



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN
DE POTENCIA REACTIVA EN CENTROS DE CONTROL DE MOTORES DE
MEDIA TENSIÓN EN LA COMPAÑÍA MINERA DEL PACÍFICO (CMP)**

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

Profesor guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Jorge Andrés Ceballos Cortés

David Ignacio Márquez Díaz

Copiapó, Chile 2023

DEDICATORIA

Dedico este proyecto, a cada uno de mis seres queridos, quienes han sido pilares para seguir adelante.

A mis padre Octavio Cervantes Parra por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida.

A mi madre Beatriz Cortes Navea que siempre me apoyo incondicionalmente y que ha sido mi pilar fundamentales en mi formación como profesional, además de su confianza y consejos.

A mis hermanos Yasmina y Alexis por el apoyo que siempre brindan día a día en el transcurso de mi carrera universitaria.

A mi abuelita Eliana Navea por estar en los momentos importantes de mi vida y ser el ejemplo para salir adelante.

Y por último a mi hijo Andrés Ceballos Pizarro que posiblemente en este momento no entiendas mis palabras, pero para cuando seas capaz, quiero que te des cuenta de lo que significas para mí. Eres la razón de que me levante cada día esforzándome por el presente y el mañana, eres y serás mi principal motivación para seguir cumpliendo metas.

Atte.

Jorge Andrés Ceballos Cortés.

DEDICATORIA

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, con valores y principios que me han permitido alcanzar las metas que me propuesto en la vida, muchos de mis logros se los debo a ellos entre los que se incluye este.

Esta dedicatoria también va para mi esposa la cual ha estado junto a mí, desde antes que comenzara este proceso universitario, por tanto, en cada paso a representado un apoyo incondicional en mis triunfos y fracasos.

Asimismo dedicar este proyecto a la familia Aravena Patiño, por brindar su apoyo a lo largo de todo mi proceso académico.

Finalmente dedicar este gran triunfo, a mi madre, la cual siempre ha sido mi motivo de superación, personal y profesionalmente.

Atte.

David Ignacio Márquez Díaz.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por generar la instancia de estar finalizando una etapa más, el cual me ha acompañado a lo largo de mi carrera, por darme la sabiduría y fortaleza para alcanzar mis objetivos.

Mi especial agradecimiento a mi profesor guía el Sr. Juan Carlos Madrigal Lobos por su disposición y apoyo durante la elaboración del proyecto.

A mi compañero y amigo David Ignacio Márquez Díaz por los buenos momentos que hemos compartido realizando nuestro proyecto, que ha sido una linda experiencia tanto en lo académico como en lo personal.

Por ultimo a mi querida familia, que ha estado presente siempre, porque son lo más sagrado que tengo en la vida, por ser principales motivadores para hacer bien las cosas. Gracias madre, padre, hermanos, hijo, abuelita y seres queridos, por sus consejos y amor yo no habría llegado hasta donde estoy los amo.

Atte.

Jorge Andrés Ceballos Cortés.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a dios por permitirme tener tan buena experiencia de mi universidad, además de otorgarme la fuerza para ser resiliente a la hora de enfrentar adversidades en este proceso.

Gracias a mi universidad por permitir mi desarrollo en lo que tanto apasiona y compañero de carrera que hizo parte de este proceso de formación.

A asimismo agradecer a mi profesor guía el Sr. Juan Carlos Madrigal Lobos, por su orientación y atención a mis consultas.

También me gustaría agradecer a mi compañero de Proyecto Jorge Ceballos Cortes, por su entrega y compromiso al desarrollo de este proyecto de titulación.

Gracias a mi familia en especial a mis padres por su apoyo incondicional. Por brindarme la ayuda necesaria para el cumplimiento de mis objetivos académicos.

Finalmente agradecer a mi esposa y familia, por la paciencia, compromiso y solidaridad con este proyecto, por el tiempo que me han concedido. Su apoyo en este proyecto ha sido fundamental para llevarlo a cabo, es por esto que este trabajo es también el suyo.

Atte.

David Ignacio Márquez Díaz.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2 Descripción de la empresa	2
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
1.5 Metodología de Trabajo	3
1.6 Justificación proyecto de título	4
1.7 Resumen de capítulos.....	5
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Factor de potencia	7
2.2 Cargas resistivas.....	9
2.3 Cargas inductivas	9
2.4 Cargas capacitivas.....	10
2.5 Potencia en sistemas trifásicos balanceados	10
2.6 Potencia en sistemas trifásicos desequilibrados	11
2.7 Problemas de un bajo factor de potencia.....	12
2.8 Corrección del factor de potencia	14
2.9 Planteamiento analítico para la corrección del factor de potencia	16
2.9.1 La necesidad de corregir el factor de potencia.....	18
2.9.2 Compensación en MT	18
2.9.3 Compensando FP	19
2.10 Definición de un capacitor	23
2.11 Aspectos a considerar para instalar bancos de capacitores	25
2.12 Conexión de los bancos de capacitores	27
2.12.1 conexión estrella a tierra con neutro sólidamente conectado a tierra.....	27
2.12.2 Conexión estrella con neutro flotante	28
2.12.3 Conexión delta	29

CAPÍTULO III	30
CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	30
3.1 Solución del problema	35
3.1.1 Propuesta N° 1: Compensación mediante regulador automático.....	38
3.1.2 Propuesta N° 2: Compensación automática con los motores en funcionamiento...40	
3.1.3 Comparación entre propuestas	42
3.1.4 Elementos de la solución escogida.....	43
3.1.5 Análisis económico	50
CAPÍTULO IV	53
ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
CAPÍTULO V	55
CONCLUSIONES	55
GLOSARIO	57
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Factor de potencia en diferentes cargas.	8
Figura N° 2.2: Relación entre potencia activa, reactiva y aparente.	9
Figura N° 2.3: Diagrama vectorial de potencias.	15
Figura N° 2.4: Triángulo de potencia con 2 factores de potencia.	17
Figura N° 2.5: Compensación individual.	19
Figura N° 2.6: Compensación por grupo.	20
Figura N° 2.7: Compensación global centralizada.	20
Figura N° 2.8: Definición de capacitor.	23
Figura N° 2.9: Detalle de armadura.	26
Figura N° 2.10: Conexión en estrella aterrada de capacitores.	28
Figura N° 2.11: Conexión en estrella aislada de capacitores.	29
Figura N° 2.12: Conexión en triángulo de capacitores.	29
Figura N° 3.1: Potencia activa medida.	30
Figura N° 3.2: Potencia reactiva medida.	31
Figura N° 3.3: Potencia activa versus Potencia reactiva.	32
Figura N° 3.4: Factor de potencia medido y valor mínimo por norma.	34
Figura N° 3.5: Configuración actual del CCM 212 sin compensación reactiva.	44
Figura N° 3.6: Compartimiento de entrada del CCM 212.	45
Figura N° 3.7: Compartimiento de Bomba 2 – Línea 1 de flotación.	46
Figura N° 3.8: Interruptor Schneider SF1.	47
Figura N° 3.9: Relé de Protección Schneider Sepam 20.	47
Figura N° 3.10: Contactor tripolar Schneider Rollarc.	48
Figura N° 3.11: Transformador de corriente Arteche para protección y medida.	48
Figura N° 3.12: Transformador de tensión monofásico Arteche.	49
Figura N° A.1: Diagrama unilineal CCM 212.	61
Figura N° A.2: Diagrama unilineal solución opción Nro. 1.	62
Figura N° A.3: Diagrama unilineal solución opción Nro. 2.	63
Figura N° A.4: Diagrama funcional para la solución seleccionada.	64
Figura N° A.5 (continuación): Diagrama funcional para la solución seleccionada.	65

Figura N° A.6: Esquema constructivo para la solución seleccionada.....	66
Figura N° A.7: Diagrama de funcionamiento planta magnetita.....	67
Figura N° A.8: Diagrama de funcionamiento bombas 21310-3 y 21310-7	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Datos de motores correspondientes al CCM 212.	4
Tabla N° 2.1: Potencia en sistemas trifásicos balanceados.	10
Tabla N° 2.2: Factores de potencia típicos de distintas cargas.	16
Tabla N° 3.1: Resumen de componentes del banco.	39
Tabla N° 3.2: Costos estimados de ejecución del proyecto.	39
Tabla N° 3.3: Resumen de componentes del banco de compensación según motores en funcionamiento.	41
Tabla N° 3.4: Costos estimados de ejecución del proyecto.	42

RESUMEN

En el marco de este proyecto de título, se ha desarrollado un sistema de compensación reactiva en una de las salas eléctricas de la Planta Magnetita, propiedad de la Compañía Minera del Pacífico. La planta está ubicada en la III Región de Atacama, específicamente en la comuna de Tierra Amarilla. Este proyecto responde a los requisitos estipulados en el Decreto 9 del Ministerio de Energía que fija precios de nudo para suministro de electricidad con fecha de publicación 26 de febrero del 2022. La propuesta comienza con una revisión teórica general que abarca conceptos relacionados con el factor de potencia, incluyendo potencias activas y reactivas para diferentes tipos de cargas, ya sean equilibradas o desequilibradas. También se analiza el factor de potencia en cargas resistivas, inductivas y capacitivas, lo que permite determinar la cantidad de potencia que se necesita compensar. Luego, se procede a calcular la potencia reactiva requerida para ajustar el factor de potencia a un valor de 0,99 inductivo. Para llevar a cabo este proceso, se realiza un relevamiento de datos de las cargas a compensar, incluyendo información como la tensión de operación, la potencia, el factor de potencia, y otros datos relevantes. Dado el tipo de sistema eléctrico con cargas motoras significativas y operaciones puntuales, se optó por una compensación local que funcione simultáneamente con el motor. Una vez determinado el valor de potencia capacitiva necesario, se definen los elementos requeridos para su funcionamiento, como contactores para el control y fusibles para la protección, utilizando componentes eléctricos de las marcas Schneider, Artech, etc. Además, se realiza una evaluación de la factibilidad económica del proyecto en el contexto del cumplimiento del Decreto 9 mencionado anteriormente. En resumen, este proyecto se enfoca en diseñar y aplicar una solución de compensación reactiva basada en capacitores automáticos para mejorar el factor de potencia en una sala eléctrica específica de la Planta Magnetita de la Compañía Minera del Pacífico, en cumplimiento de regulaciones gubernamentales recientes y con el objetivo de optimizar la eficiencia energética en las operaciones de la planta.

Palabras claves: Media tensión, motor, banco de condensador, valor actual neto, tasa interna de retorno

ABSTRACT

Within the framework of this title project, a reactive compensation system has been developed in one of the electrical rooms of the Magnetite Plant, property of the Compañía Minera del Pacífico. The plant is located in the III Region of Atacama, specifically in the commune of Tierra Amarilla. This project responds to the requirements stipulated in Decree 9 of the Ministry of Energy that sets node prices for electricity supply with publication date February 26, 2022. The proposal begins with a general theoretical review that covers concepts related to the power, including active and reactive powers for different types of loads, whether balanced or unbalanced. The power factor in resistive, inductive, and capacitive loads is also analyzed, which allows determining the amount of power that needs to be compensated. Then, we proceed to calculate the reactive power required to adjust the power factor to a value of 0.99 inductive. To carry out this process, a data survey of the loads to be compensated is carried out, including information such as operating voltage, power, power factor, and other relevant data. Given the type of electrical system with significant motor loads and specific operations, a local compensation that works simultaneously with the motor was chosen. Once the necessary capacitive power value has been determined, the elements required for its operation are defined, such as contactors for control and fuses for protection, using electrical components of brands like Schneider, Artech, etc. In addition, an evaluation of the economic feasibility of the project is carried out in the context of compliance with Decree 9 mentioned above. In summary, this project focuses on designing and applying a reactive compensation solution based on automatic capacitors to improve the power factor in a specific electrical room of the Magnetite Plant of Compañía Minera del Pacífico, in compliance with recent government regulations and with the objective of optimizing energy efficiency in plant operations.

Keywords: Medium voltage, motor, capacitor bank, net present value, internal rate of return

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes generales

Compañía Minera del Pacífico, Planta Magnetita se ubica en la III Región de Atacama en comuna de Tierra Amarilla, es una faena productora de concentrado de hierro (Pellet Feed), logrando recuperar el mineral de interés mediante diversos procesos de concentración.

La principal fuente de procesamiento son los relaves provenientes de la Planta Concentradora de cobre de Minera Candelaria. El proceso productivo recibe los relaves en forma de pulpa, los cuales son procesados en una etapa de concentración magnética Rougher.

Posteriormente el mineral es traspasado a la etapa de remolienda, para lograr una reducción de tamaño y liberación de las partículas, las siguientes etapas: deslamado y concentración magnética de limpieza, permiten aumentar la concentración de hierro en el mineral procesado.

Finalmente, el mineral es procesado en la etapa de flotación de sílice, donde se eliminan impurezas y se logra la calidad requerida para el concentrado Pellet Feed, 66 % Fe.

El producto es bombeado en forma de pulpa, mediante un concentrado, hacia las instalaciones de Puerto Punta Totalillo, donde el mineral es filtrado, acopiado y embarcado para su exportación.

Parte importante del proceso viene dado mediante la utilización de motores asíncronos de media tensión (4,16 kV), que se alimentan desde 2 centros de control de motores (CCM's).

Al tener ese tipo de cargas, el factor de potencia será bajo por el comportamiento inductivo de los motores, lo que causa que el nivel de tensiones pueda ser menor al deseado, además de que se presente ineficiencias energéticas y costos asociados por consumos efectuados con un factor de potencia medio mensual inferior a 0,93, que se carga en 1% por cada 0,01 en que dicho factor baje de 0,93.

Por todo lo expuesto anteriormente, se plantea la instalación de un banco de condensadores para que suministren parte de la potencia reactiva que necesita el sistema eléctrico, y por ende disminuyan las corrientes que suministra la fuente de energía, mejorando así el comportamiento de las variables de estado del sistema como por ejemplo el perfil de tensiones, disminuyendo la corriente que circula a la salida del transformador, y reduciendo costos de facturación por consumo energético.

1.2 Descripción de la empresa

CAP Minería, empresa del Grupo CAP, es el principal productor de minerales de hierro en la costa americana del Pacífico. Sus principales operaciones se encuentran en las regiones de Atacama y Coquimbo, donde posee una fuerte identidad regional, con un 98% de dotación local.

Desde sus yacimientos mineros y plantas, CAP Minería elabora diferentes productos que son exportados y utilizados como materia prima para fabricar acero. El 99 % del hierro que exporta Chile es producido por la compañía.

El Pellet Feed es el principal producto de venta. Le siguen en cantidad el Pellet Autofundente y Sinter Feed. Estos tres productos representan el 96 % de los despachos de la empresa.

El hierro magnético cuenta con ventajas con respecto a los minerales hematíticos, ya que contribuye a la sustentabilidad del proceso siderúrgico. Con este producto se requiere una menor cantidad de materias primas y energía en la producción de acero.

1.3 Objetivo general

Mejorar la calidad de la energía eléctrica en el sistema de la planta Magnetita de la Compañía Minera del Pacífico (CMP) mediante la optimización del sistema de compensación de potencia reactiva."

1.4 Objetivos específicos

- ✚ Determinar las ubicaciones óptimas para la instalación de los dispositivos de compensación, considerando la distribución de cargas y el impacto en la red eléctrica.
- ✚ Calcular la potencia reactiva requerida para mejorar el factor de potencia y reducir las pérdidas de energía, considerando las condiciones de carga y operación de la planta.
- ✚ Evaluar los resultados obtenidos a través de los indicadores económicos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) después de la implementación del sistema de compensación, comparando el factor de potencia, la calidad de energía y el ahorro energético logrado antes y después de la optimización.

1.5 Metodología de Trabajo

Se evaluó la compensación reactiva en un centro de control de motores a 4,16 kV que posee la empresa.

Primero, se realizó levamiento de la información de los motores del CCM 102, y luego se realizó la medición cada quince minutos de la potencia activa y reactiva durante un lapso de 30 días, para posteriormente determinar el consumo de potencia y el factor de potencia actual.

A continuación, la tabla N° 1.1 muestra el resumen de los motores del CCM 102. En dicha tabla se presentan los parámetros más relevantes de las cargas asociadas al mismo.

