



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE BYPASS ELÉCTRICO EN TREN DE
BOMBAS PARA CONTINUIDAD OPERACIONAL EN MINERA
CANDELARIA**

JORGE MANUEL VERGARA LATOJA

Copiapó, Chile 2022



**UNIVERSIDAD
DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE BYPASS ELÉCTRICO EN TREN DE
BOMBAS PARA CONTINUIDAD OPERACIONAL EN MINERA
CANDELARIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO EN CONFORMIDAD AL PROGRAMA DE
TITULACIÓN FLEXIBLE Y CONTEXTUALIZADO RESOLUCIÓN EXENTA N°191 DEL 2021
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRICIDAD**

Profesor Guía: Manuel Monasterio Cortés

Jorge Manuel Vergara Latoja

Copiapó, Chile 2022

Dedicatoria:

A Dios, a mi Esposa, a mis Hijos, a mis Padres, Familiares y Amigos y en especial a mis Profesores, que me motivaron y me apoyaron en este proceso de estudios en la Universidad, en mi trabajo y en preparar mi proceso de titulación.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la vida, por sus bendiciones y por otorgarme la oportunidad de estudiar y poder desarrollarme profesionalmente.

A mi esposa Cecilia, que me ha acompañado y apoyado durante todo este caminar en Familia, en mi vida personal, familiar, de estudios y en este proceso final de titulación que estoy viviendo, a mis hijos Cristián, Constanza y Javiera, que han sido parte también de la motivación que he necesitado para avanzar en este proceso de mis estudios.

También quiero agradecer a Mis padres Arturo y María por darme el ser, la formación, por los valores y por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis Familiares, compañeros de Universidad, del trabajo y amigos que me acompañaron en este proceso de estudios, en especial a mi compañero de trabajo James Díaz Velásquez quien fue el gestor de este proyecto el cual expongo en este trabajo escrito.

También y de manera muy especial a los profesores de la Universidad de Atacama que compartieron sus conocimientos conmigo, en especial a mí Profesor guía Manuel Monasterio Cortés y al personal de esta casa de estudios, que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme.

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	3
CAPÍTULO 2: CONTEXTUALIZACIÓN DE LA EXPERIENCIA	5
2.1 COMPAÑÍA CONTRACTUAL MINERA CANDELARIA	5
A) Área Seca:.....	6
B) Área Húmeda:	6
C) Área de Relaves:	8
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	12
3.1 COMPONENTES DE LOS TRENES DE BOMBAS.....	12
3.2 DESCRIPCIÓN DE VDF ROBICON SIEMENS.....	19
3.2.1 SECCIÓN CELDAS.....	20
3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL RECTIFICADOR	21
3.2.3 SISTEMA DE BYPASS EN CELDAS DE POTENCIA	23
3.2.4 DIAGRAMA DE SISTEMA DE BYPASS EN CELDAS DE POTENCIA	25
3.3 DESCRIPCIÓN DE SWITCHGEAR SIMOPRIME SIEMENS	26
3.4 CABLE MINERO	28
3.5 TERMINAL DE OJO 2/0 AWG	30
CAPÍTULO 4: CONTEXTO DEL PROBLEMA	32
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	33
4.2 ANÁLISIS DE FALLA DE VDF ROBICON SIEMENS	35

4.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN	36
4.4.1 ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE TRENES DE BOMBAS	36
4.4.2 ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO VDF ROBICON SIEMENS	38
4.5 PROPUESTA DE TRABAJO	40
4.5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO	41
4.5.2 IMPLEMENTACIÓN DE BYPASS ELÉCTRICO	43
4.5.3 OPTIMIZACIÓN DEL ÁREA DE RELAVES	52
5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1.1 CÁLCULO DE IMPACTO ECONÓMICO	54
5.1.2 PLAN DE OPERACIONES	56
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	60
• Respecto al objetivo general:	60
• Respecto de la solución:	60
• Respecto al desafío personal como Profesional:	61
• Respecto a la continuidad de la solución y desafíos futuros:	61
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS	65
ANEXO B: PROTOCOLO DE OPERACIÓN DE TRENE DE BOMBAS	68
ANEXO C: FICHAS TECNICAS DE CELDA SWITCHGEAR SIMOPRIME SIEMENS	80

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Diagrama de Proceso de Minera Candelaria.	1
Figura N°2. Trenes de bombas en conjunto con el espesador de relaves.	2
Figura N°3. Ubicación Geográfica de Minera Candelaria.	5
Figura N°4. Vista de Planta Concentradora Minera Candelaria.	7
Figura N°5. Vista de espesadores de relaves, Fase 1 y Fase 2.	8
Figura N°6. Espesador de columna central con tracción en la periferia.	9
Figura N°7. Canaleta periférica del espesador para recuperar el agua.	10
Figura N°8. Cajón de recuperación agua de rebose y grupo de Bombas Overflow.	10
Figura N°9. VDF Robicon de 805[HP] / 3300 [V]	11
Figura N°10. Trenes de Bombas A, B, C y circuito de bombas de agua de sello.	12
Figura N°11. Tren de Bombas C, punto de succión y punto de descarga.	13
Figura N°12. VDF Robicon MT Perfect Harmony, 805 [HP] / 3300[V].	13
Figura N°13. Bomba principal de descarga acoplada a Motor Eléctrico de 805 [HP]. ...	14
Figura N°14. Bomba y sus componentes acoplados a motor de 603[HP] / 3300[V].	14
Figura N°15. Bomba Centrifuga Warman, acoplada a su eje.	15
Figura N°16. Conjunto de bombas de agua de sello Tren C.	16
Figura N°17. Conjunto de válvulas de cuchillo de Tren C.	17
Figura N°18. Conjunto de válvulas Zúrich de Tren C.	18
Figura N°19. Sensores de Diferencial de Presión Tren B.	18
Figura N°20. Disposición de Celdas de Potencia en VDF.	21
Figura N°21. Topología de VDF Perfect Harmony Robicon.	22
Figura N° 22. Gabinete de control y procesamiento.	24

