



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

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

**PROPUESTA DE BANCOS CONDESADORES PARA LAS ÁREAS DE  
CHANCADO PRIMARIO Y FINO EN PLANTA PEDRO AGUIRRE  
CERDA**

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

Profesor guía: Sr. Juan Carlos Madrigal Lobos

Miguel Eduardo Aguilera Aguilera

Copiapó, Chile 2025

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación está dedicado a mi esposa Martha Ordoñez Muñoz por su sacrificio y esfuerzo, por creer en mis capacidades, y siendo siempre un pilar en este proceso, brindándome su comprensión y apoyo.

Hijas María Paz y Sofía Ignacia por ser fuente continua de motivación e inspiración para poder superarme cada día y así poder brindarles un mejor futuro.

Padres y hermanos, quienes, con sus palabras de aliento, y constante apoyo no me dejaban decaer para seguir adelante y siempre perseverante para conseguir mis metas y objetivos.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a mi esposa e hijas, padres y hermanos, quienes me han brindado su apoyo incondicional, los mismos que me han ayudado a superar cada obstáculo y a todos aquellos que de una u otra forma me brindaron su apoyo durante mí la carrera de ingeniería.

En segundo lugar, a los profesores y a ésta prestigiosa casa de estudio vuestra Universidad la cual siempre me acogió en sus aulas, formando primeramente como técnico y ahora como un profesional competitivo y una persona de bien.

## INDICE

<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes generales .....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos .....	2
1.4 Resumen de capítulos .....	3
1.5 Historia.....	5
1.6 Descripción del proceso del área de chancado primario.....	6
1.6.1 Descripción general del chancador de mandíbulas.....	8
1.6.2 Terminología y conceptos generales de las instalaciones.....	8
1.7 Descripción del proceso del área de Chancado Fino .....	9
1.7.1 Descripción de las Instalaciones .....	9
1.8 Análisis de la problemática de las áreas de Chancado Primario y Fino .....	11
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>13</b>
<b>MARCO TEORICO.....</b>	<b>13</b>
2.1 Conceptos básicos .....	13
2.1.1 Potencia aparente (S).....	13
2.1.2 Potencia activa (P).....	13
2.1.3 Potencia reactiva (Q) .....	14
2.1.4 Triángulo de potencias.....	14
2.1.5 Tipos de carga.....	15
2.1.6 Cargas resistivas .....	15
2.1.7 Cargas inductivas.....	16
2.1.8 Cargas capacitivas .....	17
2.1.9 Carga mixta o combinada.....	18
2.1.10 Factor de potencia.....	18
2.1.11 Corrección del factor de potencia.....	19
2.2 Causas del bajo factor de potencia.....	20
2.3 Consecuencias del bajo factor de potencia .....	21
2.4 Instalación y localización del banco de condensadores .....	25

2.4.1	Instalación individual .....	26
2.4.2	Compensación individual en transformadores de distribución.....	27
2.4.3	Instalación en grupo.....	28
2.4.4	La compensación en grupo presenta las siguientes ventajas: .....	28
2.4.5	Instalación global o central.....	29
2.4.6	Tipos de bancos de condensadores .....	31
2.4.7	Conexión de los bancos de condensadores.....	32
2.4.8	Armónicos .....	36
2.4.9	Distorsión Armónica Total (THD):.....	37
2.4.10	Tipos de Armónicos:.....	37
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>38</b>
<b>METODOLOGIA.....</b>		<b>38</b>
3.1	Recopilación de información .....	38
3.2	Levantamiento de parámetros eléctricos.....	39
3.3	Método de conexión del Instrumento.....	40
3.4	Representación gráfica a través del analizador de calidad de energía. ....	40
3.5	Análisis y medición de parámetros eléctricos.....	41
3.6	Levantamiento de carga y parámetros eléctricos .....	42
3.6.1	Levantamiento de carga área de chancado primario .....	43
3.7	Resultados de mediciones de variable eléctricas área de chancado Primario.	44
3.7.1	Análisis de la potencia Aparente sala eléctrica N° 1, CCM 051 .....	44
3.7.2	Análisis de la potencia Activa sala eléctrica N° 1, CCM 051 .....	45
3.7.3	Análisis de la potencia Reactiva, sala eléctrica N° 1, CCM 051.....	46
3.7.4	Análisis del Factor de potencia sala eléctrica N °1, CCM-051 .....	46
3.7.5	Resume de variables medidas en sala eléctrica N° 1, CCM 051.....	47
3.8	Resultados de mediciones de variable eléctricas área de chancado Fino. ....	48
3.8.1	Levantamiento de carga Área de Chancado Fino.....	48
3.8.2	Cuadro de cargas del CCM -102, sala eléctrica N° 2, .....	49
3.8.3	Análisis y resultados de mediciones variables eléctricas, sala eléctrica N°2, CCM 102.....	50
3.8.4	Análisis de la potencia Activa, sala eléctrica N°2, CCM 102 .....	51

3.8.5	Análisis de la potencia Reactiva, sala eléctrica N°2, CCM 102.....	52
3.8.6	Análisis de la Factor de Potencia, sala eléctrica N°2, CCM 102 .....	52
3.8.7	Resume de variables medidas en sala eléctrica N° 2, CCM-102 .....	53
3.8.8	Simulación por medio del software ETAP.....	54
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>57</b>
<b>DISEÑO DEL BANCO DE CONDENSADORES.....</b>		<b>57</b>
4.1	Diseño banco de condensadores variable.....	57
4.2	Modo de Operación del banco de regulación variable.....	58
4.3	Ventajas de un banco de compensación automática.....	58
4.4	Diseño teórico del banco de condensadores en sala eléctrica N° 1, Chancado Primario.....	60
4.5	Simulación ETAP, con conexión del BC teórico sala eléctrica N°1- CCM 051 .....	61
4.6	Criterio de selección del banco de condensador para el CCM 051 .....	62
4.7	Cálculo del banco de condensadores teórico para la sala eléctrica N° 2, área del chancado Fino. ....	63
4.8	Simulación ETAP, con conexión del BC teórico sala eléctrica N° 2 -CCM 102 .....	64
4.9	Criterio de selección del banco de condensador para el CCM 102 .....	66
<b>CAPITULO V.....</b>		<b>68</b>
<b>DIAGNOSTICO SITUACION DE LA COMPAÑÍA CONTRACTUAL OJOS DEL SALADO.....</b>		<b>68</b>
5.1	Antecedentes generales .....	68
5.2	Diseño del banco de condensador.....	69
5.2.1	Análisis de datos tomados de la potencia reactiva CCM 051, Sala N°1 .....	69
5.2.2	Distribución del banco de condensadores en sala eléctrica N°1 .....	70
5.2.3	Análisis de datos tomados de la potencia reactiva CCM 102, Sala N°2 .....	71
5.2.4	Distribución del banco de condensadores en sala eléctrica N°2 .....	72

5.2.5	Detalle del consumo de energía reactiva en las áreas de chancado fino y chancado primario .....	74
5.2.6	Detalle del consumo de energía activa en las áreas de chancado fino y chancado primario. ....	76
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>80</b>
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>		<b>80</b>
6.1	Antecedentes generales .....	80
6.2	Costos de instalación de banco de condensadores para cada una de las áreas.....	83
6.3	Análisis de los datos.....	83
6.4	Origen de los Ahorros en la Facturación Mensual .....	84
6.5	Reducción de Costos por Energía Reactiva .....	84
<b>CAPITULO VII .....</b>		<b>88</b>
CONCLUSIONES.....		88
7.1	RECOMENDACIONES.....	89
BIBLIOGRAFIA .....		90

## INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Vista general Planta PAC. ....	6
Figura N° 1.2: Diagrama de proceso chancado primario.....	7
Figura N° 1.3: Vista general edificio chancado primario.....	7
Figura N° 1.4: Diagrama de proceso chancado fino. ....	10
Figura N° 2.1: Forma de onda voltaje y corriente carga resistiva.....	16
Figura N° 2.2: Forma de onda voltaje y corriente carga inductiva. ....	17
Figura N° 2.3: Forma de onda voltaje y corriente carga capacitiva.....	17
Figura N° 2.4: Causas de un bajo factor de potencia. ....	21
Figura N° 2.5: Corrección del factor de potencia mediante el uso de condensadores. .....	25
Figura N° 2.6: Compensacion Individual .....	26
Figura N° 2.7: Compensacion en Grupo .....	28
Figura N° 2.7: Compensacion Global o Central .....	29
Figura N° 2.9: Conexión estrella banco condensadores .....	33
Figura N° 2.10: Conexión triangulo banco condensadores.....	34
Figura N° 3.1: Instrumento de Medición Quali Star + modelo AEMC 8336 .....	39
Figura N° 3.2: Método de conexión de 3 hilos .....	40
Figura N° 3.3: Datos placa transformador Chancado Primario .....	42
Figura N° 3.4: Potencia Aparente sala eléctrica N°1, CCM 051 .....	45
Figura N° 3.5: Potencia activa sala eléctrica N°1, CCM 051 .....	45
Figura N° 3.6: Potencia Reactiva sala eléctrica N° 1, CCM 051 .....	46
Figura N° 3.7: Factor de potencia sala eléctrica N° 1, CCM 051 .....	47
Figura N° 3.8 :Datos del transformador CCM 102, chancado fino. ....	48
Figura N° 3.9: Potencia Aparente, CCM 102.....	51
Figura N° 3.10: Potencia Activa, CCM 102.....	51
Figura N° 3.11: Potencia Reactiva CCM 102 .....	52
Figura N° 3.12: Factor de potencia CCM 102 .....	53
Figura N° 3.13: Simulación en ETAP sin B.C Area Chancado Primario.....	55
Figura N° 3.14: Simulación en ETAP sin B.C Área Chancado Fino. ....	56

Figura N° 4.1: Simulación en ETAP con B.C valor teórico 73 kVar Área Chancado Primario.....	61
Figura N° 4.2: Simulación en ETAP con B.C valor teórico 80 kVar Área Chancado Primario.....	62
Figura N° 4.3: Simulación en ETAP con B.C valor teórico 205 kVar Área Chancado Fino. ....	62
Figura N° 4.4: Simulación en ETAP con B.C valor teórico 225 kVar Área Chancado Fino. ....	62
Figura N° 5.1: Análisis de potencia reactiva durante todo el periodo de medición. ....	70
Figura N° 5.2: Análisis de potencia reactiva durante todo el periodo de medición. ....	72
Figura N° 6.1: Periodo de retorno inversión CCM 051 – Área Chancado Primario. ....	86
Figura N° 6.2: Periodo de retorno inversión CCM 102 – Área Chancado Fino ....	87

## INDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Impactos por bajo Factor de Potencia.....	22
Tabla N° 2.2: Comparación de tipos bancos condensadores.....	32
Tabla N° 3.1: Cuadro de carga CCM 051, sala eléctrica N° 1.....	43
Tabla N° 3.2: Resumen de variables medidas sala eléctrica N° 1.....	47
Tabla N° 3.3: Cuadro de carga CCM 102, sala eléctrica N° 2.....	49
Tabla N° 3.4: Resumen de variables medidas sala eléctrica N° 2.....	53
Tabla N° 4.1: Comparación técnica para selección del BC CCM 051.....	64
Tabla N° 4.2: Comparación técnica para selección del BC CCM 102.....	68
Tabla N° 5.1: Resumen general de mediciones realizadas en CH. Primario.....	71
Tabla N° 5.2: Distribución del BC en sala eléctrica N°1, CCM 051.....	71
Tabla N° 5.3 Resumen general de mediciones realizadas en chancado fino .....	72
Tabla N° 5.4: Distribución del BC en sala eléctrica N°2, CCM 102.....	73
Tabla N° 5.5: Consumo de energía reactiva periodo 2022 - 2025.....	75
Tabla N° 5.6: Costo anual de la energía reactiva correspondiente ambas áreas ..	76
Tabla N° 5.7: Detalle del consumo de energía Activa en las áreas de chancado primario .....	78
Tabla N° 5.8: Detalle del consumo de energía Reactiva en las áreas de chancado primario .....	79
Tabla N° 6.1: Resumen de la facturación chancado Primario CCM 051.....	81
Tabla N° 6.2: Resumen de la facturación chancado Fino CCM 102.....	82
Tabla N° 6.3: Costos de instalación de los bancos de condensadores .....	83
Tabla N° 6.4: Costo mensuales promedio lo que va del año 2025 (enero-mayo).	85

## RESUMEN

En el presente proyecto se centrará en diseñar y calcular dos bancos de condensadores de compensación automática. Para el corregir el factor de potencia en las áreas de Chancado primario y Chancado fino de minera contractual Ojos del salada (planta Pedro Aguirre cerda) ubicada en la localidad de Tierra Amarilla. Mediante un estudio técnico el cual se hará con un analizador de redes Eléctricas trifásicas modelo AEMC 8336, para la obtención de parámetros indispensables, potencias, factor de potencia actual, que nos permitan visualizar e identificar problemas que puedan afectar el normal funcionamiento de los equipos, esto debido a que los bancos de condensadores existentes en cada una de las áreas se encuentran fuera de servicio. En el capítulo 1 se describe los antecedentes generales, la justificación del estudio estableciendo los objetivo general y los objetivos específicos, junto a ello se explica en consiste el proceso de chancado primario y secundario y la función que cumple cada uno de los equipos involucrados en este proceso. En el capítulo 2 es referido al marco teórico donde se abordarán los conceptos de potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y armónicos que permitan entender de mejor manera las ventajas que se obtienen al realizar la corrección del factor de potencia, así como también lo que implica una deficiencia de este. El capítulo 3, está comprendido en la metodología utilizada basada en la recopilación de información, la cual nos permitirá cuantificar la carga total en cada una de las áreas, como así mismo las mediciones que se realizaran por medio del analizador de energía, nos aportara los datos los cuales se interpretaran los resultados y se definirá si estos cumplen con la normativa vigente. Capítulo 4, se centrará en el diseño de los bancos de condensadores, basado en los cálculos teóricos y las simulaciones con software ETAP. Capítulo 5 se presenta y analizan los datos obtenidos durante el estudio interpretando los resultados. Capítulo 6 se realizará el análisis técnico económico del proyecto para determinar, la factibilidad del proyecto y de la implementación de los bancos de condensadores para el mejoramiento del Factor de Potencia. Y como parte final del proyecto correspondiente a capítulo 7, se darán a conocer las conclusiones y recomendaciones.

## ABSTRACT

This project will focus on designing and calculating two automatic compensation capacitor banks to correct the power factor in the primary crusher and fine crusher areas of the Ojos del Salada contract mining operation (Pedro Aguirre Cerda plant) located in Tierra Amarilla. A technical study will be carried out using an AEMC 8336 three-phase electrical network analyzer to obtain the essential parameters, such as power, current power factor, and other relevant variables that will allow us to visualize and identify possible problems that could affect the normal operation of the equipment, given that the existing capacitor banks in each of the areas are out of service. Chapter 1 describes an overview of the general background and justification for the study, outlining the main objective and its specific objectives. It also explains the primary and secondary crushing process and the function of each piece of equipment involved in this process. Chapter 2 refers to the theoretical framework, addressing the concepts of power (P-Q and S), power factor, and harmonics, which allow for a better understanding of the advantages obtained by correcting the power factor, as well as what a deficiency in this factor implies. Chapter 3 covers the methodology used, based on field data collection, which will enable us to quantify the total load in each area, process the records obtained with the network analyzer, and verify compliance with current regulations. Chapter 4 will focus on the design of capacitor banks, based on theoretical calculations and validation through simulations in ETAP software. Chapter 5 presents and analyzes the data obtained during the study, interpreting the results. Chapter 6 will carry out the technical and economic analysis of the project to determine the feasibility of the project and the implementation of capacitor banks to improve the power factor. And as the final part of the project, corresponding to Chapter 7, the conclusions and recommendations will be presented.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes generales

Compañía Minera Ojos del Salado gestiona su operación en la comuna de Tierra Amarilla, a 16 kilómetros de Copiapó, que pertenece al denominado “Distrito Candelaria”. Esta planta produce concentrado de cobre a través de la explotación de las minas subterráneas Santos y Alcaparrosa a un promedio de 15.400 toneladas anuales de cobre.

Las instalaciones de su Planta, llamada Pedro Aguirre Cerda, incluyen Áreas de Chancado Primario y Fino, Planta Concentradora y el área de Relave ducto con capacidad para producir 17.600 toneladas anuales de cobre fino en concentrados, 11.000 onzas de oro y 156.000 onzas de plata al año.

Para lograr las metas de producción es necesario el óptimo funcionamiento de todas las áreas involucradas en la producción de concentrado de cobre, ya sea por la ejecución del plan de mantenimiento, así como también una adecuada calidad de energía suministrada a los equipos que interactúan en el proceso, nos referiremos a las áreas de chancado primario y chancado fino, dichas áreas realizan la función de chancar y/o disminuir la granulometría adecuada del material proveniente de la mina, para luego pasar al proceso de molienda

En el proyecto se realizarán mediciones eléctricas las cuales nos permitirán determinar y analizar como objetivo principal mejorar el factor de potencia del conjunto de motores y equipos que interactúan en el proceso de chancado, y de acuerdo con los parámetros eléctricos obtenidos se implementarán unos bancos de condensadores autorregulable para así asegurar la compensación necesaria al consumo demandado, y con ello evitando la sobrecompensación de las instalaciones.

Actualmente presenta un factor de potencia por debajo de los niveles aceptados teniendo las siguientes consecuencias, incremento de las pérdidas en los conductores, sobrecarga de los transformadores y líneas de distribución, aumento de la caída de tensión, incremento de la potencia aparente

Por este motivo, se vio en la necesidad de darle atención a este problema, mediante el análisis técnico económico de la instalación de un nuevo banco de condensadores que nos permitirá eliminar los efectos de tener un bajo factor de potencia e incrementado la vida útil de las instalaciones.

## **1.2 Objetivo general**

Mejorar el factor potencia en compañía contractual Ojos del Salado en las áreas de Chancado primario y fino, mediante la implementación de dos bancos de condensadores autorregulables en baja tensión basado en un estudio técnico.

## **1.3 Objetivos específicos**

- ✚ Describir el proceso de las áreas involucradas y evaluar si la existencia de irrupciones en el sistema se debe a un bajo factor de potencia.
- ✚ Identificar las mediciones y datos de los parámetros eléctricos, así como el factor de potencia actual en cada una de las áreas en cuestión.
- ✚ Proponer la implementación de los bancos de condensadores por medio de un circuito equivalente en ETAP y los cálculos realizados
- ✚ Analizar los resultados de la propuesta.

## 1.4 Resumen de capítulos

**Capítulo II: Marco Teórico:** En este capítulo se establecen las características fundamentales para comprender el factor de potencia. Se abordan temas como la identificación del factor de potencia, los métodos para obtener o medir el factor de potencia de un sistema eléctrico, y las técnicas de compensación o corrección de este.

### **Capítulo III: Metodología para la corrección del factor de potencia.**

- ✚ **Medición del Factor de Potencia y Armónicos:** Se utilizará un analizador de calidad de energía para medir tanto el factor de potencia, consumos de potencia, así como los armónicos que pueda presentar el sistema. las mediciones en intervalos regulares cada 10 minutos para obtener un espectro claro del comportamiento de las variables en los sistemas
- ✚ **Recopilación y Organización de Datos:** Importa los datos medidos en una herramienta de análisis, como Excel, y organiza los datos en tablas que incluyan fecha, hora, factor de potencia y Potencias activa y reactiva.
- ✚ **Cálculo de Indicadores Clave:** Determinar el factor de potencia, potencia reactiva, potencia activa, obteniendo valores promedio, máximo y mínimo.

**Capítulo IV: Diseño del banco de condensadores:** Este capítulo detallara el diseño de los bancos de condensadores de compensación variable para corregir el factor de potencia en las áreas de chancado fino y primario. Utilizando el analizador de calidad de energía Quali Star, AEMC y el software Power Pad III, se obtendrán los parámetros eléctricos. Los datos, y en combinación con el levantamiento de carga del capítulo III, fundamentan la selección de los bancos de compensación automática que ajustara dinámicamente la potencia reactiva. El diseño se considera un análisis del sistema, primeramente, teórico y posteriormente con una simulación en software ETAP, lo cual permitirá corroborar la selección de los bancos de condensadores para cada una de las áreas.

**Capítulo V: Diagnostico situación de la compañía contractual ojos del salado:** La situación eléctrica de la Sociedad Contractual Minera Ojos del Salado, enfocándonos en las áreas de chancado primario (CCM 051) y fino (CCM 102), donde el bajo factor de potencia actualmente es de (0.77 y 0.74) respectivamente generado principalmente por motores de inducción, lo que provoca ineficiencias y costos adicionales. Con base en los datos del capítulo IV y simulaciones en ETAP, se propone el diseño de bancos de condensadores de compensación automática para elevar el factor de potencia a 0.98, así optimizando la eficiencia, reduciendo los costos y asegurando cumplimiento normativo.

**Capítulo VI: Análisis de los resultados de la optimización y beneficios técnicos económicos:** En este capítulo se evalúa los beneficios técnicos y económicos que significa la implementación de los bancos de condensadores de compensación automática en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Fino (CCM 102), para corregir el factor de potencia. La Sociedad Contractual Minera Ojos del Salado ha incurrido en penalizaciones por bajo factor de potencia, y además en costos por consumo de energía reactiva que han generado un impacto económico significativo. Con la corrección se eliminarán las penalizaciones, y se reducirán los costos por potencia reactiva y con ello se mejorará la eficiencia del sistema, logrando ahorros mensuales con lo cual se logrará un retorno de la inversión, convirtiendo en un sistema más eficiente y una operación rentable.

**Capítulo VII: Conclusiones:** Este capítulo resume los resultados del proyecto de mejoramiento del factor de potencia en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Fino (CCM 102) de la planta Pedro Aguirre Cerda. Al corregir el factor de potencia con bancos de condensadores de compensación automática, se eliminan penalizaciones, se reducen costos de energía y se mejora la eficiencia del sistema eléctrico, generando ahorros mensuales y recuperando la inversión. Además, se presentan recomendaciones prácticas para garantizar una operación más eficiente y sostenible, fortaleciendo el compromiso de la empresa con la optimización energética y el ahorro económico.

## 1.5 Historia

Las faenas de Ojos del Salado iniciaron su producción comercial en 1929 bajo el nombre de Planta Punta del Cobre. Las instalaciones pertenecieron a la Caja de Crédito Minero (CACREMI). Posteriormente, la planta concentradora cambió de nombre al de “Planta presidente Pedro Aguirre Cerda”. En 1978, la instalación fue adquirida por particulares a la Empresa Nacional de Minería (Enami). La compra incluyó a las minas Santos y Resguardo, formándose la Compañía Minera Ojos del Salado S.A. (“Compañía Contractual Minera Ojos del Salado”).

En 1983 Phelps Dodge Corporation adquirió el 10 % de Compañía Minera Ojos del Salado y en 1985 pasó a ser su única dueña. En 2007, fue adquirida por Freeport McMoRan Copper & Gold. En 2014, la operación pasó a formar parte de los activos de Lundin Mining. La minera Ojos del Salado es una de las faenas de mayor arraigo y tradición en la comunidad de Tierra Amarilla, debido a su larga historia y a su cercanía con los vecinos. (“Compañía Contractual Minera Ojos del Salado”).

Compañía Minera Ojos del Salado, pertenece al denominado “Distrito Candelaria”. Produce concentrado de cobre a través de la explotación de las minas subterráneas Santos y Alcaparrosa a un promedio de 15.400 toneladas anuales de cobre. En la figura N° 1.1 se realiza una vista general de la planta.

