



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

**FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA**

**“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO EN
UNA PALA ELÉCTRICA P&H 4100 XPC A.C.”**

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

Profesor Guía: Juan Astorga Gómez

Jhon Javier Córdova Flores

Copiapó, Chile 2025.



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

**FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA**

**“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL SUMINISTRO ENERGÉTICO EN
UNA PALA ELÉCTRICA P&H 4100 XPC A.C.”**

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

Profesor Guía: Juan Astorga Gómez

Jhon Javier Córdova Flores

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mi más profundo agradecimiento a quienes generosamente compartieron sus conocimientos y recursos para llevar a cabo esta investigación. Agradezco profundamente a mi familia y pareja por su constante apoyo incondicional y creer siempre en mí.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
INDICE DE CONTENIDO	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
INDICE DE TABLAS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
1. MARCO INTRODUCTORIO.....	1
1.1. Síntesis del proyecto	1
1.2. Marco del proyecto	2
1.3. Objetivos y alcances.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances del proyecto	4
1.5. Descripción del caso de estudio	5
1.6. Metodología.....	6
1.6.1. Equipo analizador de la calidad de energía.....	8
2. MARCO TEORICO.....	13
2.1. Aspectos técnicos de la calidad de servicio.....	13
2.2. Norma técnica de calidad de energía en sistemas de distribución	14
2.3. Definiciones técnicas	15
2.3.1. Regulación de voltaje.....	15
2.3.2. Armónicos de red.....	17
2.3.3. Distorsión armónica de corriente	20
2.3.4. Factor de potencia.....	23
2.4. Pala eléctrica 4100 XPC A.C.	25
3. MARCO DE DESARROLLO.....	26
3.1. Resultados y análisis de las mediciones	26
3.2. Análisis de la regulación de tensión	27
3.3. Análisis del factor de potencia	33
3.4. Análisis de armónicos de corriente	35
3.5. Análisis de armónicos de tensión	41
4. RECOMENDACIONES FINALES	42
4.1. Reducción de armónicos de corriente	42
4.2. Normalización de regulación de tensión	45
5. CONCLUSION	49
BIBLIOGRAFIA	52
ANEXO:.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Pala Eléctrica 4100 XPC, Chañaral, Chile.....	5
Figura 1.2: Power Xpert 8000 (XPM)	8
Figura 1.3: Montaje Físico Power Xpert 8000	10
Figura 1.4: Esquemáticos de Power Xpert.....	10
Figura 1.5: Puntos de Medición en Desconectador H.V. Superior.....	11
Figura 1.6: Diagrama Unilineal Pala Eléctrica 4100 XPC.....	12
Figura 2.1: Onda Sinusoidal Fundamental Distorsionada.....	18
Figura 3.1: Grafico Tensiones Generadas en Fase R.....	28
Figura 3.2: Grafico Tensiones Generadas en Fase S.....	29
Figura 3.3: Grafico Tensiones Generadas en Fase T.....	29
Figura 3.4: Desplazamiento del Factor de Potencia	34
Figura 3.5: Espectro de Fourier Línea R.....	39
Figura 3.6: Espectro de Fourier Línea S.....	40
Figura 3.7: Espectro de Fourier Línea T.....	40
Figura 4.1: Filtro de armónicos universal avanzado.....	43
Figura 4.2: Transformador de iluminación.....	44
Figura 4.3. Esquemático Transformador.....	44
Figura 5.1: Distorsión en la Onda producto de la 5 ^{ta} Armónica.....	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Descripción del Plan de Medida	7
Tabla 2.1: Límites de Regulación de Voltaje ART 3-1 Norma Técnica.....	16
Tabla 2.2: Orden de los Armónicos de Secuencia Positiva, Negativa y Cero.....	19
Tabla 2.3: Límites Distorsión Armónica de corriente en PCC.....	22
Tabla 3.1: Cantidad de Registros Recolectados.....	27
Tabla 3.2: Registros que no cumplen con Regulación en Barra R.....	30
Tabla 3.3: Registros que no cumplen con Regulación en Barra S.....	31
Tabla 3.4: Registros que no cumplen con Regulación en Barra T.....	32
Tabla 3.5: Factor de Potencia Medio Mensual.....	33
Tabla 3.6: Armónicos Máximos Fase R.....	36
Tabla 3.7: Armónicos Máximos Fase S.....	37
Tabla 3.7: Armónicos Máximos Fase T.....	38
Tabla 3.9: Armónicos Máximos de Tensión.....	41

RESUMEN

A través del registro y análisis de variables como el voltaje, el factor de potencia y la distorsión armónica de corriente, este estudio evaluó la calidad del suministro eléctrico de un equipo en la mediana minería.

Se utilizó como caso de estudio una pala eléctrica P&H modelo 4100 XPC suministrada con 7,2 kV desde una subestación móvil conectada a la red eléctrica con 13,8 kV.

Los resultados obtenidos se compararon con el capítulo N°3 de la Norma técnica de calidad de energía para sistemas de distribución determinando el cumplimiento de los estándares establecidos por lo cual se propuso la instalación de un filtro de armónicos pasivo para la reducción de armónicos de corriente y el cambio de sección del cable conductor minero que suministra energía al equipo para mejorar la regulación de tensión.

ABSTRACT

By recording and analyzing variables such as voltage, power factor and harmonic current distortion, this study evaluated the quality of the electrical supply of equipment in medium mining.

For this study, a P&H model 4100 XPC electric shovel was used, fed with 7.2 kV from a mobile substation connected to the power grid with 13.8 kV.

The results obtained were compared with Chapter 3 of the Technical Standard on Power Quality for Distribution Systems, determining compliance with the established standards and the installation of a passive harmonic filter was proposed to reduce current harmonics and change section of the mining conductor cable that supplies power to the equipment to improve voltage regulation.

1. MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Síntesis del proyecto

Este proyecto busca analizar la calidad del suministro eléctrico en una pala minera P&H 4100 XPC A.C., ubicada en una faena de mediana minería en Chañaral, Atacama, con el objetivo de identificar las posibles perturbaciones respecto a los estándares normativos establecidos y proponer correcciones para optimizar el rendimiento energético del equipo.

A través del análisis de variables como tensión, factor de potencia y distorsión armónica de corriente se espera contribuir al conocimiento sobre la calidad de la energía en la industria minera y proporcionar información útil para la toma de decisiones en la gestión de activos eléctricos y minimizar los costos asociados a fallas y paradas no programadas.

En este capítulo se dará un arco introductorio al análisis del proyecto, en el capítulo 2 se darán a conocer los conceptos y definiciones técnicas necesarias para poder entender el proyecto, en el capítulo 3 se dará el análisis y su evaluación teniendo como referencia la norma técnica de calidad de energía en sistemas de distribución, en el capítulo 4 se proponen las recomendaciones finales con respecto al análisis realizado en el capítulo anterior, y por último en el capítulo 5 se darán las conclusiones realizadas con respecto a los objetivos específicos planteados.

1.2. Marco del proyecto

La calidad de la energía eléctrica es un factor crítico para garantizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Las fluctuaciones de tensión, la presencia de armónicos y las interrupciones en el suministro pueden generar daños en los equipos, reducir la productividad y aumentar los costos de operación.

Este estudio se centra en analizar la calidad de la energía en palas mineras eléctricas, considerando los desafíos propios de las operaciones mineras en zonas remotas y los requisitos establecidos en el Decreto Supremo 327, utilizando como referencia para el desarrollo y evaluación la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución confeccionada por la Comisión Nacional de Energía (CNE).

Al evaluar los parámetros de calidad de la energía en una pala minera específica, se busca identificar las principales causas de las desviaciones respecto a los estándares normativos y proponer medidas correctivas para mejorar el desempeño energético y la confiabilidad de los equipos.

Los resultados de esta investigación contribuirán a generar conocimiento sobre la calidad de la energía en la industria minera y a promover el desarrollo de soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos asociados a la electrificación de los procesos productivos.

1.3.Objetivos y alcances

1.3.1. Objetivo general

Analizar la calidad del suministro energético en términos de regulación de tensión, factor de potencia y distorsión armónica de corriente en una pala minera P&H 4100 XPC A.C., utilizando como referencia los estándares establecidos por la Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución.

1.3.2. Objetivos específicos

- Registrar los valores eficaces de tensión, de factor de potencia y sus distorsiones armónicas individuales en las tres fases de alimentación del equipo.
- Calcular los indicadores de regulación de tensión y contenido armónico total de corriente según lo indicado la norma técnica de calidad en servicio
- Evaluar si los registros máximos de distorsiones armónicas de corriente individual y total, la regulación de tensión y el factor de potencia medio cumplen con los límites establecidos en cada fase de suministro según la norma técnica de calidad.
- Identificar las principales fuentes de perturbaciones en la calidad de la energía que afectan el funcionamiento de la pala minera.
- Proponer recomendaciones correctivas para mejorar la calidad de la energía y optimizar el desempeño del equipo.

1.4. Alcances del proyecto

Este estudio se centra en realizar un análisis a la calidad de la energía eléctrica suministrada a una pala minera P&H 4100 XPC AC en una faena minera específica. La pala tiene alrededor de 1 año de operación ya que la minera esta recién expandiendo su categoría a la gran minería.

Los resultados obtenidos permitirán determinar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma técnica de calidad de servicio en el capítulo 3 de calidad en el producto. Cabe destacar que se tomara como referencia esta norma ya que es la normativa vigente en Chile otorgada por la CNE.

Debido a que se trata de un estudio de caso, los resultados pueden no ser generalizables a otras palas mineras o faenas con características diferentes. El estudio se reserva el derecho de mencionarla por una política interna de la empresa.

Las recomendaciones presentadas en este estudio constituyen un punto de partida para futuras investigaciones y acciones de mejora. Es posible que se requieran estudios complementarios para evaluar el impacto a largo plazo de las medidas implementadas y para identificar nuevas oportunidades de optimización. La empresa mandante podrá solicitar estudios adicionales para profundizar en aspectos específicos de la calidad de la energía.

La decisión final sobre la ejecución de las acciones correctivas recae en la discreción de la empresa mandante. Se sugiere realizar un análisis de costo-beneficio que permita priorizar las acciones a implementar. Las recomendaciones contenidas en este informe se proporcionan de buena fe y se basan en la información disponible al momento de la elaboración del estudio.

1.5. Descripción del caso de estudio

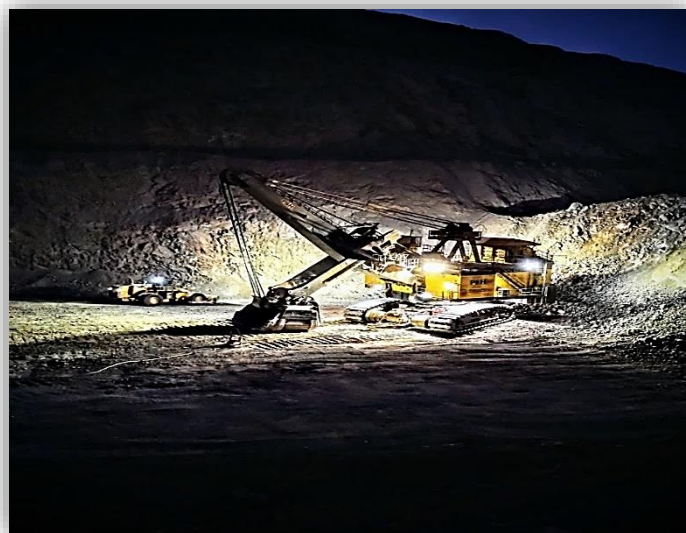
Como una de las palas eléctricas más grandes y potentes del mundo, la P&H 4100 XPC representa una inversión significativa para las empresas mineras.

