductivo y que los valores medidos en el tiempo sean de al menos un 98 %, bajo esta exigencia se determinó que ninguna de las tres fases cumple con el mínimo exigido encontrándose valores muy por debajo de los límites señalados, la fase S es la más afectada con apenas 0,24 y ningún valor por sobre 0,93, el promedio total de factor de potencia de las 3 fases es solo 0,53, Además los valores medidos en el tiempo no cumplen lo establecido ya que solo representa un 15,2 % lo que está muy alejado del 98 % exigido. Esta variable eléctrica está completamente fuera de norma por lo que se ve afectado en la inestabilidad en el sistema, pérdidas de energía, sobrecargas de equipos y penalizaciones económicas.

Se informó que la instalación cuenta con un sistema de protección de malla a tierra insuficiente el que consta solo de una barra Copperweld lo que podría estar afectando en

parámetros eléctricos anormales detectados, como son el desequilibrio de fases respecto a la corriente, altos niveles de corriente por el neutro, bajo nivel de factor de potencia y distorsión armónica total de corriente.

Finalmente se puede concluir que las variables eléctricas entregadas por la compañía eléctrica como son el voltaje y la frecuencia, si cumplen con la calidad de la energía establecida por la normativa, mientras que las variables correspondientes al uso y condiciones por parte del cliente presentan valores fuera de los rangos establecidos. En base a toda la información recopilada y analizada se estructura un plan de mejoramiento para neutralizar las variables anormales.

El primer lugar se propone la medición y diseño de un sistema de protección de malla a tierra que cumpla con las medidas necesarias para la seguridad de equipos y personas, además de contribuir en la disminución del paso de corriente por el neutro.

En segundo lugar, se propone la instalación de un filtro armónico activo de 4 hilos (3F+N) con un límite mínimo calculado de compensación de 60 [A], para corregir los problemas relacionados con armónicos, desequilibrio de corriente y factor de potencia.

Debido a que el registro de datos solo contempló distorsión armónica total de voltaje y corriente y no sobre frecuencias armónicas individuales, el filtro activo puede filtrar armónicos en un rango amplio de frecuencias y se adapta a condiciones variables en el sistema mientras que el filtro armónico pasivo limita su acción a los armónicos específicos y además no puede compensar fluctuaciones dinámicas o problemas de desequilibrio. Como desventaja el filtro armónico activo es más complejo, requiere sistemas electrónicos y mantenimiento más avanzado y un mayor costo inicial que un filtro armónico pasivo, pero a cambio compensa con mayor flexibilidad y eficiencia.

Se concluye de forma general que el sistema eléctrico de la empresa Sattel Chile Ltda., presenta problemas debido al uso propio de la energía, y no por la calidad de la energía entregada por la compañía eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

- Acquatella, N. (21 noviembre 2018). Caídas de tensión (SAGs): el más importante de todos los problemas de calidad de energía. Técnica Fase S.A Recuperado de <http://www.tecnicafase.com/blog/ortea/caidas-de-tension-sags-el-mas-importante-de-todos-los-problemas-de-calidad-de-energia/>
- Ccoa, C. (2023). Armónicos en Redes Eléctricas. [Guía de armónicos para personas que estudian electricidad entre otros]. Recuperado de <https://www.studocu.com/pe/document/servicio-nacional-de-capitacion-para-la-industria-de-la-construccion/seguridad-salud-en-el-trabajo/armonicos-en-redes-electricas-convertido/38181020#>
- Circuitor. (9 junio 2022). Funcionamiento real de un filtro de armónicos activo. Web Recuperado de <https://circuitor.com/articulos/funcionamiento-real-de-un-filtro-de-armonicos-activo/>
- Coluccio Leskow, E. (15 julio de 2021). Corriente eléctrica. Enciclopedia Concepto. Recuperado el 18 de octubre de 2024 de <https://concepto.de/corriente-electrica/>.
- EDP Energía. (12 junio 2022). Voltaje o tensión eléctrica: Qué es, tipos y como medirlo. Web Recuperado de <https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/voltaje-electrico/>
- Electrotecnia. (16 enero de 2021). Triangulo de potencias. Facebook Recuperado de https://web.facebook.com/ElectrotecniaLatam/posts/triangulo-de-potencias/2921278141425252/?_rdc=1&_rdr
- Imagina Energía. (2022). Corto circuito. Web Recuperado de <https://imaginaenergia.com/glosario/cortocircuito/#:~:text=Un%20cortocircuito%20ocurre%20cuando%20hay,incluso%20dar%20lugar%20a%20incendios.>
- Mazur, G.A, (2024). ¿Qué es la frecuencia eléctrica? American Technical Publishers Recuperado de <https://www.fluke.com/es-cl/informacion/blog/electrica/que-es-la-frecuencia.>

Reguladores. (1 de noviembre de 2024). Filtro pasivo de armónicos: ¿qué son y por qué son importantes? Web Recuperado de <https://www.reguladores.com.mx/blog/filtro-pasivo-armonicos/>

Risoul España. (05 febrero de 2021). ¿Qué es el factor de potencia y en que me beneficia? Recuperado de <https://www.risoul.com.mx/blog/que-es-el-factor-de-potencia-y-en-que-me-beneficia>

Tecsa. (02 septiembre 2022). ¿Para qué sirve un filtro de armónicos? Web Recuperado de <https://www.tecsagro.com.mx/blog/filtro-de-armonicos/>

Vásquez, R. (2 diciembre de 2024). Filtrado de Armónicos ¿Cómo decidir entre la opción de filtro activo, compensador activo o filtro híbrido? Revista Electro Industria Recuperado de <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=121#:~:text=El%20filtro%20h%C3%ADbrido%20es%20una,que%20la%20pura%20soluci%C3%B3n%20activa.>

ANEXOS

Anexo N°1: Máquinas utilizadas en taller Sattel Chile Ltda.