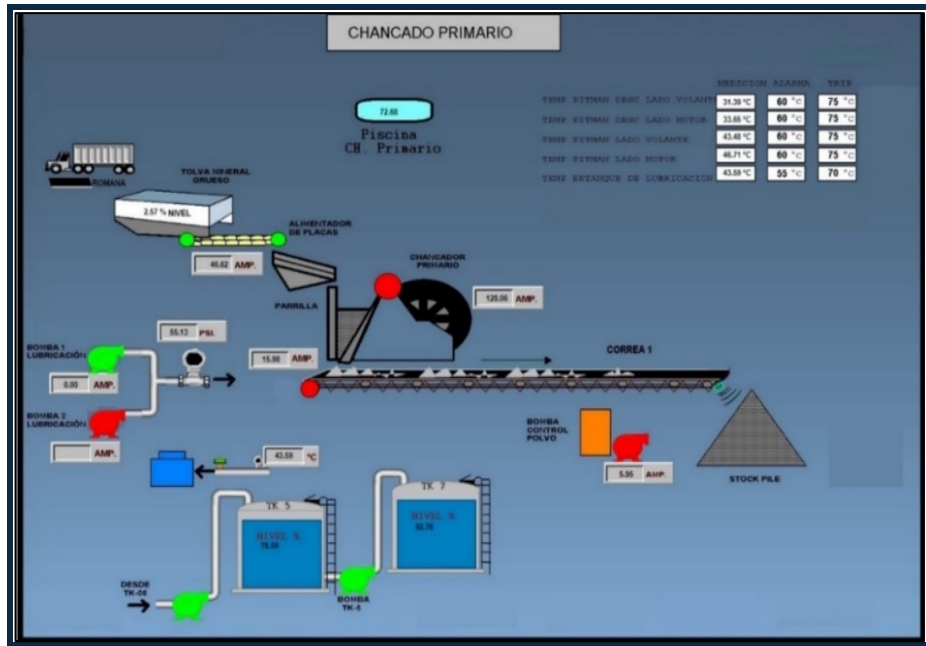


**Figura N° 1.1: Vista general Planta PAC.**

Fuente: fotografía Planta Ojos del Salado.

## **1.6 Descripción del proceso del área de chancado primario**

El objetivo del chancador primario es procesar al máximo de tonelaje del mineral proveniente de la mina Santos, el cual es trasladado por medio de camiones y depositado en la tolva de recepción, este material aproximadamente posee un máximo de 60", una vez triturado por el chancador de mandíbula queda con la granulometría adecuada entre 8" a 6", siendo transportado por la correa CV # 01, hacia el cono grueso, para luego ser procesado en área de chancado fino. Como se detalla en diagrama de proceso (ver la figura N° 1.2), junto a la figura N° 1.3, vista del edificio de chancado primario.



**Figura N° 1.2: Diagrama de proceso chancado primario.**

Fuente: Visualización de pantalla operador sala de control C.C.M Ojos del salado.



**Figura N° 1.3: Vista general edificio chancado primario.**

Fuente: fotografía Planta Ojos del Salado.

### 1.6.1 Descripción general del chancador de mandíbulas

"La mandíbula oscilante describe dos tipos de movimientos: un movimiento de oscilación dirigido hacia el lado opuesto de la cámara (que se denomina muela fija debido a la acción de una placa de articulación), y un movimiento vertical causado por la rotación del eje excéntrico." ("Chancadores de mandíbulas - McLanahan"), La combinación de estos dos movimientos comprime el material y lo empujan a través de la cámara de chancado, la cual se ajusta a un tamaño predeterminado de acuerdo con la estrategia operacional.

### 1.6.2 Terminología y conceptos generales de las instalaciones

- ✚ **Tolva de recepción de mineral:** Lugar donde es descargado el mineral proveniente de la mina Santo, por medio de camiones.
  
- ✚ **Alimentador de placas:** Equipo que traslada el mineral desde la tolva hacia la parrilla desde la cual ingresa al chancador.
  
- ✚ **Parrillas:** Conjunto de rieles separados a 3" cada uno y dispuestos longitudinalmente en sentido de flujo, que sirve para clasificar el mineral de bajo tamaño, antes de ser alimentado el chancador.
  
- ✚ **Chancador:** Equipo que realiza la operación de reducción de tamaño del mineral, el cual básicamente está compuesto por dos mandíbulas una fija y la otra móvil, su sistema motriz es accionado por un motor 150 HP, de anillos rozantes.
  
- ✚ **Correa transportadora:** Cinta transportadora sin fin ubicada sobre una estructura metálica y accionada por medio de una polea motriz con sus cubiertas de carga y retorno apoyadas sobre polines. Cuya función es transportar el mineral chancado hacia el cono grueso.

- ✚ **Electroimán:** Es un equipo que a partir de la electricidad genera un campo magnético (imán), el cual atrae los materiales ferrosos que pasan por la correa.
  
- ✚ **Control polvo:** Dispositivos compuestos por aspersores de agua y aire, los cuales permiten la reducción de la polución a la descarga y trituración del material, estos están ubicados en tolva de recepción de mineral y en la salida chancador correa CV-01, lo que ayuda al control de la polución generada por la descarga, trituración, caída y transporte de mineral.
  
- ✚ **Sistema de refrigeración:** Cumple la función de mantener la temperatura normal del chancador, enfriando el aceite del sistema de lubricación.
  
- ✚ **Sistema de lubricación:** Cumple la función de lubricar el Pitman del chancador.

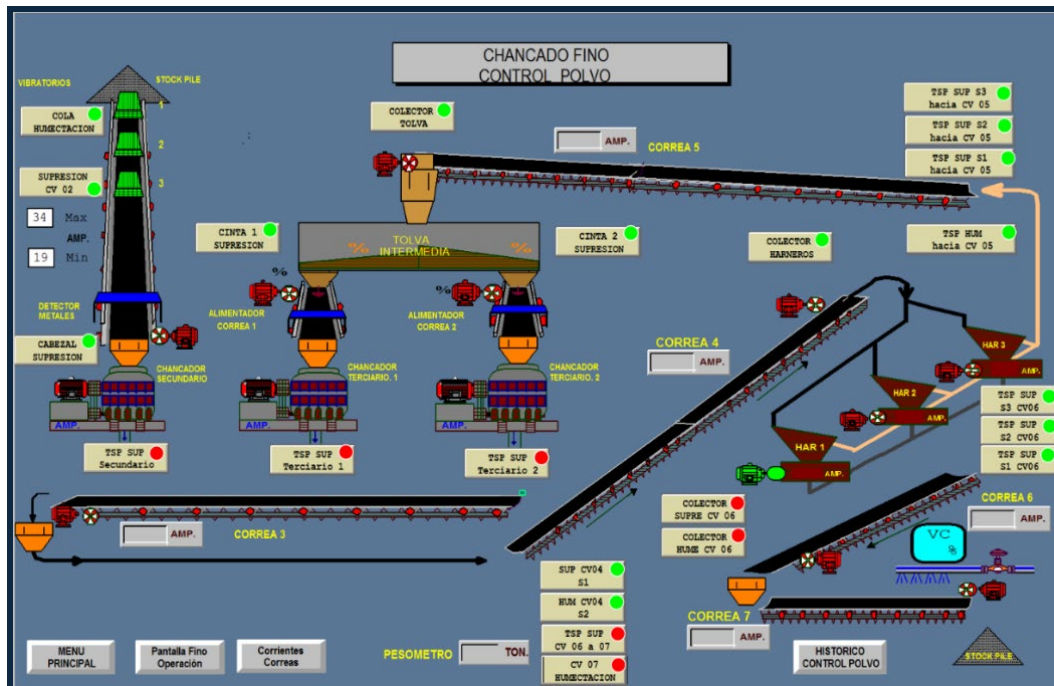
## **1.7 Descripción del proceso del área de Chancado Fino**

### **1.7.1 Descripción de las Instalaciones**

El Área del chancado fino, este circuito de chancado comienza desde los alimentadores vibratorios ubicados debajo del acopio de mineral grueso (stock pile grueso), hasta el acopio de mineral fino de la correa N° 7, (stock pile fino). (ver la figura N° 1.4).

El objetivo de esta área es procesar el máximo de tonelaje proveniente del chancado primario, con la granulometría adecuada, a un bajo costo cuidando y/o protegiendo al medio ambiente. La capacidad nominal de esta planta es de 5.000 toneladas por día.

Desde el stock pile grueso se extrae mineral mediante tres alimentadores vibratorios el cual es descargado en la correa 2 para ser transportado hasta el chancador secundario.



**Figura N° 1.4: Diagrama de proceso chancado fino.**

Fuente: Visualización de pantalla operador sala de control, Planta Ojos del Salado.

El canchador secundario y/o Standard, reduce el mineral a una granulometría adecuada, determinada por un Setting de trabajo que varía dependiendo de la estrategia operacional de 20 a 25 mm descargándolo en la correa 3, donde este se mezcla con el producto de los canchadores terciarios donde posteriormente se descarga en la correa 4 y este al chute repartidor, el cual lo envía a clasificación a tres harneros, compuesto por dos parrillas deck superior e inferior.

El mineral rechazado por estas dos parrillas es descargado en la correa 5 para ser recirculado hacia las tolvas intermedias, y por tanto nuevamente al proceso de reducción y clasificación.

Desde las tolvas intermedias se extrae el mineral mediante dos alimentadores cintas 1 y 2 de velocidad variable, alimentando a los dos canchadores terciarios 1 y 2, respectivamente, donde se reducen el mineral a una granulometría adecuada, determinada

por un Setting de trabajo que varía dependiendo de la estrategia operacional de 7 a 10 mm, descargándolo nuevamente a la correa 3.

Por otra parte, el mineral fino que es clasificado por los harneros constituye el producto final de esta etapa, siendo descargado a la correa 6, está a la correa 7 y luego es apilado en el acopio fino (stock pile fino).

## **1.8 Análisis de la problemática de las áreas de Chancado Primario y Fino**

Ambas áreas como todo procesamiento de minerales, la producción de este son accionado por motores de inducción de distintas potencias de acuerdo con su aplicación, lo que generan un bajo factor de potencia y la problemática se acrecienta ya que ambos bancos de condensadores están fuera de servicio. Esto se puede observar claramente en los medidores de variables eléctrica IQ-1000, marca Westinghouse, los cuales se encuentran ubicado en cada CCM 051, Chancado Primario y el CCM 102 Chancado Fino.

En una primera etapa será comprender los conceptos teóricos para el entendimiento de la problemática de tener un factor de potencia deficiente, luego se medirán las variables eléctricas las que nos permitirán ver la calidad de la energía actual de ambas áreas, estas mediciones se realizaran en baja tensión cada sala eléctrica TAG N° 1-CCM-051-area 05-0240-01, chancado primario y sala eléctrica TAG N°2 CCM 102-area-05-0240-02, chancado fino, para luego el modelamiento de la carga se utilizará el software ETAP.

Los datos se obtendrán en cada una de las salas eléctricas indicadas tomando muestras cada 10 minutos durante 7 días, se descartarán periodos en los cuales no se registren datos debido a que dichas áreas se encuentran sujetas al plan anual de mantenimiento, como también a mantenimiento correctivo, lo cual se traduce a la detención de las áreas o parte de ellas en donde los datos pueden ser poco significativo.

Una vez realizado el diagnóstico, se efectuará el posterior diseño de los bancos de condensadores que se implementará en cada una de las áreas que actúen como elementos de corrección y mejoramiento del factor de potencia.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 Conceptos básicos**

Es importante repasar algunos conceptos que hacen referencia a los tipos de potencias presentes en los circuitos de corriente alterna.

De acuerdo con este criterio, en cualquiera instalación industrial de corriente alterna, conviene distinguir los siguientes términos.

La potencia eléctrica representa la capacidad de una máquina, equipo o instalación para generar o consumir energía en un determinado intervalo de tiempo. En los circuitos de corriente alterna, el funcionamiento de los dispositivos eléctricos involucra tres tipos fundamentales de potencia:

##### **2.1.1 Potencia aparente (S)**

La potencia aparente es la suma geométrica de las potencias activa y reactiva, o bien, el producto de la corriente y el voltaje. Se la representa con la letra S y su unidad de medida se expresa en voltamperios (VA).

$$S = V * I \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

##### **2.1.2 Potencia activa (P)**

Se representa con la letra P y su unidad es watts (W). Solamente esta potencia se puede transformar en potencia mecánica o en potencia calorífica.

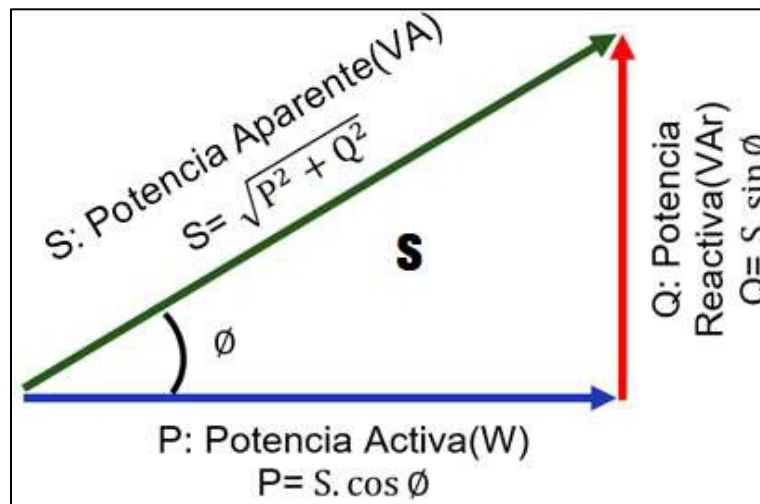
La potencia efectiva o real es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo, es decir, en energía utilizable.

### 2.1.3 Potencia reactiva (Q)

También conocida como potencia magnetizante, se simboliza con la letra Q, y se mide en voltamperios reactivos (Var), Aunque no puede convertirse directamente en energía útil como potencia mecánica o calorífica, cumple un papel esencial en el funcionamiento de equipos eléctricos, tales como: motores, transformadores, bobinas ya que es necesaria para generar los campos magnéticos que permiten operar dichos dispositivos. Sin embargo, su presencia en los sistemas eléctricos también implica pérdidas adicionales.

### 2.1.4 Triángulo de potencias

El triángulo de potencias es la representación fasorial de la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S). La figura N° 2.1 es usada para ilustrar las diferentes formas de potencia eléctrica.



**Figura N° 2.1: Triángulo de potencia eléctrica.**

Fuente: Catálogo Legrand

Donde:

✚ P = Potencia activa (kW).

- ✚ Q = Potencia reactiva, no produce trabajo, pero si hay que pagar por ella (kVAr).
- ✚ S = Potencia aparente, potencia total requerida para alimentar la carga (kVA).

De la figura N° 2.1 se obtiene la ecuación N° 2.2 Por lo que se puede conocer la potencia aparente a partir del teorema de Pitágoras aplicado en el triángulo de potencias.

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

### 2.1.5 Tipos de carga

En un sistema eléctrico los elementos pasivos se los conoce como cargas, estas pueden ser lineales y no lineales.

Las cargas lineales son las que muestran una relación proporcional entre el voltaje que se aplica y la corriente producida. En otras palabras, cuando se le aplica a un voltaje, la forma de la onda de la corriente que se genera conserva la misma forma a la del voltaje.

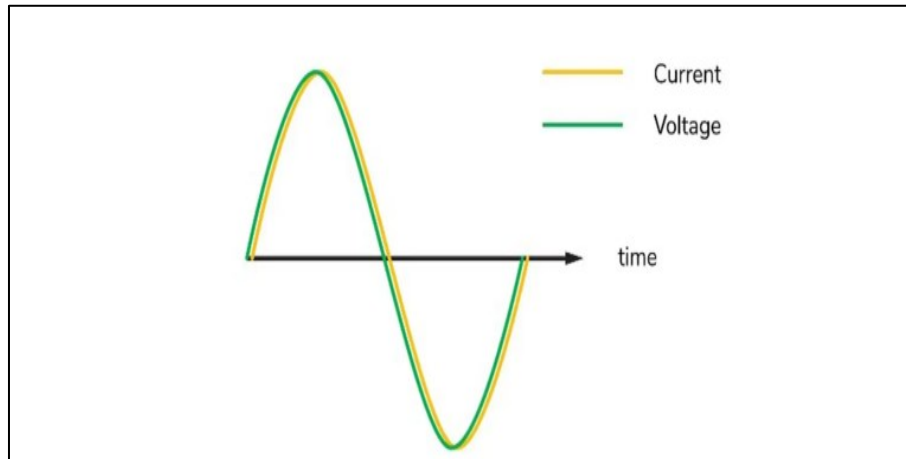
Las cargas no lineales son aquellas cuya relación entre corriente y tensión no es constante debido a que, al aplicarse una tensión, su impedancia varía, provocando así que la onda de la corriente generada no sea igual a la onda del voltaje aplicado.

Las cargas eléctricas también se pueden catalogar según su capacitancia, inductancia y reactancia, además de una cuarta clasificación, la cual sería una combinación de las anteriormente mencionadas.

### 2.1.6 Cargas resistivas

La característica de estas cargas es que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente es cero, (Por lo tanto, se tiene un factor de potencia unitario) es decir, se encuentran en fase de forma en que al aumentar o disminuir el voltaje aplicado, la corriente

tendrá una reacción directamente proporcional a este. Como se muestra en la figura N° 2.2.

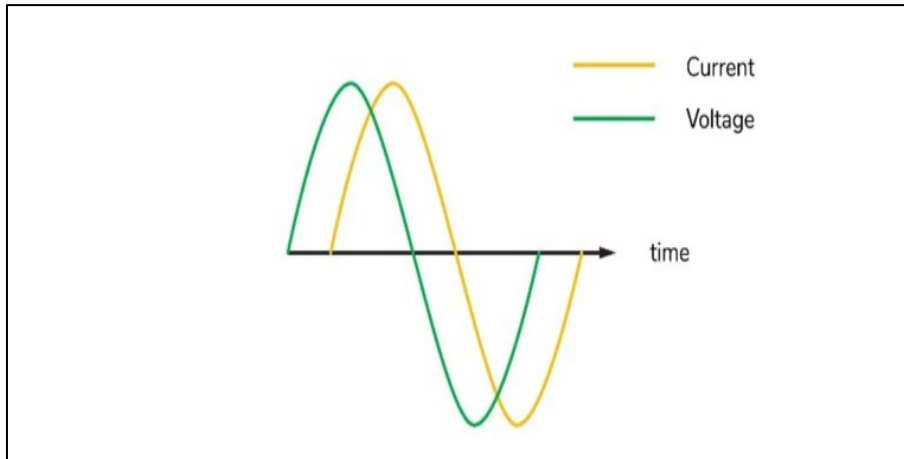


**Figura N° 2.2: Forma de onda voltaje y corriente carga resistiva.**

Fuente: Avtron Power.

### 2.1.7 Cargas inductivas

Las cargas inductivas o bobinas como los motores y transformadores la característica principal de estos elementos es la de almacenar y consumir la energía eléctrica convirtiéndola en energía magnética por medio del campo magnético que se genera al circular una corriente eléctrica por estos elementos, la corriente se encuentra desfasada respecto al voltaje, en  $-90^\circ$ , produciendo que a la vez que el voltaje aumenta, la corriente disminuye, siendo inversamente proporcional. Con este comportamiento se tiene un factor de potencia retrasado. Como se observa en la figura N° 2.3.

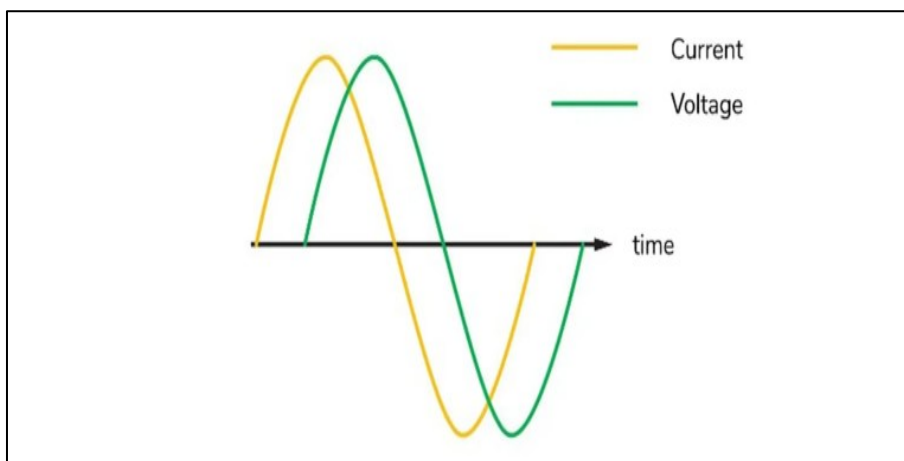


**Figura N° 2.3: Forma de onda voltaje y corriente carga inductiva.**

Fuente: Avtron Power.

### 2.1.8 Cargas capacitivas

Carga capacitiva se refiere a un tipo de carga eléctrica en un circuito que muestra un comportamiento capacitivo, caracterizado por su capacidad para almacenar energía en un campo eléctrico. En términos técnicos, un componente ideal como un condensador (o capacitor) en un circuito de corriente alterna (CA) presenta una impedancia puramente reactiva, donde la corriente eléctrica se adelanta al voltaje en  $90^\circ$  de fase como se observa en la figura N° 2.4.



**Figura N° 2.4: Forma de onda voltaje y corriente carga capacitiva.**

Fuente: Avtron Power.

### 2.1.9 Carga mixta o combinada

Está compuesta por una parte resistiva, dispuesta en paralelo con otra parte reactiva ideal, la parte reactiva puede considerarse como prácticamente nula. Sin embargo, en las cargas representadas por líneas de transmisión y distribución, transformadores, motores eléctricos, entre otros, la parte reactiva de la carga suele ser de una magnitud similar a la de parte resistiva.

En estos casos, además de la corriente activa necesaria para producir el trabajo, el calor o la función deseada, la carga toma algo adicional de corriente activa comparable en magnitud a la corriente reactiva, esta misma corriente si bien es indispensable para energizar los circuitos magnéticos de los equipos mencionados, representa una carga adicional de corriente para el cableado de las instalaciones industriales, los transformadores de potencia, las líneas eléctricas.

### 2.1.10 Factor de potencia

Se describe como la relación entre la potencia de trabajo o activa (P) y la potencia aparente (S) consumida. Está definido por la ecuación N° 2.3.

$$FP = \cos\varphi = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \quad (\text{Ec. N° 2.3})$$

El factor de potencia expresa en términos generales, el desfaseamiento o no de la corriente con relación al voltaje y es utilizado como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el cual puede tomar valores entre 0 y 1 siendo la unidad (1) el valor máximo de Factor de Potencia y por tanto indica el mejor aprovechamiento de energía. Por ejemplo, si el factor de Potencia es igual a 0.80, indica que del total de la energía suministrada (100 %), sólo el 80 % de esa energía es aprovechada en trabajo útil.

El factor de potencia se utiliza para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los equipos ha sido transformada en trabajo y bajo a 1 significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

### **2.1.11 Corrección del factor de potencia**

Las cargas industriales por su naturaleza eléctrica son reactivas a causa de la presencia principalmente de motores y transformadores, debido a que poseen un bajo factor de potencia. Al consumo de potencia activa ( $W$ ), se suma el consumo de una potencia reactiva ( $Var$ ), las cuales en conjunto determinan el comportamiento operacional de dichos equipos.

Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas de electricidad. Al ser suministradas por las empresas de electricidad deberá ser producida y transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transmisión y distribución.