Su sistema de control eléctrico de última generación requiere de un suministro eléctrico eficiente para garantizar un funcionamiento óptimo y evitar fallas prematuras.

Las fluctuaciones de voltaje y la presencia de armónicos pueden afectar el rendimiento de los motores eléctricos, los sistemas de control y los componentes electrónicos de la pala, generando costos de mantenimiento adicionales y disminuyendo la disponibilidad del equipo.

Dada la importancia de estas máquinas en los procesos de extracción y la creciente demanda de energía en la industria minera, resulta fundamental garantizar un suministro eléctrico confiable y eficiente que permita optimizar la productividad y minimizar los costos operativos.

Figura 1.1. Pala eléctrica 4100 XPC, Chañaral, Chile.



1.6. Metodología

El presente estudio se basó en la adquisición de datos eficaces de calidad de energía eléctrica en una pala minera P&H 4100 XPC AC. Para ello, se implementó el siguiente protocolo:

Selección del punto de medición: Se seleccionó el desconectador principal de baja tensión de la pala como punto de medición, permitiendo así registrar el consumo eléctrico total del equipo.

Instrumentación: Se utilizó un analizador de calidad de energía Power Xpert PXM8000 de la marca EATON integrado al sistema de monitoreo de la pala para la adquisición de datos.

Adquisición de datos: Se registraron las siguientes variables durante 7 días consecutivos, con una frecuencia de muestreo de 15 minutos, conforme a lo establecido en la norma técnica de calidad de servicio:

- Valores eficaces de voltaje de línea
- Distorsión armónica de corriente y voltaje
- Factor de Potencia

Tabla 1.1. Descripción del plan de medida.

Variable registrada	Inicio y Término medición	Lugar medición	Tiempo de muestreo
Voltaje de línea	31-08-23 al 07-09-23	Equipo Compacto de Medida	15 minutos
Factor de Potencia	31-08-23 al 07-09-23	Equipo Compacto de Medida	15 minutos
THD por fase	31-08-23 al 07-09-23	Equipo Compacto de Medida	15 minutos

Análisis de datos: Los datos obtenidos serán calculados y analizados según la norma técnica de calidad de sistemas de distribución obteniendo

- Regulación de voltaje
- Contenido armónico total

Comparación con la normativa: Los resultados obtenidos se compararon con los límites establecidos en la norma técnica de calidad energética para sistemas de distribución, específicamente en el capítulo 3 para determinar el cumplimiento de los requisitos de calidad de la energía.

Recomendaciones finales: Realizar propuestas con respecto a la evaluación del análisis desarrollado.

Conclusión: Desarrollar comentarios con respecto al alcance del objetivo general alcanzado con el logro de cada objetivo específico.

1.6.1. Equipo analizador de la calidad de energía

El medidor Eaton Power Xpert 8000 (PXM) es un dispositivo altamente avanzado diseñado para monitorear y analizar de manera exhaustiva la calidad y el consumo de energía en sistemas de distribución eléctrica.

Este equipo combina las funciones de un medidor de energía convencional con las capacidades de un analizador de calidad de la energía, ofreciendo un conjunto completo de herramientas para la gestión eficiente de la energía.

Figura 1.2. Power Xpert 8000 (PXM).



Entre sus características principales destacan:

- **Multifuncionalidad:** Realiza mediciones precisas de energía, monitorea la calidad de la alimentación y proporciona análisis detallados.
- **Conectividad:** Incluye un servidor web integrado que permite el acceso remoto a los datos a través de un navegador estándar, facilitando la supervisión y el análisis.
- **Capacidad de medición:** Ofrece una amplia gama de mediciones, incluyendo parámetros de energía activa y reactiva, armónicos, fluctuaciones de tensión, transientes, entre otros.
- **Análisis de datos:** Permite visualizar los datos de medición en forma de gráficas, tendencias e informes, facilitando la identificación de problemas y la toma de decisiones.
- **Integración:** Se puede integrar con otros sistemas de gestión de energía, lo que permite una gestión más completa y eficiente de la energía.

Sus aplicaciones típicas:

- **Monitoreo de la calidad de la energía:** Identificación y diagnóstico de problemas de calidad de la energía que pueden afectar el funcionamiento de equipos y procesos industriales.
- **Optimización del consumo de energía:** Análisis de los patrones de consumo y detección de oportunidades para reducir los costos energéticos.
- **Protección de equipos:** Detección temprana de condiciones anormales que pueden dañar equipos eléctricos.
- **Cumplimiento normativo:** Verificación del cumplimiento de los estándares de calidad de la energía establecidos por las autoridades reguladoras.

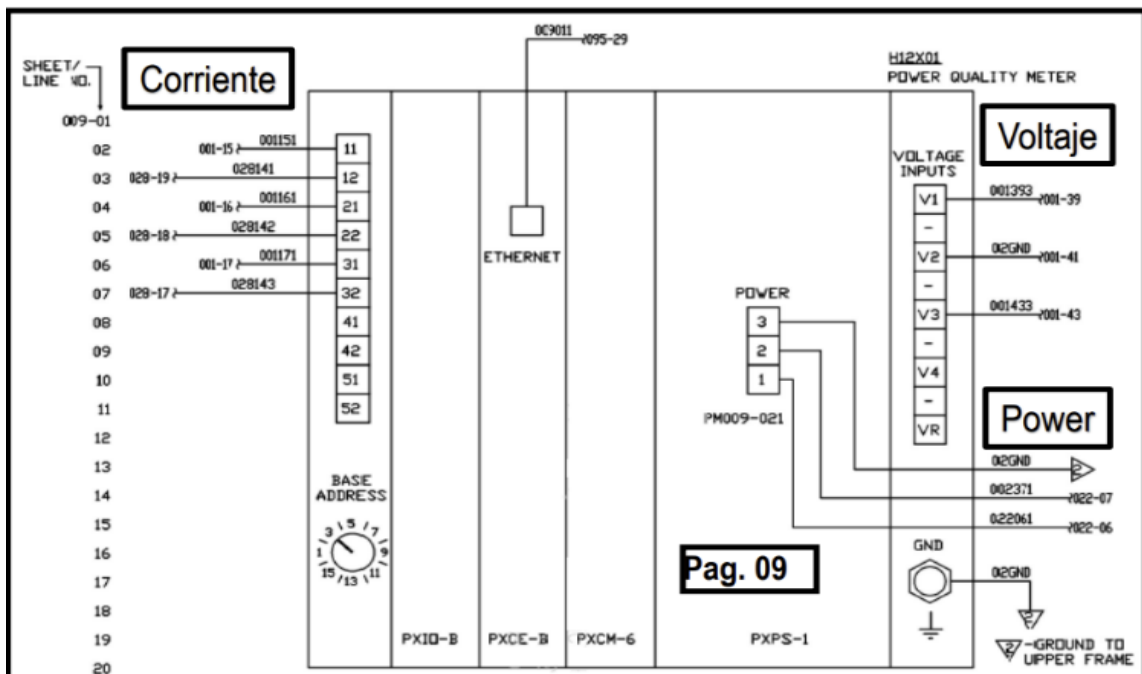
La imagen que se presenta a continuación es en donde encuentra montado físicamente el medidor de calidad de energía.

Figura 1.3. Montaje Físico Power Xpert 8000.



El esquemático inferior muestra las señales análogas de corriente y voltaje en donde el medidor obtiene sus registros de variables.

Figura 1.4. Esquemático Power Xpert, en pala eléctrica



Este dispositivo está conectado a los siguientes puntos de medición los cuales son los transformadores de corriente y de potencial, estos elementos le otorgan entradas de señales para que el equipo pueda analizarlas y así evaluar el rendimiento energético de la pala y detectar posibles anomalías en el sistema eléctrico. A continuación, se presenta el lugar físico donde está montado

El Power Xpert 8000 se encuentra ubicado aguas abajo del desconectador superior de alta tensión del transformador principal como se mencionó anteriormente.

Figura 1.5. Puntos Medición en Desconectador H.V. Superior.

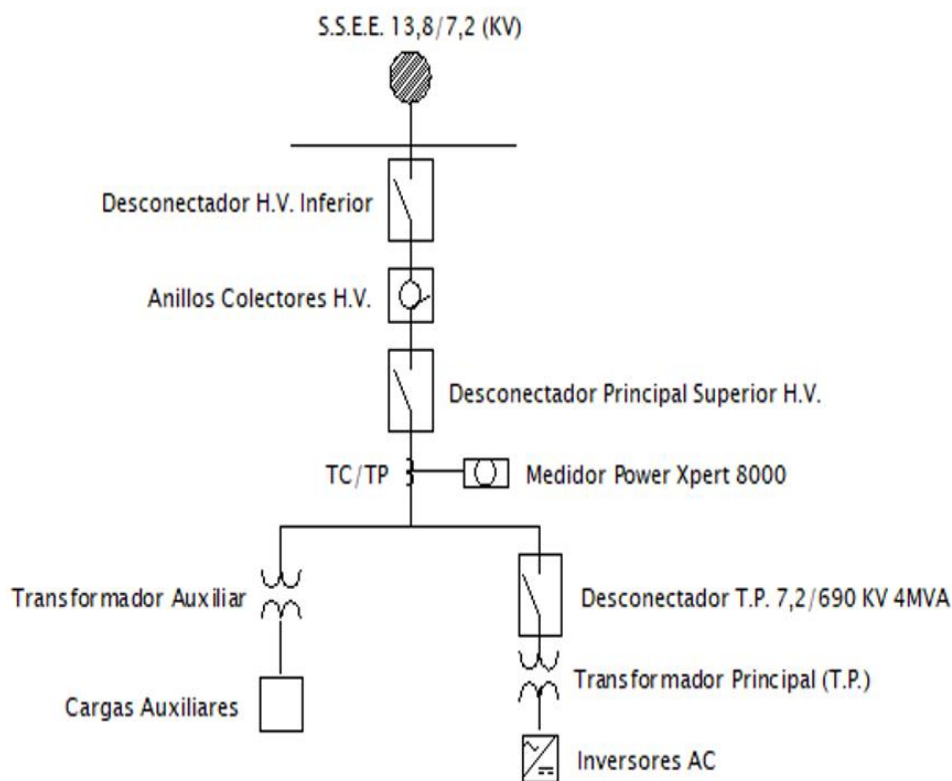


El diagrama unilineal que se presenta a continuación representa una vista simplificada del sistema de medición energética de la pala eléctrica.

En la cual se puede observar el paso de la energía eléctrica desde la subestación móvil de 13,8 KV reduciendo su tensión a 7,2 kV hasta la pala eléctrica, iniciando su recorrido a través del desconectador de alta tensión inferior en donde se enchufa el cable minero.

Los anillos colectores de alta tensión le dan la movilidad 360° al equipo, desde aquí pasa al desconectador principal de alta tensión superior quien es el encargado de aislar la tensión hacia los transformadores principal y auxiliar, encargados de suministrar una tensión de trabajo hacia las distintas cargas no lineales.

Figura 1.6. Diagrama Unilineal Pala Eléctrica 4100 XPC.



2. MARCO TEORICO

2.1. Aspectos técnicos de la calidad de servicio

La responsabilidad del suministro adecuado de la onda de tensión y el control de las interrupciones en el suministro de energía a los consumidores recae en la empresa distribuidora de energía eléctrica en el área de concesión donde se ubica la carga del usuario.

La calidad de la energía eléctrica es un factor crítico en el desempeño y la vida útil de los equipos eléctricos, especialmente en entornos industriales como las minas.