En base a esta información, se determinó el banco de capacitores requerido para el centro de control de motores, y sus características de operación.

Se evaluaron dos opciones de compensación, y luego a la mejor opción se le realizó el estudio de factibilidad económica para así comprobar la viabilidad del proyecto (ver anexos A.1, A.2 y A.3).

Tabla N° 1.1: Datos de motores correspondientes al CCM 212.

Tag	Descripción	Potencia (kW)	Factor de potencia	Corriente (A)
21305-1	Bomba 1 Principal Flotación	223,8	0,86	40
21305-2	Bomba 2 Principal Flotación	223,8	0,86	40
21305-3	Bomba 3 Principal Flotación	223,8	0,86	40
21305-5	Bomba 5 Principal Flotación	223,8	0,86	40
21305-6	Bomba 6 Principal Flotación	223,8	0,86	40
21305-7	Bomba 7 Principal Flotación	223,8	0,86	40
Total		1.342,8	0,86	240

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Justificación proyecto de título

Al optimizar el sistema de compensación de potencia reactiva, se logra aumentar el factor de potencia del sistema eléctrico.

Un factor de potencia más cercano a la unidad (1) reduce la cantidad de potencia reactiva circulante en la red, lo que a su vez disminuye las pérdidas de energía y aumenta la eficiencia del sistema.

Reducción de costos de energía: Al mejorar el factor de potencia y reducir las pérdidas de energía, la compañía puede beneficiarse de una reducción significativa en los costos de energía eléctrica. Un factor de potencia bajo puede resultar en un factor de carga más alto y, por lo tanto, en mayores cargos por excedentes de potencia reactiva.

Beneficios ambientales: La optimización del sistema de compensación de potencia reactiva no solo tiene beneficios económicos, sino también ambientales. Al reducir las pérdidas de energía, se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero y la huella de carbono de la compañía.

1.7 Resumen de capítulos

En el Capítulo I se describen los antecedentes generales del proyecto de título, así como también su objetivo general y agregar sus objetivos específicos con la finalidad de llevar a cabo la metodología y justificación del proyecto.

En el Capítulo II se realiza una revisión teórica de los principales conceptos relacionados con el factor de potencia, como lo son los diversos tipos de potencias existentes, las posibles cargas y su influencia en el factor de potencia, el cálculo de la potencia reactiva a compensar y el funcionamiento de un capacitor de placas paralelas.

En el Capítulo III se realiza la presentación del problema y su solución, partiendo de los datos básicos de la compañía obtenidos de los planos y levamientos realizados, pasando por el cálculo de la potencia reactiva requerida para corregir el factor de potencia a un valor objetivo prefijado, definiendo el tipo de compensación seleccionada y finalmente seleccionando el equipamiento requerido para llevar a cabo dicha compensación reactiva.

En el Capítulo IV se presenta el análisis de los resultados en base a los indicadores económicos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

En el Capítulo V se presentan las conclusiones alcanzadas en el desarrollo del presente proyecto de título y su relación con los objetivos planteados en el mismo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Factor de potencia

Se denomina factor de potencia al cociente entre la potencia activa y la potencia aparente, que es coincidente con el coseno del ángulo entre la tensión y la corriente cuando la forma de onda es sinusoidal pura, o sea que, el factor de potencia debe tratar de coincidir con el $\cos \varphi$ pero no es lo mismo.

Para el caso analizado, y citando la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio de la CNE establece que para los coordinados (que sería el caso de Magnetita) el factor de potencia debe fluctuar entre 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo, si la alimentación es menor que 30KV (artículo 5-17). También se puede decir que es simplemente el nombre dado a la relación de la potencia activa usada en un circuito, expresada en watts o kilowatts (kW), a la potencia aparente que se obtiene de las líneas de alimentación, expresada en Volt-Ampere o kiloVolt- Ampere (kVA).

El factor de Potencia se puede utilizar 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 aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, generadores, transformadores, etc. Este carácter reactivo obliga a que, junto al consumo de potencia activa (kW), se sume el de una potencia llamada reactiva (kVAR), las cuales en su conjunto determinan el comportamiento operacional de equipos y motores.

Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas generadoras de electricidad.

Al ser suministradas por las empresas de electricidad deberá ser transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transmisión y distribución. Todas estas cargas industriales necesitan de corrientes reactivas para su operación.

Dependiendo del tipo de carga, el factor de potencia puede ser: adelantado, retrasado, igual a 1. Esto es:

- ✚ En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, la tensión y la corriente están en fase en este caso, se tiene un factor de potencia unitario.
- ✚ En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto a la tensión. En este caso se tiene un factor de potencia retrasado.
- ✚ En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. Ver la figura N° 2.1.

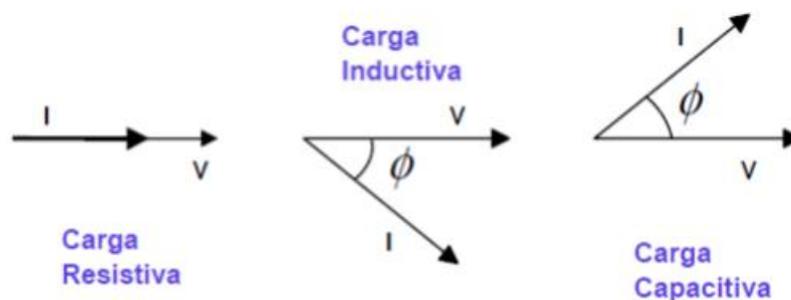


Figura N° 2.1: Factor de potencia en diferentes cargas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la figura N° 2.2 se puede observar la representación gráfica de las potencias eléctricas.

P: Es la potencia activa en kW

S: Es la potencia aparente en kVA

Q: Es la potencia reactiva en VAR

ϕ : Angulo entre la corriente (A) y el voltaje (V)

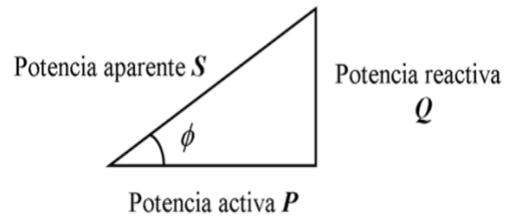


Figura N° 2.2: Relación entre potencia activa, reactiva y aparente.

Fuente: Elaboración propia.

De acá, se puede deducir que el factor de potencia viene dado por la ecuación 2.1:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\phi \quad (\text{Ec. N° 2.1})$$

2.2 Cargas resistivas

En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, el voltaje y la corriente están en fase, entonces:

✚ Por lo tanto, $\phi = 0$.

✚ En este caso, se tiene un factor de potencia unitario.

2.3 Cargas inductivas

En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje, entonces:

✚ Por lo tanto, $\phi > 0$.

✚ En este caso se tiene un factor de potencia retrasado.

2.4 Cargas capacitivas

En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje, entonces:

✚ Por lo tanto, $\varphi < 0$.

✚ En este caso se tiene un factor de potencia adelantado.

2.5 Potencia en sistemas trifásicos balanceados

En un sistema trifásico balanceado, se pueden expresar las distintas potencias en función de los valores de tensión y corriente de fase o de línea.

Tabla N° 2.1: Potencia en sistemas trifásicos balanceados.

Potencia	Valores de fase	Valores de línea
Activa (P)	$3V_F I_F \cos\varphi$	$\sqrt{3}V_L I_L \cos\varphi$
Reactiva (Q)	$3V_F I_F \sin\varphi$	$\sqrt{3}V_L I_L \sin\varphi$
Aparente (S)	$3V_F I_F$	$\sqrt{3}V_L I_L$

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

✚ V_F : Voltaje de fase (V).

✚ I_F : Corriente de fase (A).

✚ V_L : Voltaje de línea (V).

✚ I_L : Corriente de fase (A).

2.6 Potencia en sistemas trifásicos desequilibrados

En sistemas eléctricos trifásicos desequilibrados, la potencia se puede dividir en tres componentes: potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y potencia aparente (S). Cada una de estas potencias puede ser diferente en cada fase debido al desequilibrio en las tensiones o corrientes entre las fases.

1. **Potencia Activa (P):** Es la potencia real que se convierte en trabajo útil y se mide en vatios (W). La potencia activa representa la energía que realiza trabajo mecánico, térmico o cualquier otro trabajo útil en el sistema eléctrico. En un sistema trifásico desequilibrado, la potencia activa en cada fase será diferente debido a las diferencias en las tensiones y corrientes entre las fases.
2. **Potencia Reactiva (Q):** Es la potencia que se intercambia entre el sistema y los elementos inductivos o capacitivos. La potencia reactiva se mide en Volt-Ampere reactivo (VAR). La potencia reactiva no realiza trabajo útil directamente, pero es necesaria para mantener el voltaje en el sistema y para el funcionamiento de dispositivos inductivos y capacitivos. En un sistema trifásico desequilibrado, la potencia reactiva en cada fase también será diferente debido al desequilibrio de tensiones y corrientes.
3. **Potencia Aparente (S):** Es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva y se mide en Volt-Ampere (VA). La potencia aparente representa la magnitud total de la potencia entregada o absorbida por el sistema. En un sistema trifásico desequilibrado, la potencia aparente en cada fase será diferente y depende del equilibrio entre la potencia activa y la potencia reactiva en esa fase.

$$P_{3\phi} = V_1 I_1 \cos\phi_1 + V_2 I_2 \cos\phi_2 + V_3 I_3 \cos\phi_3 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.2})$$

$$Q_{3\phi} = V_1 I_1 \sin\phi_1 + V_2 I_2 \sin\phi_2 + V_3 I_3 \sin\phi_3 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.3})$$

$$S_{3\phi} = V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.4})$$

2.7 Problemas de un bajo factor de potencia

La potencia aparente de un circuito eléctrico de corriente alterna, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes. Esta potencia no es la realmente consumida, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ($\cos \phi=1$), y nos señala que la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a suministrar a bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S y se mide en Volt-Ampere (VA).

Potencia aparente en sistemas trifásicos equilibrados:

$$S_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2} = \sqrt{(3V_\phi I_\phi \cos\phi)^2 + (3V_\phi I_\phi \sin\phi)^2} = 3V_\phi I_\phi \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.5})$$

Dónde:

✚ I_ϕ : es la corriente de cada una de las fases en Ampere (A).

✚ V_ϕ : es el voltaje de cada una de las fases en Volt (V).

✚ S: potencia aparente en Volt-Ampere (VA).

La potencia aparente en función de los valores de tensiones y corrientes de líneas:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.6})$$

Dónde:

✚ V_L : es el voltaje de línea a línea en Volt (V).

✚ I_L : es la corriente de línea a línea en Ampere (A).

Si se observa con detenimiento la figura N° 2.2, se puede apreciar que a medida que la potencia reactiva es más pequeña, la potencia activa es más cercana a la potencia aparente, por lo que se aprovecha de mejor manera la potencia útil, y la corriente total disminuye al disminuir la potencia aparente.

Una carga que consuma la mayor potencia reactiva y el factor de potencia más bajo es el fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables. Para una potencia consumida constante, el factor de potencia más bajo, la potencia aparente será más alta y así también más alta la cantidad de corriente en la red. Con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente por la carga será dos veces la corriente útil. Con un factor de potencia de 0.9 la cantidad de corriente será 10% más alta que la corriente útil. Para una potencia constante, la cantidad de corriente de la red se incrementará en la medida en que el factor de potencia disminuya. Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y que las pérdidas en ellos se incrementarán (en proporción al cuadrado de la corriente). Esto por supuesto es real en todos los puntos de la red.

Se ha visto la considerable influencia que el factor de potencia tiene sobre el valor de la corriente demandada en el sistema.

Esas instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a 1, afectan a la red eléctrica tanto en alta tensión como en baja tensión, además, tiene una serie de consecuencias en la medida que el factor de potencia disminuye, estas consecuencias serán tratadas más adelante.

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo físico directo en los equipos, es necesaria para producir el flujo electromagnético que pone en funcionamiento elementos tales como: motores, transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de refrigeración y otros similares. Cuando la cantidad de estos equipos es apreciable los requerimientos de potencia reactiva también se hacen significativos, lo cual produce una disminución exagerada del factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de:

- ✚ Un gran número de motores.
- ✚ Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- ✚ Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- ✚ Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.

Las cargas puramente resistivas, tales como alumbrado incandescente, resistencias de calentamiento, etc. no causan este tipo de problema ya que no necesitan de la corriente reactiva.

2.8 Corrección del factor de potencia

La finalidad es reducir la presencia de potencia reactiva para mejor aprovechamiento de las instalaciones.

El factor de potencia es la relación de la potencia activa P con la potencia aparente S , es decir la proporción de potencia que se transforma en trabajo útil (P) de la potencia total (S) requerida por la carga.

Bajo condiciones de tensiones y corrientes senoidales el factor de potencia es igual al $\cos(\varphi)$, tal y como se mostró en el análisis de relaciones entre potencias, de la cual se obtuvo la ecuación N° 2.1.

En un circuito trifásico equilibrado la potencia activa (P), reactiva (Q) y aparente (S) se expresan como lo indicado en la tabla N° 2.1:

A continuación, en la figura N° 2.3 se presenta el diagrama vectorial de potencias, para una carga inductiva:

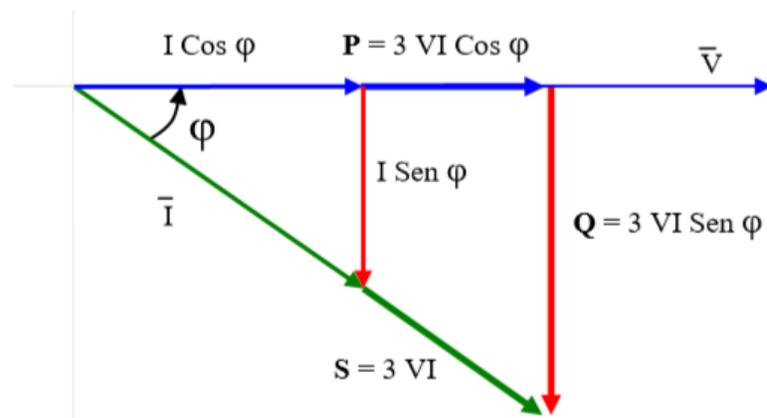


Figura N° 2.3: Diagrama vectorial de potencias.

Fuente: Elaboración propia.

En este diagrama vectorial se puede apreciar que, para una potencia activa (P) dada, la corriente (I) y la potencia aparente (S), son mínimas cuando el ángulo de desfase es igual a 0° ($\varphi = 0^\circ$), o lo que es equivalente cuando el $\cos \varphi = 1$.

A continuación, en la tabla N° 2.2 los valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes:

Tabla N° 2.2: Factores de potencia típicos de distintas cargas.

Aparato	Carga	Cos (ϕ)
Motor asincrónico	0%	0,17
	25%	0,55
	50%	0,73
	75%	0,8
	100%	0,85
Lámparas incandescentes		1
Lámparas fluorescentes		0,5
Lámparas de descarga		0,4 a 0,6
Hornos de resistencia		1
Hornos de inducción		0,85
Máquinas de soldar por resistencia		0,8 a 0,9
Soldadora de arco monofásica		0,5
Soldadora de arco con transformador - rectificador		0,7 a 0,9
Hornos de arco		0,8

Fuente: Vera (2019).

En muchas instalaciones eléctricas de la industria, hay grandes consumos de corriente, este consumo se agrava más cuando se trabaja con muchos motores (cargas inductivas), que causan que exista un gran consumo de corriente reactiva que normalmente es penalizada según Decreto 9 del Ministerio de Energía que fija precios de nudo para suministro de electricidad con fecha de publicación 26 de febrero del 2022 y que dicho factor baje de 0,93.

2.9 Planteamiento analítico para la corrección del factor de potencia

La aplicación de los bancos de capacitores en las instalaciones industriales y en las redes de distribución, es la corrección del factor de potencia, esto se hace por tres razones fundamentalmente:

- a) Para estar dentro de los límites mínimos fijados por las compañías suministradoras y evitar penalización por bajo factor de potencia. Cuando el $\cos \varphi$ es mayor que el especificado por la compañía suministradora (0,9), entonces se penaliza, es decir, se impone una sanción económica o cargo por bajo factor de potencia en el recibo de consumo de energía.
- b) Para mejorar las condiciones operativas (voltajes y pérdidas) y tener una mejor economía de operación.