Figura N°23. Celda de potencia.	25
Figura N°24. Salida de la unidad reequilibrada al pasar por alto la celda funcional.	25
Figura N°25. Vista de Celdas Switchgear Simoprime Siemens.	26
Figura N°26. Interruptor de Media Tensión de Switchgear Simoprime de 5,7 [Kv], vista frontal y lateral respectivamente	27
Figura N°27. Estructura de Cable Minero.	28
Figura N°28. Disposición de conductores en Cable Minero.....	29
Figura N°29. Terminal de Ojo 2/0 AWG.....	31
Figura N°30. Circuito de Trenes de Bombas y válvulas asociadas a cada una de las líneas de descarga de relaves.....	32
Figura N°31. Variador de Frecuencia TREN A siniestrado.....	34
Figura N°32. Distribución y configuración de los trenes de bombas A, B y C.	37
Figura N°33. Diagrama en bloques de un VDF.	39
Figura N°34. Flujo de cronología de Trabajo.	41
Figura N°35. Plano eléctrico con la configuración original del accionamiento de las bombas principales del TREN A PP102 como del TREN B PP103.....	44
Figura N°36. Plano eléctrico con accionamiento modificado de las bombas principales del TREN A PP102 como del TREN B PP103, utilizando Celdas Switchgear Simoprime.	46
Figura N°37. Celdas Simoprime “A” y “B” instaladas y habilitadas.	49
Figura N°38. Block de contactos de Control en Interruptor celda Simoprime.	51
Figura N°39. Gabinete de Control en Switchgear Simoprime.....	51
Figura N°40. Celdas Switchgear Simoprime instaladas para nuevo Bypass.	53

INDICE DE FÓRMULAS

Fórmula N°1. Cálculo de producción de 1 hora de Molino SAG.	55
Fórmula N°2. Costo total por falla de VDF.	58
Fórmula N°3. Porcentaje de pérdida con respecto al total sin fallas en un mes.	59

INDICE DE TABLAS

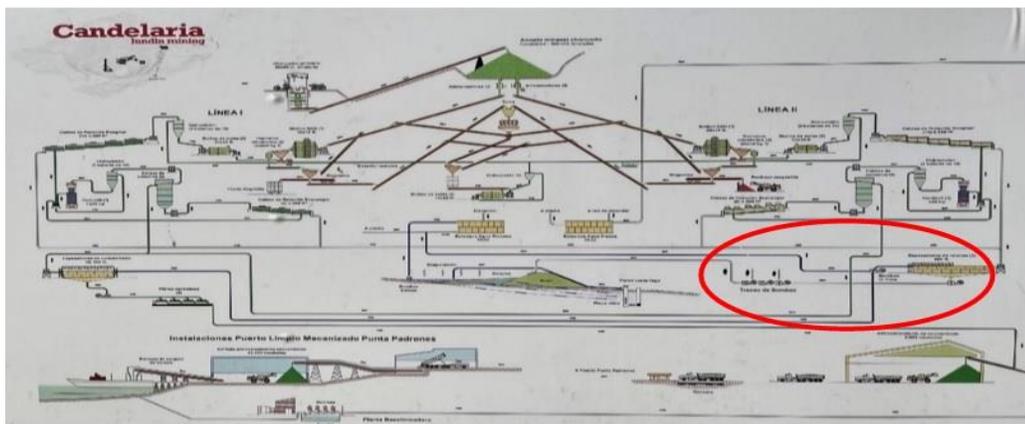
Tabla N°1. Materiales para el Bypass Eléctrico.	57
Tabla N°2. Mano de obra.	57
Tabla N°3. Costos de producción.	58

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Todo proceso de producción genera residuos, cuan más o cuan menos y los procesos mineros no son la excepción ya que después de su extracción el mineral debe ser tratado a fin de poder obtener el producto final que se desea, Minera Candelaria es un yacimiento del cual se obtiene como producto final concentrado cobre y los residuos de este proceso deben ser conducidos a su destino final que es el tranque de relaves. En la etapa final de descarte o desecho existe para esta finalidad un conjunto de equipos encargados de realizar dicha función. Los trenes de bombas son los que realizan el trabajo de impulsar los residuos y son una etapa de una criticidad muy alta para el proceso, lo que demanda que su funcionamiento, operatividad y confiabilidad no se vea comprometida, a fin de no afectar la continuidad operacional del proceso.

Para comprender más claramente la importancia de esta etapa del proceso, se realiza un análisis del trabajo efectuado como consecuencia de una falla ocurrida en uno de los equipos y las consecuencias que esta falla produjo, así como las mejoras efectuadas, se desarrollan los temas a través de los cuales se presentan la metodología utilizada, la investigación, materiales o elementos de apoyo utilizados durante este proceso de mejora, los resultados obtenidos y las conclusiones.

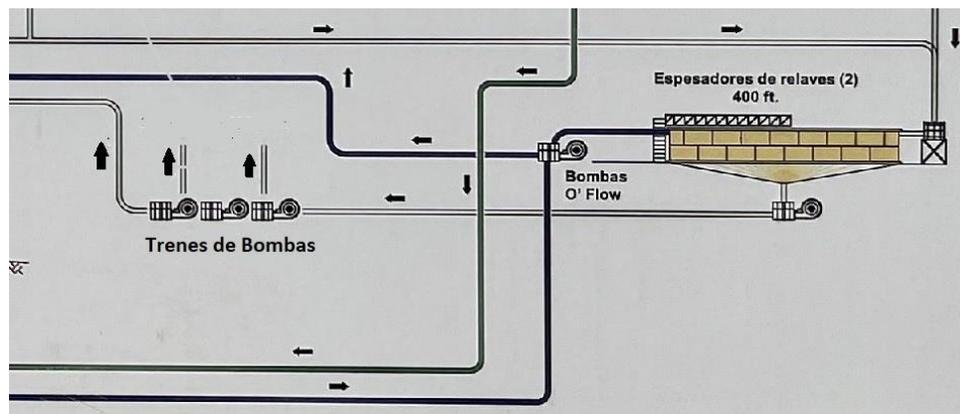
Figura N°1. Diagrama de Proceso de Minera Candelaria.