Para comprender a cabalidad los desafíos que enfrenta una pala eléctrica minera, es fundamental conocer los conceptos de regulación de voltaje, distorsión armónica de corriente y factor de potencia. Estos parámetros influyen directamente en la eficiencia, la fiabilidad y la seguridad del suministro eléctrico.

En este capítulo primero se analiza algunas definiciones técnicas relacionadas como la regulación de voltaje, distorsión armónica y factor de potencia.

2.2. Norma técnica de calidad de energía en sistemas de distribución

La Norma Técnica de Calidad de Energía en Sistemas de Distribución es un conjunto de reglas y estándares establecidos por las autoridades reguladoras del sector eléctrico. Su objetivo principal es garantizar que la energía eléctrica que llega a los consumidores finales cumpla con ciertos requisitos de calidad, asegurando así un servicio confiable y eficiente.

Esta norma es fundamental por varias razones:

- Protección de equipos: Una mala calidad de energía puede dañar equipos eléctricos y electrónicos, desde electrodomésticos hasta sistemas industriales complejos.
- Continuidad del servicio: La norma establece límites para interrupciones del servicio, fluctuaciones de voltaje y otros problemas que pueden afectar la continuidad del suministro eléctrico.

Los alcances son los siguientes y solamente se usará como referencia para el análisis de este proyecto, cito “La NT será aplicable a las Empresas Distribuidoras, los Clientes y los Usuarios de la Red de Distribución, sean estos consumidores con o sin Equipamiento de Generación, en adelante “EG”, o Pequeños Medios de Generación Distribuidos, en adelante “PMGD”. Sin perjuicio de lo anterior, las exigencias establecidas en la presente NT no serán aplicables en los siguientes casos:

1. Sistemas de Distribución pertenecientes a sistemas con capacidad instalada de generación igual o inferior a 1.500 kW.
2. Sistemas eléctricos pertenecientes a Clientes o Usuarios finales. En el evento que dichos sistemas originen perturbaciones al sistema eléctrico al cual se encuentren conectados.
3. En caso que se decreten medidas para evitar, reducir o administrar déficit de generación en sistemas eléctricos cuya capacidad instalada de generación sea superior a 1.500 kW, en los términos del artículo 163° de la Ley o el que lo reemplace.

2.3. Definiciones técnicas

En este apartado se definen los conceptos técnicos involucrados y utilizados en este trabajo para medir la calidad energética de las variables de tensión utilizando indicadores que evalúan el estado de la variable de interés frente a los límites establecidos por la norma técnica de calidad energética.

2.3.1. Regulación de voltaje

La regulación de voltaje se refiere a la capacidad de un sistema eléctrico para mantener el voltaje dentro de un rango predefinido y aceptable, a pesar de las variaciones en la carga y las condiciones del sistema. Un voltaje estable es esencial para el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos.

Importancia:

- Evita sobrevoltajes que pueden dañar los equipos.
- Previene subtensiones que pueden reducir la eficiencia y el rendimiento.
- Garantiza una vida útil más larga de los equipos.

Métodos de regulación:

- Reguladores de voltaje: Dispositivos electrónicos o electromecánicos que ajustan automáticamente el voltaje de salida.
- Transformadores: Modifican el voltaje mediante la relación de vueltas entre el primario y el secundario.
- Sistemas de control de tensión: Emplean algoritmos y sensores para ajustar la generación o la demanda de potencia.

Para evaluar la regulación de tensión en un punto de la Red de Distribución se utilizará el siguiente indicador proporcionado por la norma técnica.

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

Donde:

ΔV_k : Regulación de Tensión en el punto k, en [%].

V_k : Tensión de suministro en el punto k, determinada como el promedio de las medidas en un intervalo de 15 minutos, en [kV].

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

Su metodología de registro es según la norma técnica: “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:”

Tabla 2.1. Límites de regulación de voltaje ART 3-1 norma técnica.

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

2.3.2. Armónicos de red

Los armónicos de corriente se producen cuando la forma de onda de la corriente eléctrica se desvía de la onda sinusoidal ideal, debido a la presencia de componentes de frecuencia múltiple.

Los armónicos son corrientes de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz).

Causas:

- Cargas no lineales como inversores y variadores de frecuencia.
- Equipos electrónicos de potencia.
- Efectos:
- Pérdidas adicionales en los conductores y equipos eléctricos.
- Calentamiento excesivo de los equipos.
- Interferencia en las comunicaciones.
- Reducción de la vida útil de los equipos.

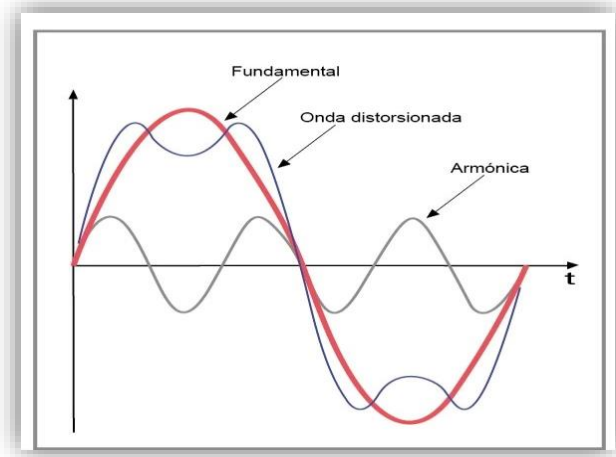
Su medición es a través de la Distorsión armónica total (THD) la cual indica el porcentaje de contenido armónico en relación con la fundamental.

La norma UNE-EN-60150:1996 define la tensión armónica como “una tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación del sistema”.

Los armónicos absorben corrientes no lineales, cuya amplitud y frecuencia dependen de la deformación de la onda de corriente cuando se aplica una tensión sinusoidal. Estas cargas no lineales son generalmente periódicas.

La deformación de la onda sinusoidal, conocida también como, distorsión armónica, toma formas características según el orden de la armónica. Por ejemplo, en la figura 2 se puede apreciar la deformación de las ondas (respecto de la frecuencia fundamental).

Figura 2.1. Onda sinusoidal fundamental distorsionada



Los armónicos se clasifican según tres parámetros: orden, frecuencia y secuencia. Cada uno de estos parámetros define la función de los armónicos presentes en la red eléctrica.

El orden indica con qué frecuencia el armónico es mayor que la frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto armónico para Chile sería una señal sinusoidal con una frecuencia de 250 Hz (ya que en Chile la frecuencia fundamental es 50 Hz), y esta frecuencia armónica es cinco veces mayor que la frecuencia fundamental.

En la industria es común la presencia de armónicos de orden impar, producto del uso masivo de sistemas electrónica de potencia, mientras que los componentes de orden par aparecen solo cuando existe asimetría en la red o por la introducción de componentes de corriente continua de las cargas permanentes.

En un sistema trifásico con neutro distribuido a cuatro fases alimentado con cargas no lineales, existen corrientes de orden armónico positivo, negativo y cero, mientras que, en la distribución a tres fases, es decir con neutro no distribuido, ocurre de forma aislada, sólo se observa la presencia de corrientes armónicas con secuencia positiva y negativa.

El sistema cero crea un flujo de corriente a través del conductor neutro de la misma magnitud que las corrientes de fase, por lo que es necesario hacer coincidir la sección del conductor neutro con las fases. Los armónicos asociados a la secuencia cero se denominan “armónicos triples”, cuyo orden es múltiplo de 3, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Orden de los armónicos de secuencia positiva, negativa y cero.

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0
...
n	50n	...

2.3.3. Distorsión armónica de corriente

Es un indicador de la distorsión armónica total de corriente, respecto de la onda fundamental de frecuencia 50 Hertz, expresada en porcentaje y que considera la componente individual de las armónicas múltiplos de la fundamental.

En este trabajo, y por tratarse de un sistema de corriente alterna, sólo se consideran las armónicas impares.

Según la norma técnica calidad de servicio para sistemas de distribución capítulo N°3, artículo 3-7 Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios de Media Tensión, distorsión armónica individual se puede calcular como:

Distorsión Armónica individual de corriente (D_{Ij}):

La distorsión armónica individual de corriente es un parámetro que se utiliza para evaluar la calidad de la energía eléctrica en un sistema de distribución. En términos simples, mide la cantidad de cada componente de frecuencia armónico presente en una corriente eléctrica, en comparación con la frecuencia fundamental.

Su fórmula según la norma:

$$D_{Ij} = \frac{I_j}{I_1} \times 100$$

Donde:

D_{Ij} : Distorsión Armónica individual de corriente, para la j-esima en [%].

I_j : Corriente de la j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].

I_1 : Corriente de la componente fundamental de la corriente de suministro, en [A].

Distorsión de Demanda Total (TDD):

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{50} I_j^2}}{IL} \times 100$$

Donde:

TDD: Distorsión de Demanda Total, en [%].

I_j: Magnitud de la j-ésima armónica de la corriente de suministro, en [A].

IL: Corresponde al promedio de los máximos valores efectivos de la componente fundamental de la corriente de carga/inyección de un Usuario en [A], medidos en el Punto Común de Conexión correspondiente. Para el cálculo de dicho promedio, se deberá considerar el valor máximo mensual para cada uno de los últimos 12 meses.

“Para la aplicación del presente artículo, se entenderá que el Punto Común de Conexión (PCC) de un Usuario corresponde al punto de la Red de Distribución más cercano a él y donde otros Usuarios se conectan a dicha red.

En general, para Usuarios que se conecten al SD directamente a través de un transformador exclusivo para su conexión, el PCC se ubica en el lado de alta tensión de dicho transformador.

Para el caso de Usuarios que se conecten al SD a través de un transformador del cual se alimentan diversos consumos, el PCC se ubica en el lado de baja tensión de dicho transformador.

En el caso de un sólo Cliente en el extremo de una línea radial de alimentación, el PCC se establece en el extremo de la carga.”

“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 MT, medidos en el PCC y promediados en 15 minutos, deberán ser tales que la Distorsión Armónica cumpla con los siguientes límites:”

Tabla 2.3. Límites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los usuarios, expresados como porcentajes de IL

Orden de la armónica j (armónicas impares)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq j < 11$	$11 \leq j < 17$	$17 \leq j < 23$	$23 \leq j < 35$	$35 \leq j < 50$	TDD
≤ 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 - 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 - 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 - 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
<ul style="list-style-type: none"> Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares. Se deberá controlar hasta la armónica 50. I_{SC} corresponde a la máxima corriente de cortocircuito en el Punto Común de Conexión (PCC). 						

La tabla establece los límites máximos permitidos para la distorsión armónica de corriente en el punto de conexión común (PCC) de los usuarios. Estos límites se expresan como un porcentaje de la corriente de demanda máxima (IL) del usuario, y varían en función de la relación entre la corriente de cortocircuito (ISC) y la corriente de demanda máxima (IL).

Elementos clave:

- Orden de las armónicas: La tabla suele indicar los límites para diferentes órdenes de armónicas (3, 5, 7, etc.).
- Relación ISC/IL: La relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de demanda máxima es un factor determinante en los límites permitidos. A mayor relación, mayores pueden ser los límites.
- Porcentaje de IL: Los límites se expresan como un porcentaje de la corriente de demanda máxima (IL).

2.3.4. Factor de potencia

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa (que realiza trabajo útil) y la potencia aparente (la potencia total suministrada). Un factor de potencia bajo indica que una parte significativa de la potencia suministrada se pierde en forma de calor.

Importancia:

- Un factor de potencia bajo aumenta las pérdidas en las líneas de transmisión y distribución.
- Puede provocar sobrecalentamiento en los equipos eléctricos.
- Aumenta los costos de energía.