La potencia reactiva, que no genera trabajo directo en los equipos, es necesaria para generar el flujo electromagnético que activa elementos como motores y transformadores. Considerando que la cantidad de estos elementos es importante en la industria de la minera, los requerimientos de potencia reactiva también se vuelven considerables, a mayor cantidad de equipo que utiliza potencia reactiva, mayor consumo de esta, por lo que resulta en una reducción del factor de potencia. Por esta razón, corregir y mejorar el factor de potencia resulta fundamental, ya que su deficiencia conlleva implicancias técnicas y económicas significativas. Entre ellas se destacan la reducción en la eficiencia energética del sistema, la posibilidad de incurrir en penalizaciones por parte de las empresas distribuidoras debido al consumo excesivo de potencia reactiva, y el aumento de la exigencia sobre la infraestructura eléctrica de las instalaciones. Esto último puede traducirse en la necesidad de sobredimensionar equipos, incrementar los costos operativos y comprometer la estabilidad del sistema. En consecuencia, abordar este fenómeno de

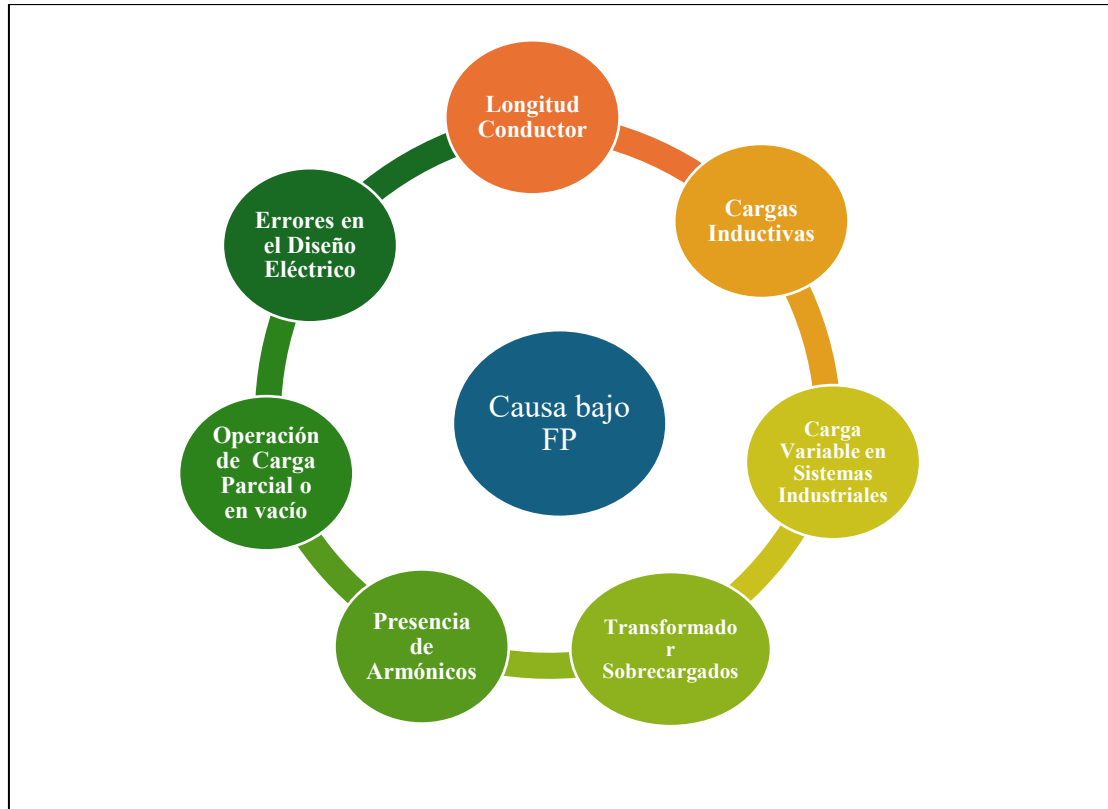
manera adecuada permite mejorar el desempeño eléctrico, reducir costos y garantizar una operación más eficiente y confiable.

## 2.2 Causas del bajo factor de potencia

El bajo factor de potencia se debe parcialmente a la carga de los motores de inducción, transformadores y en general a cualquier tipo de inductancia, son el origen del bajo factor de potencia ya que son cargas no lineales que contaminan la red eléctrica, en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con respecto al voltaje lo que provoca un bajo factor de potencia (ver figura N° 2.5).

Algunas causas por la cual se produce un bajo factor de potencia:

- ✚ **Cargas Inductivas:** Motores eléctricos, transformadores, consumen potencia reactiva para generar sus campos magnéticos, reduciendo el FP.
- ✚ **Motores a Carga Parcial o en vacío:** Motores operando con carga reducida generan una mayor proporción de potencia reactiva en comparación con la activa.
- ✚ **Presencia de Armónicos:** Variadores de frecuencia, rectificadores y electrónica de potencia distorsionan la forma de onda de corriente, afectando el FP.
- ✚ **Transformadores Sobrecargados:** Un transformador operando con alta carga genera más pérdidas por potencia reactiva, disminuyendo la eficiencia eléctrica.
- ✚ **Longitud de Conductores:** Cables largos presentan reactancias inductivas, aumentando la demanda de potencia reactiva y reduciendo el FP.
- ✚ **Carga Variable en Sistemas Industriales:** Cambios bruscos en la demanda eléctrica provocan fluctuaciones en el FP, aumentando el consumo de potencia reactiva.
- ✚ **Errores en el Diseño Eléctrico:** Incorrecto dimensionamiento de transformadores, motores y líneas eléctricas provoca pérdidas y baja eficiencia operativa.



**Figura N° 2.5: Causas de un bajo factor de potencia.**

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Consecuencias del bajo factor de potencia

En una instalación eléctrica mientras mayor la cantidad de energía reactiva el factor de potencia se deteriora y como la potencia activa es constante, se necesita una mayor intensidad de corriente para satisfacer esta demanda, además este aumento de la corriente incrementa las pérdidas por calentamiento o efecto Joule que está dada por la expresión donde  $I$  es la corriente total y  $R$  es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinados de generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifiestan en:

- ✚ Calentamiento de conductores.
- ✚ Aumento de la caída de tensión.

- ✚ Sobrecarga de líneas de distribución.
- ✚ Calentamiento y reducción del rendimiento en motorizaciones.
- ✚ Disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección.
- ✚ Incremento del mantenimiento por deterioro.
- ✚ Incremento de la facturación eléctricas.
- ✚ Penalización económica por no cumplimiento de un factor de potencia mínimo 0,93.

Uno de los mayores problemas que causa el bajo FP es el sobrecalentamiento y deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, sino que también incrementa el riesgo de fallas graves que puedan provocar cortos circuitos, comprometiendo la seguridad de las personas y equipos.

En la tabla N° 2.1, se indican los principales impactos técnicos asociado a un deficiente factor de potencia.

**Tabla N° 2.1: Impactos por bajo Factor de Potencia.**

Problema	Descripción	Impacto
Aumento de corriente y pérdidas por efecto Joule	Bajo FP eleva la corriente total, incrementando pérdidas por calentamiento ( $P_{\text{Joule}} = I^2R$ ).	Conductores de mayor calibre, aumentando los costos.
		Recalentamiento de bobinados en transformadores.
		Dispositivos de protección mayor capacidad mayor costos.
		Deterioro del aislamiento de conductores por calor, reduciendo vida útil.
Caídas de tensión en conductores	El aumento de corriente causa caídas de tensión ( $\Delta V = I \cdot R$ ), reduciendo el voltaje en las cargas.	Menor potencia de salida en equipos.
		Desgaste en transformadores, cables y sistemas de control.
Sobrecarga de equipos	El exceso de corriente ocasiona sobrecarga en transformadores y líneas distribución, sobre su diseño	Reducción de vida útil de equipos.
		Riesgo de daños por operar fuera de límites.
Incremento en facturación por consumo	Mayor potencia reactiva genera pérdidas y penalizaciones.	Bajo FP 0,93, incurrir en penalizaciones
		Mayor facturación por consumo energía reactiva elevado de corriente.

### **2.3.3 Alternativas para corregir el factor de potencia**

Los métodos para realizar la corrección del factor de potencia son los siguientes:

- ✚ Por intermedio de motores síncronos.
- ✚ Por medio de banco de condensadores estáticos.

#### **2.3.3.1 Motores síncronos**

Pueden también actuar como generadores de kvar, su capacidad para generar kvar es en función de su excitación y de la carga conectada; cuando operan en baja excitación no genera los suficientes kvar para suplir sus propias necesidades y en consecuencia los toman de la red eléctrica. Cuando operan sobrecitados (operación normal), suplen sus requerimientos de kvar y pueden además entregar kvar a la red; en este caso son utilizados como compensadores de bajo factor de potencia.

De lo expuesto se deduce que, variando la carga de una máquina sincrónica, se puede regular su factor de potencia.

Sin embargo, la desventaja de esta posibilidad de compensación del factor de potencia, con un motor síncrono sobrecitado, es que requiere de una corriente de campo y un flujo magnético alto, lo cual causa un significativo calentamiento del rotor y además su complejidad en la instalación, arranque y mantenimiento de estos motores es que limita el uso a la producción de energía eléctrica como alternadores.

#### **2.3.3.2 Banco de condensadores estáticos**

Mediante la aplicación de banco de condensadores estáticos se puede compensar el factor de potencia de una instalación, resultando un método sencillo y económico. Este método es el más aconsejable para la industria ya que presenta las siguientes ventajas:

- ✚ Reduce las caídas de tensión, en los circuitos.
- ✚ Su mantenimiento para este tipo de equipo es sencillo, y de bajo costo.
- ✚ Disminuye las perdidas por sobrecalentamiento de los componentes del circuito.
- ✚ Aumenta la vida útil de los componentes
- ✚ Se logra eliminar las penalizaciones por potencia reactiva y reduce el valor total de la factura eléctrica.

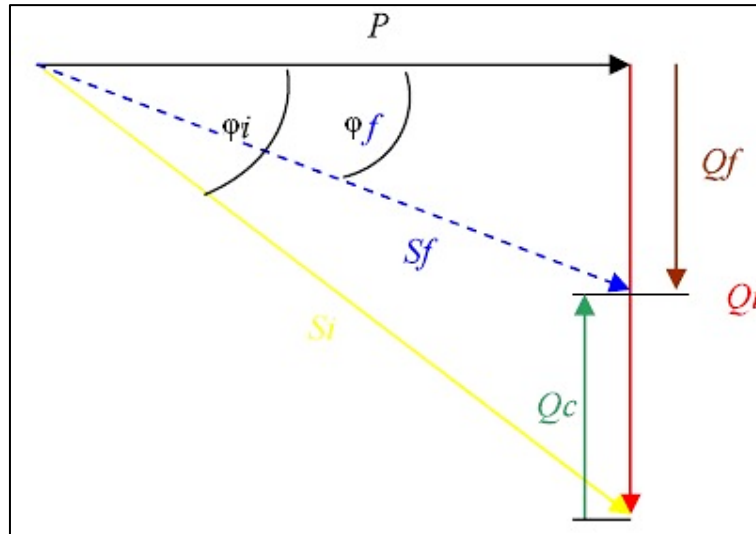
### **2.3.4 Corrección del factor de potencia mediante el uso de condensadores.**

Consiste en compensar la potencia reactiva inductiva de una instalación mediante la incorporación de potencia reactiva capacitiva que es generada por un banco de condensadores.

Este procedimiento permite reducir la potencia aparente total del sistema, mejorar el factor de potencia y disminuir las corrientes que circulan por conductores y equipos eléctricos.

Para el análisis se consideran las siguientes variables:

- ✚  $P =$  Potencia Activa (W)
- ✚  $Q_i =$  Potencia Reactiva Inicial (Var)
- ✚  $S_i =$  Potencia Aparente Inicial (VA)
- ✚  $\Phi_i =$  Factor de potencia Inicial
- ✚  $Q_c =$  Potencia Reactiva capacitiva (Var)
- ✚  $Q_f =$  Potencia Reactiva Inductiva final (Var)
- ✚  $S_f =$  Potencia Aparente Final (VA)
- ✚  $\Phi_f =$  Factor de Potencia Final



**Figura N° 2.6: Corrección del factor de potencia mediante el uso de condensadores.**

Fuente: Catalogo Legrand.

En la Figura N° 2.6 el ángulo de fase inicial es  $\phi_i$  y el ángulo de fase final es  $\phi_f$ , el ángulo de fase final corresponde al factor de potencia que se desea alcanzar. El valor de la potencia  $Q_f$  se ha obtenido restando la potencia  $Q_i$  de la potencia  $Q_c$  suministrada por los condensadores.

El proceso para encontrar la capacidad de condensadores que se requieren para mejorar el factor de potencia se la obtiene con las ecuaciones:

$$Q_c = P(\text{Tangente } \phi_i - \text{Tangente } \phi_f) \quad (\text{Ec. N° 2.4})$$

## 2.4 Instalación y localización del banco de condensadores

Los bancos de condensadores pueden ser instalados en distintos puntos del sistema eléctrico de una planta y mediante las de las siguientes estrategias:

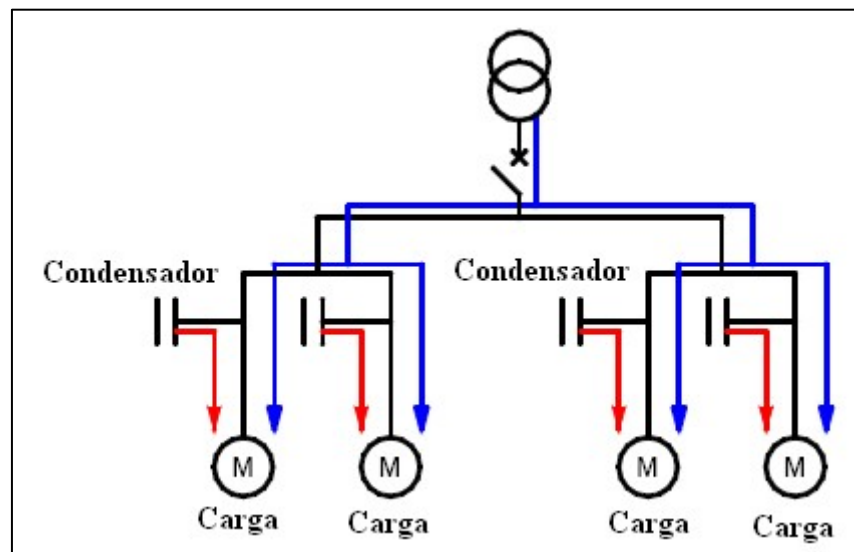
- ✚ Instalación Individual.
- ✚ Instalación en grupo o por sectores.

## ✚ Instalación global.

En teoría, la compensación óptima es aquella que reduce la distribución de la energía reactiva a la zona más próxima a su punto de origen. Sin embargo, la elección de su ubicación y diseño dependerá de criterios técnicos y económicos.

### 2.4.1 Instalación individual

La compensación individual consiste en instalar los condensadores junto a cada una de las cargas que consumen potencia reactiva, permitiendo corregir el factor de potencia en forma individual, como se muestra en la figura N° 2.7.



**Figura N° 2.7: Compensación Individual**

Fuente: Catalogo Legrand.

La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo de la carga inductiva es significativa.

El método de compensación individual es el tipo de compensación más efectivo ya que el condensador se instala en cada una de las cargas inductivas a corregir, de manera que

la potencia reactiva circule únicamente por los conductores cortos entre el motor y el condensador.

La compensación individual presenta las siguientes ventajas:

- ✚ Instalar condensadores junto a la carga inductiva permite que la potencia reactiva circule solo por una pequeña parte de la red, eliminando las pérdidas resistivas asociadas por efecto Joule ( $R \cdot I^2$ ).
- ✚ El accionamiento para el motor puede también servir como un interruptor para el condensador eliminando así el costo de un dispositivo de control del condensador.

No obstante, la desventaja mayormente significativa de este método sería el costo de varios condensadores por separado es mayor que el de un condensador individual de valor equivalente.

Es importante mencionar que para no incurrir en una sobre compensación en la carga inductiva que provoque alteraciones en el voltaje que puedan dañar la instalación eléctrica, la potencia del banco de condensadores deberá limitarse al 90 % de la potencia reactiva del motor en vacío.

#### **2.4.2 Compensación individual en transformadores de distribución**

Otro método para corregir el factor de potencia es compensar la potencia reactiva en los transformadores de distribución. La potencia total del banco de condensadores se calcula para compensar la potencia reactiva absorbida por el transformador en vacío, que es del orden del 5 al 10 % de la potencia nominal.

De acuerdo con las normas técnicas para instalaciones eléctricas, con el fin de evitar fenómenos de resonancia y sobretensión en vacío, la potencia total del banco de condensadores no debe exceder el 10% de la potencia nominal (en VA) del transformador.

### 2.4.3 Instalación en grupo

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando estas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos, como se muestra en la figura N° 2.8. Este tipo de instalación se adopta generalmente en grandes instalaciones.

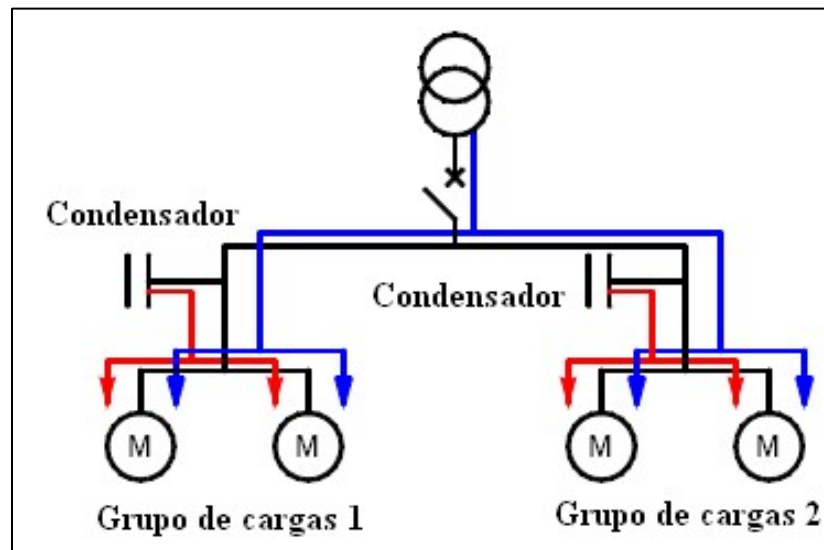


Figura N° 2.8: Compensación en Grupo.

Fuente: Catalogo Legrand

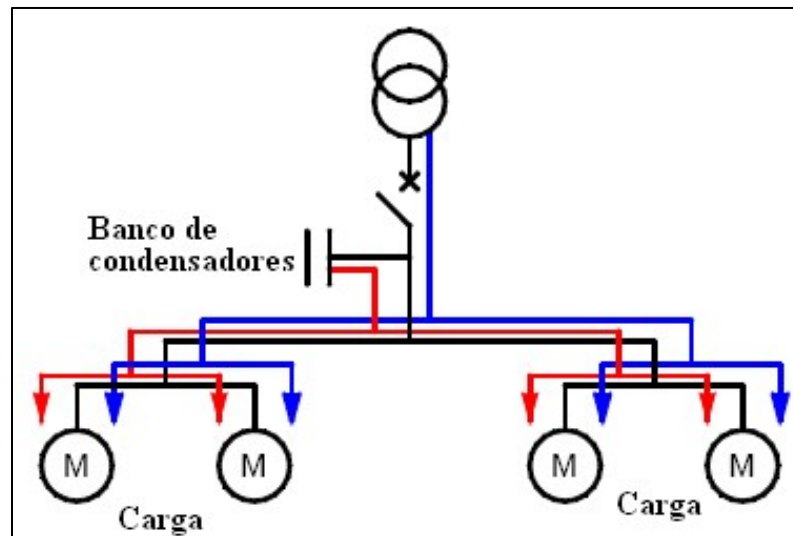
### 2.4.4 La compensación en grupo presenta las siguientes ventajas:

- ✚ Se conforman grupos de carga de diferente potencia, pero con un tiempo de operación similar, para que la compensación se realice por medio de un banco de condensadores común con su propio interruptor.
- ✚ Los bancos de condensadores pueden ser instalados en el tablero general de control de motores.
- ✚ El banco de condensadores se utiliza únicamente cuando las cargas están en uso.
- ✚ Se reducen los costos de inversión para la adquisición de banco de condensadores.

- ✚ Es posible descargar de potencia reactiva las diferentes líneas de distribución de energía eléctrica.
- ✚ Mantiene un criterio económico al concentrar la compensación de cada sector en las líneas de alimentación principal se presenta la desventaja de que la sobrecarga de potencia reactiva no se reduce, es decir, que seguirá circulando energía reactiva entre el centro de control de motores y los motores, por este motivo no permite una reducción del dimensionamiento de la instalación.
- ✚ Presenta la desventaja de riesgo de sobrecompensación, si hay grandes variaciones de carga.

### 2.4.5 Instalación global o central

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del banco de condensadores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación la ubicación del banco de condensadores se lo puede observar en la figura N° 2.9.



**Figura N° 2.9: Compensación global o central.**

Fuente: Catalogo Legrand.

La potencia total del banco de condensadores se divide en varios pasos que están conectados a un regulador de compensación automática de energía reactiva, que conecta y desconecta los pasos que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador.

La compensación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- ✚ Mejor utilización de la capacidad de los bancos de condensadores.
- ✚ Se tiene una mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico.
- ✚ Suministro de potencia reactiva según los requerimientos del momento.
- ✚ Es la alternativa más económica porque toda la instalación se concentra en un lugar.

Las desventajas de corregir el factor de potencia mediante la compensación centralizada son:

- ✚ **Sobrecompensación o subcompensación local:** Algunas zonas pueden quedar con factor de potencia inductivo (bajo) mientras otras quedan capacitivas (riesgo de sobrevoltaje), especialmente en sistemas con cargas variables.
- ✚ **Mayor circulación de corriente reactiva en las redes internas:** Aunque se corrige en el punto de medición principal, la potencia reactiva sigue fluyendo entre las cargas y el punto de compensación, aumentando las pérdidas por efecto Joule en cables y transformadores internos.
- ✚ **Menor resiliencia ante fallas:** Si el banco centralizado falla o se desconecta, todo el sistema queda sin corrección, afectando la facturación y estabilidad global.
- ✚ **Costo inicial alto y complejidad en el control automático:** Requiere sistemas de regulación más sofisticados (controladores con múltiples etapas) para evitar resonancias o inyecciones indeseadas de armónicos.

## **2.4.6 Tipos de bancos de condensadores**

La compensación de la energía reactiva es esencial para la eficiencia energética en instalaciones industriales. Existen diferentes tipos de bancos de condensadores utilizados para este propósito, cada uno con sus propias características y aplicaciones.

### **2.4.6.1 Banco de Condensadores Fijos**

Los bancos de condensadores fijos están diseñados para proporcionar una compensación constante de potencia reactiva. Son ideales para instalaciones donde la carga reactiva es relativamente estable y predecible. Estos bancos se instalan en paralelo con la carga y no requieren ajustes frecuentes, lo que los hace una solución simple y económica para mejorar el factor de potencia.

### **2.4.6.2 Banco de Condensadores Automáticos**

Los bancos de condensadores automáticos, por otro lado, están equipados con reguladores que ajustan automáticamente la cantidad de condensadores en servicio, según las necesidades de compensación de la instalación en cada momento.

Esta capacidad de ajuste dinámico los hace ideales para instalaciones con cargas variables, donde la demanda de potencia reactiva fluctúa. Los bancos automáticos ayudan a mantener un factor de potencia óptimo en todo momento, reduciendo así las pérdidas de energía y mejorando la eficiencia del sistema.