(Compañía Contractual Minera Candelaria y Compañía Contractual Ojos del Salado, 2018, pág. 2)

Dentro de las distintas etapas del proceso de Minera Candelaria, está el área de relaves y puntualmente los Trenes de Bombas, mencionado en la Introducción y que está destacado en un círculo en la Figura N°1, que es de interés por la criticidad que esta tiene en la producción y porque es donde se produjo la falla de alto impacto al proceso, de la cual se detallará más adelante.

Figura N°2. Trenes de bombas en conjunto con el espesador de relaves.



(Compañía Contractual Minera Candelaria y Compañía Contractual Ojos del Salado, 2018, pág. 2)

Se destaca en la figura N°2 el circuito hidráulico entre los trenes de bombas y los espesadores de relaves, como se mencionó anteriormente, cuya función es la de impulsar los residuos o el material inerte una vez recolectados en los espesadores y darles su disposición final en el Tranque de relaves.

Para comprender de mejor manera las distintas etapas de la producción es que se entrega una descripción de Compañía Contractual Minera Candelaria y de cómo cada una de estas áreas desarrollan una función determinada en el proceso para la obtención del producto final que es el concentrado de cobre.

Al final del documento podrá encontrar un Glosario de términos técnicos y una sección de anexos por si requiere complementar su lectura.

Los objetivos a abordar en este trabajo de Titulación son:

1.1 OBJETIVO GENERAL

Recuperar la disponibilidad y estabilidad del tren de Bombas del área Relaves siniestrado y por consiguiente la continuidad de producción de la Planta.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar un análisis de operación del tren de bombas y funcionamiento del Variador de Frecuencia Media Tensión Robicon Siemens (VDF MT de acá en adelante).
- b) Ejecutar la propuesta metodología de trabajo e implementación del Bypass eléctrico para lograr la continuidad y estabilidad del tren de bombas.
- c) Optimizar la operatividad del tren de bombas del área relaves, ante futuras fallas.
- d) Presentar un análisis de resultado operacional y económico.

1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Este trabajo de Titulación consta de cinco capítulos, el capítulo uno aborda la introducción en la cual se entrega una breve descripción del proceso de extracción del mineral y de cómo es tratado para obtener el producto final, el manejo de los residuos y de que equipos son los encargados de realizar dicha función y la importancia de estos en el proceso, la falla ocurrida a uno de estos equipos y finalmente, la importancia de implementar una solución en el menor tiempo posible.

En el capítulo dos se describe el lugar donde se presenta la problemática realizándose una descripción de la Compañía Contractual Minera Candelaria, se definen sus áreas de trabajo, la operación que realiza cada una de ellas, sus características generales y la importancia que tiene para la producción el área donde se produjo la falla catastrófica y el alto impacto que esta tuvo sobre la producción y finalmente la importancia de plantear

una solución al problema. El tercer capítulo comprende el marco teórico, en él se detalla cómo y de qué manera están constituidos los trenes de bombas, sus componentes y la importante función que cumplen dentro de la operación y del proceso, los equipos eléctricos de alta potencia asociados en el accionamiento de los trenes de bombas y cómo éstos funcionan. Se describen, además, los equipos, materiales y elementos, sus características y cualidades, que se utilizaron para configurar el bypass eléctrico, que forma parte de la solución ante el problema originado por la falla destructiva ocurrida en el VDF en el área de relaves.

En el cuarto capítulo se expone el contexto del problema y su descripción, por la falla ocurrida en uno de los trenes de bombas, se explica el análisis de la falla y la causa raíz de la misma. Se plantea una solución por lo cual se hace necesario analizar el funcionamiento de los trenes de bombas y la dinámica en la operación de estos, también se analiza el funcionamiento del variador de frecuencia, equipo eléctrico de alta importancia por la función que este realiza en la operación del tren de bombas. Se desarrolla además cada uno de los objetivos específicos descritos en la introducción de este trabajo y que dan respuesta al objetivo principal, que es lograr la continuidad operacional y de producción de la Planta. También se plantea la mejora obtenida con este accionamiento del bypass eléctrico en el área de relaves, para asegurar una continuidad operacional, se realiza además un análisis económico, como comparativa entre las opciones posibles en respuesta a la falla ocurrida.

En el quinto capítulo se plasman las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo de titulación, así como también del valor agregado que la solución implementada, actualmente ofrece al área de relaves. Las conclusiones personales que se obtuvieron por la experiencia adquirida al participar del desarrollo del bypass eléctrico y de la posibilidad de resolver estos desafíos planteados en la ejecución de los trabajos encomendados. Al final de este documento se encuentran también los anexos como el glosario que contiene las definiciones de algunos términos técnicos para que el lector pueda comprender de mejor manera este trabajo, así como también puede consultar los anexos de operación de trenes de bombas o las fichas técnicas de algunos equipos eléctricos, apartados con información complementaria al marco teórico.

CAPÍTULO 2: CONTEXTUALIZACIÓN DE LA EXPERIENCIA

A continuación, se da una descripción de la Compañía Contractual Minera Candelaria, de sus áreas y de cómo estas están compuestas, la función que cumplen cada una de ellas y de la importancia que tiene el área donde se produjo la falla de alto impacto y de la importancia de dar una solución al problema.

2.1 COMPAÑÍA CONTRACTUAL MINERA CANDELARIA

Minera Candelaria es una empresa de Mediana Minería de capitales extranjeros, (Corporación Canadiense Lundin Mining con el 80% de la propiedad y Corporación Japonesa Sumitomo con el 20% restante). Sus operaciones se ubican principalmente en la comuna de Tierra Amarilla a 29 kilómetros al Sur de Copiapó, en la región de Atacama. El distrito Minero Candelaria produce concentrado de cobre, el mineral es extraído desde una mina a rajo abierto y desde las minas subterráneas Candelaria Norte, Santos y Alcaparroza. Las principales ventajas del distrito son su ubicación a baja altura, su cercanía a importantes centros urbanos, una planta desalinizadora que abastece de agua y un puerto propio para el embarque del concentrado.