Mejoramiento:

- Compensación de la energía reactiva mediante el uso de bancos de capacitores.
- Corrección del factor de potencia en los equipos.

Según la norma técnica ART 3-9 el valor del factor de potencia instantáneo se determinará utilizando la siguiente expresión:

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

Donde:

FP_{inst}: Factor de Potencia en intervalo de 15 minutos.

EQ_{inst}: Energía reactiva en intervalo de 15 minutos, en [kVAh].

EP_{inst}: Energía activa en intervalo de 15 minutos, en [kWh]

Según el ART 3-9, “En función de los resultados obtenidos para el Factor de Potencia instantáneo, se determinará el valor de Factor de Potencia medio mensual, de acuerdo a la siguiente expresión:”

$$FP = \frac{\sum_{k=1}^n (FP_{inst} \times EP_{inst})_k}{\sum_{k=1}^n (EP_{inst})_k}$$

Donde:

FP: Factor de Potencia medio mensual.

n: Número de intervalos de 15 minutos durante el periodo de medición de un mes.

Los límites establecidos para el factor de potencia según la norma técnica de calidad ART 3-10 se indican a continuación.

$$0,95_{cap} < FP > 0,93_{ind}$$

Esta expresión, presente en las normas de calidad de energía para sistemas de distribución, establece un rango aceptable para el factor de potencia en un sistema eléctrico. Este factor es una medida de la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica y se expresa como un valor entre 0 y 1.

- 0,95_{cap}: Representa el límite superior del factor de potencia aceptable bajo condiciones de carga máxima (CAP). Es decir, el factor no debe superar 0,95 cuando el sistema está operando a su máxima capacidad.
- 0,93_{ind}: Indica el límite inferior del factor de potencia aceptable en condiciones industriales (IND). Es decir, el factor no debe ser menor a 0,93 en instalaciones industriales.

2.4. Pala eléctrica 4100 XPC A.C.

La pala eléctrica 4100XPC es una máquina de gran envergadura, diseñada específicamente para la industria minera. Pertenece a la categoría de palas de cable de clase ultra, lo que significa que es una de las más grandes y potentes de su tipo en el mundo y su funcionamiento puede ser hidráulica, diésel y eléctrica. Dentro de las eléctricas se dividen en 2 grandes grupos, las de corriente alterna (CA) y las de corriente continua (CC).

Esta pala incorpora tecnología de punta que optimiza su funcionamiento y eficiencia. Sistemas de control avanzados, motores eléctricos de alta eficiencia y componentes electrónicos sofisticados permiten un control preciso y una mayor productividad.

Una pala minera utiliza varios motores de CA para accionar los diferentes movimientos del equipo requeridos para excavar, girar, vaciar y propulsar. La operación confiable de estos movimientos es clave para asegurar una alta disponibilidad del equipo en el proceso de carguío. La pala del caso de estudio es de corriente alterna.

El primer dispositivo de aislación y conexión eléctrica de la pala es el interruptor de desconexión neumático con puesta a tierra que se encuentra en la parte posterior del chasis inferior de la pala. Este conjunto recibe la alimentación de alto voltaje de corriente alterna proveniente de un cable de alimentación proveniente de una subestación conectada a la red de distribución de la mina, en este caso de 13,8 kV a 7,2 kV como lo muestra la siguiente imagen.

La cabina de alto voltaje proporciona la conexión y aislación eléctrica en el chasis superior giratorio, un transformador principal tipo seco, enfriado por aire, conexión delta a estrella reduce la alimentación de alto voltaje del cable cola 7,2 kV a 600 VCA.

3. MARCO DE DESARROLLO

3.1. Resultados y análisis de las mediciones

En este capítulo se muestran los resultados de las mediciones de regulación de voltaje, distorsión armónica de corriente y factor de potencia en la carga de prueba correspondiente a una empresa de la mediana minería, registrados durante un período continuo de 7 días de medición con muestreo cada 15 minutos.

Los resultados son comparados con las normas técnicas vigentes y se analizan para detectar posibles causas al comportamiento de la variabilidad de éstos.

Cabe destacar que el análisis de la variabilidad del voltaje y la evaluación de la distorsión armónica son de mucho interés en este análisis, puesto que las variables voltaje y corriente son de responsabilidad de la empresa suministradora de energía eléctrica.

El análisis permite medir calidad de suministro de la energía eléctrica hacia la carga y establecer ciertas directrices que aporten información sobre medidas que vayan en pos del mejoramiento continuo del proceso de suministro de energía eléctrica.

En resumen, resolver problemas de armónicos y regulación de voltaje requiere un enfoque integral que combine análisis técnico, medidas correctivas y cumplimiento normativo. Al abordar estos problemas de manera efectiva, se podrá mejorar la eficiencia energética, prolongando la vida útil del equipo y garantizando un funcionamiento óptimo y seguro.

3.2. Análisis de la regulación de tensión

Según la Tabla 2.1. el cliente de la carga es un usuario con una densidad de carga muy baja y de media tensión, obteniendo un límite del +/- 8 % en su valor nominal.

Por lo que el valor mínimo de tensión a evaluar en cada registro será de 6,624 volts y como tensión máxima de referencia será de 7,776 volts.

Los valores eficaces de tensión en las 3 líneas fueron recolectados y promediados por el equipo medidor obteniendo un valor medio en intervalos de 15 minutos para fase.

En total fueron reunidos 766 registros en una semana de medición en tiempo real con un voltaje en barra de 7,200 volts nominales.

Dada la gran cantidad de registros se utiliza el software de Excel para una mayor rapidez en la comparación de los registros que estén fuera de la normativa.

En la Tabla 3.1. se muestra la cantidad de datos dentro y fuera de rango expresado en cantidad y porcentaje:

Tabla 3.1. Cantidad de registros recolectados.

Fase o Línea	R	S	T
Cantidad de Registros fuera de norma	28	35	48
Porcentaje de registros fuera de norma	3,66%	4,57%	6,26%
Porcentaje de registros dentro de norma	96,34%	95,43%	93,74%

Por lo que, según normativa, los datos registrados en la línea R y S están dentro de la norma, correspondiendo al 96,34% y 95,43% de los registros, estos están sobre el 95% que exige la normativa aplicada, sin embargo, en la línea T hay un porcentaje del 93,74% lo que indica que están fuera del 95% de los registros como mínimo exigido, cabe destacar que los datos están bajo el 8% del voltaje permitido.

A continuación, se presentan los gráficos generados correspondiente a la medición de tensión en línea para las distintas fases realizadas en el equipo durante 7 días corridos, además se presentan tablas con el registro de las variables que no cumplen con la normativa y su fecha de registro.

Figura 3.1. Gráfico de tensiones en Barra R.