Considerando la figura N° 2.4, si el valor mínimo especificado es $\cos \varphi_2$, entonces es necesario pasar de $\cos \varphi_1$ a $\cos \varphi_2$, mantenido el suministro de la carga constante, por lo tanto, para pasar del valor actual de consumos de potencia reactiva Q_1 , al valor deseado, para obtener el ángulo φ_2 , es decir a Q_2 , se requiere restar a Q_1 una cantidad Q_c , que corresponde a la potencia reactiva del banco de capacitores.

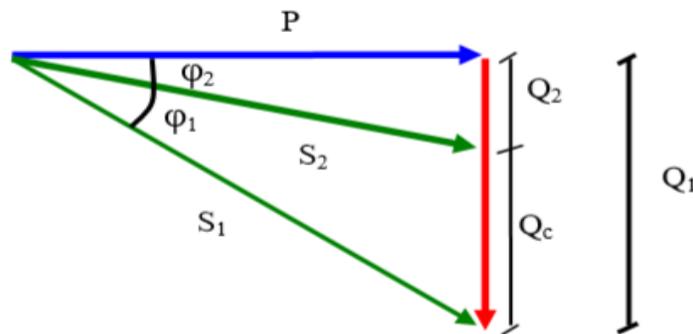


Figura N° 2.4: Triángulo de potencia con 2 factores de potencia.

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el cálculo de Q_c se utiliza la siguiente ecuación

$$Q_c = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (\text{Ec. N° 2.7})$$

2.9.1 La necesidad de corregir el factor de potencia

La compensación de potencia reactiva: es indispensable para una correcta gestión técnica y económica de un sistema eléctrico en MT. Los beneficios obtenidos son:

- ✚ **Optimización técnica:** Ayuda al control de la tensión a lo largo del sistema de transporte y distribución, descarga de las líneas de transporte y los transformadores de potencia, reducción del nivel de pérdidas del sistema.
- ✚ **Optimización económica:** Reducción del coste de la energía reactiva facturable (recargo según país y tarifa), reducción del coste económico oculto por efecto Joule en las líneas de transporte, permite un mejor ratio (KW/KVA) de utilización de las instalaciones.

2.9.2 Compensación en MT

Básicamente se debe compensar en MT cuando se trate de:

- ✚ **Sistemas de generación, transporte y distribución:** los puntos más usuales donde se realiza la compensación de energía reactiva son las líneas de evacuación de centrales de generación (parques eólicos, hidroeléctricas, etc.), subestaciones receptoras o de distribución, y nudos de distribución.
- ✚ **Instalaciones industriales con distribución y consumo en MT:** por regla general, las instalaciones que distribuyen y consumen energía en MT son susceptibles de ser compensadas, como por ejemplo centros de bombeo, desalinizadoras, papeleras, cementeras, industria petroquímica, acerías, etc.
- ✚ **Instalaciones industriales con distribución en MT y consumo en BT:** normalmente se realiza la compensación en BT debido a que se trata de potencia pequeñas y con un nivel de fluctuación de la demanda rápida en comparación con MT. No obstante, si el

número de centros de transformación y el consumo de energía reactiva son elevados y presentan poca fluctuación de carga, se debe proponer la compensación de energía reactiva en MT.

2.9.3 Compensando FP

La compensación reactiva puede realizarse en cualquier punto de una instalación. Cada método donde se instale seguirá una estrategia diferente para conseguir la mejora del factor de potencia.

Compensación individual (ver la figura N° 2.5), compensación directa a la maquina a compensar, siendo la solución técnica óptima al reducir directamente el consumo de reactiva en la carga. Es habitual su utilización para bombas, motores o transformadores.

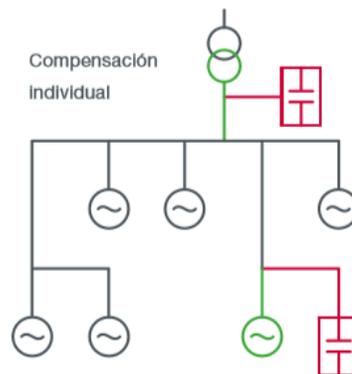


Figura N° 2.5: Compensación individual.

Fuente: Circutor (2013).

Compensación por grupo (ver la figura N° 2.6), compensación para grupos de cargas en instalaciones donde existe una distribución sectorizada y extensa.

Complemento de apoyo para un sistema de compensación centralizado global, aumentando la capacidad de la línea que suministra al grupo de cargas compensadas.

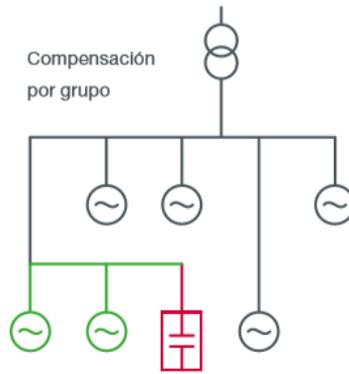


Figura N° 2.6: Compensación por grupo.

Fuente: Circutor (2013).

Compensación global centralizada (ver la figura N° 2.7) Compensación conectada a la entrada general de la instalación, habitualmente utilizada para la reducción de facturación eléctrica por recargos por energía reactiva.

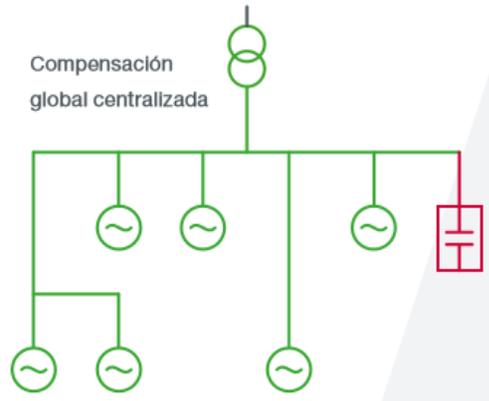


Figura N° 2.7: Compensación global centralizada.

Fuente: Circutor (2013).

Compensación individual de transformadores de potencia y motores asíncronos.

Dentro de las principales aplicaciones de compensación en MT está la compensación individual de transformadores de potencia y la compensación individual de motores asíncronos.

Transformadores de potencia para determinar la potencia reactiva de un transformador debe tener en cuenta dos componentes: el consumo en vacío (corriente magnetizante) y el consumo en carga.

$$Q_T = S_N \left(\frac{I_0\%}{100} \right) + \left(\frac{V_{CC}\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 S_N \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.8})$$

Dónde:

- ✚ Q_T : es la potencia reactiva total requerida.
- ✚ S_N : es la potencia nominal del transformador.
- ✚ $I_0\%$: es el porcentaje de la corriente de vacío (corriente magnetizante) en relación a la potencia nominal del transformador.
- ✚ $V_{CC}\%$: es el porcentaje de la tensión de cortocircuito en relación a la tensión nominal del transformador.
- ✚ S : es la potencia aparente suministrada.
- ✚ S/S_N : es el índice de carga, que es la relación entre la potencia aparente suministrada y la potencia nominal del transformador.

En esta ecuación (Ec. N° 2.8), la potencia reactiva total necesaria (Q_T) se calcula considerando tanto la parte fija (debida a la corriente de vacío y la tensión de cortocircuito) como la parte variable (dependiente del índice de carga) de la compensación de energía reactiva en un transformador de potencia.

La parte fija depende de la corriente magnetizante del transformador, que suele representar entre el 0,5 y el 2 % de la potencia nominal del transformador. La parte variable depende del índice de carga que se esté consumiendo (S/S_N) y de la tensión de cortocircuito.

Se recomienda compensar entre un 5 % y un 7 % de la potencia nominal de los transformadores de uso industrial y hasta un 10 % en los transformadores de redes de distribución de energía.

Motores asíncronos debe prestarse especial atención en los motores asíncronos en el caso que se desee compensar de forma directa, con o sin elemento de maniobra o desconexión.

Este aspecto es relevante a la hora de evitar posibles daños en el motor o en la instalación por efecto de excitación. Se recomienda no compensar más del 90% de la corriente de vacío del motor, con el fin de evitar la auto excitación del motor por causa de la descarga del condensador hacia el motor. Para ello se puede estimar el valor de potencia a compensar según:

$$Q_M \leq 0,9I_0V_N\sqrt{3} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.9})$$

$$Q_M \leq 2P_N(1 - \cos\phi_i) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.10})$$

Dónde:

✚ Q_M es la potencia reactiva para compensar (kVAR).

✚ I_0 la corriente de vacío del motor (A).

✚ V_N la tensión nominal (V).

✚ P_N la potencia nominal del motor (kW) y $\text{Cos } \phi$ es el $\text{Cos } \phi$ inicial del motor.

De esta forma difícilmente se podrá compensar más de un $\text{Cos } \phi$ superior a un 0,95, con lo que se compensa de forma individual utilizando un elemento de desconexión a la vez que se desconecta el motor, con el fin de evitar el fenómeno de auto excitación.

2.10 Definición de un capacitor

Los capacitores son equipos capaces de acumular electricidad están constituidos básicamente por dos placas conductoras colocadas frontalmente en paralelo y separadas por un medio cualquiera aislante, que puede ser aire, papel, plástico, etc. En las caras externas de estas placas se conecta una fuente de tensión que genera un campo electrostático en el espacio comprendido entre las dos placas, como se muestra en la figura N° 2.8.

El generador G podría ser una batería o un generador cualquiera de corriente continua o de corriente alterna, las placas paralelas se denominan electrodos, las líneas de flujo entre las placas paralelas son imaginarias, el material aislante colocado entre las placas paralelas se denomina dieléctrico, la energía electrostática queda acumulada entre las placas y en menor intensidad en su vecindad.

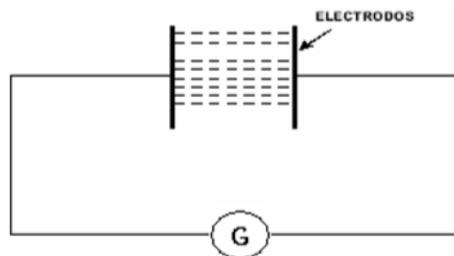


Figura N° 2.8: Definición de capacitor.

Fuente: Elaboración propia.

El coulomb es una cantidad de carga eléctrica que puede ser almacenada o descargada en forma de corriente eléctrica durante un cierto periodo de tiempo tomado como unidad. Para mejor comprensión se puede considerar el caso de una batería de automóvil de 54 Ah que puede descargar toda la energía a razón de 1 A en un tiempo de 54 horas, o bien 54 A en un tiempo de 1 h. Un coulomb es por lo tanto el flujo de carga o descarga de una corriente de 1 A en un tiempo de 1 segundo, esto quiere decir que durante un tiempo de 1segundo, $6,25 \times 10^{18}$ electrones son transportados de una placa a otra cuando la carga o descarga del capacitor es de $1,6 \times 10^{-19}C$. Es bueno saber que la carga eléctrica de un electrón es de $1,6 \times 10^{-19} C$.

Si una determinada tensión V (Volt) se aplica entre las placas paralelas separadas por una distancia de d (m), la intensidad del campo eléctrico se puede calcular por medio de la ecuación:

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.11})$$

Dónde:

✚ E = Intensidad del campo eléctrico (V/m).

✚ V = Tensión (V).

✚ d = Distancia (m).

La unidad que mide la capacidad de carga C de un capacitor es el Faraday, de modo que 1 Farad es la capacidad de carga eléctrica de un capacitor cuando una carga eléctrica de 1coulomb ($6,25 \times 10^{-18}$ electrones), está almacenada en el medio eléctrico bajo una tensión aplicada de 1Volt entre las terminales de placas paralelas. Los capacitores son evaluados por la cantidad de carga eléctrica que es capaz de almacenar en su campo y está dada por la ecuación:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.12})$$

Dónde:

✚ C = Capacidad del capacitor (F).

✚ V = Tensión aplicada (V).

Cuando los electrodos de un capacitor son sometidos a una tensión entre sus terminales, circula en su interior una corriente de carga, lo que hace que una determinada cantidad de

energía se acumule en su campo eléctrico. La energía media almacenada en el capacitor se puede obtener con la ecuación:

$$E = \frac{1}{2} CV_m^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.13})$$

Dónde:

✚ E = Energía almacenada (J).

✚ C = Capacidad del capacitor (F).

✚ V_m = Tensión aplicada en valor pico (V).

2.11 Aspectos a considerar para instalar bancos de capacitores

Considerando los aspectos teóricos señalados en el capítulo anterior, este abordará toda la información referente a los bancos de capacitores, tanto sus partes principales, esquemas de conexión, selección de la conexión del banco y algunos factores que afectan, los cuales son el efecto de resonancia y las componentes armónicas.

Las partes principales de un capacitor de potencia, son las que se mencionan a continuación:

Caja o carcasa: Esta caja o carcasa tiene la función de contener la parte activa del capacitor, está construida de placa de acero con un espesor adecuado al volumen del capacitor, la caja contiene las siguientes partes:

- a) Placa de características. En esta placa deben estar contenidos todos los datos característicos para la identificación del capacitor, como son: su potencia nominal en kVAr, la tensión nominal de operación, su capacitancia, la frecuencia a que opera, su peso o masa, el nivel básico de aislamiento, la fecha de fabricación, etc.

- b) Los aisladores. Corresponden a las terminales externas de las unidades capacitivas.
- c) Ganchos en ojales para levantamiento. Son usados para levantar la unidad capacitiva
- d) Soportes para fijación. Se utilizan para fijar la unidad capacitiva en su estructura de montaje.

Armadura: Está constituida por hojas de aluminio enrolladas con el dieléctrico, como se muestra en la figura N° 2.9, con espesores comprendidos entre 3 y 6 μm y patrón de pureza de alta calidad, con el objetivo de mantener en bajos niveles las pérdidas dieléctricas y las capacitancias nominales del proyecto.

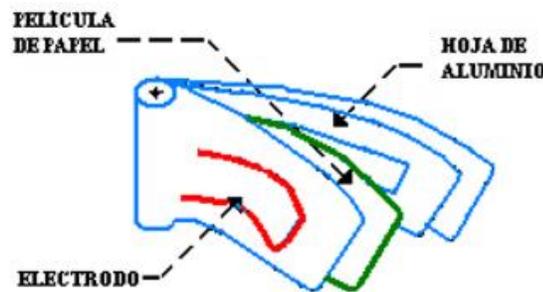


Figura N° 2.9: Detalle de armadura.

Fuente: Elaboración propia.

Dieléctrico: Actualmente existen dos tipos básicos de capacitores en cuanto a su medio dieléctrico:

- a) Capacitores del tipo autoregenerable. Son aquellos cuyo dieléctrico está formado por una fina capa de película de polipropileno esencial, asociada muchas veces, una capa de papel dieléctrico (papel Kraft), con alrededor de 18 μm de espesor. Es necesario que los componentes dieléctricos estén constituidos de material seleccionado y de alta calidad, para no influenciar negativamente las pérdidas dieléctricas.

b) Capacitores de tipo impregnado: Están constituidos por una sustancia impregnante que se trata a continuación:

Líquido de impregnación: Los fabricantes de capacitores usan normalmente una sustancia biodegradable con una estructura molecular constituida por carbono e hidrógeno (hidrocarbonato aromático sintético), que no es agresivo con el medio ambiente.

Resistor de descarga: Cuando se retira la tensión de las terminales de un capacitor, la carga eléctrica almacenada necesita ser dañada para que la tensión resultante sea eliminada, evitándose de esta manera situaciones peligrosas de contacto con las referidas terminales.

Para que esto sea posible, se inserta entre las terminales un resistor, con la finalidad de transformar en pérdidas Joule la energía almacenada en el dieléctrico, reduciendo a 75 V el nivel de tensión en un tiempo menor a 10 minutos para capacitores en media tensión, y menor que 3 minutos para capacitores de baja tensión. Este dispositivo de descarga se puede instalar en forma interna o externa al capacitor, siendo más común la primera solución.