A continuación, se presenta una tabla N° 2.2 comparativa entre ambos tipos de bancos de condensadores donde se resalta las diferencias en cada uno de ellos, de igual manera en modo general se puede determinar, que un banco de condensadores fijo, es recomendado para aplicaciones con cargas constantes, pero presenta riesgo de sobrecompensación, y un banco variable es más eficiente en redes o sistemas con demanda variable, ya que ajusta la potencia reactiva de forma automática, reduciendo pérdidas

energéticas y mejorando la estabilidad eléctrica, para en ambos casos estos ayudan a evitar penalizaciones por un bajo factor de potencia, teniendo en consideración lo expuesto.

**Tabla N° 2.2: Comparativa de tipos de bancos de condensadores.**

Aspecto	Banco Fijo	Banco Variable
Accionamiento	Manual o activación directa sin ajuste dinámico.	Regulado automáticamente según demanda y/o carga
Flexibilidad	No ajusta la compensación ante variaciones de carga.	Se adapta a cambios en la carga reactiva.
Factor de Potencia	Puede llevar a sobrecorrección en cargas bajas.	Mantiene el FP en niveles óptimos.
Protección Contra Armónicos	Puede requerir filtros adicionales.	Ajuste progresivo minimiza efectos armónicos.
Impacto en la Red	Puede generar fluctuaciones de tensión por sobrecompensación.	Mejora la estabilidad y calidad de energía.
Eficiencia Energética	Menor eficiencia si la carga es variable.	Maximiza ahorro energético y evita penalizaciones.
Costo Inicial	Más económico en inversión inicial.	Mayor inversión por regulador y controladores.
Mantenimiento	Puede requerir ajustes manuales frecuentes.	Menor intervención, autogestionado.
Aplicación Recomendada	Cargas constantes o sistemas simples.	Instalaciones industriales con demanda fluctuante.

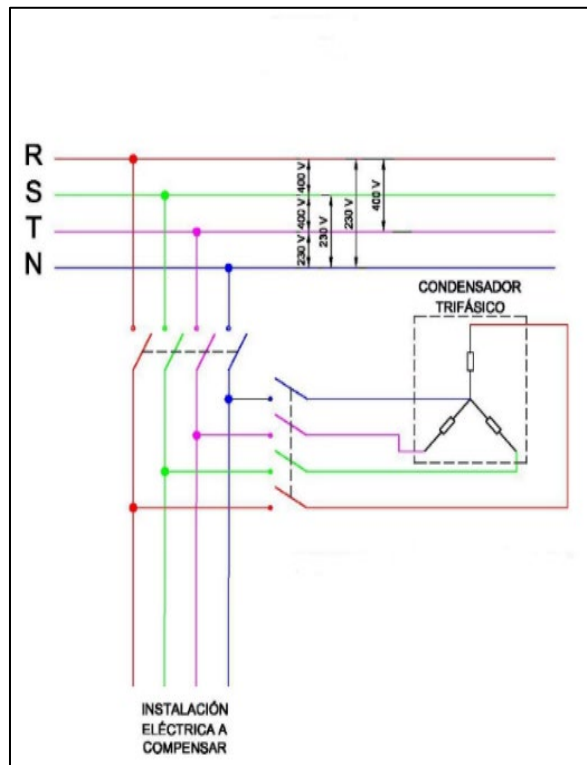
#### 2.4.7 Conexión de los bancos de condensadores

El tipo de conexión más comúnmente utilizado es la conexión en estrella o en triángulo.

##### 2.4.7.1 Conexión en estrella:

Los condensadores están conectados de tal manera que un extremo de cada condensador está conectado a un punto común (neutro) y el otro extremo a una fase del

sistema. Esta configuración es útil para sistemas trifásicos y permite una distribución equilibrada de la carga reactiva. Como se muestra en la figura N° 2.10.



**Figura N° 2.10: Conexión estrella banco condensador**

Fuente: Catalogo Legrand.

#### 2.4.7.2 Ventajas de la Conexión en Estrella:

- ✚ **Reducción de la Tensión en los Condensadores:** En una conexión en estrella, la tensión a través de cada condensador es menor que la tensión de línea, lo que reduce el estrés de voltaje en los condensadores.
- ✚ **Facilidad de Medición y Monitoreo:** El punto neutro proporciona un punto de referencia fácilmente accesible para medir el voltaje de fase y detectar desequilibrios.
- ✚ **Seguridad y Protección:** La conexión en estrella con el neutro a tierra mejora la seguridad y facilita la protección contra fallas a tierra.

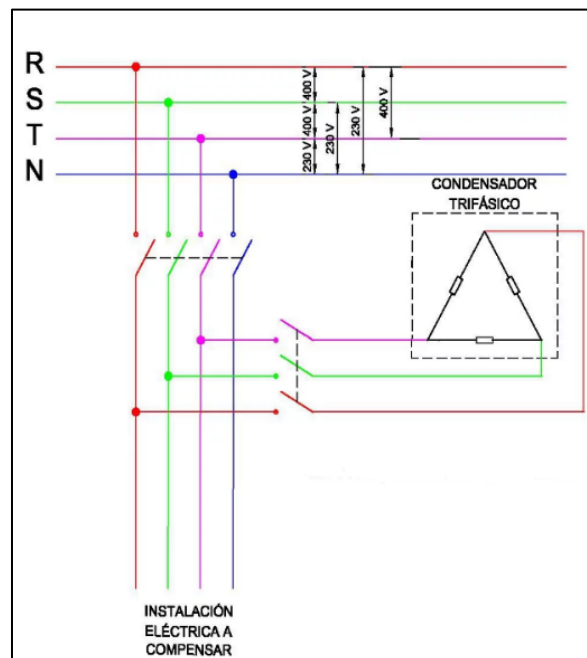
- ✚ **Aplicaciones de Media y Alta Tensión:** Es adecuada para aplicaciones de media y alta tensión debido a la reducción del estrés de voltaje en los condensadores.

#### 2.4.7.3 Desventajas de la Conexión en Estrella:

- ✚ **Mayor Complejidad en el Diseño:** Requiere un diseño más complejo y puede necesitar más componentes, lo que puede aumentar los costos iniciales.
- ✚ **Posibles Desequilibrios:** Si no se diseña correctamente, puede haber desequilibrios en las fases, lo que puede afectar la eficiencia del sistema.
- ✚ **Limitaciones en la Capacidad de Potencia:** En comparación con la conexión delta, la conexión en estrella puede tener una capacidad de potencia ligeramente menor.

#### 2.4.7.4 Conexión en Delta o Triángulo

Los condensadores están conectados en un circuito cerrado, formando un triángulo. Cada condensador está conectado entre dos fases del sistema. Esta configuración es también común en sistemas trifásicos y es efectiva para la corrección del factor de potencia. Ver figura N° 2.11.



**Figura N° 2.11: Conexión triángulo banco condensador**

Fuente: Catalogo Legrand.

#### 2.4.7.5 Ventajas de la Conexión en Delta

- ✚ **Mayor Capacidad de Potencia:** La conexión en delta permite una mayor capacidad de potencia reactiva en comparación con la conexión en estrella, ya que la tensión aplicada a cada condensador es la tensión de línea completa.
- ✚ **Eficiencia Mejorada:** La configuración en delta puede ser más eficiente en términos de utilización de los condensadores, proporcionando una mejor compensación del factor de potencia.
- ✚ **Simplicidad de Instalación:** La conexión en delta no requiere un punto neutro, lo que simplifica el diseño y la instalación en ciertos casos.
- ✚ **Reducción de Corrientes Armónicas:** La configuración en delta puede ayudar a reducir las corrientes armónicas circulantes, mejorando la calidad de la energía.

#### 2.4.7.6 Desventajas de la Conexión en Delta

- ✚ **Mayor Tensión en los Condensadores:** Cada condensador en una conexión en delta está expuesto a la tensión de línea completa, lo que puede aumentar el estrés de voltaje y reducir la vida útil de los condensadores.
- ✚ **Mayor Riesgo de Desequilibrio:** Si uno de los condensadores en la conexión en delta falla, puede provocar un desequilibrio en el sistema, afectando la eficiencia y la estabilidad de este.
- ✚ **Complejidad en la Protección:** La configuración en delta puede requerir una protección más compleja y sofisticada para evitar daños y garantizar una operación segura.
- ✚ **Costo Inicial:** La instalación inicial de una conexión en delta puede ser más costosa debido a la necesidad de condensadores de mayor capacidad y resistencia al voltaje.

## 2.4.8 Armónicos

En el contexto de los sistemas eléctricos, los armónicos son componentes de una señal de corriente o voltaje cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. Los armónicos son causados principalmente por cargas no lineales, como equipos electrónicos, variadores de frecuencia, motores de velocidad variable y equipos de iluminación.

### 2.4.8.1 Principales Características de los Armónicos

- ✚ **Frecuencia Fundamental:** La frecuencia principal de la señal, como 50 Hz o 60 Hz en la mayoría de los sistemas eléctricos.
- ✚ **Frecuencias Armónicas:** Múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (ejemplo., segundo armónico =  $2 \times$  frecuencia fundamental).
- ✚ **Número de Orden:** Los armónicos se clasifican por su número de orden, que indica el múltiplo de la frecuencia fundamental.
- ✚ **Armónico del Orden (N):** Un armónico cuya frecuencia es N veces la frecuencia fundamental (ejemplo, el quinto armónico tiene una frecuencia de  $5 \times$  fundamental).
- ✚ **Magnitud:** La magnitud de los armónicos es menor que la de la frecuencia fundamental, pero puede tener un impacto significativo en la calidad de la energía.
- ✚ Se mide típicamente como un porcentaje de la magnitud de la componente fundamental.
- ✚ **Fase:** Cada armónico tiene una fase específica que puede variar con respecto a la fase de la frecuencia fundamental.
- ✚ La superposición de las diferentes fases de los armónicos puede afectar la forma de onda de la señal total.

### 2.4.9 Distorsión Armónica Total (THD):

- ✚ La THD es una medida de la cantidad total de armónicos presentes en una señal y se expresa como un porcentaje de la componente fundamental.
- ✚ Se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de los armónicos, dividida por la magnitud de la componente fundamental.

### 2.4.10 Tipos de Armónicos:

- ✚ **Armónicos de Secuencia Positiva:** Armónicos cuya secuencia es la misma que la de la frecuencia fundamental.
- ✚ **Armónicos de Secuencia Negativa:** Armónicos cuya secuencia es opuesta a la de la frecuencia fundamental.
- ✚ **Armónicos de Secuencia Cero:** Armónicos que no tienen secuencia y afectan por igual a todas las fases del sistema.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGIA**

**Análisis, mediciones y determinación de la situación actual del sistema eléctrico en las áreas de chancado primario y fino.**

#### **3.1 Recopilación de información**

Las mediciones de parámetros eléctricos se realizaron en ambas áreas Chancado Primario y Fino, primeramente, en chancado Fino durante la fecha comprendida del 08 de diciembre hasta el día 14 de diciembre del 2022, y posteriormente en el área de Chancado Primario entre la fecha del 02 de enero al 09 de enero del 2023, tomando en consideración lo establecido por el Decreto supremo 327 en el artículo 242, que indica de debe ser en intervalos de 10 minutos, y por 7 días consecutivos.

Cabe señalar que ambas áreas del proceso de chancado están sujeta a mantenimiento programado, de acuerdo con el plan anual de mantenimiento, así como también a mantenimiento correctivo, con ello nos referimos a que, durante el periodo en que se tomaron las mediciones, ocurrieron eventos no programados (del tipo correctivo), fallas mecánicas, eléctricas y operacionales, dado que durante los eventos no programados los valores medidos no se considerarán, ya que afectarán en las mediciones promedios.

Adicionalmente se realiza el levantamiento de las cargas asociadas en cada sala eléctrica N° 1 y 2, en donde se encuentran ubicados los centros de control de motores CCM 051, chancado primario y CCM 102, chancado Fino, respectivamente, los cuales se encuentran cada uno de los partidores de los motores y tablero general de iluminación, entre otros, con el fin de tener como antecedentes referenciales la potencia instalada.


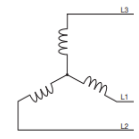
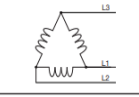
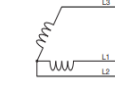
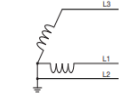
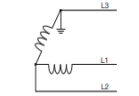
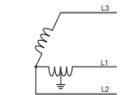
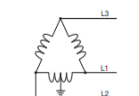
Primeramente, se realizará el análisis de los valores de las variables eléctricas medidas y el dimensionamiento del banco de condensadores autorregulable necesario para corregir



cargas, verificar la capacidad del sistema eléctrico y del cableado, distribuir correctamente la carga entre las tres fases, realizar un seguimiento del factor de potencia y calcular el consumo de energía antes y después de las mejoras para justificar de esta forma las medidas adoptadas para el ahorro de energía.

### 3.3 Método de conexión del Instrumento

El menú de conexión trifásico establece la configuración del cableado del instrumento de acuerdo con el sistema de número de hilos. Como se muestra en la figura N° 3.2.

<p>Trifásico de 3 hilos (L1, L2 y L3)</p>  <p>Indique los 2 sensores de corriente que se conectarán: los 3 sensores (3A) o únicamente 2 (A1 y A2, o A2 y A3 o A3 y A1).</p> <p>Método de los 3 vatímetros con neutro virtual (si conexión 3 sensores) o método de los 2 vatímetros o método de los 2 elementos o método de Aron (si conexión 2 sensores).</p> <p>Para las conexiones 2 sensores, el tercer sensor no es necesario si los otros dos son del mismo tipo, de mismo rango y mismo ratio. En caso contrario, se debe conectar el tercer sensor para realizar las medidas de corriente.</p>	Trifásica de 3 hilos en estrella	
	Trifásica de 3 hilos en triángulo	
	Trifásica de 3 hilos en triángulo abierto	
	Trifásica de 3 hilos en triángulo abierto con conexión a tierra entre las fases	
	Trifásica 3 hilos en triángulo abierto con conexión a tierra en la fase	
	Trifásica de 3 hilos en triángulo "high leg" abierto	
	Trifásica de 3 hilos en triángulo "high leg"	

**Figura N° 3.2: Método de conexión de 3 hilos**

Fuente: Catalogo Chauvin Arnoux.

### 3.4 Representación gráfica a través del analizador de calidad de energía.

La optimización del factor de potencia (FP), es clave en la gestión de sistemas eléctricos industriales. Un factor de potencia desfasado puede resultar en ineficiencia

energética, pérdidas de energía y costos adicionales por parte de los proveedores de energía. En este contexto, la representación gráfica a través de un analizador de redes se presenta como una herramienta eficaz para analizar y mejorar el factor de potencia en sistemas eléctricos.

El objetivo de esta representación es identificar y corregir los problemas relacionados con el factor de potencia. Utilizando un analizador de calidad de energía, se pueden realizar mediciones precisas de las características de la red eléctrica, incluyendo el factor de potencia, corrientes, tensión y las potencias Aparente, Activa y Reactiva entre otros variables eléctricas. Estos datos posibles se utilizan para visualizar y evaluar el rendimiento actual del sistema y detectar desviaciones, puntos críticos de las instalaciones.

Durante la representación se puede analizar y compara diferentes escenario y estrategia de compensación para mejora el factor de potencia. Esto incluye el cálculo de la capacidad necesaria de compensación, como los bancos de condensadores, y la evaluación de los resultados esperados. Además, proporcionara una contemplación clara de los parámetros eléctricos, facilitando la comprensión y el análisis de los resultados.

La simulación grafica a través de un analizador de calidad de energía ofrece una forma eficiente y efectiva de optimizar el factor de potencia, en caso de estar por debajo del umbral 0,93. Esta herramienta proporcionara una visión detallada del comportamiento actual del sistema eléctrico de las áreas de chancado y permitiendo tomar decisiones informadas sobre las acciones correctivas necesarias para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos. En conclusión, la simulación y representación gráfica a través de un analizador de calidad de energía es una herramienta esencial para el diagnóstico y optimización del FP, asegurando la estabilidad del sistema eléctrico y maximizando la eficiencia de las instalaciones.

### **3.5 Análisis y medición de parámetros eléctricos**

El análisis de las mediciones se efectuará detallando las siguientes consideraciones:

- Se realizará la toma de parámetros durante los siete días de medición, para lo cual se procedió a instalar el analizador de calidad de energía agua a bajo del interruptor principal de cada CCM 051 área de chancado primario y CCM 102 área de chancado fino.
- Se hará la trazabilidad tomando en los valores de energía reactiva sobre 10 kVar, ya que, en Chile, no hay un valor mínimo específico establecido por ley para la implementación de bancos de condensadores. Sin embargo, generalmente se considera viable instalar un banco de condensadores cuando la potencia reactiva a compensar supera o igualar los 10 kVar, para el área de chancado primario y la compensación para el chancado fino se considerará los datos de potencia reactiva iguales o mayores a los 20 kVar. Esto se debe a que los costos fijos de implementación pueden hacer que sea menos económico para potencias reactivas muy bajas.

### 3.6 Levantamiento de carga y parámetros eléctricos

La figura N° 3.3, muestra la placa característica de transformador trifásico sumergido en aceite, siendo este el alimentador del CCM 051, donde se observa la potencia Aparente de 500 kVA como capacidad de carga máxima admisible.



**Figura N° 3.3: Datos placa transformador Chancado Primario**

Fuente: C.C.M Ojos del salado

### 3.6.1 Levantamiento de carga área de chancado primario

En la Tabla N.º 3.1 se presentan las cargas asociadas al CCM 051, ubicado en la sala eléctrica N.º 1. En ella se observa todos los motores que interactúan en el proceso de primera molienda como el chancador, correa transportadora y los sistemas auxiliares, presentan un factor de carga igual a 1, lo que indica un funcionamiento continuo y constante.

En contraste, las cargas de alumbrado muestran un factor de carga de 0,5, reflejando una operación intermitente o parcial, asociada a su uso según las necesidades de la planta puntualmente en horario nocturno.

**Tabla N.º 3.1: Cuadro de carga CCM 051, sala eléctrica N.º 1.**

Descripción de cargas	Potencia real (KW)	Cantidad	Potencia Instalada (kW)	Factor de carga (FC)	Máxima Demanda (kW)
Motor Chancador	150	1	150	1	150
Motor Correa # 1	22	1	22	1	22
Motor Alimentador de placa	22	1	22	1	22
Motor Sistema. Lubricación	1,1	1	1,1	1	1,1
Motor Sistema. Refrigeración	4	1	4	1	4
Motor Red incendio	22	1	22	1	22
Electroimán	8	1	12,5	1	13
Alumbrado tipo 1	0,12	26	3,12	0,5	1,56
Alumbrado tipo 2	0,04	22	0,88	0,5	0,44
Alumbrado tipo 3	0,25	8	2	0,5	1
			<b>240,862</b>		<b>236,1</b>

Fuente: C.C.M Ojos del salado

### **3.7 Resultados de mediciones de variable eléctricas área de chancado Primario.**

A partir de los resultados obtenidos por el analizador de calidad de energía de las variables de potencias aparente, activa, reactiva y del factor de potencia, es posible analizar el comportamiento de las cargas asociadas al Centro de Control de Motores (CCM) 051.

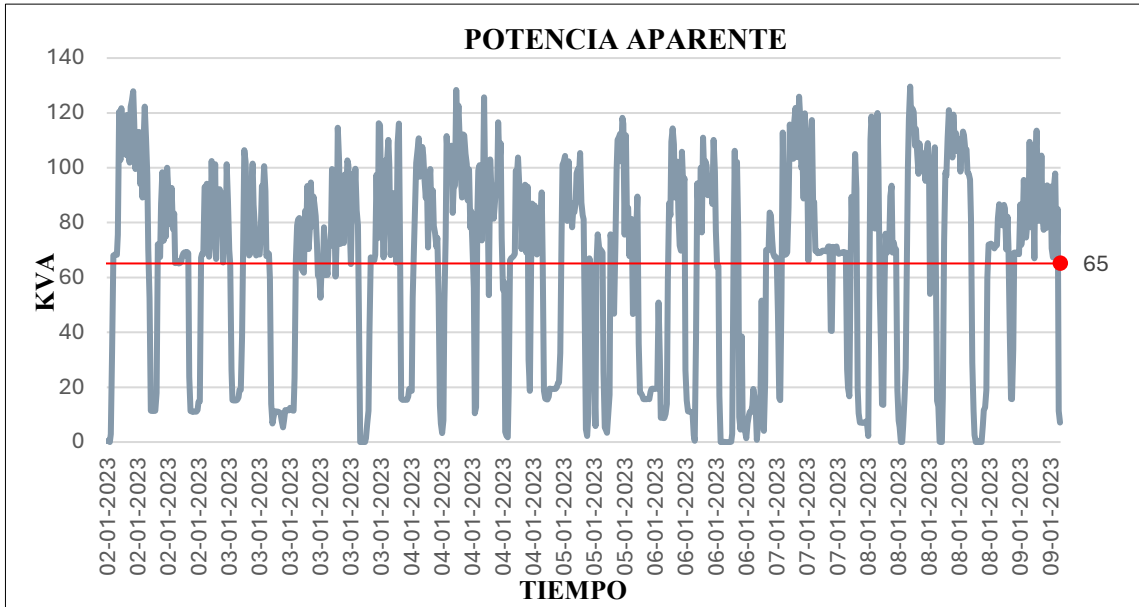
Estos resultados se ilustrarán en gráficos presentados a continuación, los cuales permiten observar la variación de las potencias y del factor de potencia durante el período de medición, facilitando la evaluación del desempeño eléctrico del sistema.

Las mediciones se efectuaron durante el período comprendido entre el 2 y el 9 de enero de 2023, registrándose un total de 1008 muestras. Sin embargo, para el análisis se consideraron únicamente 608 mediciones válidas, debido a detenciones del proceso de chancado, provocadas por mantenimientos programados y eventos de mantenimiento correctivo (fallas). Lo que generó que el analizador registrara valores nulos o inexactos. Por esta razón, dichas mediciones serán excluidas del análisis, con el fin de garantizar la representatividad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

#### **3.7.1 Análisis de la potencia Aparente sala eléctrica N° 1, CCM 051**

La figura N° 3.4 muestra la potencia aparente (S). El valor promedio es de 65 kVA, el máximo alcanzado 130 kVA y los intermedios oscilan entre 40–70 kVA, con caídas a 0 kVA durante paradas por mantenimiento.

Las variaciones observadas muestran que el proceso no se mantiene constante, sino que presenta momentos de mayor y menor actividad, producto de los arranques frecuentes de los equipos y de la dureza o tamaño del material.

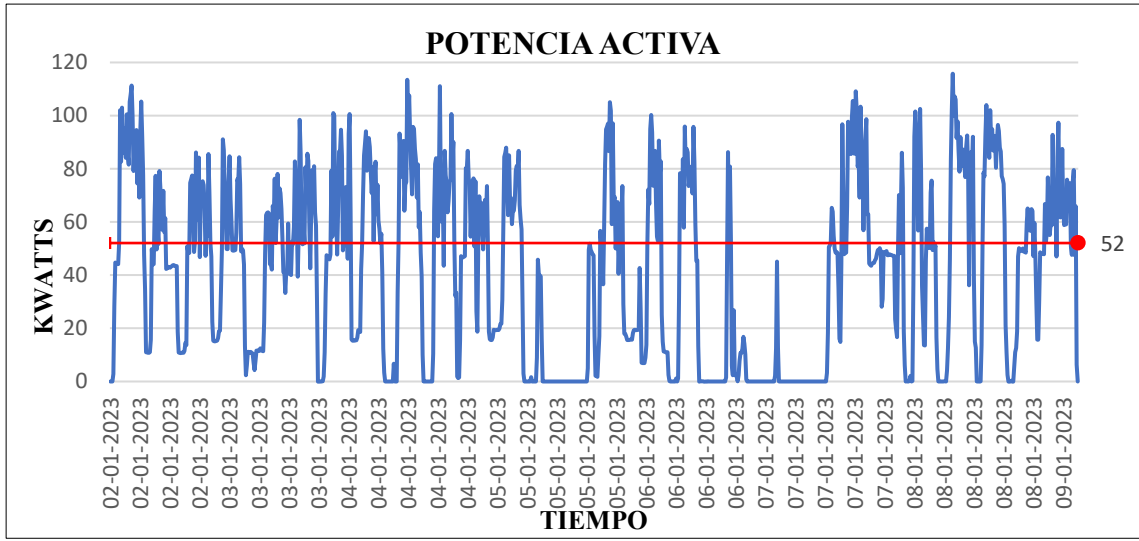


**Figura N° 3.4: Potencia Aparente sala eléctrica N°1, CCM 051**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.7.2 Análisis de la potencia Activa sala eléctrica N° 1, CCM 051

La figura N° 3.5 muestra la potencia activa (P). El valor promedio es de 52 kW, el máximo alcanza 116 kW y con valores intermedios se sitúan entre 30 y 60 kW.