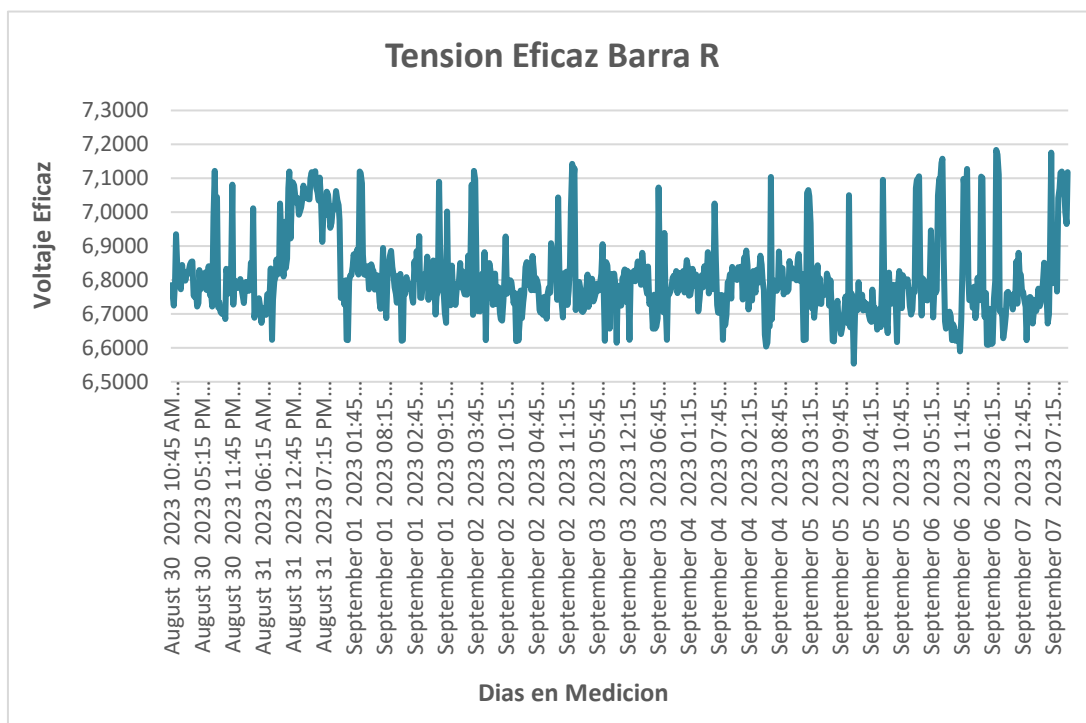


Figura 3.2. Gráfico de tensiones en Barra S

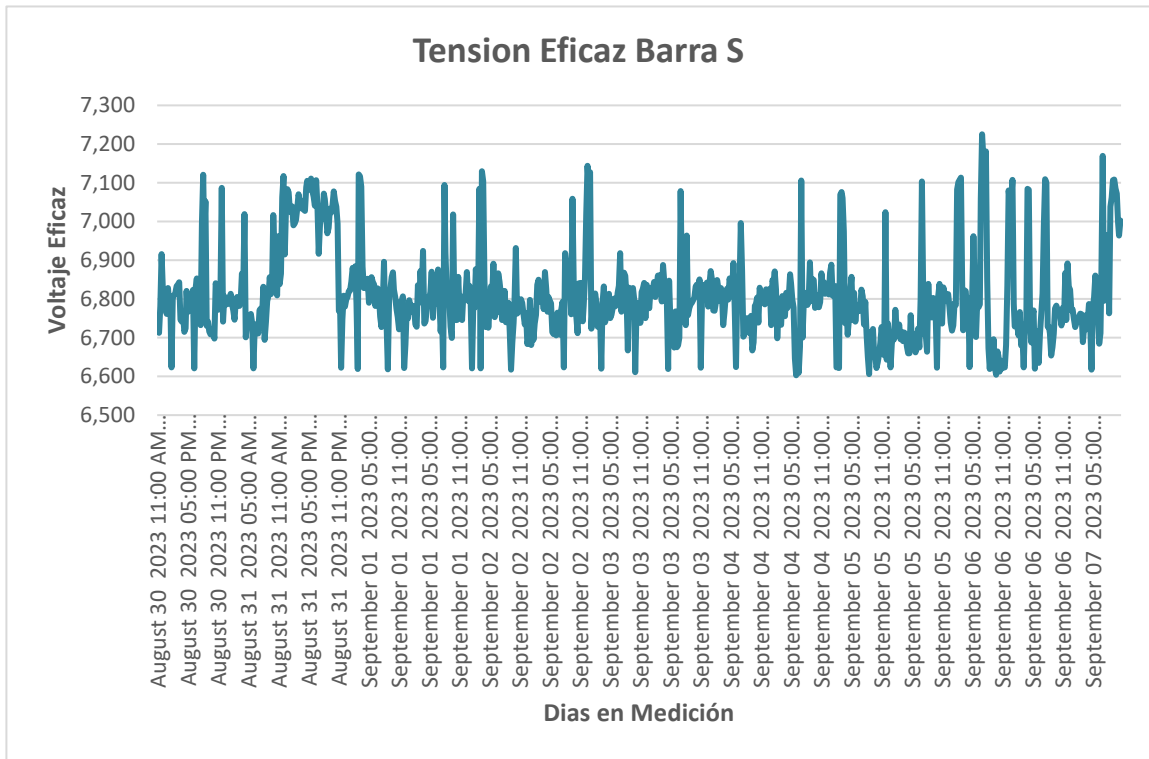
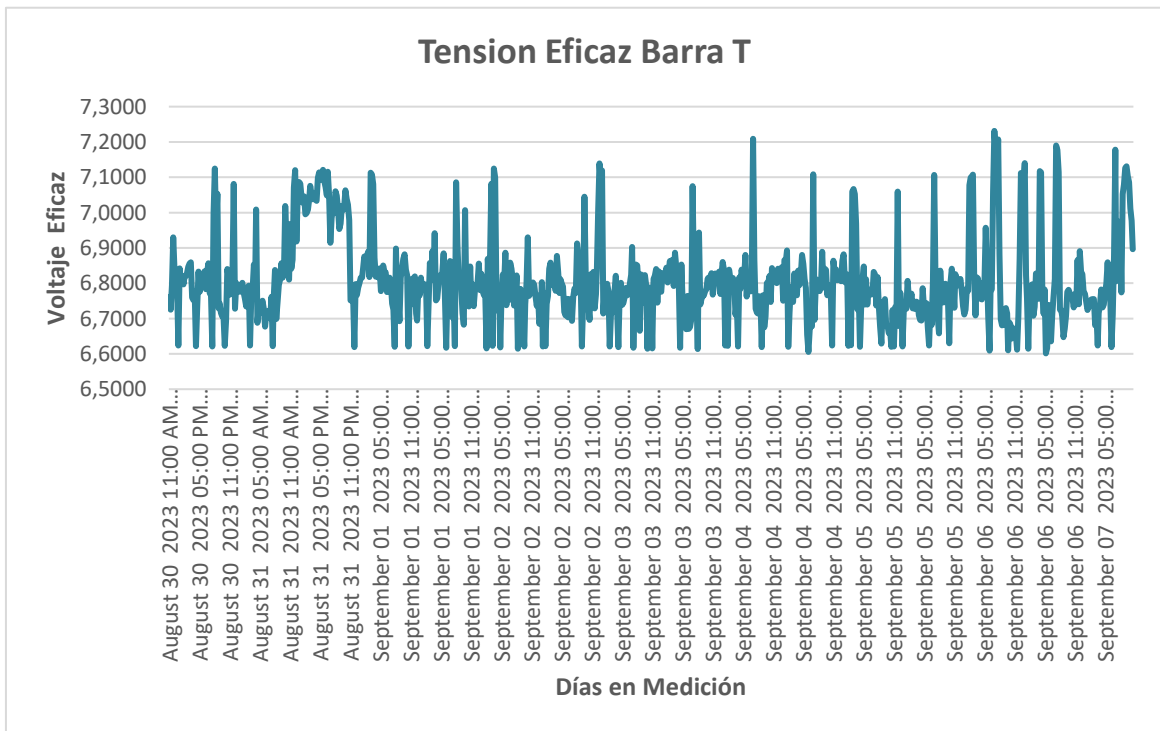


Figura 3.3. Gráfico de tensiones en Barra T.



A continuación, se presentan tablas con la regulación de tensión inferior al 8%:

Tabla 3.2 Registros que no cumplen con la regulación en Barra R.

Fecha de Registro	Tensión Registrada (KV)
31 Agosto 2023 08:15 AM UTC	6621,8
01 Septiembre 2023 12:15 AM UTC	6623,6
01 Septiembre 2023 12:30 AM UTC	6622,5
01 Septiembre 2023 12:00 PM UTC	6620,5
01 Septiembre 2023 12:15 PM UTC	6622,5
02 Septiembre 2023 06:00 AM UTC	6622,8
02 Septiembre 2023 12:30 PM UTC	6619,5
02 Septiembre 2023 01:00 PM UTC	6621,4
03 Septiembre 2023 07:30 AM UTC	6620,5
03 Septiembre 2023 10:00 AM UTC	6614,8
03 Septiembre 2023 08:45 PM UTC	6623,8
04 Septiembre 2023 08:45 AM UTC	6623,5
04 Septiembre 2023 06:00 PM UTC	6603,9
04 Septiembre 2023 06:15 PM UTC	6614,8
05 Septiembre 2023 02:00 AM UTC	6623,0
05 Septiembre 2023 08:15 AM UTC	6620,5
05 Septiembre 2023 08:30 AM UTC	6618,6
05 Septiembre 2023 12:45 PM UTC	6553,5
05 Septiembre 2023 10:00 PM UTC	6617,6
06 Septiembre 2023 09:45 AM UTC	6622,8
06 Septiembre 2023 10:30 AM UTC	6620,5
06 Septiembre 2023 10:45 AM UTC	6621,5
06 Septiembre 2023 11:30 AM UTC	6590,1
06 Septiembre 2023 05:15 PM UTC	6609,6
06 Septiembre 2023 05:30 PM UTC	6608,9
06 Septiembre 2023 06:15 PM UTC	6611,8
06 Septiembre 2023 06:30 PM UTC	6614,7
07 Septiembre 2023 01:45 AM UTC	6623,1

Tabla 3.3 Registros que no cumplen con la regulación en Barra S.

Fecha de Registro	Tensión Registrada (KV)
30 Agosto 2023 01:45 PM UTC	6623,0
30 Agosto 2023 06:15 PM UTC	6620,5
31 Agosto 2023 06:00 AM UTC	6620,5
31 Agosto 2023 11:30 PM UTC	6622,5
01 Septiembre 2023 02:45 AM UTC	6619,3
01 Septiembre 2023 08:45 AM UTC	6618,5
01 Septiembre 2023 12:00 PM UTC	6621,5
01 Septiembre 2023 07:45 PM UTC	6623,5
02 Septiembre 2023 01:30 AM UTC	6620,5
02 Septiembre 2023 03:15 AM UTC	6621,0
02 Septiembre 2023 09:15 AM UTC	6617,8
03 Septiembre 2023 07:45 PM UTC	6623,5
03 Septiembre 2023 03:15 AM UTC	6620,3
03 Septiembre 2023 10:00 AM UTC	6610,7
03 Septiembre 2023 04:30 PM UTC	6619,1
03 Septiembre 2023 11:00 PM UTC	6622,3
04 Septiembre 2023 06:00 AM UTC	6623,8
04 Septiembre 2023 06:00 PM UTC	6602,9
04 Septiembre 2023 06:30 PM UTC	6609,6
05 Septiembre 2023 02:00 AM UTC	6623,3
05 Septiembre 2023 02:30 AM UTC	6622,0
05 Septiembre 2023 08:30 AM UTC	6606,3
05 Septiembre 2023 10:00 AM UTC	6621,9
05 Septiembre 2023 12:45 PM UTC	6623,3
05 Septiembre 2023 10:00 PM UTC	6622,3
06 Septiembre 2023 04:30 AM UTC	6623,9
06 Septiembre 2023 08:30 AM UTC	6618,9
06 Septiembre 2023 09:30 AM UTC	6621,6
06 Septiembre 2023 09:45 AM UTC	6603,9
06 Septiembre 2023 10:30 AM UTC	6612,9
06 Septiembre 2023 11:00 AM UTC	6620,5
06 Septiembre 2023 11:30 AM UTC	6623,6
06 Septiembre 2023 03:15 PM UTC	6623,5
06 Septiembre 2023 05:30 PM UTC	6619,8
07 Septiembre 2023 04:45 AM UTC	6617,5

Tabla 3.3 Registros que no cumplen con la regulación en Barra T.

Fecha de Registro	Tensión Registrada (KV)
30 Agosto 2023 12:45 PM UTC	6623,6
30 Agosto 2023 04:15 PM UTC	6622,1
30 Agosto 2023 07:30 PM UTC	6620,5
30 Agosto 2023 10:00 PM UTC	6622,7
31 Agosto 2023 03:00 AM UTC	6623,9
31 Agosto 2023 07:30 AM UTC	6621,8
31 Agosto 2023 11:45 PM UTC	6618,9
01 Septiembre 2023 07:45 AM UTC	6619,6
01 Septiembre 2023 10:30 AM UTC	6620,5
01 Septiembre 2023 02:15 PM UTC	6621,5
01 Septiembre 2023 06:00 PM UTC	6617,7
01 Septiembre 2023 07:45 PM UTC	6622,2
02 Septiembre 2023 02:00 AM UTC	6615,9
02 Septiembre 2023 03:15 AM UTC	6623,2
02 Septiembre 2023 04:45 AM UTC	6618,2
02 Septiembre 2023 08:15 AM UTC	6614,8
02 Septiembre 2023 09:30 AM UTC	6620,8
02 Septiembre 2023 01:15 PM UTC	6621,2
02 Septiembre 2023 01:45 PM UTC	6622,8
02 Septiembre 2023 09:00 PM UTC	6621,3
03 Septiembre 2023 02:30 AM UTC	6621,2
03 Septiembre 2023 04:15 AM UTC	6618,9
03 Septiembre 2023 07:15 AM UTC	6616,9
03 Septiembre 2023 10:00 AM UTC	6614,4
03 Septiembre 2023 11:00 AM UTC	6615,9
03 Septiembre 2023 04:30 PM UTC	6616,9
03 Septiembre 2023 08:00 PM UTC	6613,6
04 Septiembre 2023 01:30 AM UTC	6623,8
04 Septiembre 2023 02:00 AM UTC	6622,7
04 Septiembre 2023 04:00 AM UTC	6620,3
04 Septiembre 2023 08:45 AM UTC	6618,9
04 Septiembre 2023 02:00 PM UTC	6620,1
04 Septiembre 2023 06:00 PM UTC	6605,3
04 Septiembre 2023 10:45 PM UTC	6623,6
05 Septiembre 2023 02:00 AM UTC	6623,1
05 Septiembre 2023 04:15 AM UTC	6619,6
05 Septiembre 2023 10:30 AM UTC	6618,7
05 Septiembre 2023 11:00 AM UTC	6620,5
05 Septiembre 2023 12:45 PM UTC	6621,2
05 Septiembre 2023 06:00 PM UTC	6623,6
06 Septiembre 2023 11:30 AM UTC	6612,0
06 Septiembre 2023 01:45 PM UTC	6614,8
06 Septiembre 2023 05:15 PM UTC	6601,4
06 Septiembre 2023 05:30 PM UTC	6616,5
07 Septiembre 2023 03:30 AM UTC	6623,7
07 Septiembre 2023 06:15 AM UTC	6618,6

3.3. Análisis del factor de potencia

El siguiente análisis corresponde al factor de potencia que calcula el equipo registrando los valores de potencia suministrada, los datos también fueron obtenidos en intervalos dentro de un periodo de 7 días corridos, y serán comparados con respecto a la norma técnica anteriormente mencionada, la compara con los límites establecidos en el capítulo 2.2.4.

El equipo Power Xpert 8000 ha sido instalado para monitorear de forma continua el factor de potencia de las líneas en estudio. Cada 15 minutos, el equipo captura los valores instantáneos de tensión y corriente, los cuales son utilizados para calcular el factor de potencia según la fórmula 4 presentada en el capítulo anterior.

Esta fórmula, basada en el principio de la potencia aparente, activa y reactiva, permite determinar la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica en cada instante. Los datos obtenidos son almacenados en una base de datos y procesados semanalmente como referencia para obtener un valor promedio por línea.