2.12 Conexión de los bancos de capacitores

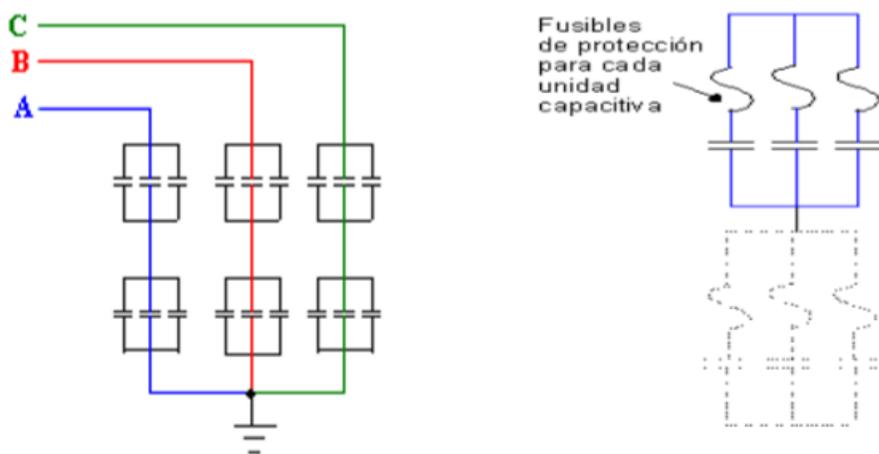
Los capacitores instalados, se pueden conectar en cualquiera de las conexiones trifásicas clásicas que son: Estrella sólidamente aterrizada, estrella con neutro flotante y delta.

2.12.1 conexión estrella a tierra con neutro sólidamente conectado a tierra

En esta conexión, el voltaje de las unidades capacitivas debe ser igual o mayor que el voltaje de fase a neutro del sistema al cual se van a conectar.

Normalmente esta conexión se usa en sistemas de distribución, en rangos de tensiones hasta 34,5 kV. La capacidad del banco en kVAr se selecciona de manera que proporcione la potencia reactiva deseada en el sistema.

Cada fase en este tipo de conexión está formada por grupos de unidades capacitivas conectadas en serie paralelo para dar el valor de potencia deseado tal como se muestra en la figura N° 2.10 a), en este tipo de arreglos generalmente se adopta una protección por fusibles para cada unidad capacitiva, sin embargo existe también la posibilidad de proteger a las unidades capacitivas por grupo, esta opción se usa generalmente en sistemas de distribución con compensación de baja capacidad, esto se muestra en la figura N° 2.10 b).



a) Unidades capacitivas conectadas en serie paralelo. b) Protección por fusibles.

Figura N° 2.10: Conexión en estrella aterrada de capacitores.

Fuente: Elaboración propia.

La conexión estrella con neutro sólidamente aterrizado, tiene la ventaja de permitir un balanceo de fases más fácil que en otras conexiones, sin embargo, en estos arreglos, se presenta el problema de que la falla en una unidad capacitiva presenta una sobretensión en el resto de las unidades del arreglo, sometiéndolas a mayores esfuerzos dieléctricos.

2.12.2 Conexión estrella con neutro flotante

Este tipo de conexión se usa en sistemas de media tensión o mayores, presenta la ventaja de evitar en forma importante la presencia de transitorios de sobretensión y permite también una mejor protección contra sobrecorrientes, en cambio, tiene el problema de desbalance de

voltaje, que hace que aparezcan tensiones al neutro, por lo que es necesario incorporar una protección contra sobretensiones al neutro. En la figura N° 2.11, se muestra la protección para este tipo de arreglo.

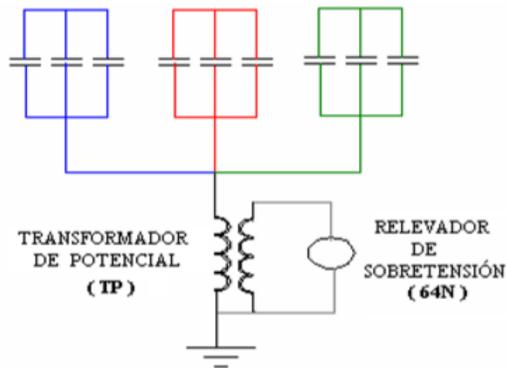


Figura N° 2.11: Conexión en estrella aislada de capacitores.

Fuente: Elaboración propia.

2.12.3 Conexión delta

En esta conexión (ver la figura N° 2.12), se usa generalmente en baja tensión (600 Volt o menos), en motores eléctricos o cargas de valor similar, tiene la ventaja sobre las conexiones en estrella de que no presenta problemas de desbalance y también aísla las corrientes armónicas.

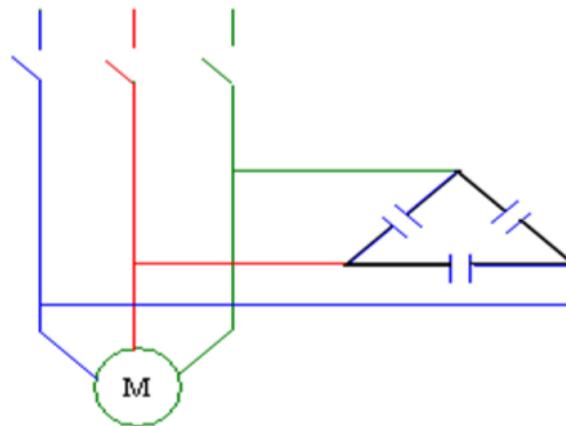


Figura N° 2.12: Conexión en triángulo de capacitores.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

El centro de control de motores Sala 102-B (CCM 212), presenta un total de 6 motores que operan a una tensión de 4,16kV. Las potencias activa y reactiva del CCM 212 se determinaron con el equipo VATIMETRO mediante mediciones en campo, que se pueden observar en las figuras N° 3.1 (potencia activa), y la figura N° 3.2 (potencia reactiva).

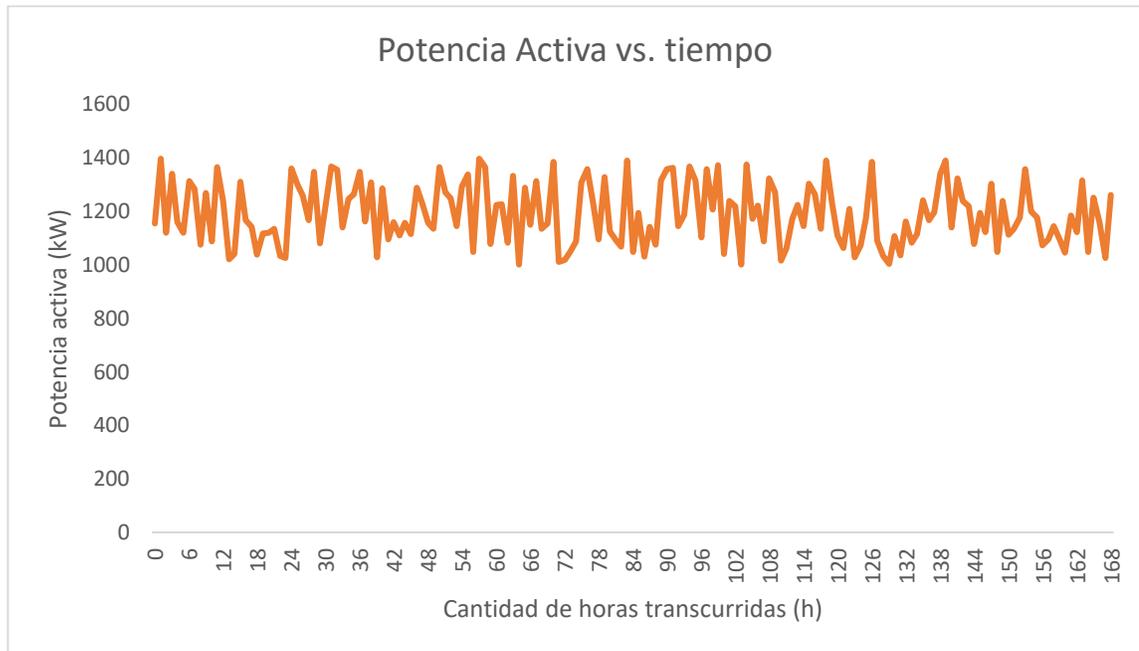


Figura N° 3.1: Potencia activa medida en centros de control.

Fuente: Elaboración propia.

De lo observado en la figura N° 3.1 se concluye que se encuentra posicionada en la banda de los 1.000 a 1.400 kW y de manera estable en dicho valor a través del tiempo (hrs).

A continuación, la figura N° 3.2 muestra la potencia reactiva versus el tiempo (hrs).

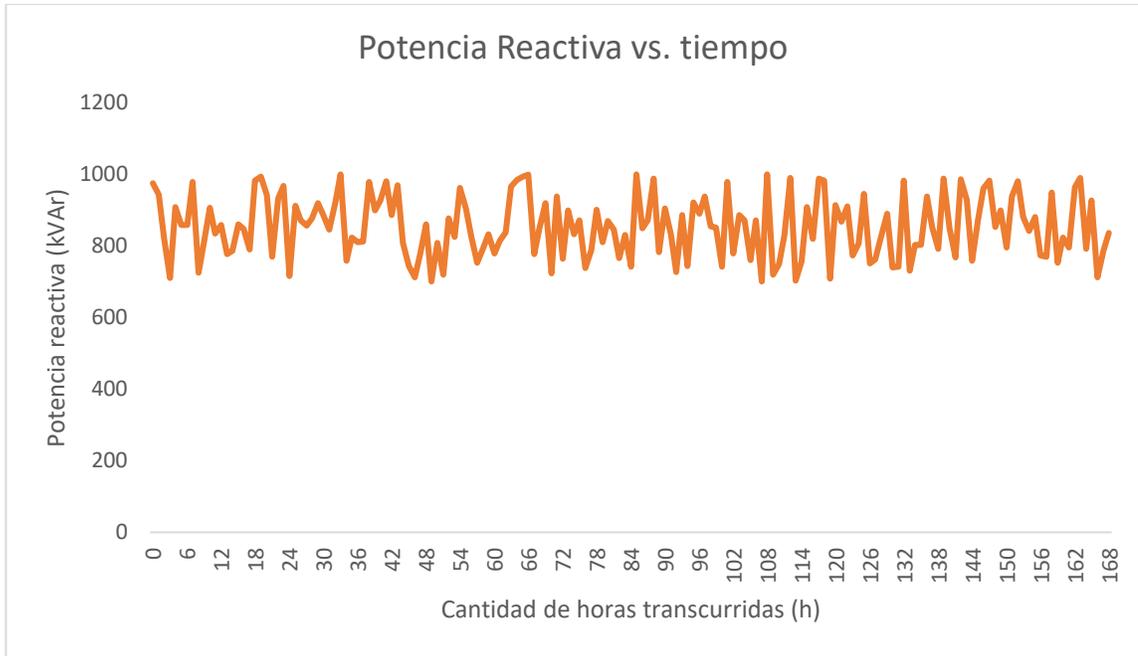


Figura N° 3.2: Potencia reactiva medida en centros de control.

Fuente: Elaboración propia.

De lo observado en la figura N° 3.2 se concluye que se encuentra posicionada en la banda de los 700 a 1.000 kW y de manera estable en dicho valor a través del tiempo (hrs).

A continuación, la figura N° 3.3 muestra la potencia activa y la potencia reactiva a través del tiempo.

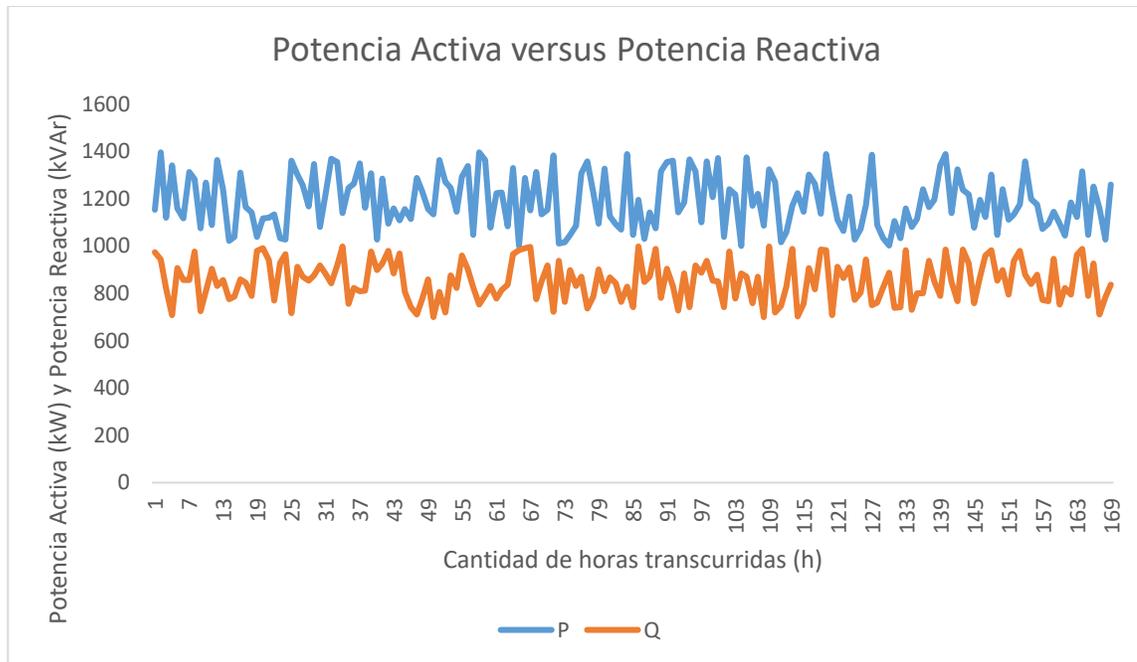


Figura N° 3.3: Potencia activa versus Potencia reactiva.

Fuente: Elaboración propia.

De lo observado en la figura N° 3.3 se concluye que se encuentra posicionada en la banda de los 900 a 1.400 kW ambas potencia activa y la potencia reactiva entre los 700 a 1.000 kVAR a través del tiempo. Cuando la potencia activa es mayor que la potencia reactiva, se dice que el sistema eléctrico tiene un "factor de potencia de avance" o "factor de potencia inductivo". Esto ocurre cuando la carga eléctrica del sistema es predominantemente resistiva o capacitiva, lo que significa que la energía se está utilizando principalmente para realizar trabajo útil y existe una cantidad relativamente pequeña de potencia reactiva necesaria para mantener los campos electromagnéticos en los equipos.

Algunas implicaciones y características de tener una potencia activa mayor que la potencia reactiva son las siguientes:

1. **Eficiencia energética:** Un factor de potencia de avance generalmente indica que el sistema eléctrico está utilizando la energía de manera más eficiente, ya que una mayor proporción de la energía suministrada se está convirtiendo en trabajo útil.

2. **Ahorro de costos:** En muchas tarifas eléctricas, se aplican penalizaciones por tener un bajo factor de potencia (factor de potencia menor a 1), lo que resulta en facturas eléctricas más altas. Al tener un factor de potencia de avance, se puede evitar o reducir estas penalizaciones y, por lo tanto, ahorrar costos de energía.
3. **Menores pérdidas de energía:** Un factor de potencia cercano a 1 también implica que hay menos pérdidas de energía en el sistema eléctrico debido a la menor cantidad de corriente reactiva circulando por las líneas y componentes.
4. **Requerimientos de equipos:** Un factor de potencia de avance suele ser deseable en la mayoría de los sistemas eléctricos, ya que implica que los equipos y dispositivos eléctricos están funcionando de manera más eficiente y con menos estrés en los componentes.

Es importante tener en cuenta que el factor de potencia puede variar a lo largo del tiempo y en diferentes situaciones, especialmente en sistemas eléctricos con cargas cambiantes. Por lo tanto, es común implementar correcciones y medidas de compensación, como el uso de capacitores o inductores, para mejorar el factor de potencia y optimizar el rendimiento del sistema eléctrico.