Figura N°3. Ubicación Geográfica de Minera Candelaria.



(Google Maps, 2021)

Del distrito Minero Candelaria, se extraen aproximadamente 230.000 [ton] de material por día, de las cuales aproximadamente 85.000 [ton] corresponden a mineral que es enviado para su proceso a las plantas concentradoras Candelaria y Pedro Aguirre Cerda, cuyo resultado final, dependiendo de la ley del mineral, produce aproximadamente 75.000 [ton]/día de concentrado de Cobre, con una humedad requerida del 9 %. Sus principales operaciones se agrupan en tres grandes áreas:

A) Área Seca: También llamada etapa de Chancado, es la etapa inicial del proceso productivo que comienza con la recepción del mineral proveniente de la mina a rajo abierto Candelaria y las minas subterráneas Candelaria Norte, Santos y Alcaparroza y tiene el objetivo de reducir el tamaño del mineral desde 60 [pulgadas], hasta 80 % bajo 6 [pulgadas]. Su velocidad de procesamiento es de aproximadamente 5.500 [ton/hora], depositando el mineral reducido a través de un chute a una correa transportadora de corta longitud y baja velocidad y de esta a otra correa transportadora la cual deposita el mineral aproximadamente a 200 [metros] del chancador primario en un área de acopio. Este mineral alimenta la etapa de molienda húmeda (Planta Concentradora), en dos circuitos, compuestos cada uno de un **Molino SAG** y dos molinos de bolas, para así continuar con la liberación de la calcopirita, y pueda ser recuperada en la etapa de flotación.

B) Área Húmeda: Es la segunda etapa de la Conminución (reducción de tamaño del mineral), comienza con la etapa de molienda, la cual se realiza mediante 2 líneas de producción descritas anteriormente. La molienda se realiza por vía húmeda donde el tamaño del mineral se reduce desde 6 [pulgadas] en el Molino SAG hasta 85% bajo 1.5 [pulgadas], material que es separado en el harnero principal, el material aceptado es enviado a una batería de hidrociclones donde es clasificado y enviado a la etapa de flotación en tamaños inferiores a 200 [micrones].

El material rechazado en el harnero principal es enviado a los canchadores secundarios por medio de un circuito de correas transportadoras donde es reducido a tamaños inferiores a 1.5 [pulgadas] y devueltos nuevamente al Molino SAG para su procesamiento. El material separado en la suspensión concentrada del hidrociclón es

enviado a los Molinos de Bolas donde es reducido y enviado a la Cuba del Molino SAG donde es bombeado nuevamente a la batería de hidrociclones. Posterior a la molienda se realiza la etapa de flotación, en donde se separa el concentrado de cobre del resto del material estéril en el mineral. Luego, se realiza una etapa de espesamiento que permite eliminar el agua del concentrado, para finalizar con la extracción del concentrado de cobre a través de los filtros cerámicos, obteniendo así el producto final con un factor de humedad de un 9%. Dentro de esta área húmeda, también se considera el tratamiento del mineral estéril, el cual se impulsa por la etapa de evacuación de relaves hacia los espesadores para cada una de las líneas de producción, que extrae el agua para recuperarla, e impulsa la pulpa de estéril al tranque de relaves por medio de **Trenes de Bombas** para ser depositado según la normativa ambiental vigente.

Figura N°4. Vista de Planta Concentradora Minera Candelaria.



(Reporteminero, 2021)

C) Área de Relaves: Minera Candelaria tiene un sistema de operación continua, la cual fundamenta su productividad en la continuidad operacional de sus equipos y procesos, es por esto que mantener sus equipos operativos es de vital importancia para conseguir las metas productivas y eliminar pérdidas.

Por otro lado, y como se mencionó en la introducción de este documento, en el proceso de la obtención del producto final que es el concentrado de cobre, los materiales inertes deben ser evacuados y conducidos a su destino final que es el tranque de relaves, razón por la cual y no menos importante que la producción de concentrado de cobre, es la de contar con la continuidad de la operación en la eliminación de estos materiales estériles ya que de no ser así, esto impacta directamente en la producción.

Figura N°5. Vista de espesadores de relaves, Fase 1 y Fase 2.



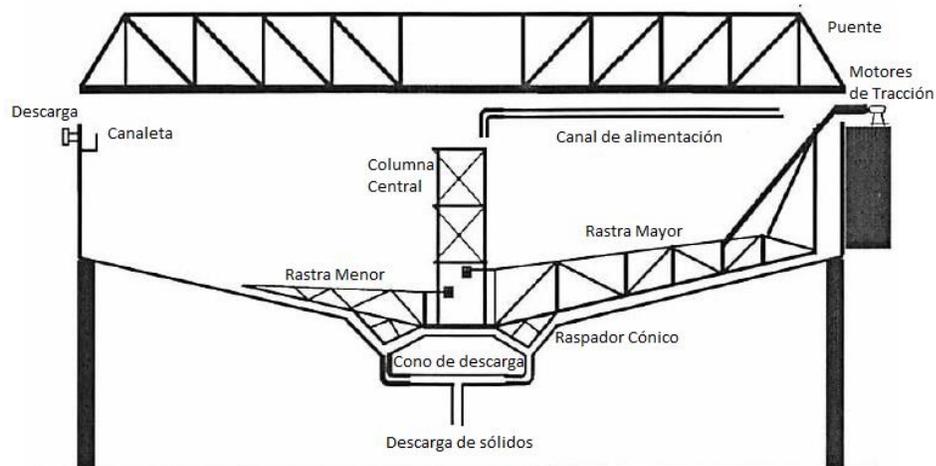
(Fuente: Imagen propia)