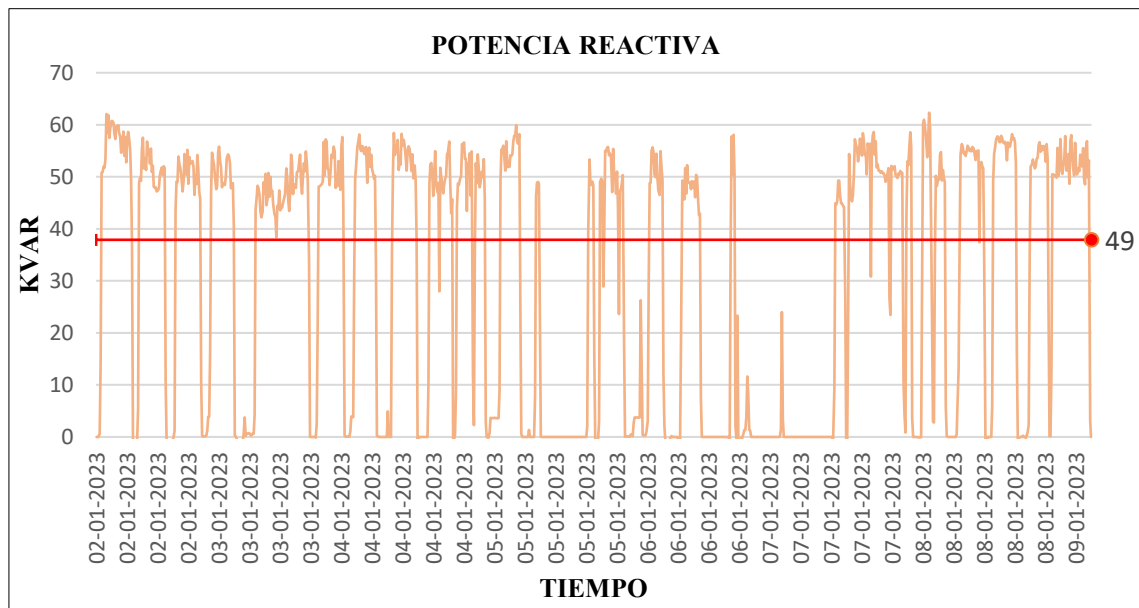
**Figura N° 3.5: Potencia activa sala eléctrica N°1, CCM 051**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.7.3 Análisis de la potencia Reactiva, sala eléctrica N° 1, CCM 051

La figura N° 3.6 muestra la potencia reactiva (Q). El valor promedio es de 49 kVar, el máximo alcanza 65 kVar y los mínimos se sitúan entre 30 y 50 kVar.

Presenta una variabilidad entre los rango de 30–65 kVar, con picos que coinciden cuando los equipos se encuentran un su máxima operación o a plena carga y valles durante funcionamiento parcial o en vacío.

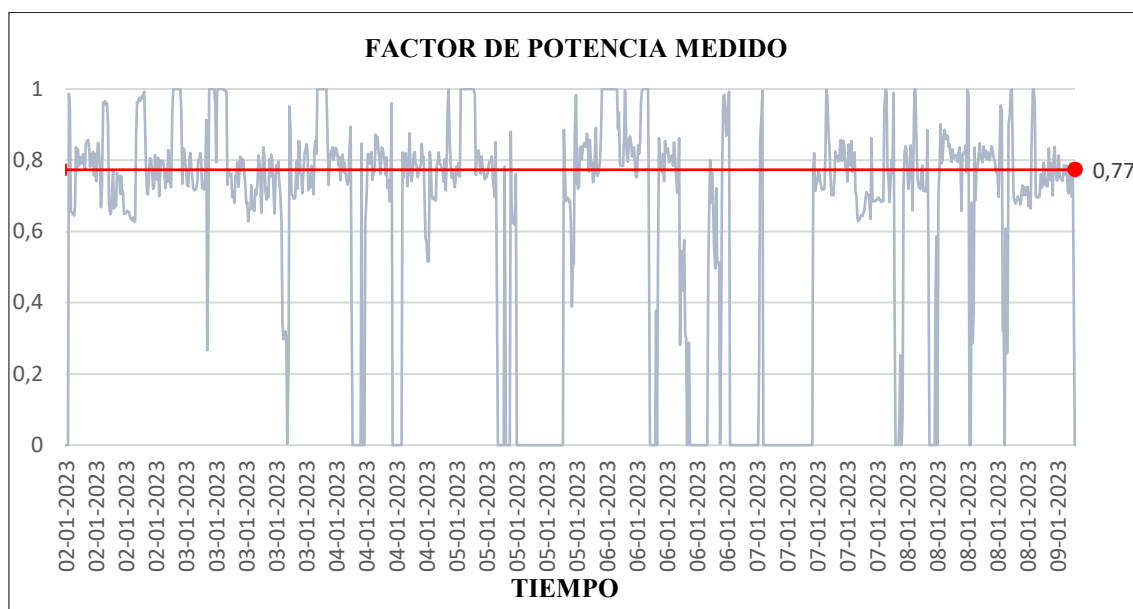


**Figura N° 3.6: Potencia Reactiva sala eléctrica N° 1, CCM 051**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.7.4 Análisis del Factor de potencia sala eléctrica N° 1, CCM-051

La figura N° 3.7, se presenta el factor de potencia medido en la sala eléctrica TAG N° 1-CCM-051. El valor promedio es de 0,77, con un rango de 0,65 (plena carga de los equipos) y de 0,95 (en regímenes parciales), observándose alta variabilidad y caídas bruscas a valores cercanos a cero durante paradas por mantenimiento. Este FP promedio de 0,77 se encuentra muy por debajo del mínimo exigido de 0,93 según el DS 88 de la SEC, lo cual ratificando la necesidad crítica de instalar bancos de condensadores automáticos para garantizar un  $FP \geq 0,93$  en todo el ciclo operativo.



**Figura N° 3.7: Factor de potencia sala eléctrica N° 1, CCM 051**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.7.5 Resume de variables medidas en sala eléctrica N° 1, CCM 051

La Tabla N° 3.2, presenta los valores máximos, mínimos y promedios de las principales variables eléctricas, obtenidos durante el periodo de medición entre el 2 y 9 de enero 2023 en el área de chancado primario.

**Tabla N° 3.2: Resumen de variables medidas sala eléctrica N° 1, CCM 051**

Variable	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Promedio
Potencia Activa (KW)	115,8	12,6	49,89
Potencia Aparente (KVA)	129,6	10,2	65
Potencia Reactiva (KVAR)	62,3	9,5	49,33
Factor de Potencia	1	0,4	0,77

Fuente: C.C.M Ojos del Salado.

### 3.8 Resultados de mediciones de variable eléctricas área de chancado Fino.

Siguiendo la misma metodología en que se obtuvieron los resultados, del área de chancado primario, con la instalación del analizador de red eléctrica Quali Star + modelo AEMC 8336, agua abajo del interruptor principal se procedió en el CCM 102, de la sala eléctrica N° 2, la cual suministra energía al área del chancado fino.

El periodo de mediciones está comprendido desde 08 al 14 de diciembre 2022, registrándose 864 mediciones, con intervalos de 10 minutos. Es importante recordar que todo proceso productivo, estos se encuentran sujeto al plan anual de mantenimiento, así como también al mantenimiento correctivo. Durante el periodo de mediciones hubo un total de 21 horas de detenciones, lo que significa la no obtención de datos trazables equivalente a 124 mediciones. De igual manera, los resultados obtenidos permitirán identificar y analizar el comportamiento de las cargas, facilitando su corrección.

#### 3.8.1 Levantamiento de carga Área de Chancado Fino

La figura N° 3.8, muestra la placa característica de transformador trifásico sumergido en aceite, siendo este el alimentador del CCM 102, donde se observa la potencia Aparente de 600 kVA como capacidad de carga máxima admisible.



Figura N° 3.8 :Datos del transformador CCM 102, chancado fino.

Fuente: C.C.M Ojos del Salado.

### 3.8.2 Cuadro de cargas del CCM -102, sala eléctrica N° 2,

En la Tabla N.º 3.3 se presentan las cargas asociadas al CCM 102, ubicado en la sala eléctrica N.º 2. En esta tabla se detallan los motores que intervienen en el proceso de segunda molienda, actuando como equipos de apoyo, ya que el chancador secundario y los dos chancadores terciarios corresponden a equipos de media tensión, cada uno con su centro de control de motores (CCM) independiente, mientras que los equipos asociados al CCM 102 cumplen funciones complementarias dentro del proceso.

Los equipos de apoyo indicados en la tabla presentan un factor de carga igual a 1, lo que evidencia un funcionamiento continuo y estable durante la operación normal del sistema. En contraste, las cargas de alumbrado muestran un factor de carga de 0,5, reflejando una operación intermitente o parcial, principalmente asociada a su uso en horarios nocturnos o según las necesidades específicas de la planta.

**Tabla N° 3.3: Cuadro de carga CCM 102, sala eléctrica N° 2**

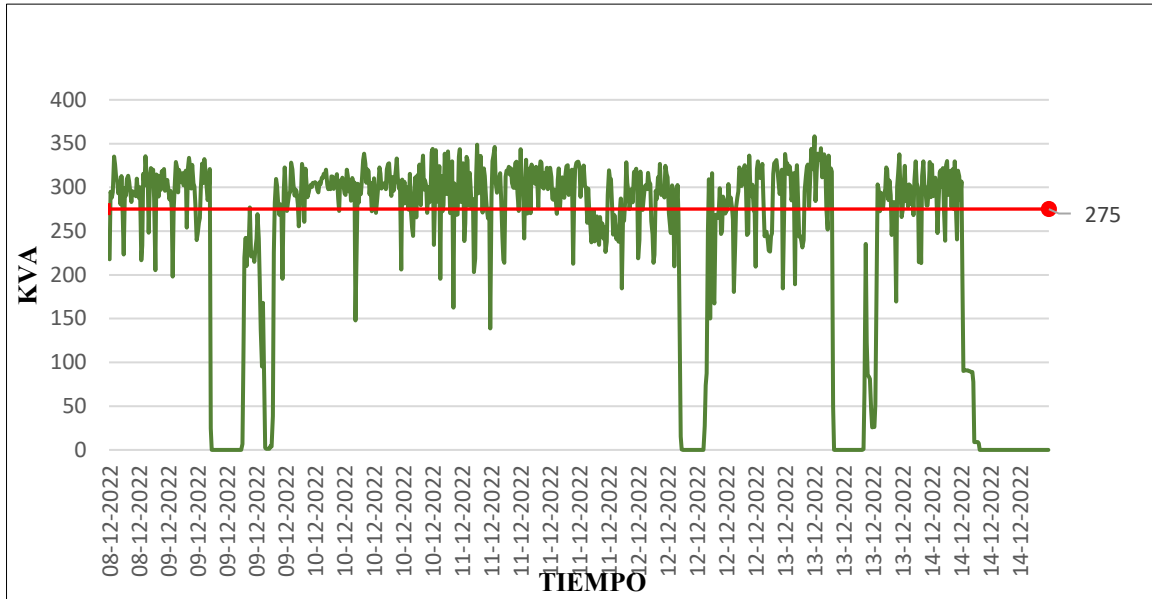
Descripción de cargas	Potencia real (KW)	Cantidad	Potencia Instalada (kW)	Factor de carga (FC)	Máxima Demanda (kW)
Correa # 02	22,38	1	22,38	1	22,38
Correa # 03	22,38	1	22,38	1	22,38
Correa # 04	93,25	1	93,25	1	93,25
Correa # 05	74,6	1	74,6	1	74,6
Correa # 06	18,65	1	18,65	1	18,65
Correa # 07	8,206	1	8,206	1	8,206
Cinta alimentadora 1	11,19	1	11,19	1	11,19
Cinta alimentadora 2	11,19	1	11,19	1	11,19
sistema hidr. T1	5,595	1	5,595	1	5,595
sistema hidr. T2	5,595	1	5,595	1	5,595
sistema hidr. STD	5,595	1	5,595	1	5,595
BBA control polvo 1	4,103	1	4,103	0,5	2,0515
BBA refrigeración 1	14,92	1	14,92	0,5	7,46
BBA refrigeración 2	14,92	1	14,92	0,5	7,46
BBA retorno 1	11,19	1	11,19	0,5	5,595

Descripción de cargas	Potencia real (KW)	Cantidad	Potencia Instalada (kW)	Factor de carga (FC)	Máxima Demanda (kW)
BBA retorno 2	11,19	1	11,19	0,5	5,595
HARNERO 1	30	1	29,84	1	29,84
HARNERO 2	30	1	29,84	1	29,84
HARNERO 3	30	1	29,84	1	29,84
Sist. lubricación STD	3,73	1	3,73	1	3,73
Sist. lubricación T1	5,595	1	5,595	1	5,595
Sist. lubricación T2	3,73	1	3,73	1	3,73
Feeder 1	2.4	1	3,75	1	3,75
Feeder 2	2.4	1	3,75	0,5	1,875
Feeder 3	2.4	1	3,75	0,5	1,875
electroimán	8	1	12,5	1	12,5
Alumbrado tipo 1	0,12	26	3,12	0,5	1,56
Alumbrado tipo 2	0,04	22	0,88	0,5	0,44
Alumbrado tipo 3	0,25	8	2	0,5	1
			472,874		

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.8.3 Análisis y resultados de mediciones variables eléctricas, sala eléctrica N°2, CCM 102

La Figura N° 3.9 muestra la potencia aparente (S) medición en baja tensión en la sala eléctrica N° 2 (CCM-102, chancado fino). El valor promedio es de 275 kVA (línea roja), con valores máximos entre a 330-360 kVA durante la operación a plena carga y mínimos de 150-200 kVA en carga parcial, además de caídas abruptas a 0 kVA asociadas a paradas por mantenimiento programado o correctivo, por detención del área.

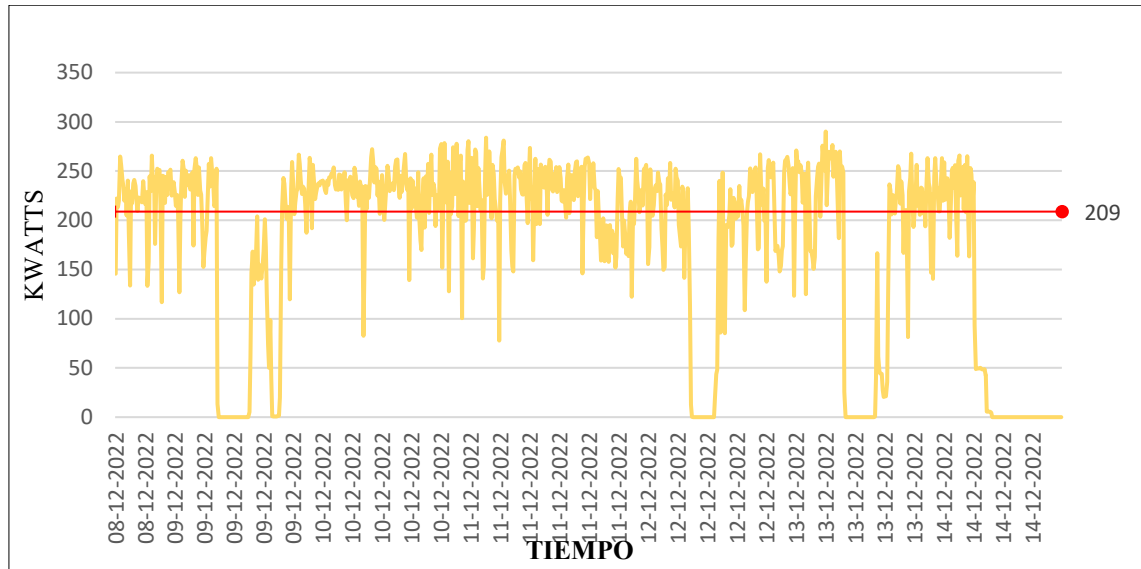


**Figura N° 3.9: Potencia Aparente, CCM 102**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.8.4 Análisis de la potencia Activa, sala eléctrica N°2, CCM 102

La Figura N° 3.10 muestra la potencia activa (P) medida en baja tensión en el CCM-102. El promedio es de 209 kW (línea roja), con picos de 300–320 kW en operación a plena carga y mínimos de 100–150 kW carga parcial.



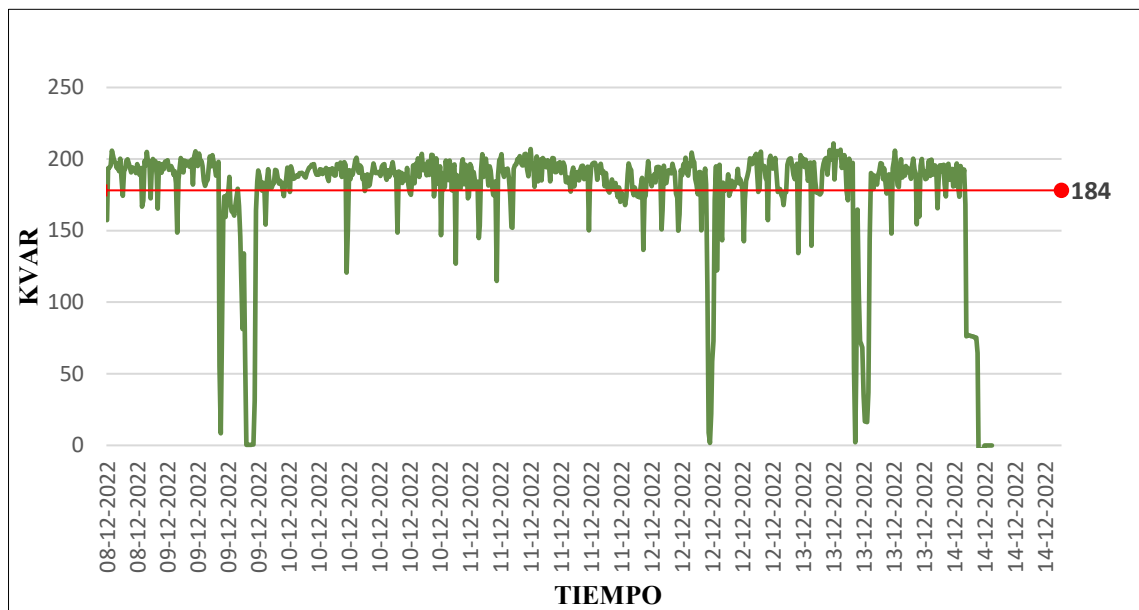
**Figura N° 3.10: Potencia Activa, CCM 102**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.8.5 Análisis de la potencia Reactiva, sala eléctrica N°2, CCM 102

La Figura N° 3.11 muestra la potencia reactiva (Q) medida en baja tensión en el CCM-102. El promedio es de 184 kVar (línea roja), con picos que van desde los 220–230 kVar en operación plena y mínimos de 100–150 kVar en carga parcial.

La alta demanda reactiva asociada se debe a que los motores inductivos requieren potencia reactiva para generar el campo magnético giratorio en el estator, esencial para inducir corriente en el rotor y producir par mecánico., confirmando que casi toda la reactiva es estructural del funcionamiento continuo de los motores y no transitoria.



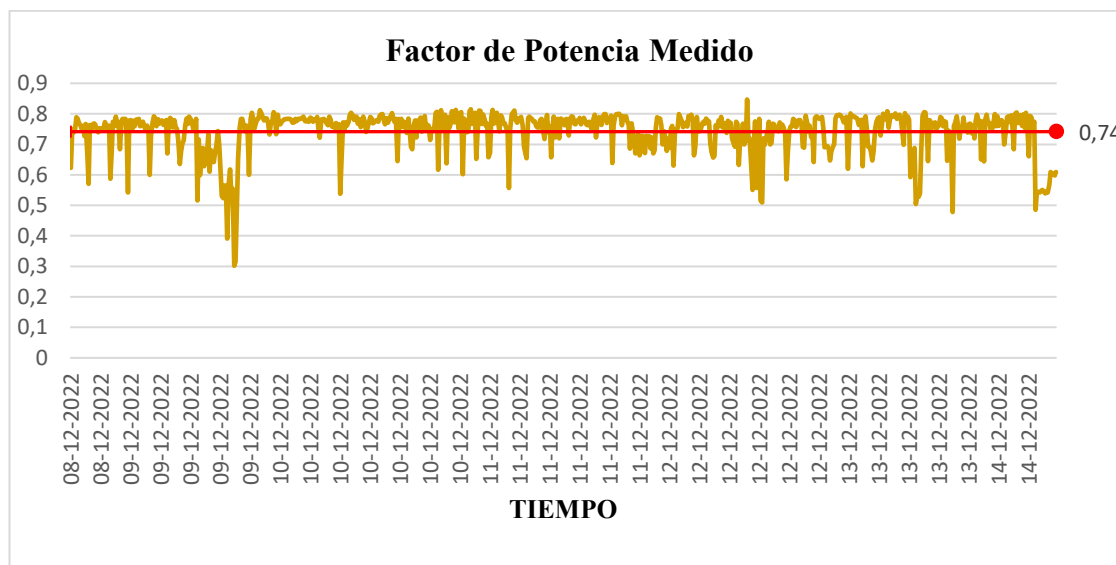
**Figura N° 3.11: Potencia Reactiva CCM 102**

Fuente: C.C.M Ojos del salado

### 3.8.6 Análisis de la Factor de Potencia, sala eléctrica N°2, CCM 102

La Figura N° 3.12 presenta el factor de potencia (FP) medido en baja tensión en el CCM-102. El promedio es de 0,74 (línea roja), con valores que oscilan entre 0,65 (a plena carga) y 0,85 (en regímenes parciales), y caídas abruptas entre 0,3–0,4 o indefinido durante paradas por mantenimiento.

Este Factor de Potencia promedio es de 0,74 lo que es un 20 % por debajo del 0,93 exigido por el DS 88 de la SEC.



**Figura N° 3.12: Factor de potencia CCM 102**

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### 3.8.7 Resume de variables medidas en sala eléctrica N° 2, CCM-102

La Tabla N° 3.4 consolida las mediciones realizadas en el CCM-102, aguas abajo del interruptor principal, entre el 8 y el 14 de diciembre de 2022. En ella se resumen los valores máximos, mínimos y promedios obtenidos de las potencias eléctrica (activa, aparente y reactiva) y el factor de potencia.

**Tabla N° 3.4: Resumen de variables medidas N° 1, CCM 102**

Variable	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Promedio
Potencia Activa (kW)	290	12,6	209
Potencia Aparente (KVA)	358,3	10,2	275
Potencia Reactiva (kVar)	211	12,6	184
Factor de Potencia	0,84	0,3	0,74

Fuente: C.C.M Ojos del salado.