Estas mediciones fueron realizadas en intervalos de 15 minutos, y se registraron durante 30 días. Con esto, se pudo seguir el procedimiento indicado por la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución (2019) en su artículo 3-9, tal como se indica a continuación. Se calcula el factor de potencia instantáneo utilizando la siguiente expresión:

$$FP_{inst} = \cos \left(\arctg \left(\frac{EQ_{inst}}{EP_{inst}} \right) \right) \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 3.1})$$

Una vez obtenido el factor de potencia instantáneo para cada punto de medición, se procede a utilizar la siguiente ecuación para el cálculo del factor de potencia medio mensual:

$$FP = \frac{\sum_{k=1}^n (FP_{inst} \cdot EP_{inst})_k}{\sum_{k=1}^n (EP_{inst})_k} \quad (\text{Ec. N}^\circ 3.2)$$

En nuestro caso se contaban con las mediciones de potencia y no de energía, pero como los intervalos de tiempo son los mismos, se obtendrán los mismos resultados al realizar el cálculo con valores de potencia. El número total de mediciones es de n=2.881, correspondientes a un mes de mediciones cada 15 minutos.

A continuación, la figura N° 3.4 se muestra el resultado del factor de potencia instantáneo durante todo el rango de medición.

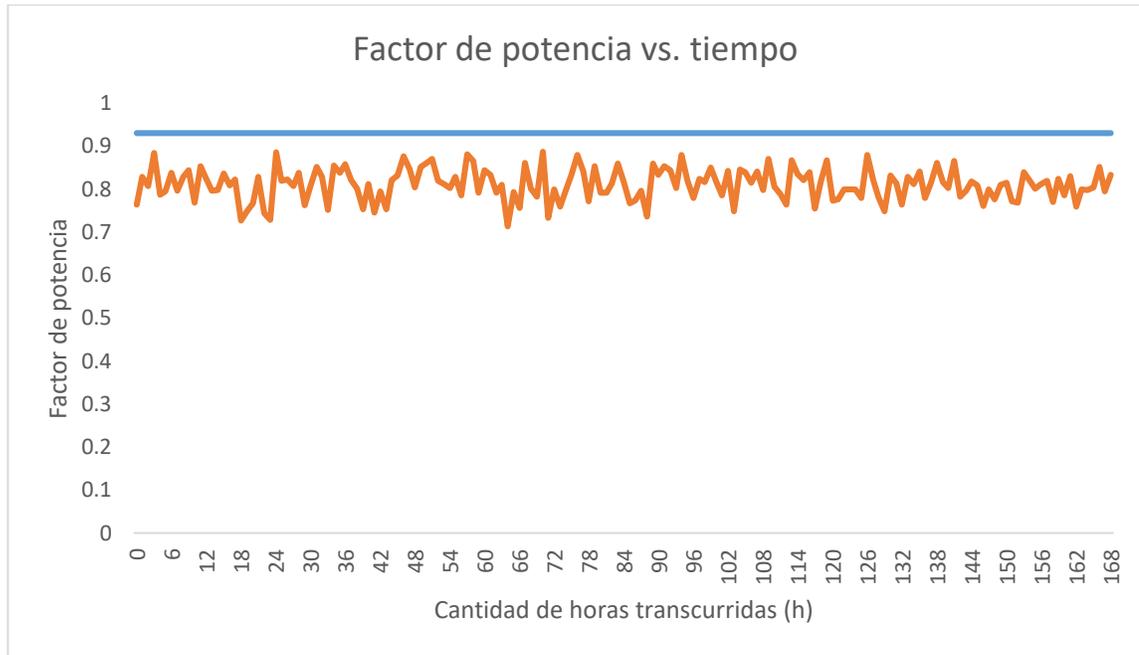


Figura N° 3.4: Factor de potencia medido y valor mínimo por Norma Técnica de Calidad y Servicio para Sistemas de Distribución.

Fuente: Elaboración propia.

La Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio dice que el factor de potencia (FP) debe fluctuar entre 0,93 inductivo y 0,96 capacitivo para sistemas con tensiones inferiores a 30kV.

Como se aprecia en la figura N° 3.3, el factor de potencia instantáneo medido es menor que el permitido por norma en todo el intervalo medido. Si se obtienen los promedios de las mediciones realizadas se obtienen los siguientes valores:

$$P_{\text{media}} = 1.204,83 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{media}} = 850,98 \text{ kVAr}$$

$$FP_{\text{medio}} = 0,8165$$

Este factor de potencia, causa que se tenga mayor circulación de corriente por los conductores, originando mayores pérdidas de potencia y carga de los cables que se podría reducir con un factor de potencia más alto.

Al aplicar la compensación reactiva, será más eficiente la transmisión de potencia a los motores, y se evitarán recargos en la factura de energía debido a penalizaciones por bajo factor de potencia.

3.1 Solución del problema

La potencia activa media consumida por el CCM 212 es de 1.205 kW y la potencia reactiva media consumida es de 851 kVAr, con un factor de potencia medio mensual de 0,8165 inductivo.

El factor de potencia de diseño será el promedio de los valores límite indicados en la norma, para estar en un valor central y asegurarse de no estar cerca de los valores extremos cuando se implemente la solución:

$$FP_{\text{nuevo}} = 0,99 \text{ inductivo}$$

Para llevar el factor de potencia a 0,99 y asumiendo que la potencia activa es la misma (los requerimientos de potencia de los motores serán similares, y el principio de desacople permite que esta hipótesis sea válida), se determina mediante las relaciones de potencia la capacidad del banco de compensación:

$$FP_{\text{nuevo}} = 0,99$$

$$S_{\text{nueva}} = \frac{P_{\text{media}}}{FP_{\text{nuevo}}} = 1.217 \text{ kVA}$$

$$Q_{\text{nueva}} = S_{\text{nueva}} * \text{sen}(\text{acos}(FP_{\text{nuevo}})) = 172 \text{ kVAR}$$

$$Q_{\text{compensacion}} = Q_{\text{nueva}} - Q_{\text{anterior}} = 679 \text{ kVAR}$$

Se consideran como opciones para la compensación la automática controlada por regulador de factor de potencia, o la automática dependiendo de si los motores están o no en funcionamiento. La compensación fija no es recomendada en este caso porque se pueden tener problemas de autoexcitación de motores cuando haya baja carga y el banco este en servicio.

En ambos casos el control de la maniobra para conectar y desconectar el capacitor será mediante un contactor de media tensión, en este caso el Schneider Rollarc en SF6.

Como el tablero tiene únicamente como cargas los motores, el tipo de compensación ideal es que una vez que entra en funcionamiento cada motor, tenga asociado su capacitor para que opere mientras el motor siga operando, y que desconecte cuando el motor salga de funcionamiento.

La protección de cada capacitor vendrá dada por fusibles Schneider FusArc en media tensión. Esto debido a que es mucho más económico que los interruptores automáticos.

En este caso lo importante es contar con stock de repuesto de los fusibles en caso de alguna falla, y el personal entrenado y calificado para poder realizar la sustitución del cartucho dañado.

A efectos comparativos, una celda de media tensión con interruptor suele costar más del doble del costo de una celda de media tensión con fusibles. Claramente la celda con interruptor presenta la ventaja que ante una falla simplemente se puede reponer el estado del interruptor dándole orden de cierre, a diferencia del caso de los fusibles que si llegan a fundirse se deben reemplazar.

En nuestro caso vamos a priorizar el aspecto económico, garantizando el stock de los fusibles de media tensión de repuesto y guiándonos por las estadísticas de fallas en sistemas de media tensión que suele ser muy baja.

Una de las opciones a seleccionar entonces, es si se utilizará un regulador automático de factor de potencia, el cual recibe la información de transformadores de corriente y tensión para calcular el factor de potencia del sistema, y así determina los pasos de compensación requeridos para mantener el factor de potencia objetivo (0,95 en nuestro caso). La ventaja de este sistema es que la compensación es en tiempo real, y el regulador conecta y/o desconecta los distintos pasos de compensación para así estar lo más cercano posible al valor fijado.

La otra opción sería que la conexión/desconexión del capacitor venga dada por el final del arranque del motor, o por el comienzo de su parada. No es recomendable que el banco de capacitores esté fijo durante el arranque del motor por los niveles de corriente involucrados. Por ende, es común en los motores con arranques suaves o variadores de frecuencia, dar la orden de conexión del banco una vez finalizada la rampa de arranque del motor, y lo mismo se hace en el caso de la parada del motor, desconectando el banco antes del comienzo de la rampa de frenado.

En el caso de los arranques directos de motores, se puede utilizar un relé auxiliar temporizado para comandar al contactor del capacitor, y así ajustarlo en función del tiempo de arranque del motor en cuestión.

3.1.1 Propuesta N° 1: Compensación mediante regulador automático

Para este caso, se considera un regulador automáticos de factor de potencia, por ejemplo el Schneider Varlogic RM6, que permite controlar 6 pasos de compensación, y lo realiza de forma automática en función de las mediciones realizadas de tensión y corriente, con las cuales el equipo realiza el cálculo interno del factor de potencia, y decide si es necesario incorporar o retirar capacitores, basándose en el parámetro definido por el usuario, que en este caso es el factor de potencia objetivo o deseado.

Como los valores de capacitores se encuentran con potencias predefinidas, se seleccionó para este caso, cuatro capacitores de 150 kVAr y un capacitor de 100 kVAr, obteniendo un total de 700 kVAr, ligeramente superior al valor calculado anteriormente (679 kVAr). En función a esta configuración del banco de capacitores, se seleccionaron el resto de elementos necesarios para un correcto funcionamiento del conjunto.

En la tabla N° 3.1 se muestra el equipamiento requerido para el caso de compensación automática mediante regulador de factor de potencia.

En la figura N° A.2 (anexos) se puede apreciar el diagrama unifilar de esta solución, donde se ven reflejados los elementos indicados en la tabla 3.2 y su conexionado al CCM 212.

Se evaluó el costo de los componentes requeridos para el ensamblado del conjunto de compensación reactiva correspondiente a esta opción, estando en el orden de los USD 141.578 como se indica en la tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1: Costos estimados de ejecución del proyecto.

Descripción	Costo (USD)
Componentes eléctricos	112.078
Gabinete	12.000
Mano de obra	6.000
Ingeniería de detalle de construcción	1.500
Material menor	10.000
Total	141.578

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla N° 3.1: Resumen de componentes del banco de compensación con regulador automático de factor de potencia.

Ítem	Descripción	Modelo	Cantidad
1	Interruptor automático de cabecera 12kV; 25kA poder de corte, 3 polos, ejecución fija, SF6.	Schneider EasyPort SF1, con relé de protección SEPAM 20.	1
2	Seccionador tripolar bajo carga con bases portafusibles HH	Schneider	5
3	Fusibles 40A; 7,2 kV	Schneider FusArc 51006506M0	12 (4 grupos de 3 unidades)
4	Fusibles 25A; 7,2 kV	Schneider FusArc 51006504M0	3 (1 grupo de 3 unidades)
5	Contactador tripolar, ejecución fija	Schneider RollArc	5
6	Capacitor tripolar 150 kVAr / 6,6 kV.	CHV-T 150/6,6	4
7	Capacitor tripolar 100 kVAr / 6,6 kV.	CHV-T 100/6,6	1
8	Transformador de intensidad 100/5A con núcleo de protección y núcleo de medición.	Arteche	3
9	Transformador de tensión 4,16kV/ 0,11kV con núcleo de protección y núcleo de medición.	Arteche	3

10	Regulador automático del factor de potencia	Schneider VARLOGIC RT6	1
11	Compartimiento de baja tensión conformado por pilotos luminosos de presencia de tensión, indicación de contactor abierto / cerrado, relés auxiliares para maniobra de contactores.	Pilotos luminosos Schneider línea XA2. Rojo (presencia de tensión), Verde (contactor cerrado), Rojo, (contactor abierto)	3 Pilotos luminosos rojos para presencia de tensión. 6 Pilotos luminosos rojos y verdes para indicación de estado de contactores.
12	Gabinete metálico 2.400 x 2.100 x 900 mm	-	1
13	Global de material menor (barras de cobre, cable unipolar 1,5mm ² ; 2,5mm ² y 4mm ² , terminales, termocontraible, etc.)	-	1

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Propuesta N° 2: Compensación automática con los motores en funcionamiento

Para este caso, se utilizan relés temporizadores, que se activarán cuando el motor reciba orden de marcha, y una vez que finalice el tiempo de arranque del mismo se permitirá la entrada del capacitor asociado a ese motor. Esto hace que no entre el capacitor durante el arranque del motor, y compensa directamente la potencia de cada motor.

En el CCM 212 existen 6 motores, por lo que se necesitan 6 capacitores (uno por cada motor). La potencia requerida de compensación es de 679 kVAr, que repartido entre los 6 motores corresponde a 113 kVAr.

En función a los valores comerciales de capacitores, la combinación más cercana para cada motor es utilizar un capacitor trifásico de 50 kVAr en paralelo con un capacitor trifásico de 75 kVAr, teniendo un total de 125 kVAr por motor. En el caso de estar los seis motores en operación, el banco de capacitores sería de 750 kVAr, valor superior al requerido para compensar, por lo que el factor de potencia será ligeramente superior a 0,99 en la práctica.

En función a esta configuración del banco de capacitores, se seleccionaron el resto de elementos necesarios para un correcto funcionamiento del conjunto, los cuales se indican en la tabla N° 3.3.

En la figura N° A.3 (anexos) se puede apreciar el diagrama unifilar de esta solución, donde se ven reflejados los elementos indicados en la tabla N° 3.3 y su conexionado al CCM 212.

Se evaluó el costo de los componentes requeridos para el ensamblado del conjunto de compensación reactiva correspondiente a esta opción, estando en el orden de los USD 120.223 como se indica en la tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.3: Resumen de componentes del banco de compensación según motores en funcionamiento.

Ítem	Descripción	Modelo	Cantidad
1	Interruptor automático de cabecera 12kV; 25kA poder de corte, 3 polos, ejecución fija, SF6.	Schneider EasyPact SF1, con relé de protección SEPAM 20.	1
2	Seccionador tripolar bajo carga con bases portafusibles HH	Schneider	6
3	Fusibles 31,5A; 7,2 kV	Schneider FusArc 51006505M0	18 (6 grupos de 3 unidades)
4	Contactador tripolar, ejecución fija	Schneider RollArc	6
5	Capacitor tripolar 50 kVAr / 6,6 kV.	CHV-T 50/6,6	6
6	Capacitor tripolar 75 kVAr / 6,6 kV.	CHV-T 75/6,6	6
7	Transformador de intensidad 125/5A con núcleo de protección y núcleo de medición.	Arteche	3
8	Transformador de tensión 4,16kV/ 0,11kV con núcleo de protección y núcleo de medición.	Arteche	3

9	Compartimiento de baja tensión conformado por pilotos luminosos de presencia de tensión, indicación de contactor abierto / cerrado, relés auxiliares para maniobra de contactores.	Pilotos luminosos Schneider línea XA2. Rojo (presencia de tensión), Verde (contactor cerrado), Rojo, (contactor abierto) Relés auxiliares Schneider RXM4AB2P7, tensión de comando 220Vca, 4 inversores. Relé temporizado Schneider RE17LMBM	3 Pilotos luminosos rojos para presencia de tensión. 6 Pilotos luminosos rojos y verdes para indicación de estado de contactores. 6 relés auxiliares. 6 relés temporizados.
---	--	---	--

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.4: Costos estimados de ejecución del proyecto.

Descripción	Costo (USD)
Componentes eléctricos	90.723
Gabinete	12.000
Mano de obra	6.000
Ingeniería de detalle de construcción	1.500
Material menor	10.000
Total	120.223

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Comparación entre propuestas

Es importante destacar que ambas opciones cumplen técnicamente con el objetivo deseado, que es elevar el factor de potencia a 0,99 en atraso (o un valor muy cercano debido a que la potencia reactiva no es exactamente igual). La diferencia fundamental entre ambas opciones es que la primera utiliza un regulador automático de factor de

potencia, que tiene una lógica de control programada para ir agregando o quitando pasos de compensación (capacitores) para así lograr cumplir con el valor de ajuste, y en la segunda opción entra y sale de servicio el capacitor de la misma forma que lo hace el motor, es decir, mientras el motor esté en funcionamiento también lo estará el capacitor asociado.

Ambas opciones se plantean como una expansión del CCM 212, para aprovechar el juego de barras ya existente, y es un sitio ideal, porque se compensa la alimentación de cada motor. Las nuevas columnas se agregaran a continuación en el lado derecho, donde se conectaría la celda con interruptor principal y a continuación las celdas con los seccionadores-fusible, los contactores y los capacitores.