Este análisis nos permitirá identificar cargas inductivas significativas, como motores eléctricos, que pueden estar deteriorando el factor de potencia.

Tabla 3.5. FP medio semanal

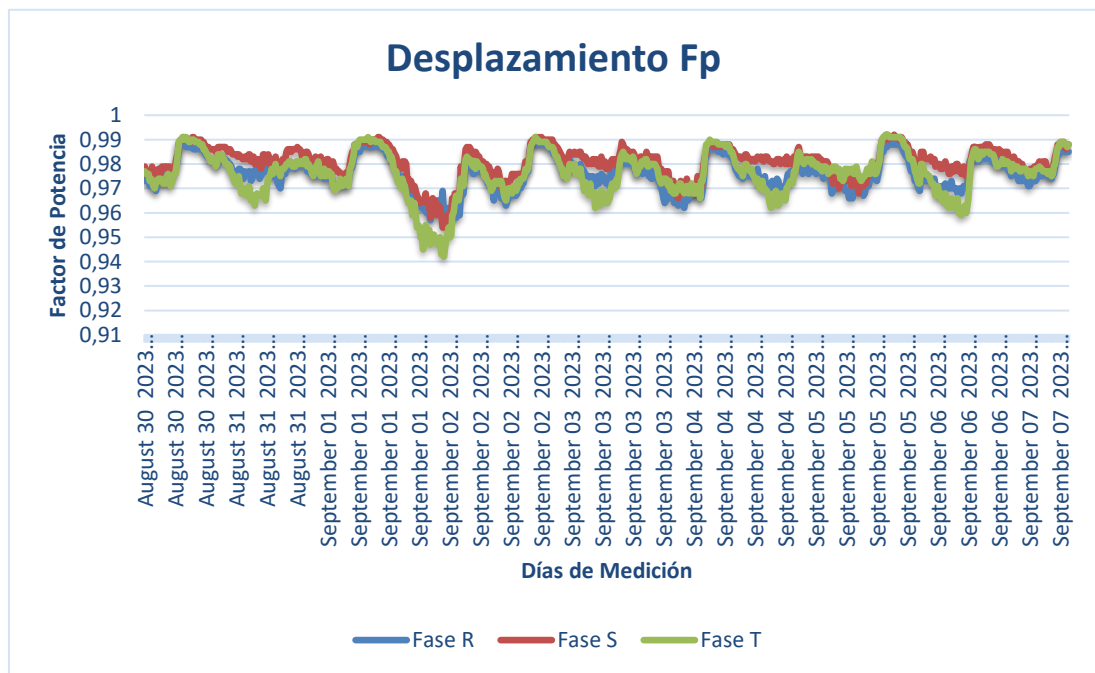
Barra	Factor de Potencia
Línea R	0,976
Línea S	0,962
Línea T	0,977

El análisis del factor de potencia, realizado a partir de la ecuación 5 y cuyos resultados se detallan en la Tabla 3.4, indica un eficiente aprovechamiento de la energía eléctrica en el sistema. Los valores promedio obtenidos, que se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normativa vigente, reflejan un bajo nivel de pérdidas energéticas debido a componentes reactivos.

La Figura 3.2, que muestra la evolución temporal del factor de potencia, confirma la estabilidad y el buen desempeño del sistema a lo largo del período de estudio. La ausencia de fluctuaciones significativas y el mantenimiento de los valores dentro de los límites aceptables sugieren una configuración adecuada de los equipos y una carga balanceada.

Sin embargo, es importante destacar que pueden existir pequeñas variaciones estacionales y además existe una ligera disminución en ciertos días. Estas variaciones pueden ser objeto de análisis más detallados en futuras investigaciones para optimizar aún más el sistema.

Figura 3.4. Desplazamiento del factor de potencia.



3.4. Análisis de armónicos de corriente

Según la norma de calidad citada en el capítulo 2 dice que se debe obtener el registro de la distorsión armónica individual en cada orden impar por fase y se evaluarán con respecto a los límites indicados en la tabla 2.2. de la norma técnica en estudio y obtener así su distorsión armónica total obtenida con la fórmula 3 del capítulo 2.

Para poder obtener los límites establecidos se debe obtener la relación entre la corriente de cortocircuito del sistema (I_{sc}) y de máxima de carga (I_L)

La pala eléctrica 4100 XPC en estudio tiene una corriente de cortocircuito aproximada de 50(kA), este valor aproximado es proporcionado por su manual de mantenimiento eléctrico y además una corriente de carga de 456 (A) otorgada por el PXM 8000 la cual fue la corriente máxima promedio a la cual estuvo trabajando el equipo en su carguío durante la semana en estudio.

$$I_{sc} / I_L = 50000 \text{ (A)} / 456 \text{ (A)} = 109,6 \text{ (6)}$$

$$\text{TDD Max} = 15\%$$

Un TDD Max de 15% indica que la distorsión armónica total en una instalación no debe exceder el 15% del valor máximo de la corriente de demanda. Este límite es fundamental para garantizar la calidad de la energía y proteger los equipos eléctricos.

En valores máximos individuales de armónicos en Fase R:

Tabla 3.6. Armónicos máximos Fase R.

Armónico	Porcentaje Máximo (%)	Estado
h1	100	Cumple
h3	5,3	Cumple
h5	23,7	No Cumple
h7	10,8	Cumple
h9	2,3	Cumple
h11	14,8	No Cumple
h13	7,7	No Cumple
h15	2	Cumple
h17	1,2	Cumple
h19	0,9	Cumple
h21	0,8	Cumple
h23	2,7	Cumple
h25	1,8	Cumple
h27	0,1	Cumple
h29	0,5	Cumple
h31	0,6	Cumple
h33	0	Cumple
h35	0,4	Cumple
h37	0,5	Cumple
h39	0	Cumple
TDD _{MAX}	2,90	A Norma

Valores máximos individuales de armónicos en Fase S:

Tabla 3.7. Armónicos máximos Fase S.

Armónico	Porcentaje Máximo (%)	Estado
h1	100	Cumple
h3	4,8	Cumple
h5	21,8	No Cumple
h7	9,7	Cumple
h9	1,5	Cumple
h11	13,5	No Cumple
h13	6,8	No Cumple
h15	0,9	Cumple
h17	1,1	Cumple
h19	1,4	Cumple
h21	0,3	Cumple
h23	2,3	Cumple
h25	1,7	Cumple
h27	0,2	Cumple
h29	0,8	Cumple
h31	0,5	Cumple
h33	0	Cumple
h35	0,3	Cumple
h37	0,5	Cumple
h39	0	Cumple
TDD _{MAX}	2,84	A Norma

Valores máximos individuales de armónicos en Fase T:

Tabla 3.8. Armónicos máximos Fase T.

Armónico	Porcentaje Máximo (%)	Estado
h1	100	Cumple
h3	5,5	Cumple
h5	24,2	No Cumple
h7	11,6	Cumple
h9	1,3	Cumple
h11	14,2	No Cumple
h13	7,2	No Cumple
h15	1,1	Cumple
h17	2,2	Cumple
h19	1,5	Cumple
h21	0,4	Cumple
h23	2,5	Cumple
h25	1,9	Cumple
h27	0,3	Cumple
h29	0,9	Cumple
h31	0,5	Cumple
h33	0	Cumple
h35	0,4	Cumple
h37	0,3	Cumple
h39	0	Cumple
TDD	2,92	A Norma

Para un análisis detallado del contenido armónico en la corriente, se emplea un espectro de Fourier. Esta herramienta matemática descompone la señal de corriente en sus componentes frecuenciales fundamentales y armónicos.

La representación gráfica de este espectro realizada mediante un diagrama de barras, permite visualizar de forma clara la magnitud de cada armónico presente en la señal, facilitando así la cuantificación del nivel de distorsión armónica en cada orden. La representación se realiza a las tres fases como se muestran a continuación.

Figura 3.5. Espectro de Fourier Línea R.

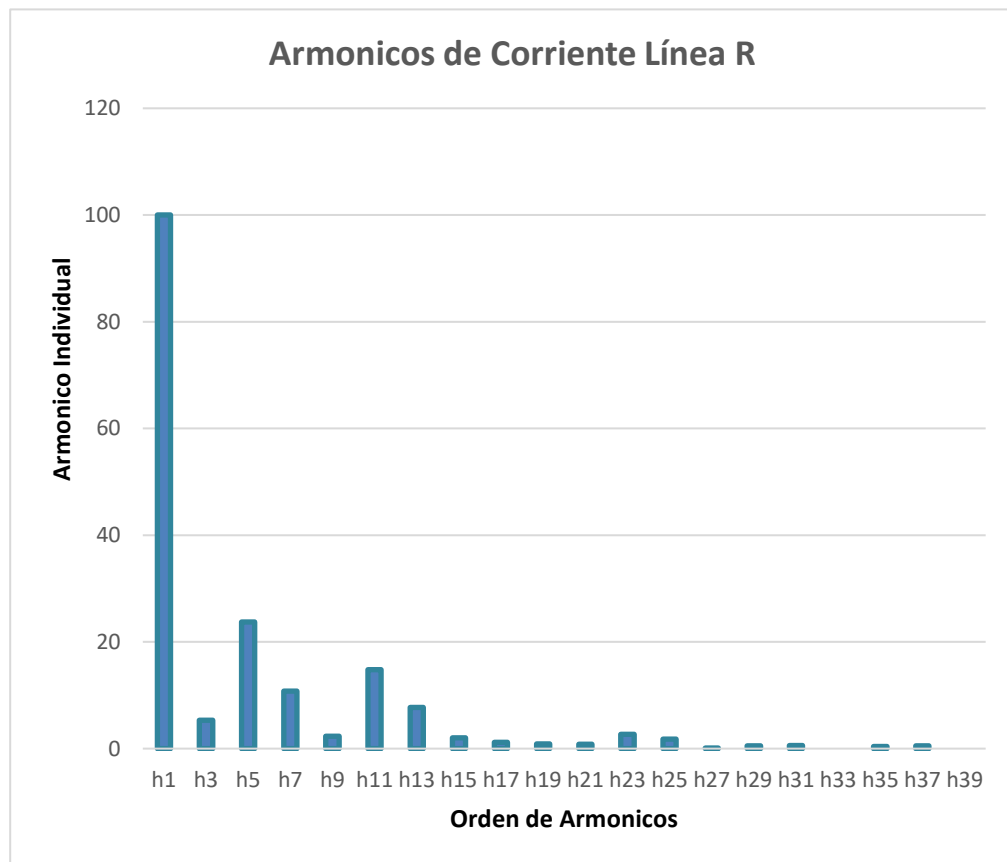


Figura 3.6. Espectro de Fourier Línea S.