El Área de Relaves propiamente tal consta de dos espesadores de relaves, uno para cada línea de producción con una capacidad $400[m^3]$ cada uno. Estos recipientes de forma cilíndrica con fondo en forma de cono de gran ángulo, facilita la descarga de la pulpa. Es aquí donde se produce la sedimentación de las partículas sólidas en un medio fluido, bajo la fuerza de la gravedad. La operación consiste en separar de la suspensión un

fluido claro que sobrenada y un lodo bastante denso que contenga una elevada concentración de materias sólidas. Estas materias sólidas decantan al fondo del espesador y son arrastradas por rastrillos de movimiento lento hacia un orificio central de descarga. Para regular la decantación de las partículas sólidas se utiliza floculante, sustancia química que mejora la decantación, atenuando la velocidad de decantación de los sólidos, esto se logra por medio de una dosificación adecuada de [gr/ton] la cual es dosificada por medio de bombas, las cuales depositan la solución preparada en el centro del estanque, esto se hace para evitar el embancamiento de las rastras del espesador. El desecho de la etapa de flotación llega por un canal de alimentación a un recipiente alimentador situado en la parte central del estanque.

El fluido claro fluye hacia los bordes del depósito, es descargado por el rebose sobre el borde periférico.

Figura N°6. Espesador de columna central con tracción en la periferia.



(911 Metallurgist, 2016)

El agua que rebosa es conducida a través de una canaleta ubicada en la periferia del espesador antes mencionada hacia un cajón donde un grupo de bombas verticales llamadas Overflow la recuperan y es nuevamente ingresada a través de un circuito hidráulico al proceso.

Figura N°7. Canaleta periférica del espesador para recuperar el agua.



(Fuente: Imagen propia)

Figura N°8. Cajón de recuperación agua de rebose y grupo de Bombas Overflow.



(Fuente: Imagen propia)

El material sólido decantado y dirigido hacia el centro del espesador, es succionado por un grupo de bombas conectadas hidráulicamente en serie llamado **Tren de Bombas** y existen tres grupos de estas bombas, denominados **Tren A**, **Tren B** y **Tren C**.

Cada uno de estos trenes posee una bomba principal y cuatro bombas auxiliares, la bomba principal acoplada a un motor de 805 [HP] / 3300 [Volts] y las bombas auxiliares cada una de ellas conectada a un motor eléctrico de 3300 [Volts] y con una potencia de 603 [HP].

El motor de la bomba principal es operado eléctricamente a través de un Variador de Frecuencia (**VDF** de aquí en adelante) de 805 [HP], 3300 [Volts], con esto se puede controlar la velocidad del motor y con esto el flujo del relave que impulsa el Tren, el cual es dirigido al tranque donde es depositado.

Figura N°9. VDF Robicon de 805[HP] / 3300 [V]

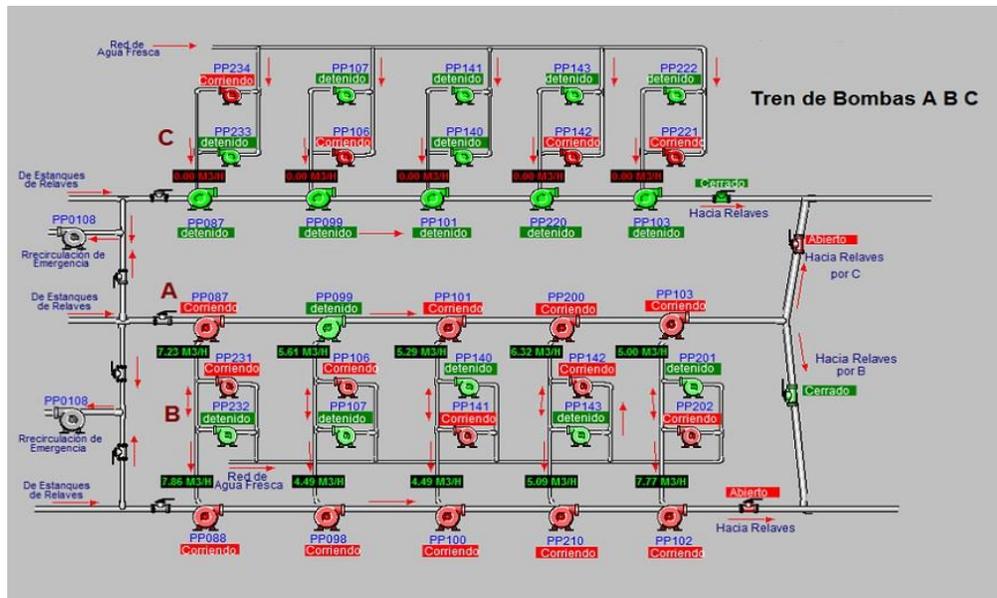


(Fuente: Imagen propia)

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

Para comprender de mejor manera que son los Trenes de Bombas se da una reseña de cómo están configurados, los equipos auxiliares que los apoyan y que función cumplen cada uno de ellos, junto con esto se entregan algunas definiciones para lograr entender de mejor forma el proceso.

Figura N°10. Trenes de Bombas A, B, C y circuito de bombas de agua de sello



(Fuente: Imagen propia)

3.1 COMPONENTES DE LOS TRENES DE BOMBAS

A continuación, se describen los componentes que conforman los trenes de bombas del Área Relaves. Como se mencionó anteriormente, cada uno de los tres trenes de bombas del área de relaves se compone de cinco bombas acopladas hidráulicamente en serie y cada una de ellas conectada mecánicamente a su respectivo motor eléctrico.

El motor conectado a la bomba principal (Descarga) es controlado a través de un VDF Robicon MT Perfect Harmony.

Estas bombas centrifugas se conectan de esta manera para que la descarga de cada bomba alimenta directamente a la succión de la siguiente, con esta configuración se logra transportar el gran caudal de relave hasta el depósito final que es el Tranque de relaves.