En lo que respecta al aspecto económico, se puede apreciar en la figura N° 3.6 el costo total de adquisición de ambas opciones, resaltando que existe una diferencia del 18%, siendo más costosa la propuesta N°1 (regulador automático) que la propuesta N°2.

Dado los resultados económicos, se sugiere la propuesta N°2, compensar en función de cada motor sin la utilización del regulador de factor de potencia, debido a que por el tipo de sistema a compensar es suficiente de esta manera.

También por razones técnicas se puede justificar en este caso la elección de la compensación de cada motor una vez que arranca el mismo, ya que de esta forma se evitan entradas y salidas de los contactores debido al controlador automático del factor de potencia. De esta forma, se asegura que la compensación reactiva estará presente únicamente cuando el motor está en funcionamiento, alargando la vida útil de los contactores y reduciendo el número de maniobras de los mismos.

3.1.4 Elementos de la solución escogida.

En la figura N° 3.5 se puede observar la configuración física actual del CCM 212, sin la compensación reactiva.



Figura N° 3.5: Configuración actual del CCM 212 sin compensación reactiva.

Fuente: Elaboración Propia, CCM Existente en la compañía.

En la figura N° 3.6 se muestra el compartimiento de entrada general del CCM, donde se encuentra el interruptor de cabecera, y las barras principales de donde se alimentan todos los motores. Justo en estas barras es donde se debe conectar en paralelo la alimentación al compartimiento de compensación reactiva.

Como estas barras van a lo largo del CCM, la conexión al banco de alimentación se puede realizar en cualquier compartimiento, lo importante es que se respete eléctricamente ese punto de conexión, para que pueda afectar a todos los motores conectados y por ende los cálculos de potencia realizados sean los correctos.



Figura N° 3.6: Compartimiento de entrada del CCM 212.

Fuente: Elaboración Propia. CCM Existente en la compañía.

A continuación, la figura N° 3.7 se muestra un compartimiento típico de salida a motor, donde se observa el relé de protección del motor, que monitorea todos los parámetros importantes del equipo y en base a esto determina si es necesario sacarlo de servicio por alguna condición fuera de lo normal (sobrecarga, exceso de temperatura, sobre o sub tensión, baja frecuencia, cortocircuito, entre otras funciones parametrizables en el relé) y los indicadores luminosos de marcha, parada, falla, y el pulsador de emergencia.



Figura N° 3.7: Compartimiento de Bomba 2 – Línea 1 de flotación.

Fuente: Elaboración Propia. CCM Existente en la compañía.

A continuación, la figura N° 3.8 se muestra un modelo del interruptor de entrada Schneider para el compartimiento de compensación reactiva seleccionado. Esto únicamente corresponde a la parte de fuerza motriz del equipo. El relé de protección se muestra en la figura N° 3.9.



Figura N° 3.8: Interruptor Schneider SF1.

Fuente: Schneider (2016).



Figura N° 3.9: Relé de Protección Schneider Sepam 20.

Fuente: Schneider (2021).

A continuación, la figura N° 3.10 se muestra la selección de contactor de maniobra para la conexión/desconexión de los condensadores.

A continuación, la figura N° 3.11 se observa un transformador de corriente de protección y medida marca Artech. Estos transformadores tienen diferentes núcleos con distintas clases de error, aptos para medición (conexión de equipos multimedidores y analizadores de red) y para protección (entradas de relés de protección). Se conectarán 3 transformadores de este estilo aguas abajo del interruptor de cabecera del compartimiento de compensación reactiva, y el secundario del núcleo de protección irá a la Sepam 20, y el secundario del núcleo de medida irá conectado al regulador automático del factor de potencia o a cualquier analizador de red que se coloque.



Figura N° 3.10: Contactor tripolar Schneider Rollarc.

Fuente: Schneider (2021).



Figura N° 3.11: Transformador de corriente Artech para protección y medida.

Fuente: Artech (2019).

Algo similar ocurre con los transformadores de tensión, que se muestran en la figura N° 3.12 y reducen la media tensión a valores típicos aceptados por instrumentos de medida y relés de protección (generalmente 110VAC entre fases).



Figura N° 3.12: Transformador de tensión monofásico Arteche.

Fuente: Arteche (2019).

Con base a todos estos componentes, se debe realizar el armado del compartimento de compensación reactiva para el CCM 102, que puede ser a continuación del existente, gracias a que es de construcción modular, o también de forma independiente.

En el Anexo A se muestra el diagrama unilineal correspondiente al CCM en estudio (ver la figura N° A.1). También se muestran los diagramas unilineales de ambas opciones comparadas como solución de compensación reactiva (ver la figura N° A.2 y la figura N° A.3).

En la figura N° A.4 se muestra el diagrama funcional o de comando propuesto para el método de compensación seleccionado. Se puede apreciar en dicho plano eléctrico que se recibe desde cada motor una señal (contacto seco) que indica que finalizó el arranque del motor correspondiente, lo que permite habilitar la compensación individual del mismo.

Esto se hace a través de un relé temporizado, que permite regular el tiempo de conexión del capacitor. Una vez cumplido el tiempo ajustado, se energiza la bobina del contactor y por ende se conectan los capacitores de 50 kVAr y de 75 kVAr al juego de barras principales del CCM 212. El principio de operación es el mismo para cada uno de los seis motores. Una vez desconectado el motor, se desenergiza la bobina del contactor y por ende salen de servicio los capacitores al mismo tiempo que el motor.

En la figura N° A.5 se presenta el esquema constructivo planteado para el gabinete de compensación reactiva. El mismo estará compuesto por cuatro columnas de dimensiones 600 x 2.100 x 900 mm (ancho x alto x profundidad) acopladas entre sí de forma lateral.

La primera columna de izquierda a derecha contendrá el interruptor principal, y será la que se acople al CCM 212 existente directamente a las barras principales. Las columnas restantes tendrán dos pasos de compensación reactiva, completando así los seis motores.

El gabinete será en chapa metálica doble decapada de espesor 2,5mm, con puertas de vidrio blindado 3+3 y con contrafrentes abisagrados donde estarán los accionamientos y los elementos de señalización y comando de la solución planteada, como por ejemplo los indicadores luminosos, el accionamiento del seccionador fusible y del seccionador de puesta a tierra, el relé de protección del interruptor principal, el mímico de operación, entre otros.

Finalmente, se muestran algunos diagramas de funcionamiento de la planta (ver la figura N° A.6 y la figura N° A.7).

3.1.5 Análisis económico

La normativa chilena vigente permite que las empresas distribuidoras de energía eléctrica cobren a cada cliente un recargo de un 1% sobre la facturación de energía por cada centésima (0,01) en que el Factor de Potencia (F.P.) de una instalación sea inferior a 0,93. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2022).

En este caso, el factor de potencia sin el sistema de compensación es de 0,82. Por ende, el recargo económico es de 11% sobre la factura de consumo eléctrico. El costo de la factura eléctrica del mes de mayo de 2022 es de \$ 41.733.072. Si se calcula el 11% de este valor se tiene que el recargo por bajo factor de potencia corresponde a un monto de \$ 4.590.638, lo que equivale a USD 5.680 al tipo de cambio del día de la facturación (808,16 \$/USD).

Este valor puede ser considerado como el ahorro mensual que se tendrá a partir del año 1, cuando se cuente con el sistema de compensación reactiva instalado y operando. Por ende, el ahorro anual asumiendo que la tarifa de electricidad no varía (caso pesimista para el estudio económico, ya que al incrementarse la tarifa se incrementará el valor de la multa por bajo factor de potencia, haciendo más beneficioso el sistema de compensación reactiva) viene dado por:

$$\text{Ahorro anual} = 5.680 \text{ USD} * 12 \text{ meses} = 68.160 \text{ USD/año}$$

Se evalúa el costo de los componentes requeridos para el ensamblado del conjunto de compensación reactiva, totalizando USD 120.223 como se indica en la tabla N° 3.4. Esto se considera para el análisis económico como la inversión inicial (año 0 del estudio).

Con estos datos, se puede calcular el VAN del proyecto de instalación del sistema de compensación reactiva. En la tabla N° 3.5 se muestran los flujos de caja del proyecto, en un horizonte de estudio de 4 años.

Tabla N° 3.5: Flujos de caja del proyecto (USD).

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
-120.223	68.160	68.160	68.160

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno mediante el uso del software Excel, se obtienen los siguientes valores:

$$VAN^1 = 45.619 \text{ USD}$$

$$TIR^2 = 32\%$$

Se utilizó una tasa de interés de 11,25 % que es la indicada por el Banco Central de Chile como tasa de actualización de flujos futuros al mes de junio del año en curso.

El VAN es un valor positivo, lo que indica que es conveniente la ejecución del proyecto. En lo que respecta a la tasa interna de retorno (TIR), se puede apreciar que se obtuvo un valor alto (32%) que al compararlo con la tasa de interés (11,25%) claramente resulta en un proyecto altamente rentable, con una recuperación de la inversión en corto plazo (el horizonte de estudio es de 4 años).

Se demuestra que la inversión está justificada tanto técnica como económicamente. Claramente se tendrán luego gastos de mantenimiento que no están incluidos, pero son gastos menores en comparación con la inversión a realizar, porque corresponden a mantenimientos preventivos de la celda para mantener sus condiciones óptimas de operación bajo toda exigencia que presente el proceso productivo con la finalidad de dar cumplimiento al target de producción de la compañía minera.

$$^1 VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+r)^i}$$

$$^2 VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+r)^i} = 0 \Rightarrow TIR$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La medición de potencia activa y reactiva realizada en el lapso de 30 días, se pudo determinar el consumo real del CCM 212 y el factor de potencia promedio mensual, resultando un valor de 0,8165 y siendo bastante inferior al mínimo indicado por la norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución (0,93). Esta diferencia justifica técnicamente la necesidad del sistema de compensación de potencia reactiva.

En función a los límites indicados en la norma, se decidió que el factor de potencia deseado una vez compensado el sistema sea de 0,99 inductivo (el punto medio del rango permitido). Conocido este parámetro objetivo, se pudo calcular el valor de potencia reactiva requerida para el banco de capacitores.

Conocido el valor del banco de compensación, se evaluaron 2 posibles escenarios de compensación:

El primero corresponde a una compensación reactiva mediante regulador automático del factor de potencia, el cual es un elemento que en función a mediciones en tiempo real de voltajes y corrientes, determina el factor de potencia real y lo compara con el parámetro objetivo ajustado por el usuario, y en función a una lógica interna de control determina qué pasos de compensación son necesarios para cumplir el valor requerido.

El segundo corresponde a una compensación automática en función de la operación de los motores del CCM 212, donde una vez que arranque un motor entra en servicio su compensación reactiva asociada, y cuando el motor salga de servicio también lo hace el capacitor correspondiente. Esto se logra mediante el uso de relés temporizados a la conexión, para impedir que entre el banco de compensación durante el arranque del motor.

Se realizó una comparativa técnica-económica de ambos escenarios, donde resultó como mejor opción el segundo escenario, ya que es más económico que el otro escenario y técnicamente cumple con todos los requerimientos del sistema, que al ser un CCM comanda básicamente motores y por el tipo de carga, al ser de conexión/desconexión, es viable la compensación individual por motor.

Una vez realizada la comparativa entre opciones, se realizó la factibilidad económica del proyecto, donde se calculó el VAN y TIR del mismo, para lo cual se consideró como inversión inicial el costo de implementación del sistema de compensación reactiva, y como flujos de caja de los años siguientes el ahorro obtenido por el recargo en la factura por bajo factor de potencia. Este estudio arrojó como resultado un VAN positivo, y un TIR superior a la tasa de interés, confirmando la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

Al corregir el factor de potencia, se obtendrán diversos beneficios en la instalación eléctrica, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

- ✚ Mejora del perfil de tensiones de la red, debido a que al disminuir la corriente por el sistema la caída de tensión es menor.
- ✚ Disminución de la potencia aparente consumida por los motores respecto al caso no compensado, haciendo que la corriente por los conductores disminuya.
- ✚ Reducción de las pérdidas de potencia globales, debido a que la corriente disminuye.
- ✚ Reducción de carga en los transformadores principales, debido a que parte de la potencia reactiva necesaria es provista por los capacitores.
- ✚ Reducción en el costo de la factura de electricidad, debido a que se evitan penalizaciones por factor de potencia bajo, además de que la potencia aparente consumida es menor a cuando no se cuenta con la compensación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema de compensación reactiva mediante capacitores de media tensión para corregir el factor de potencia del centro de control de motores 212, pasando de un factor de potencia original de 0,8165 a un factor de potencia de 0,99. Esto trae beneficios técnicos como el incremento del nivel de tensión a valores más cercanos al nominal y la disminución de la corriente total consumida. Adicionalmente tiene beneficios económicos, ya que al ser menor la potencia aparente, la facturación será menor y también se logran evitar recargos en el costo del servicio por bajo factor de potencia.

Se logró realizar la medición según el procedimiento indicado por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, demostrando que se tiene un factor de potencia de 0,8165 que es menor al permitido por dicha norma.

Se pudo seleccionar el tipo de compensación reactiva a implementar, en función a las características propias del sistema eléctrico en cuestión, logrando el más beneficioso técnica y económicamente. En nuestro caso, la compensación local es la más adecuada debido a la distribución física y eléctrica de las cargas.

En función al factor de potencia objetivo se pudo calcular la potencia reactiva requerida para los capacitores, y de aquí los valores necesarios por motor, así como también los elementos adicionales de protección y maniobra que completan el sistema de corrección de factor de potencia.

Se pudo ejecutar un estudio de factibilidad económico del proyecto, resultado rentable en un horizonte de estudio de 4 años, según indicadores económicos como un VAN de 45.619 USD y un TIR de 32%.

Finalmente, se logró diseñar un sistema de compensación reactiva conformado por seis grupos de capacitores (un grupo por cada motor) que totalizan una potencia reactiva de

750 kVAr. Para cada motor se seleccionó un capacitor de 75 kVAr y uno de 50 kVAr en paralelo. Cada grupo de capacitores está protegido por un seccionador con bases portafusibles de 31,5 A y comandado por un contactor tripolar Rollarc de 400A. El conjunto completo está protegido por un interruptor tripolar Schneider de 630A con un relé de protección Sepam, que tiene las funciones de protección comunes.

GLOSARIO

- ✚ **Tensión Eléctrica:** es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Se puede medir con un voltímetro. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el Volt.
- ✚ **Corriente Eléctrica:** es el flujo de carga eléctrica que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del mismo. Al caudal de corriente (cantidad de carga por unidad de tiempo) se le denomina intensidad de corriente eléctrica (representada comúnmente con la letra I). En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en culombios por segundo (C/s), unidad que se denomina Ampere (A).
- ✚ **Potencia Eléctrica:** es la proporción por unidad de tiempo, o ritmo, con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico. Es decir, la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio o watt (W).
- ✚ **Factor de Potencia:** Se define factor de potencia (FDP), de un circuito de corriente alterna, como la relación entre la potencia activa, P, y la potencia aparente, S.1. Da una medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa. Por esta razón, $FDP = 1$ en cargas puramente resistivas; y en elementos inductivos y capacitivos ideales sin resistencia $FDP = 0$.
- ✚ **Energía Eléctrica:** Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.

- ✚ **Resistencia Eléctrica:** Se le denomina resistencia eléctrica a la oposición al flujo de corriente eléctrica a través de un conductor. La unidad de resistencia en el Sistema Internacional es el ohmio, que se representa con la letra griega omega (Ω), en honor al físico alemán Georg Simon Ohm, quien descubrió el principio que ahora lleva su nombre.