### **3.8.8 Simulación por medio del software ETAP.**

ETAP es un software de análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia, que permite simular y estudiar diversos escenarios de operación de un sistema eléctrico, incluyendo la implementación y optimización de los bancos de condensadores. Mediante la simulación en ETAP, será posible evaluar el rendimiento del nuevo banco de condensadores, teniendo en cuenta diferentes factores como tamaño del banco capacidad de potencia reactiva, y su ubicación optima.

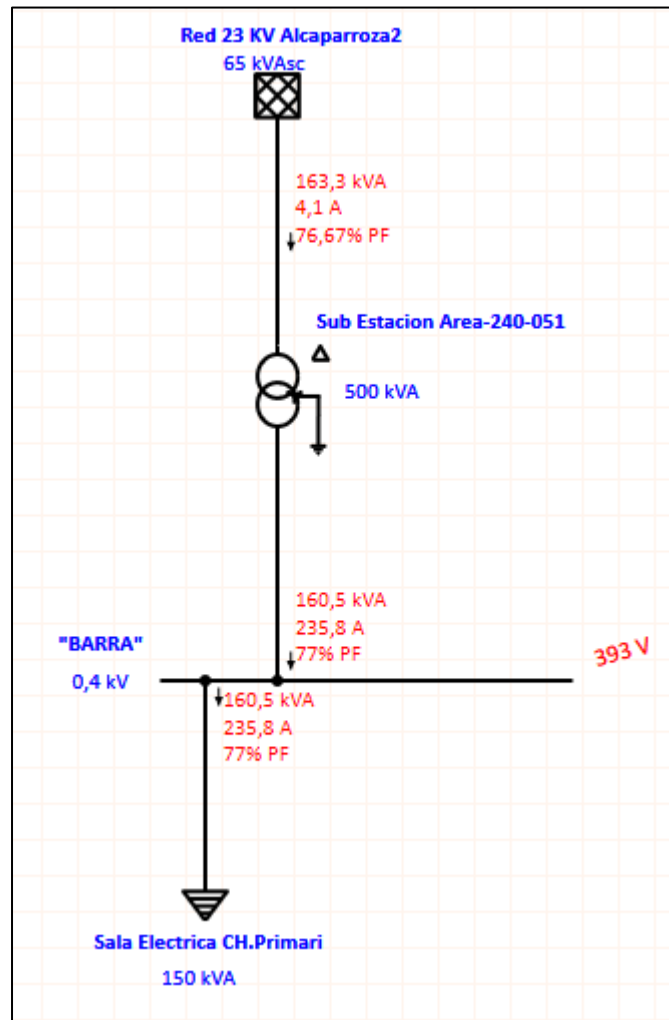
La simulación en ETAP nos proporcionará información detallada sobre las condiciones de operación del sistema eléctrico, como la corriente, tensión potencia reactiva y el factor de potencia. Esto permite identificar problemas de sobrecarga, caídas de voltaje o desequilibrios de esta, y evaluará el impacto de la implementación de un banco de condensadores con las características requeridas, que nos permita mitigar las problemáticas mencionadas.

Además, ETAP ofrece herramientas de optimización que permite mejorar la eficiencia del banco de condensadores, minimizando las pérdidas de energía y maximizando los beneficios en términos de mejorar el factor de potencia.

En resumen, la simulación de los bancos de condensadores a través del software ETAP es una práctica importante en el diseño. Que nos permitirá evaluar el rendimiento de los bancos de condensadores proyectados y optimizar su diseño para lograr una mayor eficiencia energética y reducir los costos de energía.

La figura N° 3.13, muestra la simulación en software ETAP, tomando como referencia el valor de factor de potencia promedio 0,77 y el valor máximo alcanzado de la potencia activa de 116 kW, utilizados para calcular la potencia total aparente de la carga en la sala eléctrica N°1 (CCM 051), esta carga equivale a 150 kVA.

El modelamiento se observa una corriente máxima del sistema 235,8 amperes y un voltaje de 393.

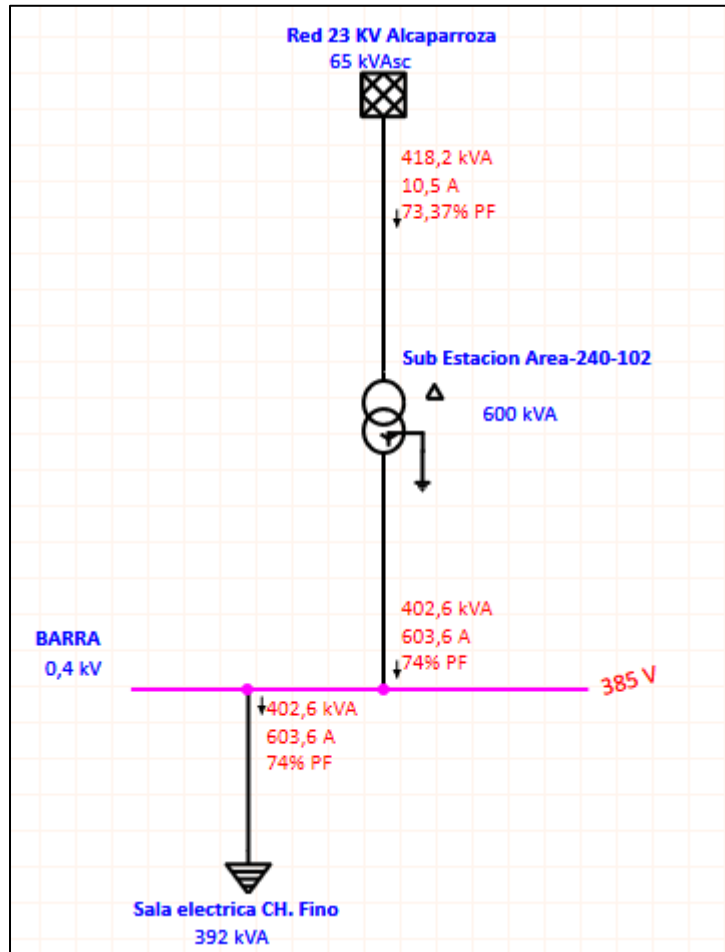


**Figura N° 3.13: Simulación en ETAP sin banco de condensador Chancado Primario.**

Fuente: C.C.M, Ojos del Salado.

La figura N° 3.14, muestra la simulación en software ETAP, tomando como referencia el valor de factor de potencia promedio 0,74 y el valor máximo alcanzado de la potencia activa de 290 kW, utilizados para calcular la potencia total aparente de la carga en la sala eléctrica N°2 (CCM 102), esta carga equivale a 392 kVA.

El modelamiento se observa una corriente máxima del sistema 603,6 amperes y un voltaje de 385.



**Figura N° 3.14: Simulación en ETAP sin banco de condensador Área Chancado Fino.**

Fuente: C.C.M, Ojos del Salado.

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO DEL BANCO DE CONDENSADORES**

Con el analizador de red Quali Star + modelo AEMC, se han obtenidos los parámetros eléctricos necesario, además de las curvas de comportamiento, de las potencias y el factor de potencia actuales, esto se ha logrado mediante el software Power Pad III, el cual permaneció tomando mediciones desde 08 al 14 de diciembre 2022, área de chancado fino y 02 al 09 de enero 2023, área de chancado primario.

Con todos estos parámetros eléctricos y datos obtenidos en el levantamiento de carga presentados en capítulo III, se procederá al diseño del banco de condensadores para cada una de las áreas mencionadas y los cálculos del valor de los condensadores en kVAR, que permitirá realiza la corrección del factor de potencia.

Con los parámetros visualizados y las curvas presentadas por el software Power Pad III, nos lleva a seleccionar el tipo de banco de condensador a utilizar, el cual será de compensación automática, de acuerdo con la variabilidad que se presenta del consumo de potencia reactiva, durante todo el periodo de mediciones.

#### **4.1 Diseño banco de condensadores variable**

Un banco de condensadores de regulación variable es una solución para la compensación de potencia reactiva, diseñada para ajustarse dinámicamente a las fluctuaciones en la carga del sistema eléctrico. Los bancos variables adaptan su operación en tiempo real, activando o desactivando módulos de condensadores según la demanda de potencia reactiva.

El principio de operación se basa en la medición continua del FP y la demanda de energía reactiva, controlada y monitoreada por un regulador automático.

## 4.2 Modo de Operación del banco de regulación variable

- ✚ Detecta variaciones en la carga inductiva y ajusta la compensación reactiva de manera óptima, integrando las múltiples etapas de condensadores, conectado progresivamente según las condiciones del sistema lo requiera.

## 4.3 Ventajas de un banco de compensación automática

- ✚ Optimiza la estabilidad del voltaje, reduciendo fluctuaciones y mejorando la calidad del suministro.
- ✚ Corrección precisa del FP en tiempo real, evitando sobredimensionamientos o compensación insuficiente.
- ✚ Reducción de costos energéticos, minimizando penalizaciones por bajo FP.
- ✚ Menos estrés en los componentes eléctricos, prolongando la vida útil de transformadores y conductores.
- ✚ Mayor eficiencia en la distribución de energía, mejorando la confiabilidad operativa del sistema.

En síntesis, un banco de condensadores de regulación variable es una herramienta esencial para la gestión eficiente de potencia reactiva, asegurando un rendimiento óptimo en sistemas eléctricos con alta variabilidad de carga. Su implementación mejora la eficiencia energética, reduce pérdidas y optimiza la calidad de suministro.

El diseño de un banco de condensadores autorregulable o de carga variable requiere tener en cuenta varios aspectos técnicos para asegurar su correcto funcionamiento, los cuales los detallaremos a continuación:

- ✚ **Análisis del sistema:** realizar un estudio detallado del sistema eléctrico en el que se instalará el banco de condensadores. Identificando los equipos y cargas principales, sus características y su patrón de uso. Análisis de los valores del factor de potencia y determinar en los rangos que varía.

- ✚ **Determinar la capacidad necesaria:** a través del software ETAP se simula la capacidad necesaria de B.C para corregir el factor de potencia en el sistema eléctrico.
- ✚ **Selección de los capacitores:** Son dispositivos fundamentales en la corrección del factor de potencia (FP), ya que almacenan y liberan energía eléctrica mediante un campo electrostático. La selección y desempeño dependen de diversos aspectos físicos, a considerar:
- ✚ **Tensión Nominal (V):** Indica el voltaje máximo que puede soportar sin deterioro.
- ✚ **Materiales dieléctricos:** Afectan la durabilidad y eficiencia del condensador. Los más comunes son polipropileno metalizado y papel impregnado.
- ✚ **Resistencia y Reactancia interna:** Factores que influyen en pérdidas eléctricas y en la estabilidad de la compensación.

Los condensadores presentan dos características eléctricas clave que influyen en su desempeño dentro de un sistema de corrección de factor de potencia:

**Resistencia interna (R):** También denominada resistencia serie equivalente (ESR), representa las pérdidas internas debidas a los materiales del dieléctrico y las conexiones eléctricas. Un valor alto de ESR puede causar calentamiento excesivo y reducir la eficiencia del condensador.

**Reactancia interna (Xc):** Define la oposición del condensador al paso de corriente alterna. Se calcula como:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.1)$$

La correcta selección de condensadores con baja resistencia interna y reactancia adecuada garantiza una corrección precisa del FP, minimizando pérdidas y mejorando la estabilidad del sistema eléctrico.

- ✚ **Controladores de factor de potencia:** Están diseñados para supervisar y ajustar automáticamente la compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos. Su función es mantener el FP dentro de valores óptimos, activando o desactivando bancos de condensadores según la demanda de la carga.

✚ **Protecciones y seguridad:** La seguridad depende de los dispositivos de protección que previenen sobrecargas, sobretensiones y fallas eléctricas. Entre ellos encontramos fusibles de potencia (limitan la corriente en caso de falla), interruptores termomagnéticos (protegen contra sobrecargas y cortocircuitos, asegurando desconexión rápida), garantizando estabilidad, operativa y prolongar la vida útil del banco de condensadores.

#### 4.4 Diseño teórico del banco de condensadores en sala eléctrica N° 1, Chancado Primario

Tomando los valores de potencia activa máxima 116 kWatt, y un factor de potencia promedio de 0,77.

Para el dimensionamiento del banco de condensadores se emplea la ecuación N° 2.4, (Capítulo II):

$$Q_c = P(\text{Tangente } \phi_i - \text{Tangente } \phi_f) . \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.4)$$

Sustituyendo valores:

$$Q_c = 116 * (\text{Tan} * (\text{Cos}^{-1} 0,77) - (\text{Tan} * (\text{Cos}^{-1} 0,98)))$$

Cálculo de ángulos:

$$\phi_{\text{Inicial}} = \text{Cos}^{-1}(0,77) = 39,64^\circ$$

$$\phi_{\text{Final}} = \text{Cos}^{-1}(0,98) = 11,47^\circ$$

Valores de Tangente:

$$\text{Tangente } (39,64^\circ) = 0,82844$$

$$\text{Tangente } (11,47^\circ) = 0,2029$$

Calcular  $Q_c$

$$Q_c = 116 * (0,82844 - 0,2029)$$

$$Q_c = 116 * 0,62553$$

$$Q_c = 72,56 \text{ kVar} \approx 73 \text{ kVar}$$

#### 4.5 Simulación ETAP, con conexión del BC teórico sala eléctrica N°1- CCM 051

La carga máxima presentada por analizador es de 150 KVA, el valor teórico calculado del banco de condensadores es de 73 kVar como lo muestra la simulación en la figura N° 4.1, se apreciar el mejoramiento o corrección del factor de potencia de 0,77 a 0,96, sin embargo, el propósito es de elevar a un factor de potencia de 0.98, para ello se consideró en la simulación un banco de condensadores de 80 kVar, con ello se obtiene un factor de potencia deseado 0,98. Ver figura N° 4.2.

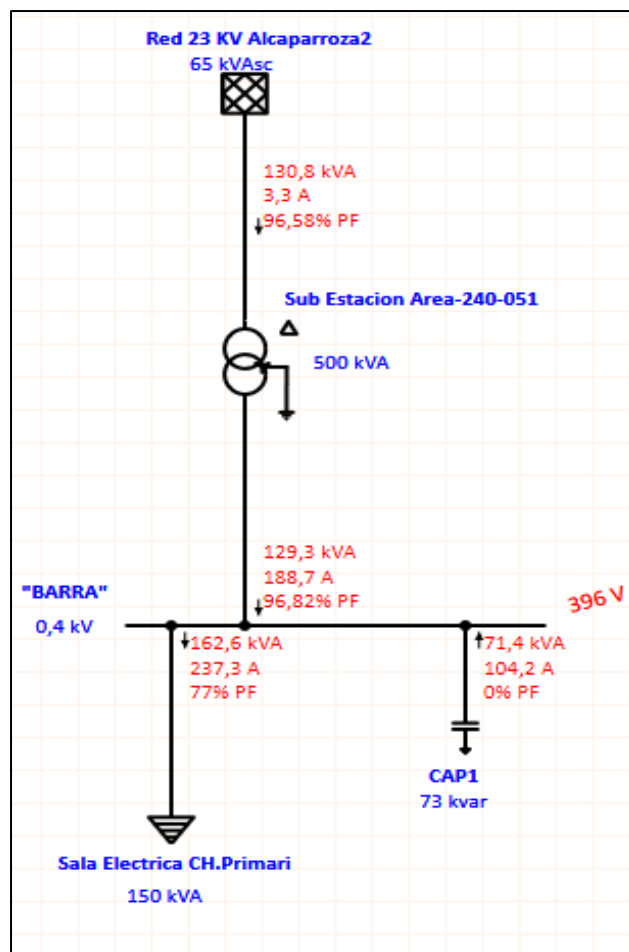
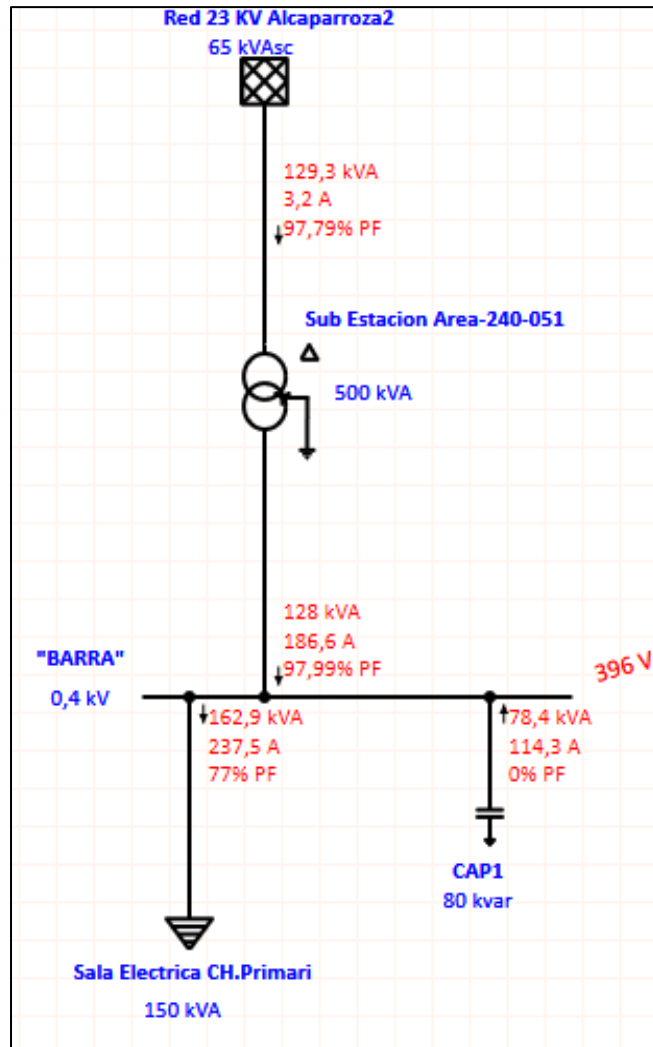


Figura N° 4.1: Simulación en ETAP con banco de condensador valor teórico 73 kVar Área Chancado Primario.

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura N° 4.2: Simulación en ETAP con banco de condensador valor teórico 80 kVar Área Chancado Primario.**

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.6 Criterio de selección del banco de condensador para el CCM 051

De acuerdo con las simulaciones realizadas en software ETAP, se puede evidenciar que el valor teórico calculado para un banco de condensadores de 73 kVar, si bien se corrige considerablemente el factor de potencia a 0,97, cumpliendo ampliamente con el requisito normativo un  $FP \geq 0,93$ .

El propósito de este proyecto es obtener FP 0,98, de acuerdo con la simulación el banco condensadores ideal debería ser de 80 kVar, este incremento de 7 kVar permite obtener ventajas cuantificables adicionales que se observan en la tabla N° 4.1.

**Tabla N° 4.1: Comparación técnica para la selección del banco de condensadores**

Qc (kVAr)	FP	S final (kVA)	Corriente final (A)	Reducción de corriente (A)	Reducción de corriente porcentaje (%)	Carga transformador 500 kVA (%)	Disminución pérdidas Joule (I <sup>2</sup> R) $1 - \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 * 100$
Sin compensación	0,77	150,65	235,8	—	—	30,13	100 %
simulación 73 kVar	0,9682	129,3	188,7	↓47,1	19,97	25,86	↓ 35,96 %
simulación 80 kVar	0,9799	128	186,6	↓49,2	20,87	25,6	↓37,39 %

Esta comparación constituye la base técnica y cuantitativa para la selección definitiva del banco automático de 80 kVar de compensación centralizada como solución óptima para el CCM-051 del área de chancado primario.

#### **4.7 Cálculo del banco de condensadores teórico para la sala eléctrica N° 2, área del chancado Fino.**

Para la realización de cálculo teórico de banco de condensadores se toma el valor máximo registrado por analizador de red el cual fue de potencia activa 290 KW, con un factor de potencia promedio de 0,74. Promedio se obtuvo del total de las mediciones realizadas

Para el dimensionamiento del banco de condensadores se emplea la ecuación N° 2.4, (Capítulo II):

$$Q_c = P(\text{Tangente } \varphi_i - \text{Tangente } \varphi_f) . \quad (\text{Ec. N° 2.4})$$

$$Q_c = 290 * (\text{Tan} * (\text{Cos}^{-1} 0,74) - (\text{Tan} * (\text{Cos}^{-1} 0.98)))$$

Cálculo de los ángulos:

$$\phi \text{ Inicial} = \text{Cos}^{-1}(0,74) = 42,26^\circ$$

$$\phi \text{ Final} = \text{Cos}^{-1}(0,98) = 11,47^\circ$$

Valores de Tangente:

$$\text{Tangente}(42,26^\circ) = 0,90892$$

$$\text{Tangente}(11,47^\circ) = 0,2029$$

Calcular Qc

$$Qc = 290 * (0,90892 - 0,2029)$$

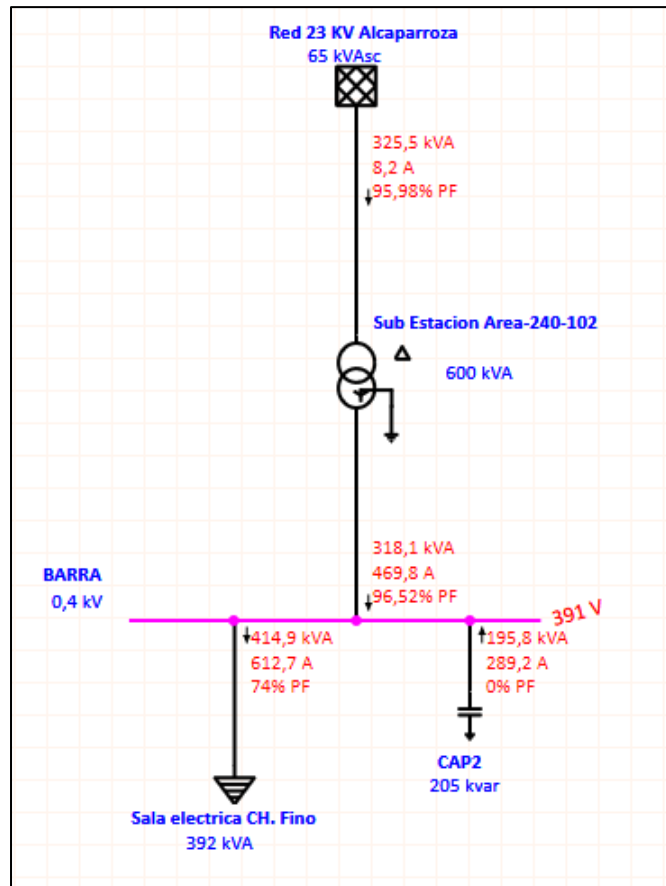
$$Qc = 290 * 0,70602$$

$$Qc = 204,746 \text{ Kvar} \approx 205 \text{ Kvar}$$

#### **4.8 Simulación ETAP, con conexión del BC teórico sala eléctrica N° 2 -CCM 102**

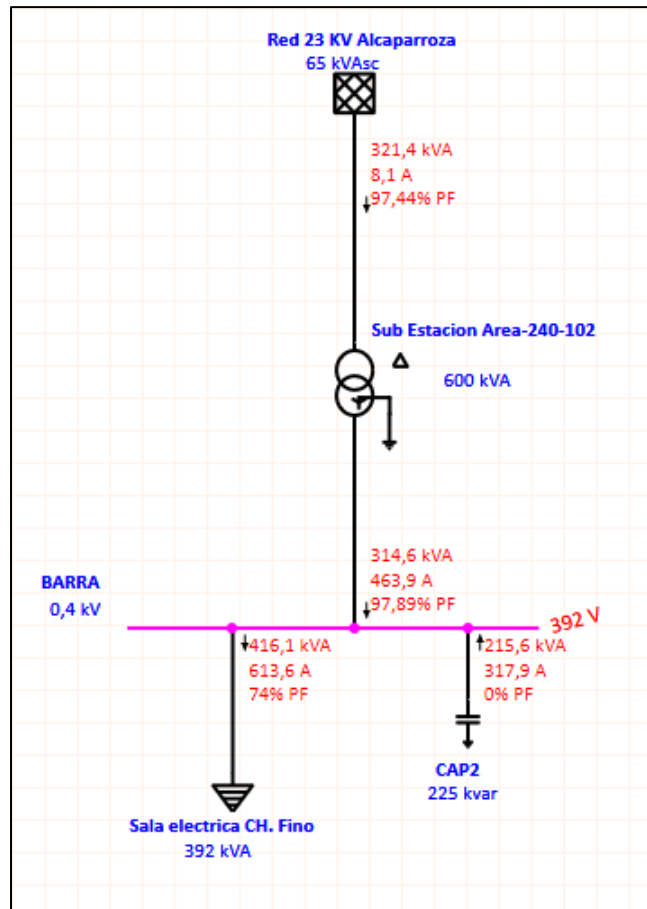
La incorporación de un banco de condensadores con una capacidad teórica calculada de 205 kVar y con una carga de 390 kVA correspondiente a la sala eléctrica N° 2 del chancado fino, si bien permite corregir eficazmente el factor de potencia del sistema, elevándolo de un nivel inicial de 0,74 hasta alcanzar un valor de FP de 0,96. Como se muestra en la figura N° 4.3.