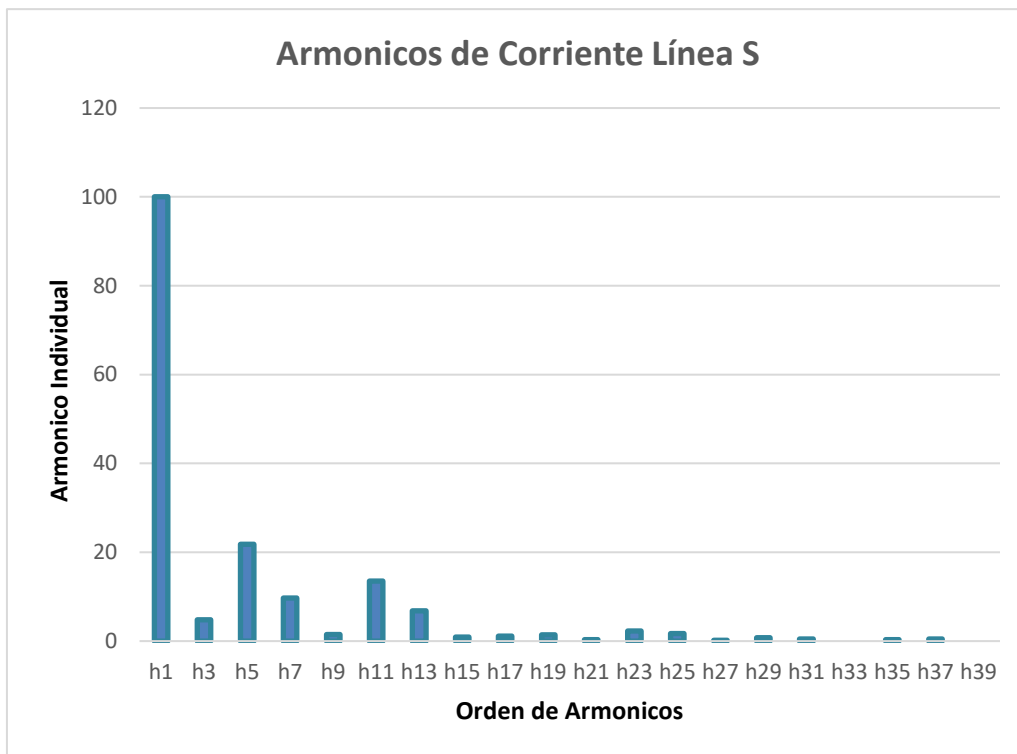
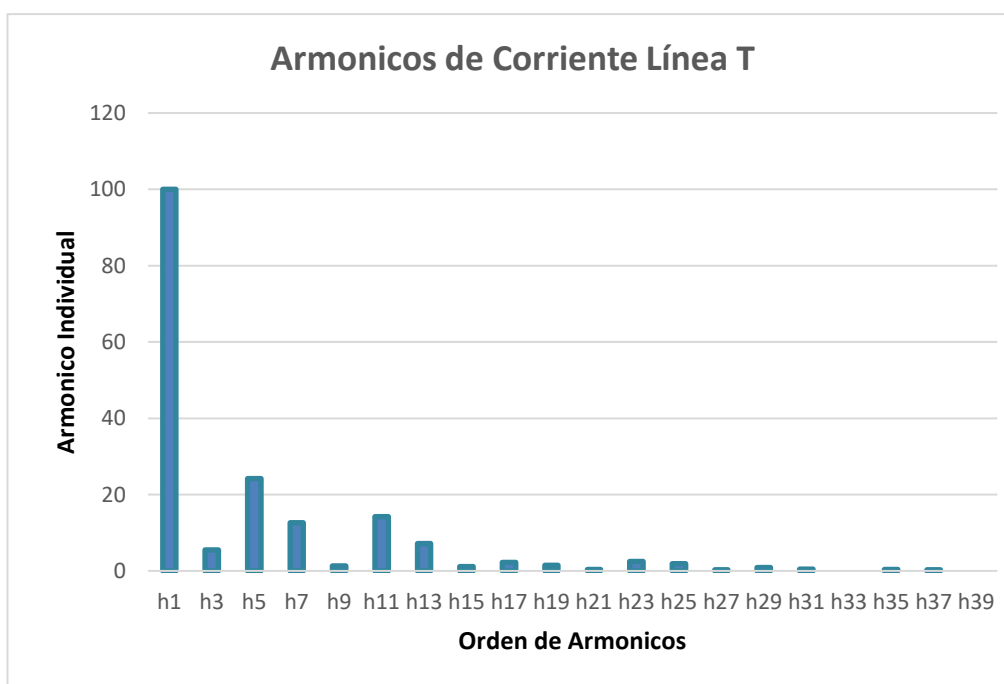


Figura 3.7. Espectro de Fourier Línea T.



3.5. Análisis de armónicos de tensión

Según la norma de seguridad y calidad de servicio (tabla 8, art 3-5).

“En estado normal y durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días de corridos de medición y registro, los valores eficaces de cada tensión armónica individual, promediados en 15 minutos, deberán ser menores o iguales a los límites indicados en la norma calidad de producto”.

Tabla 3.9. Armónicos máximos de tensión

Armónico	L1	L2	L3
h1	100	100	100
h3	0	0	0
h5	0,4	0,2	0,3
h7	0	0	0
h9	0	0	0
h11	0,1	0,1	0,1
h13	0	0	0
h15	0	0	0
h17	0	0	0
h19	0	0	0
h21	0	0	0
h23	0	0	0
h25	0	0	0
h27	0	0	0
h29	0	0	0
h31	0	0	0
h33	0	0	0
h35	0	0	0
h37	0	0	0
h39	0	0	0

Por lo que todos los valores están dentro del rango, según la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución (Tabla 8, art 3-2).

4. RECOMENDACIONES FINALES

En el siguiente capítulo se identificará las principales fuentes de perturbaciones que están afectando al funcionamiento del equipo a raíz de lo expuesto del análisis de las variables eléctricas evaluadas y proponer las recomendaciones correctivas para mejorar la calidad energética optimizando el desempeño del equipo.

4.1.Reducción de armónicos de corriente

La presencia de armónicos individuales de orden superior tanto en la onceava y treceava pero especialmente de la quinta armónica, exceden los límites permitidos en las fases R, S y T. Esta situación puede estar generando los problemas observados en el equipo.

Si bien los variadores de frecuencia ABB que se encuentran en el equipo cuentan con filtros internos, se presume que la principal fuente de perturbaciones armónicas es el sistema de iluminación, compuesto por 40 luminarias LED sin control armónico. Estas luminarias están inyectando una corriente armónica significativa al sistema, agravando la situación.

Para mitigar estos problemas, se propone la instalación de un filtro activo de armónicos. Esta solución ha sido seleccionada debido a su capacidad para compensar una amplia gama de armónicos y adaptarse a las condiciones variables del sistema. El filtro será dimensionado considerando el espectro armónico detallado del sistema de iluminación y otros equipos no lineales presentes.

Para poder solucionar este problema se deberá elegir un filtro de armónicos que cumpla con las características apropiadas del consumo eléctrico.

Para ello se describe el sistema de iluminación eléctrica afectado el cual es alimentando a través del transformador auxiliar del equipo, el cual suministra con uno de sus devanados al transformador de iluminación de quien reduce la tensión a desde 380 a 220 voltios, distribuyendo la carga a cada sala del equipo y la operación del carguío.

Para entrar en detalle se recomienda la instalación de un filtro de armónicos pasivo que tiene por nombre LINEATOR Filtro de Armónicos Universal Avanzado (AUHF), este filtro cuenta con las características técnica que se requieren, además que cumple con los estrictos límites de la norma IEEE 519 en eficiencia y tamaño.

Se recomienda utilizar un filtro con una intensidad de 143 A, 220 V, 51 KVA a 50 Hz cumpliendo con los valores técnicos de acuerdo a la tabla de características del fabricante que expone en el anexo.

Figura 4.1. Filtro de Armónicos Universal Avanzado (AUHF)



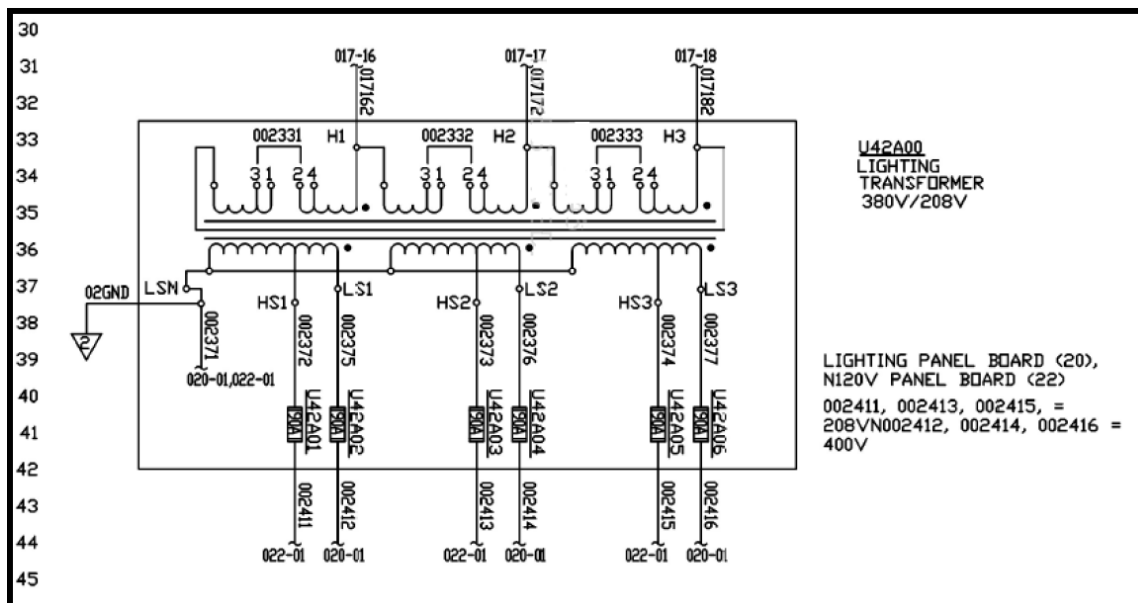
A continuación, se presenta el transformador de iluminación presuntamente afectado, el cual tiene una capacidad de 45 KVA tipo seco de conexión triángulo-estrella.

Figura 4.2. Transformador de iluminación



A continuación, se presenta el esquemático del transformador afectado a intervenir, se requiere que el filtro sea colocado en el lado secundario más próximo a la carga.

Figura 4.3. Esquemático Transformador



4.2. Normalización de regulación de tensión

Los análisis de calidad de energía revelan una alta incidencia de fluctuaciones de tensión, principalmente en la fase T. Debido a las limitaciones técnicas y económicas de modificar el sistema de alta tensión de la pala.

Se propone mejorar la caída de tensión que está existiendo entre la subestación y la pala, disminuyendo la distancia entre las mismas o también utilizar un cable conductor de mayor diámetro al que se está utilizando actualmente, el cual es de 4/0 AWG y aumentarlo a 250 AWG dada sus características.

Para el dimensionamiento de los conductores se debe calcular la sección del cable a utilizar en un tramo de 2500 metros del cable conductor como máximo permitido por la subestación, por lo que se debe calcular la sección del cable mínimo requerido para los distintos tramos donde circula la corriente, y que comprende desde la salida desde la subestación hasta la pala, para ello se emplearan los siguientes cálculos:

Obteniendo la corriente nominal:

$$In = \frac{S}{\sqrt{3} \times VL} = \frac{5000000}{\sqrt{3} \times 7200} = 400,94 \text{ (A)}$$

Donde:

In : Corriente Nominal (A)

S: Potencia aparente Pala eléctrica (KVA)

V_L : Tensión de línea (KV)

Obteniendo la corriente de tabla:

$$I_t = \frac{I_s}{F_n \times F_t \times n} = \frac{400,94}{1 \times 0,96 \times 1} = 417,64 \text{ (A)}$$

Donde:

I_t : Corriente de tabla (A)

I_s : Corriente de servicio (A)

F_n : Factor de corrección por n° de conductores.

F_t : Factor de corrección por temperatura.

n : Numero de conductores por fase.

Los factores de corrección F_n y F_t se determinaron de acuerdo con las tablas 4.6 y 4.7 de la norma RIC 4.

Dada la configuración del cable minero, con tres conductores activos dentro de la funda, se obtuvo un factor de agrupamiento F_n igual a 1.