- ✚ **Inductor:** Un inductor, bobina o reactor es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

- ✚ **Capacitor:** Un condensador eléctrico (también conocido frecuentemente con el anglicismo capacitor, proveniente del nombre equivalente en inglés), es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra), separadas por un material dieléctrico o por la permitividad eléctrica del vacío. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Artech (2019). Transformadores de Medida – media tensión – interior. Catálogo. <http://www.discarel.com/>
- [2] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2020). “Decreto 2: Decreto 2T. Fija precios de nudo para suministros de electricidad”. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1144129&idVersion=2020-08-01>
- [3] Circutor (2013). “Soluciones para la compensación de energía reactiva en media tensión”. <https://circutor.com/docs>
- [4] CNE (2019). “Norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución”. <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/>
- [5] Espinoza, Carlos. Pérez, Mauricio (2015). “Metodología para el diseño y dimensionamiento adecuado de banco de capacitores para corrección del factor de potencia en la empresa Yambersa”. <https://repositoriosiidca.csuca.org/Record/RepoUNI1456>
- [6] Gómez Morales, Enrique (2009). “Compensación de potencia reactiva”. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/7201/1/>
- [7] Schneider Electric (2007). “Compensación de Energía Reactiva Baja y Media Tensión”. <https://es.scribd.com/doc/177326062/>
- [8] Schneider Electric (2021). “Componentes para tableros de media tensión”. Catálogo. <https://www.se.com/>
- [9] Schneider Electric (2016). “Interruptor SF1 en SF6”. Guía del usuario. <https://www.se.com/mx/es/download/document/889146EN01/>

[10] Schneider Electric (2021). “Sepam Series 20”. Guía del usuario.
<https://www.se.com/co/es/product-range/933-sepam-serie-20/>

[11] Vera, Gabriel (2019). “Compensación de energía reactiva y mejoramiento del factor de potencia”. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/22412>

ANEXOS

A.1: Diagrama unilíneal

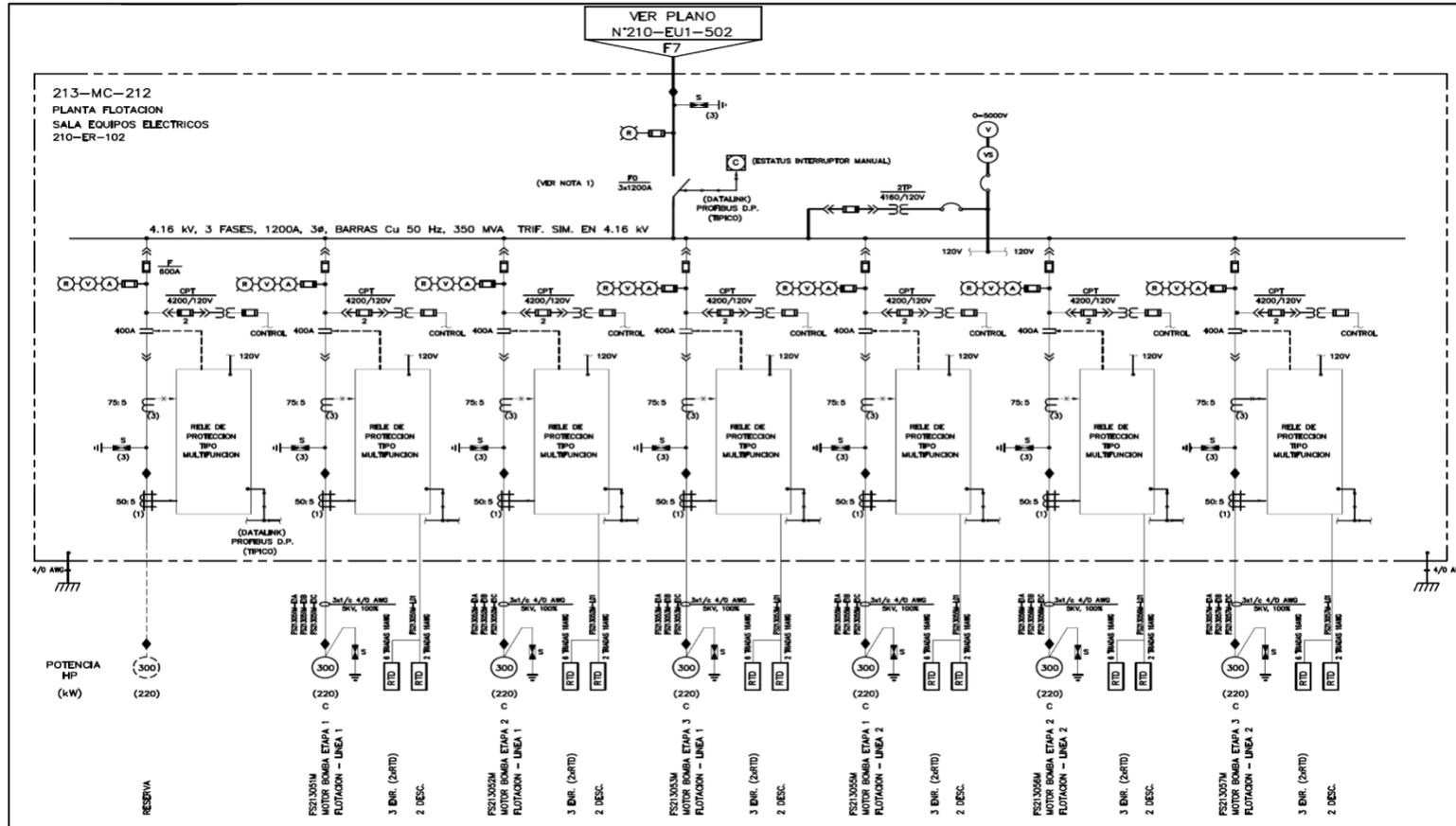


Figura N° A.1: Diagrama unilíneal CCM 212.

Fuente: CAP S.A.

A.2: Diagrama unilineal solución opción 1

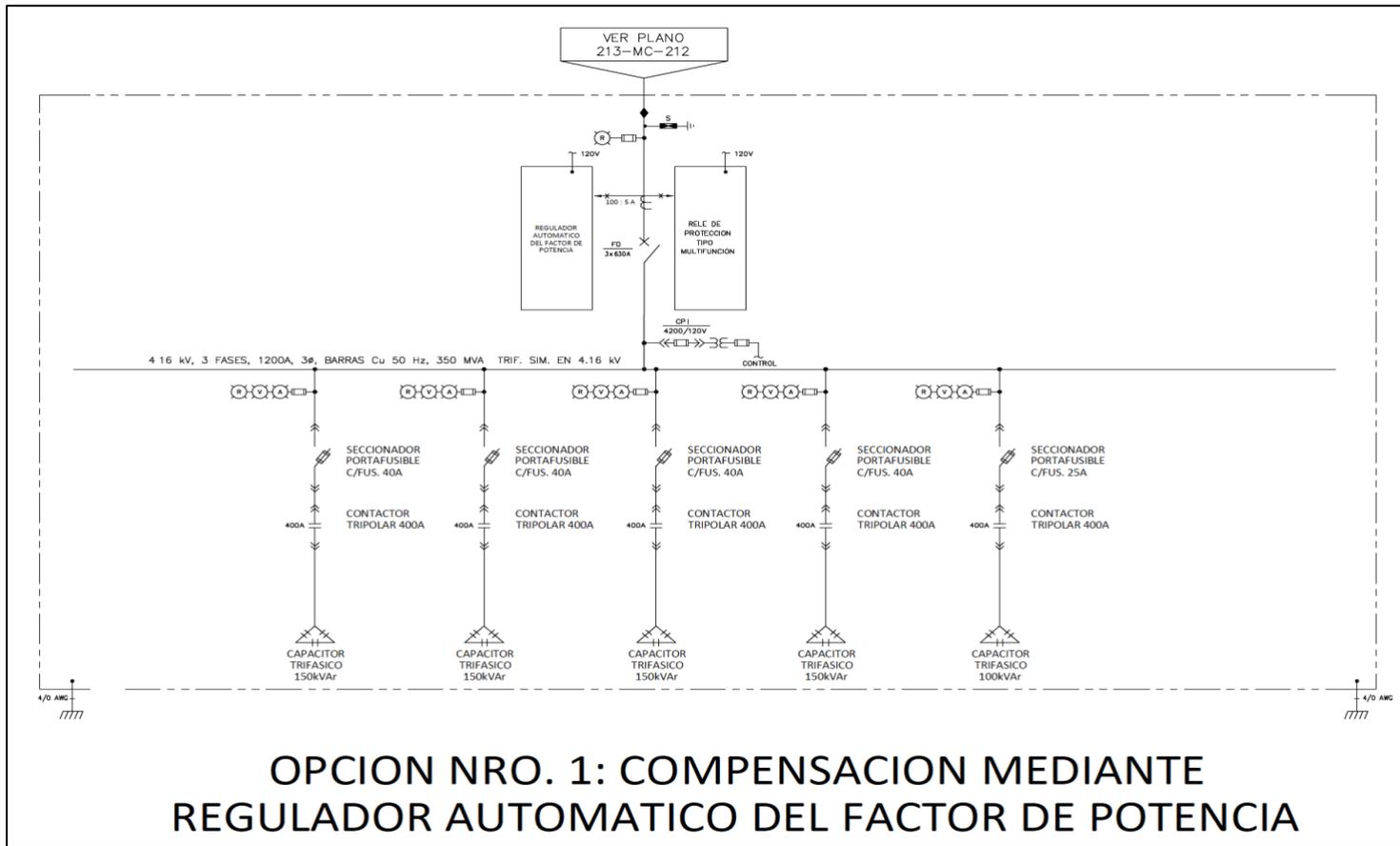


Figura N° A.2: Diagrama unilineal solución opción Nro. 1.

Fuente: Elaboración propia.

A.3: Diagrama unilineal solución opción 2

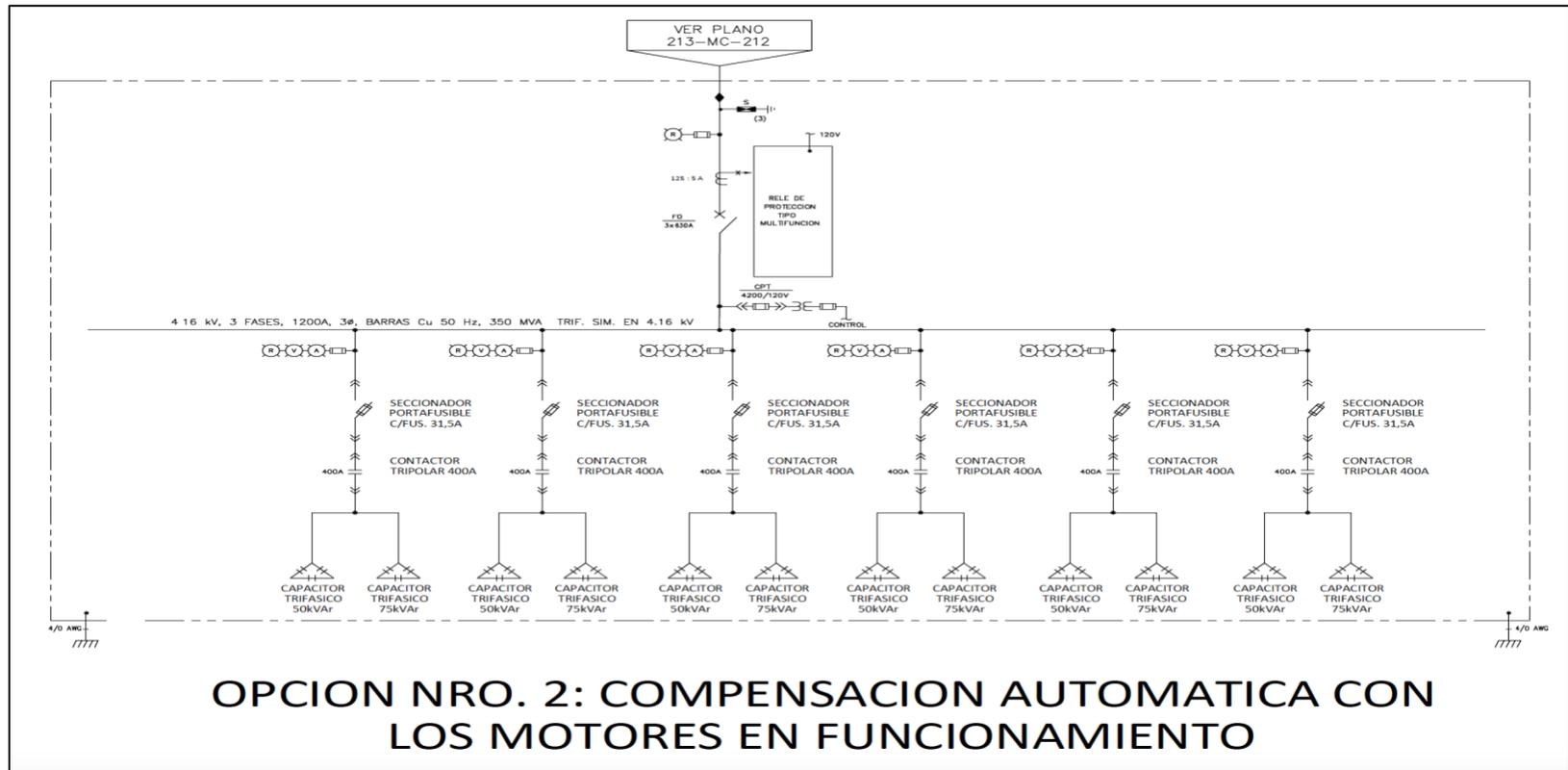


Figura N° A.3: Diagrama unilineal solución opción Nro. 2.

Fuente: Elaboración propia.

A.4: Diagrama funcional para la solución seleccionada

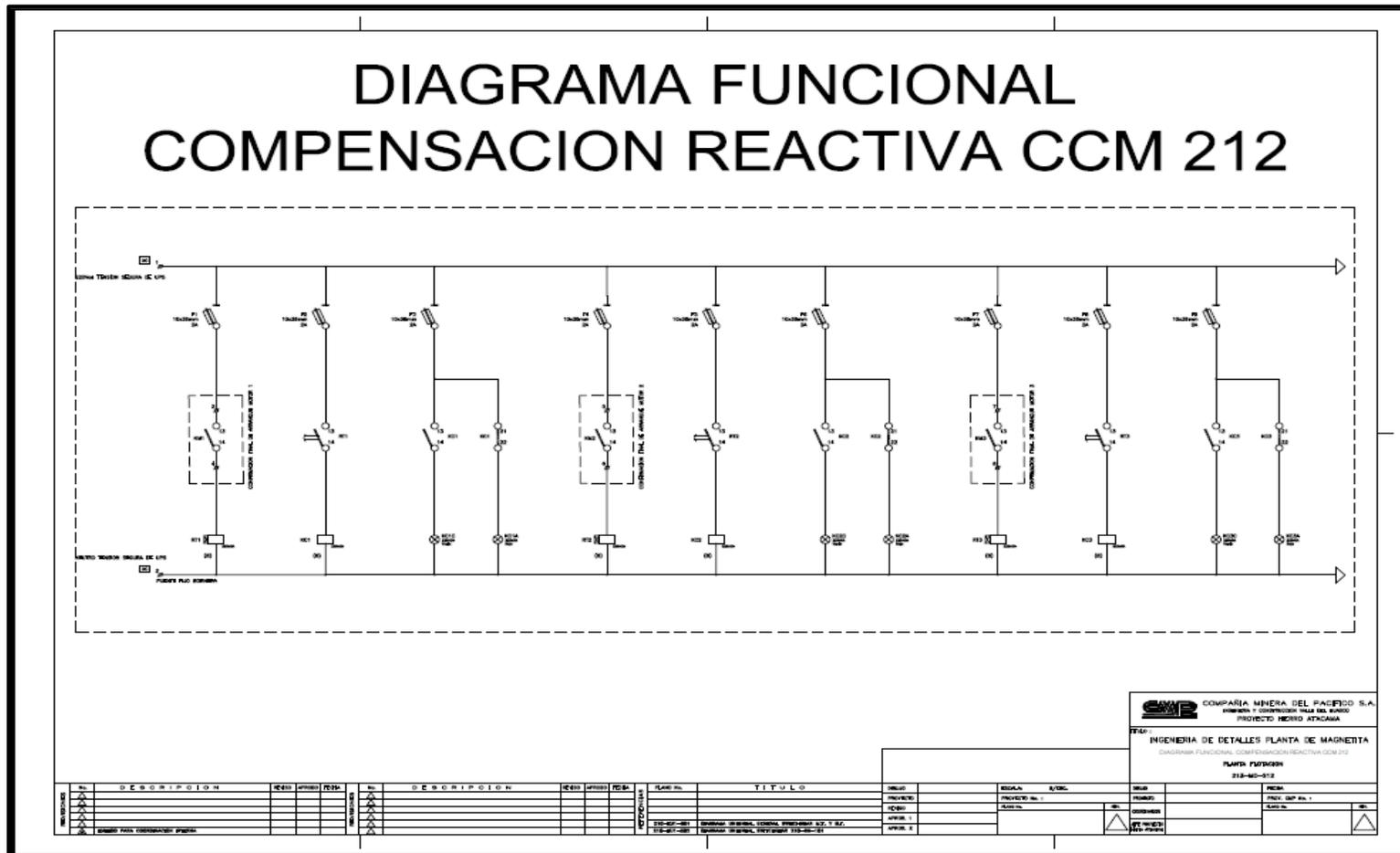


Figura N° A.4: Diagrama funcional para la solución seleccionada.