Parar lograr el valor deseado del factor de potencia de 0.98, el banco de condensador a considerar debe ser de 225 kVar de acuerdo con la simulaciones realizadas, como se indica en la figura N° 4.4 en ambos casos los resultados, mostrando con la inclusión de la compensación capacitiva ajustada y centralizada se logra estabilizar el perfil de carga y mejorar las condiciones operativas generales del sistema eléctrico.



**Figura N° 4.3: Simulación en ETAP con BC valor teórico de 205 kVar Área Chancado Fino.**

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura N° 4.4: Simulación en ETAP con BC valor teórico de 205 kVar Área Chancado Fino.**

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.9 Criterio de selección del banco de condensador para el CCM 102

La Tabla 4.2 se resume los resultados de la simulación en software ETAP para el área de chancado fino CCM-102, bajo condición de máxima demanda, potencia aparente de 400 kVA, el FP inicial 0,74, corriente máxima de 603 amperes

Con estos indicadores iniciales, y de acuerdo con las simulaciones presentadas anteriormente nos permiten cuantificar de forma directa el efecto de la compensación centralizada en barra de baja tensión.

**Tabla N° 4.2: Comparación técnica para la selección del banco de condensadores**

Qc (kVar)	FP	S final (kVA)	Corriente final (A)	Reducción de corriente (A)	Reducción de corriente en porcentaje (%)	Carga del transformador 600 kVA (%)	Reducción de pérdidas Joule I <sup>2</sup> R
Sin compensación	74	402,6	603,6	—	—	67	100
simulación 205 kVar	0,9652	318,1	469,8	133,8	22,17	53	39,4
simulación 225 kVar	0,9789	314,6	463,9	139,7	23,14	52	40,9

En conclusión, aunque el banco de 205 kVar cumple holgadamente la normativa DS 88 SEC ( $FP \geq 0,93$ ), el banco de una potencia de compensación reactiva 225 kVar es la solución técnicamente superior y económicamente óptima, al maximizar simultáneamente el factor de potencia, la reducción de corriente, la disponibilidad del transformador y la eficiencia energética del sistema.

## CAPITULO V

### DIAGNOSTICO SITUACION DE LA COMPAÑÍA CONTRACTUAL OJOS DEL SALADO

#### 5.1 Antecedentes generales

Para implementar un sistema de bancos de condensadores de forma eficiente, es fundamental realizar un análisis detallado del consumo eléctrico de la empresa y /o las áreas involucradas. Este estudio permite identificar cómo, cuándo y cuánta energía consumen los distintos equipos que interactúan en el proceso de chancado. Con esta información, es posible determinar el presente de la calidad de energía de las áreas de chancado y calcular el nivel de compensación de energía reactiva necesario.

Una vez comprendido el comportamiento del consumo eléctrico, el siguiente paso es definir con precisión los requisitos técnicos que deben cumplir los bancos de condensadores que se instalarán paralelamente a los alimentadores de cada barra correspondiente a su CCM 051 y 102. Esto incluye aspectos como la capacidad de compensación requerida, las condiciones de operación del sistema, y establecer los criterios que permitan asegurar que los bancos de condensadores funcionen de forma eficiente, segura y adaptada a las necesidades reales de la instalación.

Actualmente, la Sociedad Contractual Minera Ojos del Salado presenta un factor de potencia inferior al mínimo exigido por la normativa vigente. Esta situación se debe principalmente a que gran parte de los equipos utilizados en el proceso corresponden a motores de inducción, los cuales generan un alto consumo de energía reactiva. sino también una reducción en la eficiencia global del sistema eléctrico. Por ello, se hace necesaria la implementación de soluciones técnicas adecuadas, que permitan corregir esta deficiencia y cumplir con los estándares regulatorios.

## 5.2 Diseño del banco de condensador

A partir de los parámetros eléctricos obtenidos mediante el analizador de calidad de energía (Power Pad III), se presentan los resultados en la tablas N° 5.1 correspondiente al CCM 051 área de chancado primario.

El total de datos medidos fueron 1008, de los cuales 389 datos no se consideran por detención del área, las mediciones trazables son 619, los cuales se utilizarán para diseñar el histograma donde se agruparán los datos para visualizar y analizar la distribución de frecuencias de un conjunto de datos continuos de la potencia reactiva, que permitirá el diseño del banco de condensadores del área de chancado primario permitiendo corregir el factor de potencia

**Tabla N° 5.1: Resumen general de mediciones realizadas en chancado Primario**

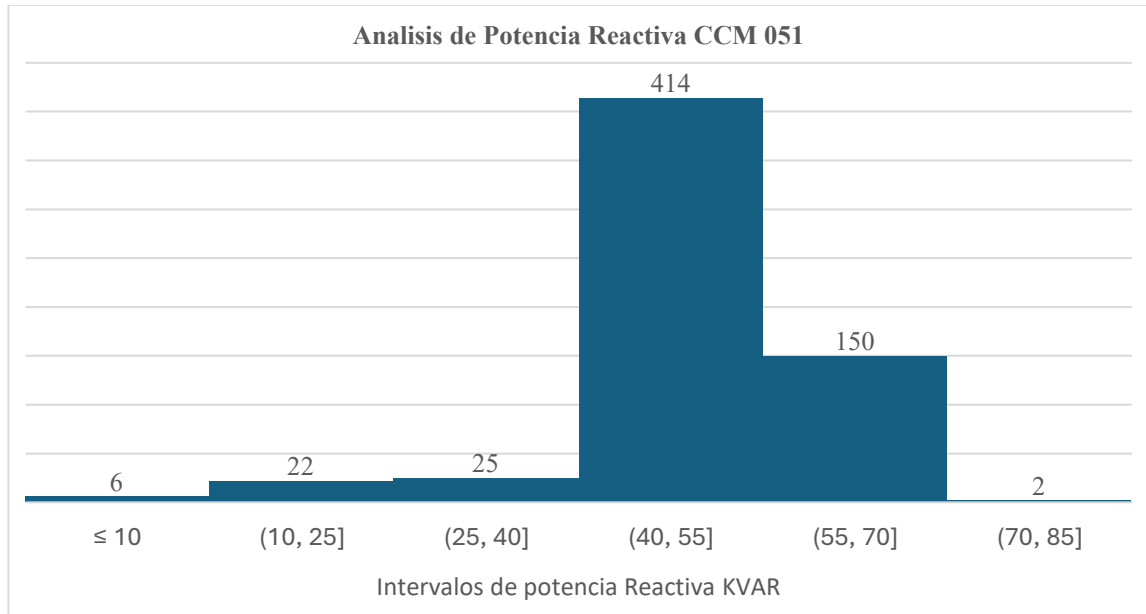
Periodo de mediciones	02 al 09 de enero del 2023	
N° total de mediciones	1008	
N° de mediciones sin considerar	Bloqueo área 143	> 5 kVar 246
	389	
N° de mediciones trazables	619	

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.2.1 Análisis de datos tomados de la potencia reactiva CCM 051, Sala N°1

De acuerdo con los datos entregados por el analizador de red un total 1008, en el periodo de mediciones, la cantidad de datos trazables es de 619, tomando en consideración valores igual o superior a 10 kVar, datos tangibles para el dimensionamiento del banco de condensadores, estos datos fueron agrupados en intervalos de 15 kVar, de manera que al diseñar el banco de condensadores, no incurrir en sobrecompensación, la cual sea una corrección gradual, evitando impactos bruscos en la red y adaptación óptima sin generar FP adelantado.

Por lo tanto, con lo expuesto se presenta la figura N° 5.1 con los pasos y distribución de los condensadores para logra una optimización y eficiencia del sistema.



**Figura N° 5.1: Análisis de potencia reactiva durante todo el periodo de medición**

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.2.2 Distribución del banco de condensadores en sala eléctrica N°1

Con los resultados teóricos calculados y la simulación realizada en el software ETAP, se estableció que el banco de condensadores debe contar con una potencia de 80 kVar para elevar el factor de potencia de 0.77 a 0.98, así optimizar la compensación de la energía reactiva en el área de chancado. Para ello, se diseñó una configuración de 6 pasos: 10 kVar, 10 kVar, 15 kVar, 20 kVar, 15 kVar y 10 kVar. Esta distribución permite una corrección escalonada de la potencia reactiva, iniciando con los niveles de carga más bajos (10-20 kVar) y progresando hasta los rangos de mayor demanda (hasta 80 kVar), garantizando una compensación eficiente y evitando fenómenos de sobrecompensación que afecten la estabilidad del sistema.

**Tabla N° 5.2: Distribución del BC en sala eléctrica N°1, CCM 051**

N° de Paso	Potencia total del paso (kVAr)	Condensador individual	N° de condensadores por paso	Potencia acumulada (kVAr)	Comentario / Zona cubierta principal
1	10	5 kVAr	2	10	Corrección inicial suave (evita sobrecompensación en cargas ligeras)
2	10	5 kVAr	2	20	Buena granularidad media inicial
3	15	5 kVAr	3	35	Entrada precisa a la zona dominante
4	20	5 kVAr	4	55	Máxima eficiencia y precisión (donde más datos ocurren)
5	15	5 kVAr	3	70	Extiende cobertura gradual sin bruscos
6	10	5 kVAr	2	80	Paso final exacto al máximo observado margen mínimo para picos reales

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.2.3 Análisis de datos tomados de la potencia reactiva CCM 102, Sala N°2

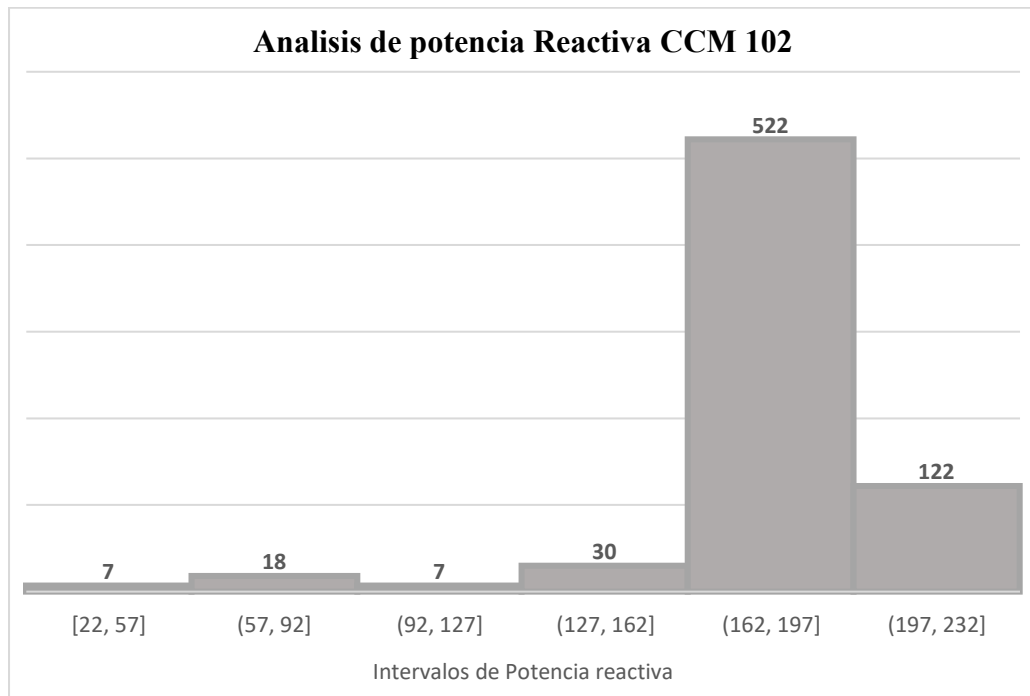
La cantidad de datos trazables para el área de chancado fino, medición realizada en el CCM 102, con un total de 706 datos, no se tomaron en consideración valores de potencia reactiva por debajo de los 20 KVar, dado que no son muy significativos, la mayor concentración de mediciones esta entre los 142 kVar a los 202 kVar, dentro estos intervalos son donde mayormente se consume potencia reactiva, se puede denotar en el figura N° 5.3 esto se señala para tener en consideración en el momento de diseñar el banco de condensador para optimizar su funcionamiento.

**Tabla N° 5.3: Resumen general de mediciones realizadas en chancado fino**

Periodo de mediciones	08 al 14 de diciembre del 2022	
N° total de mediciones	864	
N° de mediciones sin considerar	<b>Bloqueo área 100</b>	<b>&gt; 20 KVAR 58</b>
	158	
N° de mediciones trazables	706	

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura N° 5.2: Análisis de potencia reactiva durante todo el periodo de medición**



Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.2.4 Distribución del banco de condensadores en sala eléctrica N°2

De acuerdo el cálculo teórico de 225 kVar y simulación en software ETAP, en el capítulo IV, párrafo 4.1.5. para corregir la demanda reactiva en CCM 102, nos permitirá la corrección del factor de potencia de 0,74 a 0,98 y además considerando la distribución observada en la figura N° 5.3.

Se propone una configuración de 6 pasos tabla N° 5.4, la distribución del banco de condensadores para adaptarse mejor a la variabilidad de la carga reactiva, flexibilidad en la compensación y optimización el factor de potencia.

**Tabla N° 5.4: Distribución del BC en sala eléctrica N°2, CCM 102**

N° de Paso	Potencia total del paso (kVAr)	Condensador por paso	N° total de condensadores por paso	Potencia acumulada (kVAr)	Comentario
1	15	15 kVAr	1	15	Paso inicial fino y preciso: Evita sobrecompensación en cargas ligeras (pocas ocurrencias).
2	30	30 kVAr	1	45	Transición suave duplica el paso inicial para mayor granularidad .
3	45	15 kVAr + 30 kVAr	2	90	Resolución media óptima para cubrir la transición hacia la zona dominante sin saltos bruscos.
4	60	30 kVAr × 2	2	150	Paso clave de alta eficiencia: Cubre la mayor concentración de datos con precisión y bajo número de conmutaciones.
5	45	20 kVAr + 25 kVAr	2	195	Extensión precisa del pico: Permite ajuste fino en la zona alta sin exceder el máximo medido.
6	30	30 kVAr	1	225	Paso final exacto y seguro: Alcanza el máximo real medido sin capacidad sobrante innecesaria.

Fuente: Elaboración Propia

### **5.2.5 Detalle del consumo de energía reactiva en las áreas de chancado fino y chancado primario**

A continuación, la tabla N° 5.5, muestra el consumo de energía reactiva hora (kVARh), en cada una de las áreas chancado primario CCM 051, y chancado fino CCM 102, correspondiente a los años 2022 a 2025, cabe mencionar que ambos bancos de condensadores se encuentran fuera de servicio desde antes del 2022, solo haremos mención de los costos producidos desde las fechas señaladas, para cálculo de los costos de la energía reactiva se tomará como referencia el valor del promedio del dólar según Servicio de impuesto interno de cada año, junto a esto de acuerdo al contrato establecido entre la empresa generadora en AES Gener S.A. y compañía contractual minera candelaria CCMC-CCMO, no estable un costo por energía reactiva, pero basado en prácticas regulatorias de Chile se estable el rango 0,02 a 0,05 US\$/kVARh, para lo cual se promedió un estimado de 0,035 US\$/kVARh.

**TABLA N° 5.5: CONSUMO DE ENERGÍA REACTIVA PERIODO 2022 - 2025**

<b>Consumo de Potencia Reactiva KVARH</b>																	
<b>Año 2022</b>				<b>Año 2023</b>				<b>Año 2024</b>				<b>Año 2025</b>					
<b>CCM 051</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM 051</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM 051</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM 051</b>	<b>Costo</b>	<b>CCM 102</b>	<b>Costo</b>
<b>KVArh</b>	<b>mensual</b>	<b>102</b>	<b>mensual</b>	<b>051</b>	<b>mensual</b>	<b>102</b>	<b>mensual</b>	<b>KVArh</b>	<b>CLP</b>	<b>KVArh</b>	<b>CLP</b>	<b>KVArh</b>	<b>CLP</b>	<b>KVArh</b>	<b>CLP</b>	<b>KVArh</b>	<b>CLP</b>
<b>Enero</b>	38.277	1.136.396	152.710	4.533.773	37.659	1.126.648	152.409	4.559.626	36.159	1.196.515	155.810	5.155.808	39.159	1.307.711	149.009	4.976.093	
<b>Febrero</b>	39.513	1.173.079	155.565	4.618.524	39.513	1.182.095	153.311	4.586.611	39.329	1.301.420	157.740	5.219.687	39.696	1.325.627	148.883	4.971.870	
<b>Marzo</b>	40.529	1.203.248	158.733	4.712.579	40.529	1.212.497	160.071	4.788.851	40.703	1.346.883	171.593	5.678.072	40.354	1.347.616	148.550	4.960.769	
<b>Abril</b>	38.282	1.136.551	157.802	4.684.955	38.282	1.145.287	156.055	4.668.703	38.722	1.281.324	149.780	4.956.273	37.842	1.263.732	162.331	5.420.973	
<b>Mayo</b>	39.719	1.179.221	160.254	4.757.744	39.719	1.188.285	161.296	4.825.492	36.761	1.216.446	156.240	5.170.053	42.678	1.425.199	166.352	5.555.258	
<b>Junio</b>	40.764	1.210.242	159.878	4.746.590	38.689	1.157.466	158.170	4.731.960	40.926	1.354.262	167.331	5.537.036	0	0	0	0	
<b>Julio</b>	40.046	1.188.911	163.979	4.868.345	39.101	1.169.781	156.495	4.681.848	41.341	1.367.978	163.981	5.426.181	0	0	0	0	
<b>Agosto</b>	40.179	1.192.873	168.489	5.002.236	39.815	1.191.139	167.286	5.004.676	40.369	1.335.815	172.240	5.699.498	0	0	0	0	
<b>Septiembre</b>	38.799	1.151.905	165.895	4.925.208	39.049	1.168.213	170.897	5.112.703	38.628	1.278.205	175.655	5.812.498	0	0	0	0	
<b>Octubre</b>	39.665	1.177.594	164.080	4.871.324	39.384	1.178.249	159.318	4.766.296	41.333	1.367.726	166.724	5.516.975	0	0	0	0	
<b>Noviembre</b>	39.948	1.186.002	165.243	4.905.869	39.037	1.167.857	159.595	4.774.583	42.964	1.421.710	168.554	5.577.505	0	0	0	0	
<b>Diciembre</b>	38.803	1.152.002	163.478	4.853.466	39.069	1.168.819	163.176	4.881.734	38.617	1.277.858	160.672	5.316.709	0	0	0	0	
	<b>14.088.022</b>		<b>57.480.613</b>		<b>14.056.335</b>		<b>57.383.081</b>		<b>15.746.142</b>		<b>65.066.293</b>		<b>6.669.885</b>		<b>25.884.963</b>		

En la tabla N° 5.6, se puede visualizar el detalle de la energía reactiva consumida por cada año con los meses correspondiente y a su vez los costos totales que ambas áreas han registrado hasta la fecha.

**Tabla N° 5.6: Costo anual de la energía reactiva correspondiente ambas áreas**

Año	Costo Anual de energía reactiva kVARh (CLP)
2022	73.600.315
2023	70.127.251
2024	80.653.450
2025	33.150.923
Costo Total	257.531.939

Fuente: Elaboración Propia.

### **5.2.6 Detalle del consumo de energía activa en las áreas de chancado fino y chancado primario.**

En la tabla N° 5.7 y tabla N° 5.8, se detalla el consumo de energía activa (kWh), en cada una de las áreas, desde el año 2022 a lo cursado este año 2025, para realizar dichas tablas se tomó en consideración el valor monómico (precio único que combina el costo de la energía y la potencia), que la compañía contractual minera Candelaria, establece para la proyección de los gastos de energía el cual equivale 89,35 US/MWh, este valor comprende el siguiente desglose:

- ✚ **Energía (54.100 US\$/MWh):** Representa el costo base de la energía activa.
- ✚ **Potencia (12.811 US\$/MWh):** Cargo por potencia de punta, regulado por los precios de nudo de la CNE.

- ✚ **CU TxN (3.867 US\$/MWh):** Cargo por transmisión nacional, incluido en el CDCD o facturado por separado.
  
- ✚ **CU TxZ (0.000 US\$/MWh):** Sin costo de transmisión zonal.
  
- ✚ **CSP (0.820 US\$/MWh) y CSP (FET) (3.321 US\$/MWh):** Cargos por servicios públicos y estabilización de tarifas, regulados en Chile.
  
- ✚ **SSCC (3.911 US\$/MWh) y CU SSCC (0.234 US\$/MWh):** Costos de servicios complementarios, gestionados por el CEN.
  
- ✚ **Sobr\_MT (3.905 US\$/MWh):** Posible sobrecosto por generación termoeléctrica, relacionado con la Norma de Emisión.
  
- ✚ **Comp\_Pestab (2.065 US\$/MWh):** Componente de estabilización de precios, regulado en Chile.

**Tabla N° 5.7: Detalle del consumo de energía Activa en las áreas de chancado primario**

Consumo de Potencia Activa KWH valorizada Chancado Primario									
Año 2022			Año 2023		Año 2024		Año 2025		
KWH CCM 051	Costo Primario (CLP)		KWH CCM 051	Costo Primario (CLP)	KWH CCM 051	Costo Primario (CLP)	KWH CCM 051	Costo Primario (CLP)	
Enero	40.168	3.426.343	39.520	3.242.511	37.945	3.501.120	41.094	3.904.235	
Febrero	41.465	3.536.945	41.465	3.402.089	41.272	3.808.083	41.657	3.957.724	
Marzo	42.531	3.627.909	42.531	3.489.585	42.714	3.941.114	42.348	4.023.374	
Abril	40.173	3.426.810	40.173	3.296.153	40.635	3.749.281	39.712	3.772.935	
Mayo	41.682	3.555.464	41.682	3.419.902	38.577	3.559.441	44.786	4.255.002	
Junio	42.778	3.648.998	40.601	3.331.207	42.948	3.962.705		0	
Julio	42.024	3.584.680	41.033	3.366.648	43.383	4.002.841		0	
Agosto	42.164	3.596.627	41.782	3.428.117	42.363	3.908.728		0	
Septiembre	40.716	3.473.105	40.978	3.362.135	40.536	3.740.155		0	
Octubre	41.624	3.550.560	41.330	3.391.019	43.375	4.002.103		0	
Noviembre	41.921	3.575.910	40.965	3.361.113	45.087	4.160.065		0	
Diciembre	40.720	3.473.397	40.999	3.363.880	40.525	3.739.140		0	
		42.476.748			40.454.358			42.573.656	19.913.270

En la tabla N° 5.7, observa, la potencia en kWh, consumida por mes del área chancado primario, con sus respectivos costos, desde el año 2022, hasta la fecha con un costo total de \$ 145.418.033, sin considerar los costos asociado a consumo de potencia reactiva y penalizaciones.