Considerando una temperatura ambiente aproximada de 35°C en faena, se determinó un factor de temperatura F_t de 0,96 según la tabla 4.7 de la norma RIC 4 con un numero de conductores por fase de 1.

A partir de la corriente de diseño de 417,64 A por conductor, se procedió a la selección del cable de acuerdo con la tabla 4.4 de la norma RIC 4 para cables de tendido fijo a una temperatura fija de 90°C, la cual esta en el anexo de este proyecto.

Se aplicó el método F, el cual se ajusta de manera más precisa a las condiciones reales de operación del cable minero en terreno. De esta manera, se seleccionó una corriente de tabla de 464 A, correspondiente a una sección nominal de 250 AWG.

Con el fin de cumplir con los requisitos de calidad de energía establecidos en la norma técnica en calidad de sistemas de distribución, es fundamental verificar que la regulación de tensión no exceda el límite del 8%.

Para ello, se realizará el cálculo del voltaje real en la barra, lo cual permitirá determinar si la sección del conductor seleccionado es la óptima.

Obteniendo Impedancia Z:

$$Z = \frac{1}{n} (R + jX)^{-3} \times L$$

Donde:

n : Numero de conductores por fase.

R: Impedancia (miliOhms/metros).

X: Reactancia (miliOhms/metros).

L: Largo del cable.

Los valores de impedancia y reactancia están normalizados por la IEC, por lo que obteniendo su valor con respecto a la sección del cable se desarrolla de la siguiente manera:

$$Z = \frac{1}{1} (0,1706 + j0.1295)^{-3} \times 2500$$

$$Z = 0,5355 < 41,34^\circ$$

Obteniendo V_R :

$$\begin{aligned}V_R &= V_T - \Delta V = V_T - (\sqrt{3} \times Z \times I_n) \\V_R &= 7200 - (\sqrt{3} \times 0,5355 \angle 41,34^\circ \times 417) \\V_R &= 6895,9 \angle -2,16^\circ\end{aligned}$$

Donde:

V_R : Voltaje real en barra

V_T : Voltaje salida de transformador

ΔV : Caída de Tensión

Z : Impedancia conductor

I_n : Corriente nominal.

La regulación de tensión la define la Norma técnica de sistemas de distribución, mencionada en el capítulo 2 de este proyecto:

$$\Delta V_k = \frac{|7200 - 6895|}{7200} \times 100$$

$$\Delta V_k = 4,24\%$$

Esta regulación es acorde a los límites establecidos por la norma técnica en calidad de sistemas de distribución eléctrica en la señal que será del 8% cuando se tiene una densidad de red muy baja al no tener consumidores cercanos a la faena y la el voltaje de la red es de media tensión como lo dice el capítulo 2 de regulación de tensión.

Por lo que se recomienda cambiar el cable conductor minero actual de 4/0 AWG por el calculado de 250 AWG.

5. CONCLUSION

En base a los objetivos específicos planteados en el proyecto para realizar el análisis de la calidad energética de la pala, en primer lugar, se dio registro satisfactorio a los valores eficaces de tensión, de factor de potencia y las distorsiones armónicas individuales de corriente de orden impar en la frecuencia de las 3 fases de alimentación del equipo sin anomalías en su en la toma de mediciones.

Se calcula los indicadores de regulación y contenido armónico total tomando como referencia lo indicado en la norma técnica de calidad en sistema de distribución sin inconvenientes en su ejecución.

Posteriormente se evalúa que la distorsión armónica de corriente total y el factor de potencia medio cumple con lo indicado en la norma técnica de calidad, en las distorsiones armónicas de corriente individuales máximas se presenta que la quinta, onceava y treceava armónica sobrepasan los límites establecidos por la norma técnica, y en la séptima se encuentra valores cercanos al límite máximo permisible. Con respecto a la regulación de voltaje las fases R y S cumplen de manera satisfactoria con los límites, sin embargo, la fase T tiene un porcentaje de registros fuera de lo establecido.

Con la evaluación se identifican que las principales fuentes de perturbaciones que están afectando el funcionamiento del equipo son armónicos de corriente de orden quinta, onceava y treceava y la séptima esta casi dentro de los límites permisibles, y con respecto a la regulación de tensión existe una desviación en la fase T.

Debido a que estos problemas están aumentando el número de paradas no programadas se propone que se instale un filtro de armónicos pasivo para la reducción de armónicos en el sistema de iluminación de la pala ya que todas las luminarias son tipo LED y no existe un control de la inyección de armónicos. Para la regulación de tensión debido al costo que sería instalar reguladores de voltaje en el sistema de alta tensión se propone realizar un cambio en el cable minero aumentado su sección según la norma RIC 4.

El resumen el análisis de los datos de calidad de energía revela una situación compleja, con aspectos positivos y negativos que requieren atención.

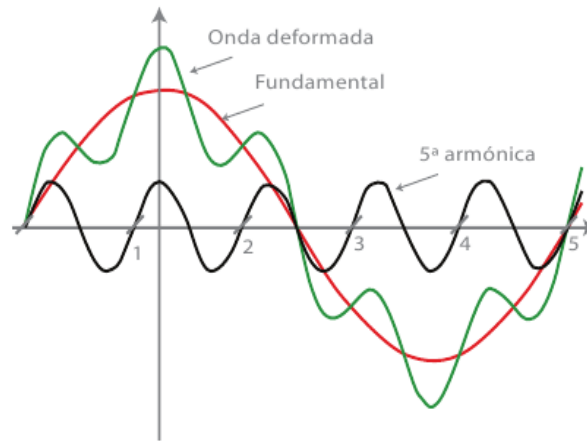
Aspectos Positivos:

- Regulación de voltaje: Las fases R y S cumplen satisfactoriamente con los límites establecidos por la norma técnica, lo que indica una adecuada estabilidad de tensión en estas fases.
- Distorsión armónica total: Se encuentra por debajo de los límites permitidos en las tres fases, lo que sugiere un control general de los armónicos en el sistema eléctrico de la pala.
- El análisis del factor de potencia ha demostrado que el sistema eléctrico opera con una eficiencia energética satisfactoria. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa, indicando un adecuado balance entre la potencia activa y reactiva. Además, la estabilidad del factor de potencia a lo largo del tiempo, garantiza un suministro de energía de calidad y minimiza las pérdidas en el sistema.

Aspectos Negativos:

- Regulación de voltaje en fase T: La fase T presenta un porcentaje de registros fuera de los límites establecidos, lo que podría indicar problemas locales en esa fase o en la carga conectada.
- Armónicos individuales: A pesar de que el THD cumple con la norma, la presencia de armónicos individuales de orden superior tanto en la onceava y treceava pero especialmente la quinta armónica, exceden los límites permitidos en las fases R, S y T. Esta situación puede estar generando los problemas observados en el equipo.

Fig. 5.1 Distorsión de la onda fundamental producto de la armónica de orden 5



La presencia de armónicos de orden superior, particularmente la quinta armónica, está teniendo un impacto significativo en el funcionamiento del sistema eléctrico y puede ser la causa raíz de los problemas reportados en las paradas no programadas, como:

- Falsas activaciones de protecciones: Los armónicos pueden generar corrientes de falla aparentes, lo que provoca el disparo de las protecciones.
- Interferencias de comunicación: Los armónicos pueden generar ruido electromagnético que afecta las comunicaciones.
- Mal funcionamiento de variadores/Drive: Los armónicos pueden causar sobrecalentamiento, vibraciones y mal funcionamiento en los variadores de velocidad, lo que resulta en paradas no programadas.
- Parpadeo Flike: Fenómeno que se produce cuando la intensidad de una fuente de luz varía de forma rápida e imperceptible para el ojo humano, creando una sensación de parpadeo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ARRILLAGA JOS, “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons, 2003, ISBN 0-470-85129-5.
- [2] GÖNEN TURAN, “Electric Power Distribution System Engineering”, McGraw-Hill, 1986, ISBN 0-07-023707-7.
- [3] Ley General de Servicios Eléctricos, Decreto Supremo 327, Ministerio de Minería, República de Chile, Santiago 10 de septiembre de 1998.
- [4] Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, Comisión Nacional de Energía, EXENTA 706, Santiago de Chile, 2017.
- [5] Norma RIC N°4 de conductores, materiales y sistemas de canalización, resolución exenta N.° 33.877, de fecha 30/12/2020, de la Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC).
- [6] Manual de Usuario Power Xpert 8000 (PXM), EATON Instruments Power Quality Analyzers, Meters & Loggers, EE. UU, 2014.
- [7] Manual de Mantenimiento Eléctrico Pala 4100 XPC A.C., P&H Mining Equipment, Inc, EE. UU, 2008.

ANEXO:
Capacidad de transporte de corriente de conductores de cobre aislado,
Según Norma RIC 4, Tabla 4.4.

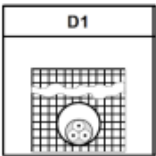
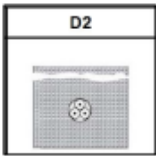
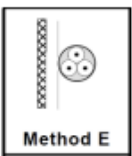
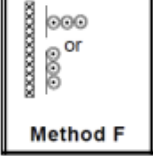
CABLES PARA TENDIDO FIJO TEMPERATURA DE SERVICIO 90°C. APLICA a THHN, RV, RV-K,RZ1, RZ1-K.					
Sección nominal [mm ²]	Sección en sistema americano [AWG] o [kcmil]	 D1 Método de instalación D1. Temp. ambiente 20°C	 D2 Método de instalación D2. Temp. ambiente 20°C	 Method E Método de instalación E. Temp. ambiente 30°C	 Method F Método de instalación F. Temp. ambiente 30°C
1,5	-	19	23	19	-
2,08	14	30	31	28	-
2,5	-	33	38	32	-
3,31	12	38	39	38	-
4	-	42	59	42	42
5,26	10	48	69	50	50
6	-	52	74	54	55
8,37	8	63	89	67	68
10	-	68	98	75	77
13,3	6	80	114	89	93
16	-	89	126	100	105
21,1	4	103	147	114	126
25	-	113	161	127	141
26,7	3	117	167	133	147
33,6	2	132	189	154	172
35	-	136	194	158	176
42,4	1	150	216	178	200
50	-	159	230	192	216
53,5	1/0	170	245	207	234
67,4	2/0	192	278	240	273
70	-	197	282	246	279
85	3/0	218	315	278	318
95	-	232	339	298	342
107,2	4/0	248	362	322	371
120	-	263	386	346	400
126,7	250	270	396	358	415
150	-	296	431	399	464
152	300	299	437	402	468
177,3	350	325	474	444	518
185	-	332	486	456	533
202,7	400	349	510	483	567
240	-	382	563	538	634
253,3	500	393	576	557	657
300	-	431	629	621	736

Tabla técnica de características del filtro de armónicos AUHF:

Tamaño del motor		Valoración del Lineator (3 fases)				
HP	kW	Amperios de entrada				Salida kW
		208V 60Hz	220/ 240V 50/60Hz	380/ 400V 50Hz	415/ 440V 50Hz	
5	4	14	13	8	7	4.5
7.5	5.5	20	18	11	10	6.3
10	7.5	27	24	14	13	8.5
15	11	40	36	21	19	13
20	15	53	48	28	25	17
25	18.5	66	60	35	32	21
30	22	79	72	42	38	25
40	30	105	95	55	51	34
50	37.5	131	119	69	63	42
60	45	158	143	83	76	51
75	55	196	178	103	95	63
100	75	260	236	137	125	84
125	90	323	294	170	156	104
150	110	388	353	204	187	125