Figura N°11. Tren de Bombas C, punto de succión y punto de descarga.



(Fuente: Imagen propia)

Figura N°12. VDF Robicon MT Perfect Harmony, 805 [HP] / 3300[V].



(Fuente: Imagen propia)

El VDF es el encargado de operar el motor eléctrico que está conectado eléctricamente a él, controla las RPM (revoluciones por minuto), el torque o Par del motor, el voltaje, la corriente, es decir, las variables eléctricas del motor.

Figura N°13. Bomba principal de descarga acoplada a Motor Eléctrico de 805 [HP].



(Fuente: Imagen propia)

Figura N°14. Bomba y sus componentes acoplados a motor de 603[HP] / 3300[V].



(Fuente: Imagen propia)

En la configuración de cada bomba asociada a cada Tren de bombas, interactúan componentes auxiliares que cumplen la función de acoplar de manera mecánica cada motor a la bomba, el reductor cumple la función de reducir las RPM del motor en relación a las RPM que necesita la bomba para su óptimo trabajo, el acoplamiento cumple 2 funciones; unir mecánicamente el reductor – torpedo y también como fusible mecánico en caso de trabarse la bomba para que este se rompa y el torpedo acopla el impulsor de la bomba con el reductor por medio del acoplamiento.

Figura N°15. Bomba Centrífuga Warman, acoplada a su eje.



(Fuente: Imagen propia)

En los Trenes de Bombas A, B, C respectivamente, en esta aplicación (pulpa abrasiva, altas presiones, altos caudales, duras condiciones mecánicas, eventual rotación reversa, etc.), se emplean casi exclusivamente Bombas Centrífugas de Pulpa equipadas con Sello de Agua tipo prensa estopa.

Por lo tanto, el sistema de agua de sello es un factor de vital importancia. El agua tiene que llegar al sello con el caudal y la presión que cada Bomba de Pulpa necesita. Si esto no se cumple, aunque sea por un breve tiempo, se producen graves problemas.

Se debe disponer de una fuente de agua limpia y segura, que cumpla con las siguientes características principales:

- **Capacidad:** Suficiente para suplir el consumo máximo de todas las bombas de pulpa (en operación e inactivas), dentro del Tren.
- **Presión:** El agua de sello debe mantener una presión constante de 35 a 70 [Kpa] mayor que la presión de descarga de cada Bomba de Pulpa. En las bombas en serie, la presión de descarga de cada etapa es igual a la suma de la presión propia (generada por la bomba) más la presión de descarga de la etapa precedente. Por esto el agua de sello dispone de controles de Caudal / Presión automáticos e individuales para el sello de cada Bomba de Pulpa, para lo cual se utilizan Flujómetros.

Figura N°16. Conjunto de bombas de agua de sello Tren C.



(Fuente: Imagen propia)

Otros de los equipos adicionales que interactúan directamente con los Trenes de Bombas son las Válvulas, las hay de Cuchillo On-OFF neumáticas, Válvulas Zúrich On-Off neumáticas.

Las válvulas de Cuchillo On-Off, son las encargadas de permitir el paso del flujo de la pulpa proveniente del Espesador de Relaves.

Figura N°17. Conjunto de válvulas de cuchillo de Tren C.



(Fuente: Imagen propia)

Las Válvulas Zúrich On-Off, son las encargadas de permitir la salida del flujo del relave impulsado por el Tren de Bombas, la apertura de estas válvulas es comandada por unos sensores de diferencial de presión, ubicados tanto aguas arriba de la Válvula Zúrich como aguas abajo. La tubería que se encuentra aguas arriba de la válvula, en su interior hay una columna de agua, la cual está ejerciendo una presión hacia la válvula, cuando los sensores de diferencial de presión detectan que la presión del flujo impulsado por el Tren se iguala al de la columna, da el comando de apertura de la Válvula Zúrich para que el flujo de relave circule por los ductos de descarga hacia el Tranque de relaves.

La Columna de agua, antes mencionada, se genera cada vez que se limpia la línea de descarga de relave con agua limpia, cuando se realiza un cambio de Tren y este se detiene, para evitar que la pulpa del relave decante dentro de la línea y produzca el embancamiento de la línea de descarga. Esto se explica en el protocolo de operación del Tren de Bombas. (Anexo B)

Figura N°18. Conjunto de válvulas Zúrich de Tren C.



(Fuente: Imagen propia)

Dentro de la configuración del conjunto de las Válvulas Zúrich, está la válvula de sello, encargada de retener la columna de agua (relave) cuando el Tren de bombas se detiene, sea esto en una detención normal del tren o cuando ocurre una detención imprevista y evitar que esta se devuelva por la diferencia de nivel que existe en las líneas de descarga. La válvula de sacrificio cumple la función de cerrarse en el caso de que la válvula de sello falle. Esta válvula está diseñada para soportar el golpe de ariete que produce la columna de agua (relave). Estas válvulas operan (apertura o cierre) por medio de la señal que les entregan los sensores de diferencial de presión, cuando las presiones se igualan en ambos sensores, la válvula se abre, en caso contrario, estos sensores generan la señal de cierre de la válvula.

Figura N°19. Sensores de Diferencial de Presión Tren B



(Fuente: Imagen propia)

Los sensores de diferencial de presión como se mencionó, entregan las señales para el accionamiento de las Válvulas Zúrich, para entregar esta señal de apertura o cierre, estos sensores monitorean las presiones que se están produciendo en la línea, tanto a la entrada como a la salida del conjunto de válvulas, cuando las presiones se igualan, los sensores entregan la señal de apertura y cuando las presiones son desiguales o distintas, entregan la señal de cierre a las válvulas, para conseguir esto, estos están dispuestos uno a la entrada del conjunto de válvulas y otro a la salida.

Los trenes de bombas cumplen la función de succionar e impulsar los residuos estériles hacia el tranque de relaves, pero dentro de su funcionamiento se pueden dar distintas situaciones de operación según lo requiera el proceso, las cuales se detallan en su Protocolo de Operación.