Fuente: Elaboración propia.

A.5: Diagrama funcional para la solución seleccionada (continuación)

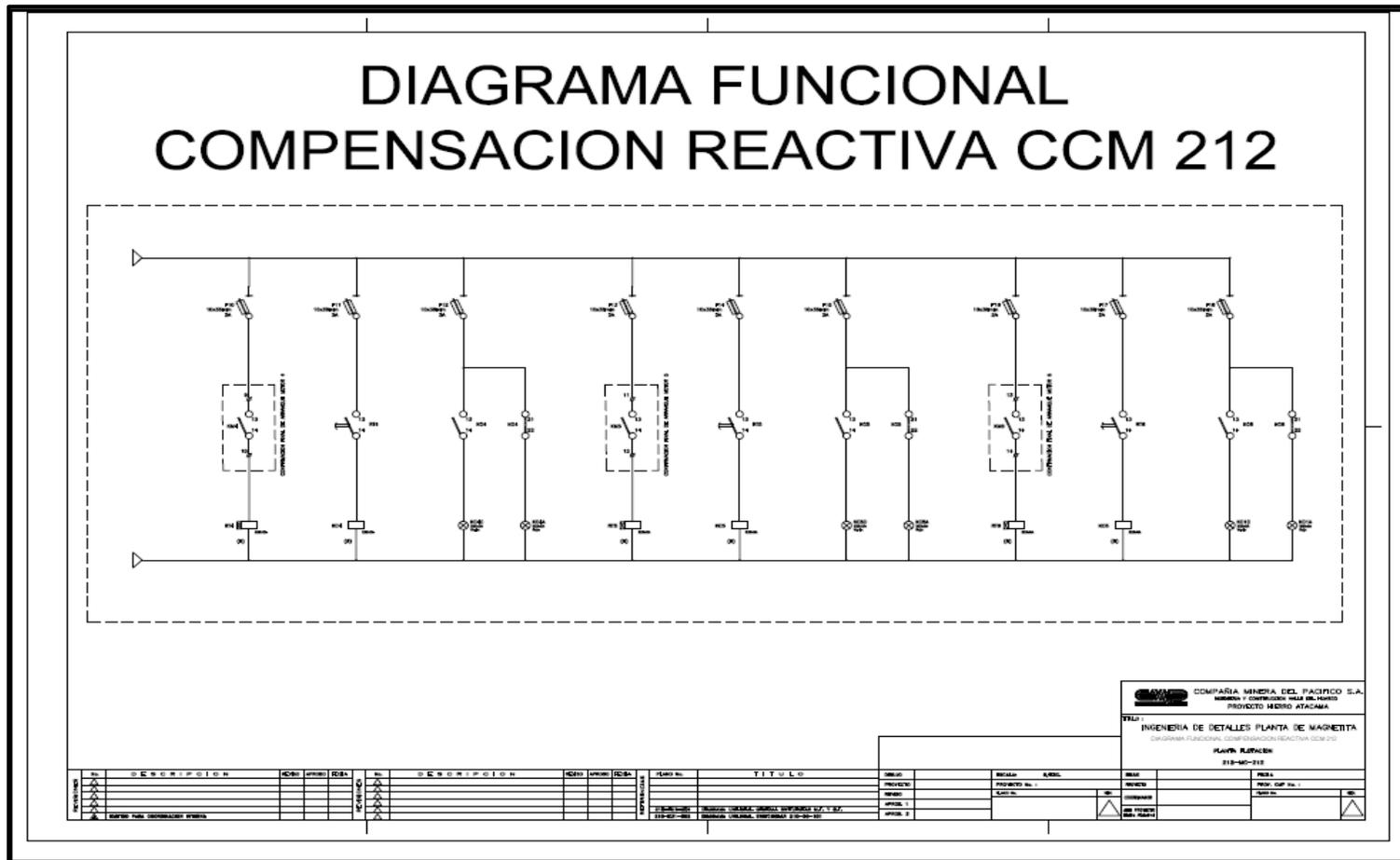


Figura N° A.5 (continuación): Diagrama funcional para la solución seleccionada.

Fuente: Elaboración propia.

A.6: Esquema constructivo para la solución seleccionada

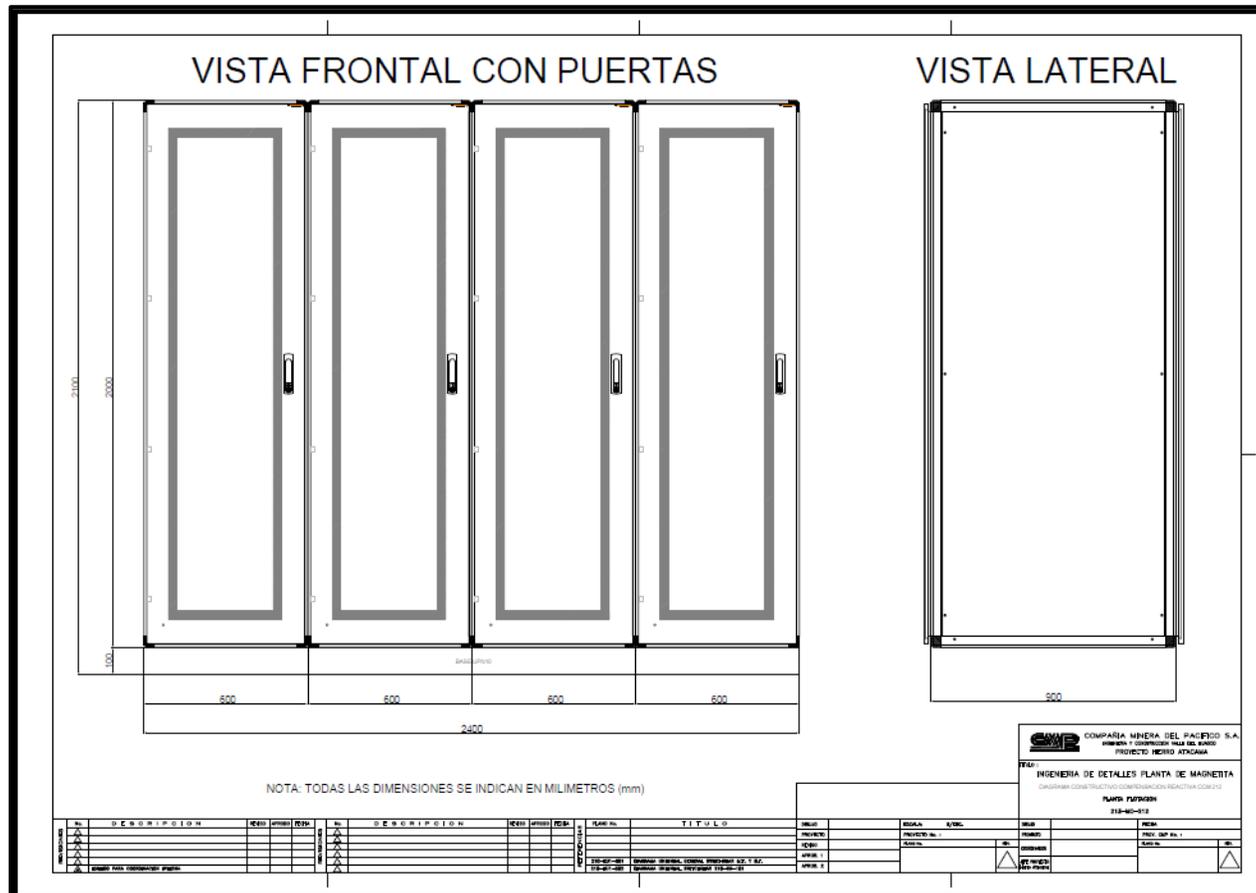


Figura N° A.6: Esquema constructivo para la solución seleccionada.

Fuente: Elaboración propia.

A.7: Diagrama de funcionamiento planta magnetita

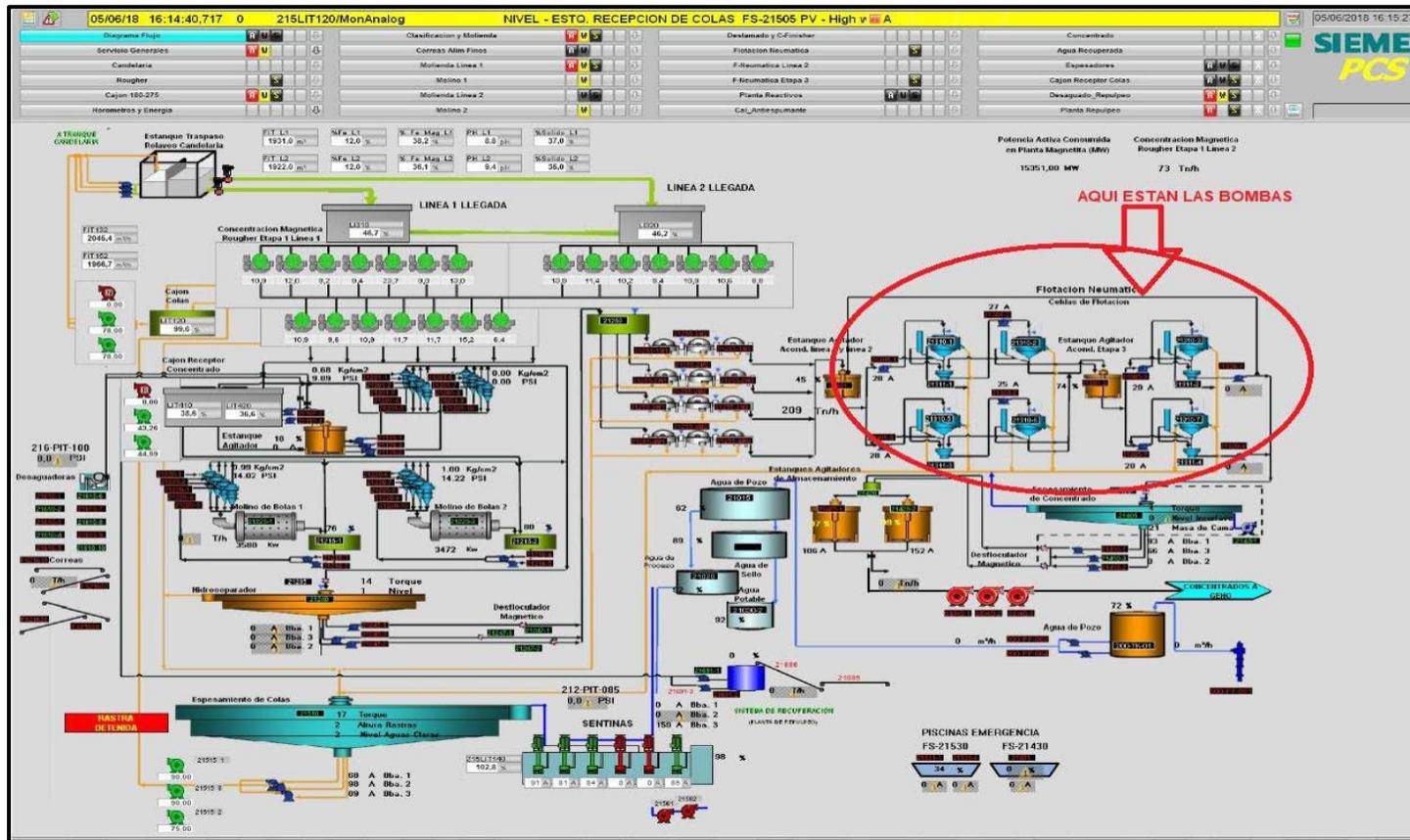


Figura N° A.7: Diagrama de funcionamiento planta Magnetita.

Fuente: CAP S.A.

A.8: Diagrama de funcionamiento bombas 21310-3 y 21310-7

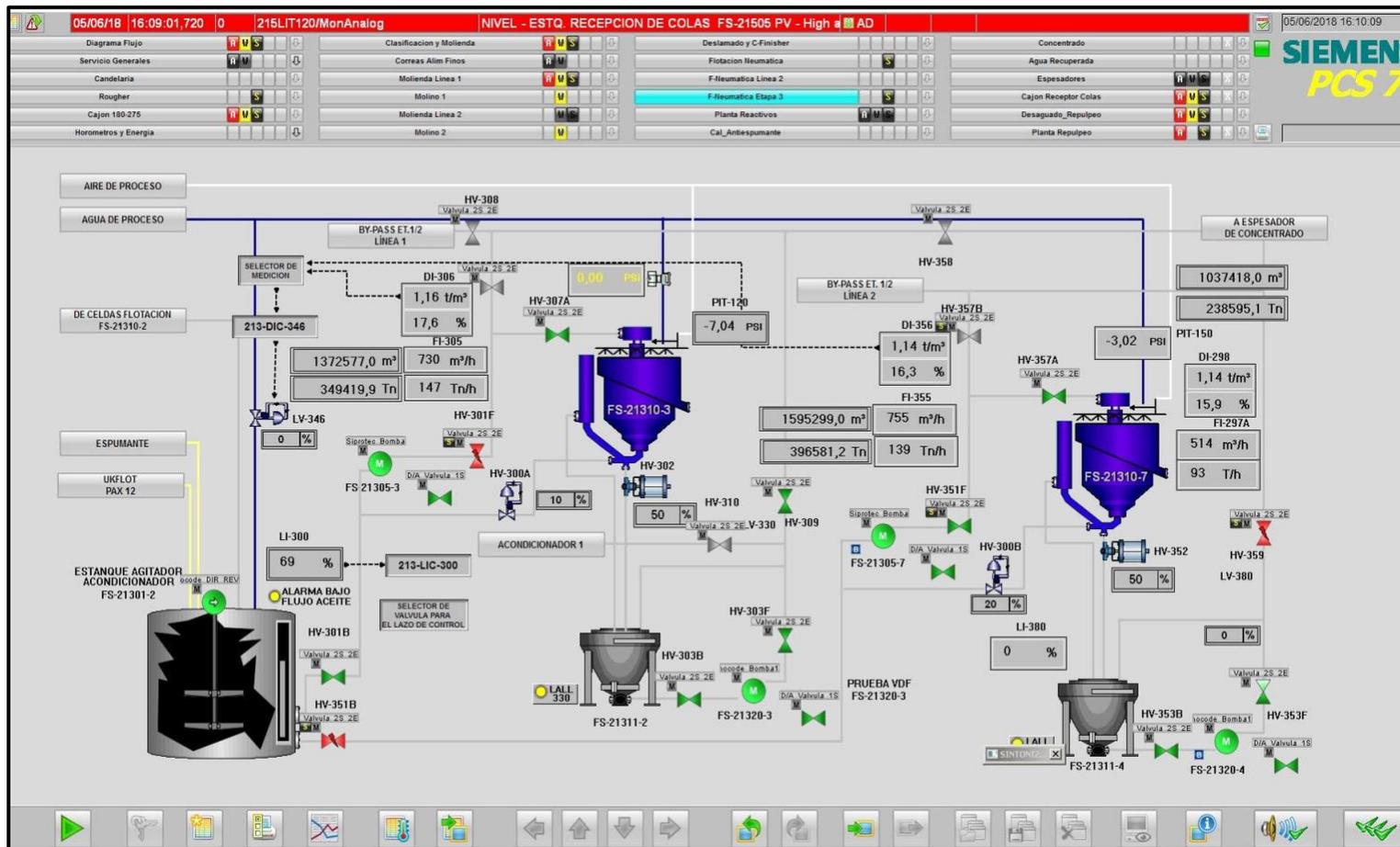


Figura N° A.8: Diagrama de funcionamiento bombas 21310-3 y 21310-7.

Fuente: CAP S.