**Tabla N° 5.8: Detalle del consumo de energía Activa en las áreas de chancado Fino**

Consumo de Potencia Activa KWH valorizada Chancado fino									
	Año 2022		Año 2023		Año 2024		Año 2025		
	KWH CCM 102	Costo fino (CLP)	KWH CCM 102	Costo fino (CLP)	KWH CCM 102	Costo fino (CLP)	KWH CCM 102	Costo fino (CLP)	
Enero	146.097	12.462.100	145.809	11.963.348	149.062	13.753.590	142.556	13.543.878	
Febrero	148.828	12.695.059	146.672	12.034.148	150.909	13.923.992	142.435	13.532.382	
Marzo	151.859	12.953.589	153.139	12.564.777	164.162	15.146.775	142.117	13.502.170	
Abril	150.968	12.877.659	149.297	12.249.537	143.293	13.221.312	155.301	14.754.747	
Mayo	153.314	13.077.737	154.311	12.660.913	149.474	13.791.588	159.148	15.120.241	
Junio	152.955	13.047.077	151.320	12.415.509	160.084	14.770.550		0	
Julio	156.878	13.381.749	149.718	12.284.027	156.879	14.474.833		0	
Agosto	161.193	13.749.777	160.041	13.131.050	164.781	15.203.931		0	
Septiembre	158.710	13.538.047	163.496	13.414.485	168.048	15.505.369		0	
Octubre	156.974	13.389.938	152.418	12.505.598	159.504	14.717.035		0	
Noviembre	158.087	13.484.891	152.683	12.527.341	161.254	14.878.503		0	
Diciembre	156.399	13.340.849	156.110	12.808.479	153.714	14.182.806		0	
	157.998.472		150.559.215		173.570.284		70.453.418		

En la tabla N° 5.8, observa, la potencia en kWh, consumida por mes del área chancado fino, con sus respectivos costos, desde el año 2022, hasta la fecha con un costo total \$ 552.581.388, sin considerar los costos asociado a consumo de potencia reactiva y penalizaciones.

## **CAPITULO VI**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **6.1 Antecedentes generales**

En el presente capítulo se centrará en el análisis detallado de los beneficios técnicos y económicos derivados del mejoramiento del factor de potencia en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Chancado Fino (CCM 102) de la planta Pedro Aguirre Cerda, mediante la implementación de bancos de condensadores automáticos.

El análisis considera los costos asociados a la inversión, así como los ahorros proyectados por la reducción de penalizaciones tarifarias y mejora del rendimiento energético. Se evalúa además la factibilidad económica del proyecto en función del retorno de inversión y la disminución de los sobrecostos eléctricos.

Se debe señalar que la Compañía Contractual Minera Ojos del Salado ha incurrido en penalizaciones mensuales por bajo factor de potencia, conforme a lo establecido en la regulación eléctrica chilena, que exige un mínimo de 0,93. Estas penalizaciones se reflejan directamente en las facturas de consumo eléctrico.

En las Tablas N° 6.1 y N° 6.2, se presentan un resumen de los antecedentes de facturación eléctrica correspondientes a las áreas señaladas, evidenciando que durante el período evaluado 2022 al 2025, han generado un impacto económico significativo en la operación. Además, el resumen cuenta con los costos del consumo de energía activa, reactiva y penalizaciones en los periodos mencionados.

**Tabla N° 6.1: Resumen de la facturación chancado Primario CCM 051.**

<b>Chancado Primario CCM 051</b>							
Año	Energía Activa (kWh)	Energía Reactiva (kVArh)	Factor de Potencia	Costo Activa Anual (CLP)	Costo Anual Reactiva (CLP)	Penalización (CLP)	Costo Total (CLP)
2022	572.662	474.524	0,74	42.476.748	14.487.950	3.719.879	60.684.578
2023	567.016	469.845	0,77	40.454.358	13.798.155	2.867.149	57.119.662
2024	574.265	475.852	0,75	46.074.776	15.715.164	3.771.639	65.561.580
2025	241.037	199.730	0,74	19.913.270	6.792.009	1.743.894	28.449.174
Costos Totales				148.919.153	50.793.279	12.102.562	211.814.994

Fuente: C.C.M. Ojos del Salado.

En la Tabla N° 6.1 se aprecia que el costo acumulado por penalizaciones por bajo factor de potencia desde el año 2022 hasta la fecha asciende a \$12.102.562 CLP, mientras que el costo asociado al consumo de energía reactiva durante el mismo período alcanza los \$50.793.279 CLP.

Estos valores evidencian el impacto económico generado por la falta de compensación reactiva en el área analizada, lo cual ha derivado en un alto costos en la facturación eléctrica mensual.

Por lo tanto, se estima que, mediante la implementación de un sistema de compensación automática de corrección de factor de potencia, la empresa podría haber obtenido un ahorro significativo de \$62.895.841 CLP, correspondiente a la suma de ambos conceptos (penalización y consumo de energía reactiva).

**Tabla N° 6.2: Resumen de la facturación chancado Fino CCM 102**

Chancado Fino CCM 102							
Año	Energía Activa (kWh)	Energía Reactiva (kVArh)	Factor de Potencia	Costo Activa Anual (CLP)	Costo Anual Reactiva (CLP)	Penalización (CLP)	Costo Total (CLP)
2022	1.852.260	1.936.108	0,76	137.389.975	59.112.364	13.222.503	209.724.842
2023	1.835.013	1.918.079	0,74	130.921.057	56.329.097	14.462.876	201.713.029
2024	1.881.164	1.966.319	0,75	150.930.682	64.938.285	15.585.189	231.454.156
2025	741.557	775.125	0,74	61.263.841	26.358.914	6.767.829	94.390.584
Costos Totales				480.505.555	206.738.660	50.038.396	737.282.611

Fuente: C.C.M. Ojos del Salado.

En la tabla N° 6.2, se observa que durante el período comprendido entre los años 2022 y 2025, el área de Chancado Fino (CCM 102) ha incurrido en gastos significativos asociados tanto al consumo de energía reactiva, como por penalizaciones aplicadas por bajo factor de potencia.

El costo acumulado total en el período 2022–2025 asciende a \$256.777.057 CLP, lo que representa una pérdida económica directa atribuible a la ausencia de compensación en el sistema.

Este comportamiento operativo pone de manifiesto la necesidad urgente de implementar bancos de condensadores automáticos en CCM 102, a fin de corregir el factor de potencia, reducir el consumo de energía reactiva y eliminar las penalizaciones mensuales.

## 6.2 Costos de instalación de banco de condensadores para cada una de las áreas

De acuerdo con lo presentado por las tablas resumen de las facturaciones, la instalación de los bancos de condensadores en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Chancado Fino (CCM 102) es crucial para optimizar la eficiencia energética y reducir costos operativos. Estos bancos, de 80 kVar y 225 kVar respectivamente, corrigen el bajo factor de potencia (0.74–0.77), que genera penalizaciones significativas y elevados costos por energía reactiva, según las normativas chilenas (Decreto Supremo N° 62/2006).

Al mejorar el factor de potencia a niveles cercanos a 0.98, se eliminarán las penalizaciones y se reducirán los costos de energía reactiva. Además, los bancos de automáticos aseguran una compensación dinámica ante variaciones de carga, prolongando la vida útil de los equipos y reduciendo pérdidas en el sistema eléctrico.

**Tabla N° 6.3: Costos de instalación de los bancos de condensadores**

Área Chancado	Banco Requerido	Valor Referencial Banco (CLP)	Costo Estimado Instalación (CLP)	Costo Total Aproximado (CLP)
Primario CCM 051	80 kVar	21.654.833	8.279.191	29.934.024
Fino CCM 102	225 kVar	78.519.029	20.329.757	98.848.786

Fuente: C.C.M Ojos del Salado.

## 6.3 Análisis de los datos

Los datos muestran el consumo de energía activa (kWh), energía reactiva (kVARh), factor de potencia, en las tablas N° 6.1 Y 6.2 y los costos asociados (activa, reactiva y penalización), para los años 2022–2025. Los ahorros proyectados se relacionan con la instalación de bancos de condensadores de 80 kVar (CCM 051) y 225 kVar (CCM 102),

que corrigen el factor de potencia de 0.74–0.77 a 0.98, eliminando penalizaciones por bajo factor de potencia y reduciendo las pérdidas de energía.

#### **6.4 Origen de los Ahorros en la Facturación Mensual**

Con la eliminación de las penalizaciones por bajo factor de potencia que se aplican cuando el factor de potencia es inferior a un umbral (0.93, según la normativa chilena). Al instalar los bancos de condensadores, el factor de potencia se corrige 0.98, y con ello se eliminarán las penalizaciones y el consumo de energía reactiva, descritas en las en las Tablas N° 6.1 y N° 6.2.

#### **6.5 Reducción de Costos por Energía Reactiva**

Es la componente de la potencia (VAR), que no realiza trabajo útil, pero es necesaria para el funcionamiento de equipos como motores y transformadores (Los motores de inducción necesitan potencia reactiva para generar el campo magnético giratorio en el estator, esencial para inducir corriente en el rotor). Las compañías distribuidoras eléctricas cobran por esta energía reactiva, ya que representa una carga adicional en el sistema de distribución. Los bancos de condensadores compensan o proporcionan esta energía reactiva, reduciendo o eliminando los costos asociados.

La Tabla N° 6.4 presenta el costo mensual promedio de las facturas eléctricas correspondiente al período de enero a mayo de 2025, calculado como el promedio de los costos incurridos por energía reactiva y penalizaciones por bajo factor de potencia en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Chancado Fino (CCM 102).

Este análisis tiene como objetivo cuantificar el impacto económico actual de la operación con un factor de potencia inferior al umbral de 0.93, y proporcionar una base para evaluar el punto de equilibrio financiero tras la instalación de bancos de condensadores automáticos de 80 kVar (CCM 051) y 225 kVar (CCM 102).

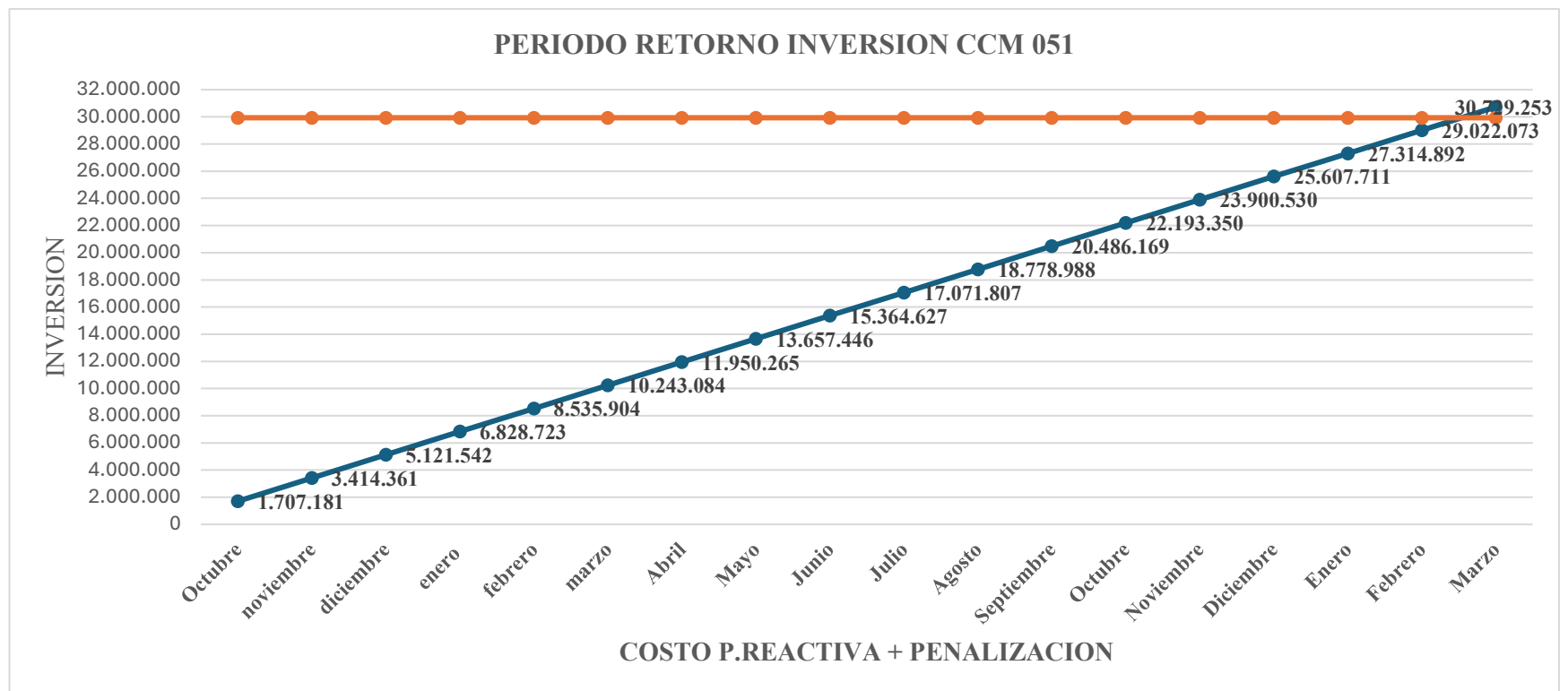
Estos bancos corregirán el factor de potencia a 0.98, eliminando las penalizaciones y los costos asociados al consumo de energía reactiva. La tabla permite visualizar los ahorros mensuales proyectados, facilitando el cálculo del período de recuperación de la inversión requerida para los bancos y demostrando la viabilidad económica del proyecto.

**Tabla N° 6.4: Costo mensuales promedio lo que va del año 2025 (enero-mayo)**

Área	Costo Mensual promedio Reactiva (CLP)	Penalización (CLP) Promedio Mensual	Reactiva + Penalización mensual	Costo Total Factura Promedio (CLP)	Costo Mensual Proyectado Promedio (CLP)	Equivalente % del Ahorro
<b>CCM 051</b>	1.358.402	348.779	1.707.181	5.689.835	3.982.654	30 %
<b>CCM 102</b>	5.271.783	1.353.566	6.625.349	18.878.117	12.252.768	35 %

La Figura N° 6.1 muestra el tiempo estimado para recuperar la inversión tras la instalación del banco de condensadores de 80 kVar, conectado en paralelo al CCM 051. Según la proyección, el retorno se alcanzaría en un período de 17 a 18 meses, además solo por concepto de facturación se logra disminuir aproximadamente en 30% el costo, correspondiente al chancado primario lo que confirma la viabilidad técnica y económica del proyecto de mejorar del factor de potencia en el área de chancado primario. A continuación, se presenta la ecuación que determina el tiempo de recuperación de la inversión.

$$\text{Periodo de recuperación inversión } P.R = \frac{\text{Costo Inversion}}{\text{Ahorro mensual}} \longrightarrow P.R = \frac{29.9340.24}{1.707181} = 17.53 \text{ Meses (Ec. N° 6.1)}$$

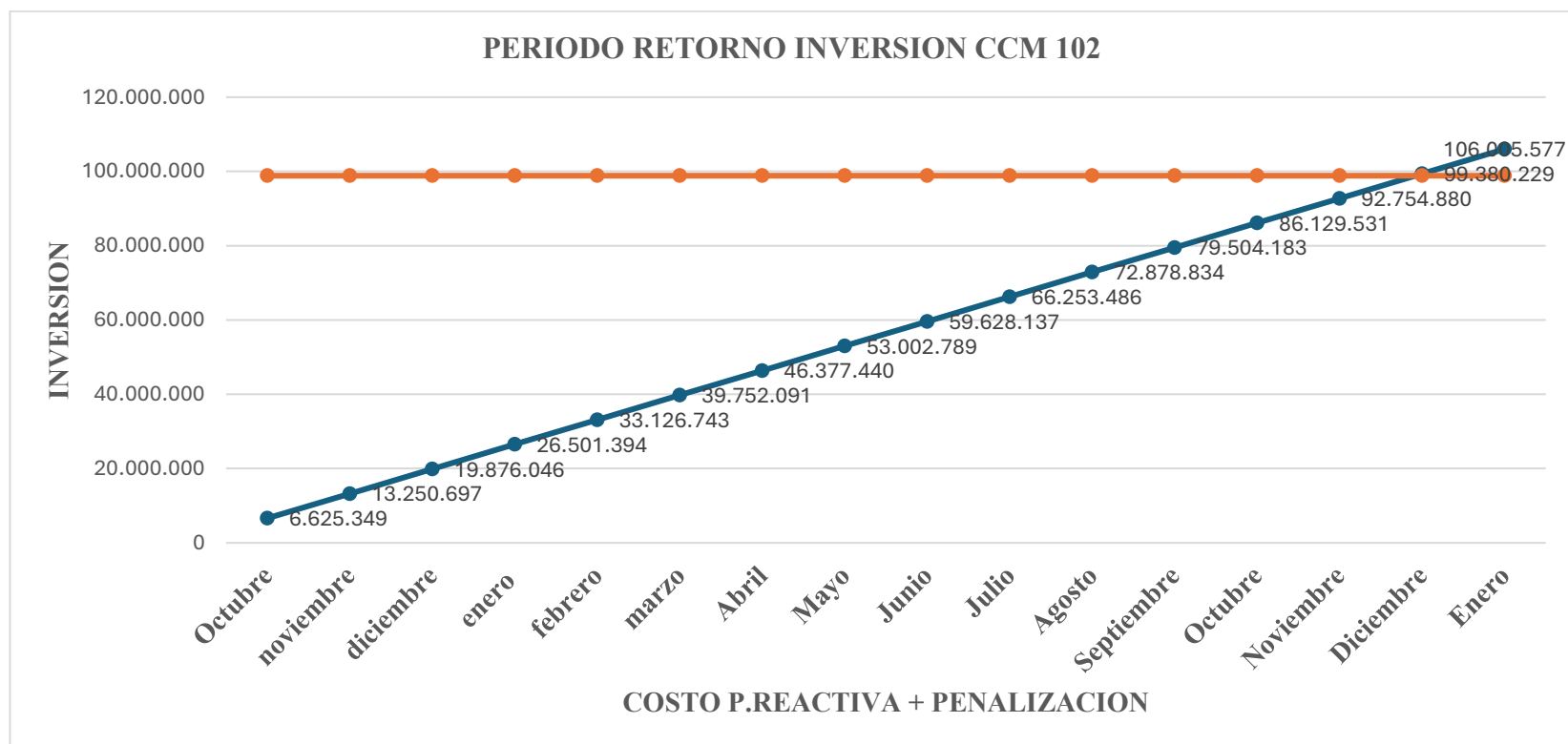


**Figura N° 6.1: Periodo de retorno inversión CCM 051 – Área Chancado Primario.**

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura N° 6.2, al igual que lo anterior es la estimación de recuperación de la inversión es de 15 a 16 meses en el área de chancado fino CCM 102, el banco de condensadores se conectará en paralelo al CCM, con esta implementación se obtendrá una reducción en la facturación eléctrica en un 35 %, valorizada en \$ 6.625.349 pesos es decir que por una vez instalado se cancelaran \$ 12.252.768 pesos confirmado la viabilidad del proyecto.

Periodo de recuperación inversión  $P.R = \frac{\text{Costo Inversion}}{\text{Ahorro mensual}} \longrightarrow P.R = \frac{98.848.786}{6.625.349} = 14.9 \text{ Meses. (Ec. N° 6.2)}$



**Figura N° 6.2: Periodo de retorno inversión CCM 102 – Área Chancado Fino**

Fuente: Elaboración Propia.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES**

El presente proyecto de tesis abordó el diseño e implementación de bancos de condensadores para mejorar el factor de potencia en las áreas de Chancado Primario (CCM 051) y Chancado Fino (CCM 102), con el objetivo de optimizar la eficiencia energética y reducir los costos asociados al consumo de energía reactiva y penalizaciones por bajo factor de potencia.

A través de un análisis técnico y económico, se determinaron las capacidades óptimas de los bancos de condensadores de compensación automática, de acuerdo con los valores de las mediciones obtenidas por el analizador de calidad de energía, lo que llevo después a calcular teóricamente la capacidad de cada uno de los bancos en 80 kVar para CCM 051 y 225 kVar para CCM 102.

Siendo esta la potencia reactiva necesarias para elevar el factor de potencia de 0.75 a 0.98, cumpliendo con los estándares normativos en Chile. Estos valores de potencia reactiva fueron validados mediante simulaciones en el software ETAP, lo que confirmó la efectividad de la solución propuesta para corregir el FP y así optimizar el rendimiento del sistema eléctrico en ambas áreas.

El análisis técnico-económico se basó en los costos reales pagados por consumo de energía reactiva y penalizaciones durante el período de enero a mayo del presente año, junto con los costos de instalación de los bancos de condensadores. Este enfoque nos permitió cuantificar los ahorros generados por la reducción de costos asociados al consumo de energía reactiva y la eliminación de penalizaciones.

La implementación de esta solución no solo mejorara la eficiencia energética, sino que también demuestra ser económicamente viable, ofreciendo una rápida recuperación de la inversión y beneficios sostenibles a largo plazo.

La inversión inicial para los bancos de condensadores, estimada en \$ 29.934.024 CLP para CCM 051 y 98.848.786 CLP para CCM 102, resulta altamente rentable. El período de recuperación se calcula en aproximadamente 17 a 18 meses para CCM 051 y 15 a 16 meses para CCM 102, considerando los ahorros mensuales proyectados de 1.707.181 CLP y 6.625.349 CLP, respectivamente. Estos retornos rápidos destacan la viabilidad económica del proyecto, especialmente en un contexto industrial donde la optimización de costos es crucial y la producción de una minería sustentable.

En conclusión, la implementación de bancos de condensadores de regulación automática en las áreas de chancado no solo mejora el factor de potencia a 0.98, cumpliendo con los requisitos normativos, demuestra que la corrección del factor de potencia es una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad económica en operaciones de la compañía contractual minera Ojos del Salado, ofreciendo beneficios tanto técnicos como financieros que justifican su opción.

## **7.1 RECOMENDACIONES**

Para maximizar los beneficios del proyecto y garantizar su sostenibilidad a largo plazo, se proponen las siguientes recomendaciones:

- ✚ Implementar un sistema de monitoreo continuo del factor de potencia para asegurar el desempeño óptimo de los bancos de condensadores.
- ✚ Evaluar la aplicabilidad de esta solución en otras áreas de la planta para ampliar los beneficios energéticos y económicos de la compañía.
- ✚ Capacitar al personal técnico en la operación y mantenimiento de los bancos de condensadores para garantizar su correcto funcionamiento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Chapman, S. J. (2013). Fundamentos de máquinas eléctricas (4.<sup>a</sup> edición en español)
- [2] Lluinquina, F (2012). “Diseño De Un Banco De Condensadores Para La corrección Del Factor De Potencia De La Empresa Banchisfood S.A. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador.
- [3] CEVALLOS, Augusto (2009). Hablemos de electricidad, Quito \_ Ecuador. Codificación del reglamento de tarifas eléctricas decreto Ejecutivo N° 2713 de 7 de junio 2009.
- [4] JOE OIA, Boletín Electrónico N° 1, “Como reducir la factura de Energía Electrica Corrigiendo el Factor de Potencia”.
- [5] Cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 8, Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas, Producido por empresa ABB.