3.2 DESCRIPCIÓN DE VDF ROBICON SIEMENS

Antes de conocer las características técnicas del equipo y el análisis de su funcionamiento, es importante señalar que el Área de Relaves es una de las etapas más críticas en relación a la continuidad operacional de la compañía, donde su evacuación de relaves fluctúa entre los $5.500[m^3/h]$ a $6.500[m^3/h]$ por cada Tren en servicio.

En el área de relaves se dispone de equipos de alta potencia donde se destacan los **VDF Perfect Harmony MT Robicon**, los cuales se encargan de controlar la velocidad, corriente del motor, flujo de la bomba principal acoplada a este, como lo habíamos descrito anteriormente, en cada uno de los Trenes, encargados de impulsar el relave desde los espesadores hacia el depósito final que es el Tranque de relaves.

Por lo antes mencionado, los VDF Perfect Harmony MT Robicon proporcionan una operación de velocidad variable, transformando la potencia de la utilidad con una frecuencia y tensión fijas a una potencia de frecuencia y tensión variable. Esta transformación se realiza electrónicamente, sin partes móviles.

Más precisamente:

- Los VDF Perfect Harmony Robicon no introducen distorsiones de armónicos significativas en el sistema de distribución de la planta. No se necesitan filtros de potencia. No hay problemas de interferencias con equipos sensibles ni de resonancia con condensadores de factor de potencia.
- Los VDF Perfect Harmony Robicon tienen un elevado factor de potencia para la utilidad, normalmente del 94% o superior en todo el rango de velocidades. No se necesita corrección del factor de potencia.
- Los VDF Perfect Harmony Robicon son casi silenciosos durante su funcionamiento, aún si el variador es sometido a su máxima potencia, esto aplica a los modelos que son refrigerados por agua, pero en nuestro caso, estos VDF son refrigerados por aire.
- Los VDF Perfect Harmony Robicon tienen una construcción completamente modular, tal que, si la situación lo amerita, un módulo defectuoso puede sustituirse en cuestión de minutos. Un complejo diagnóstico basado en un microprocesador localiza la ubicación de cualquier defecto.

3.2.1 SECCIÓN CELDAS

Los variadores de la serie Harmony consiguen este robusto rendimiento empleando tecnología suficientemente probada en una configuración modular. Los niveles de media tensión se obtienen añadiendo las salidas de múltiples celdas de potencia de baja tensión.

La topología típica de un circuito de potencia para un variador de la serie Perfect Harmony es de 3300 [Voltios], utilizando celdas de 690 [VAC]. Cada fase del motor es accionada por tres celdas de potencia conectadas en serie. Los grupos de celdas de potencia están conectadas en estrella con neutro flotante. Cada celda se alimenta de un secundario aislado de un transformador aislador integral. Los nueve secundarios tienen una tensión nominal de 690 [VAC], cada uno, la novena parte de la potencia total.

Las celdas de potencia y sus secundarios están aislados entre sí y de tierra para la tensión de salida nominal completa.

Con tres celdas de potencia de 690 [VAC] en serie por fase, un variador de la serie Perfect Harmony puede producir hasta 2070 [VAC] fase-neutro, o un Voltaje disponible máximo de 3300 [Voltios].

Figura N°20. Disposición de Celdas de Potencia en VDF.



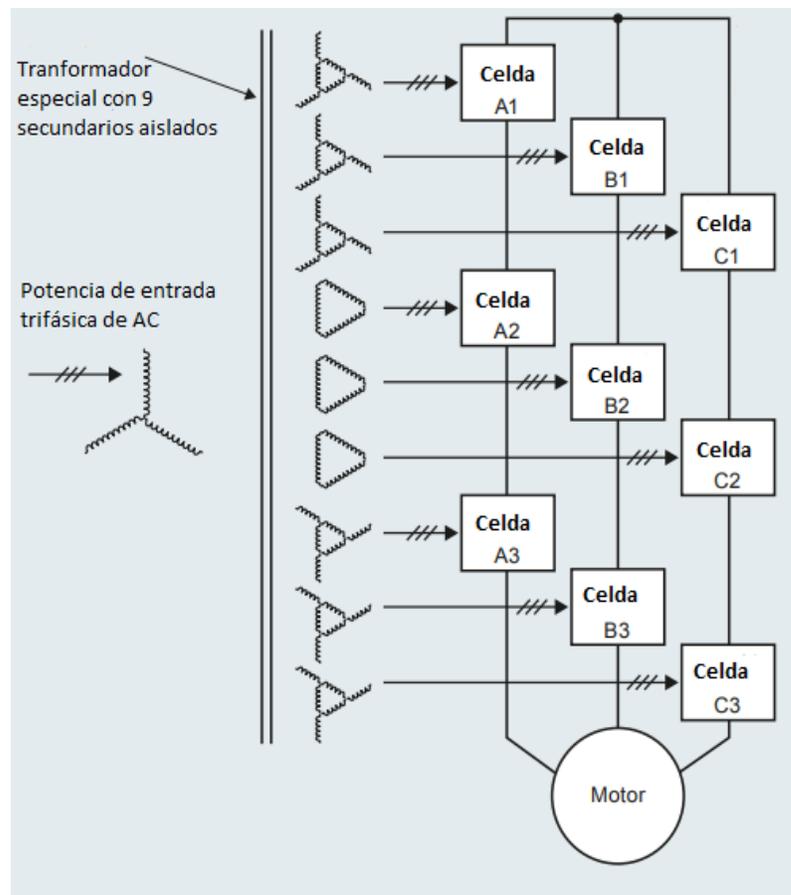
(Fuente: Imagen propia)

3.2.2 CONFIGURACIÓN DEL RECTIFICADOR

Cada entrada de celda de potencia se configura como un rectificador no controlado de diodos de seis impulsos. El transformador de entrada incluye un secundario dedicado hacia cada celda de potencia, donde los secundarios del transformador están dispuestos

en configuración triángulo y triángulo extendido con grados variables de desplazamiento de fase. Las configuraciones típicas de los VDF Perfect Harmony consisten en un mínimo de tres a un máximo de ocho celdas de potencia en serie por fase de salida, como se detalla en la figura número 2.12. La configuración efectiva del rectificador es:
 $3 \text{ celdas} / \text{ Fase} = 18 \text{ impulsos}$.

Figura N°21. Topología de VDF Perfect Harmony Robicon.



(Siemens Energy & Automation, Inc., 2008, págs. 6-3)

3.2.3 SISTEMA DE BYPASS EN CELDAS DE POTENCIA

Cada celda de potencia del variador puede equiparse con un contactor de bypass. El control maestro del VDF conecta este contactor automáticamente a la alimentación de control, si falla la celda de potencia asociada. Una vez que el contactor ha recibido alimentación, la celda dañada ya no es un componente eléctrico del sistema inversor, lo cual permite al VDF continuar funcionando.

Debido a que las celdas de cada fase de un variador Perfect Harmony están en serie, el bypass de una celda no tiene efecto sobre la capacidad de corriente del variador, pero la capacidad de tensión de salida se verá reducida. Normalmente, la tensión requerida del motor es aproximadamente proporcional a la velocidad, de forma que la velocidad máxima a la que el variador puede cumplir los requisitos de la aplicación se verá igualmente reducida. Por tanto, es importante maximizar la tensión del motor disponible tras el bypass de una o más celdas.

El sistema de bypass de celda avanzado, el modulador se comunica con el controlador de bypass y supervisa los fallos de hardware tales como **IOC** (sobre corriente instantánea), **ESTOP** (parada de emergencia) y fallos de alimentación. El controlador de bypass está configurado para controlar los contactores (mecánicos) del bypass de celdas. Tras detectarse un fallo en una celda, el procesador se comunica con el controlador de bypass para soslayar los fallos en las celdas. Además de hacer bypass de celdas, el controlador de bypass comprueba constantemente el estado de los contactores para verificar que es el requerido.

Figura N° 22. Gabinete de control y procesamiento.

Sistema de Control Maestro:

Tarjeta Moduladora

Tarjetas de interfaz de fibra óptica

Tarjeta de comunicaciones

Tarjeta de interfaz del sistema

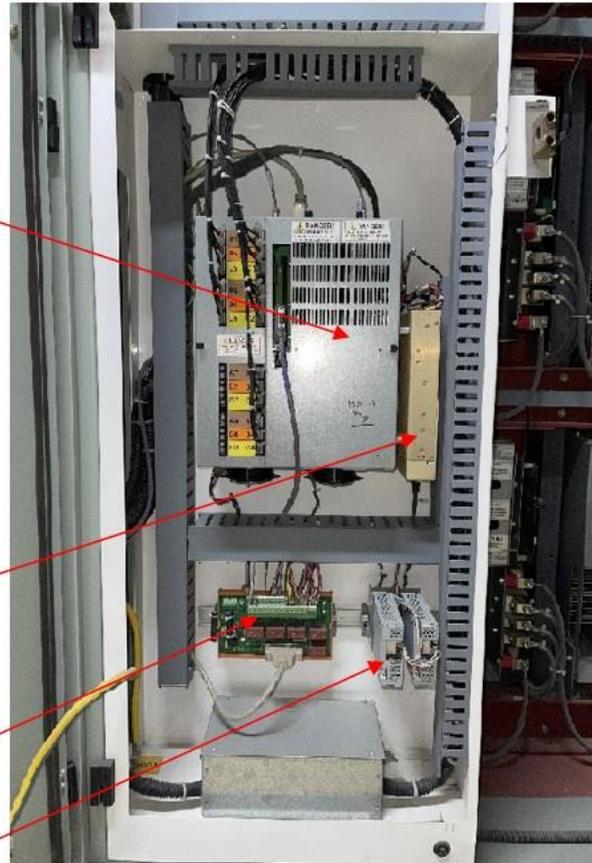
Tarjeta analógica a digital

Tarjeta de Microprocesador

Fuente de alimentación 12 Vdc
para control Maestro.

Tarjeta de señales análogas

Fuente alimentación 120 Vac para
sensores de corriente de VDF.

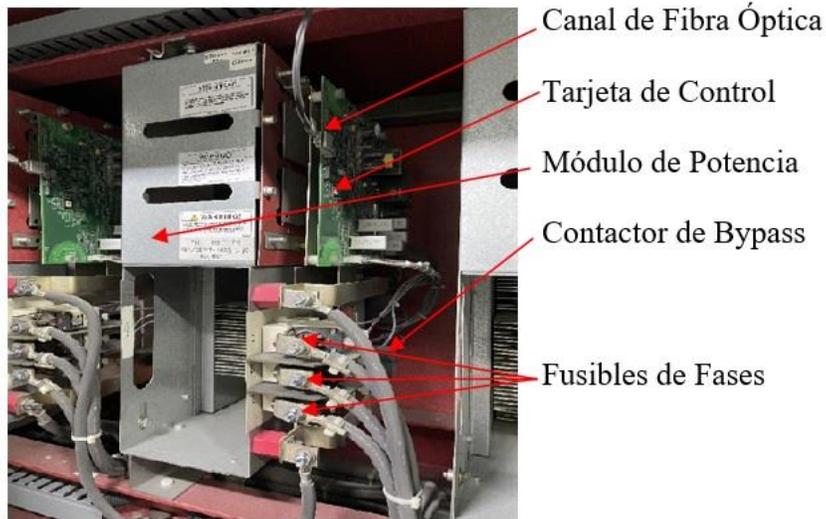


(Fuente: Imagen propia)

La interfaz de fibra óptica transfiere datos entre el modulador y las celdas a través de canales dedicados de fibra óptica. Cada celda recibe sus órdenes de disparo y señales de estado a través de un canal dúplex completo de fibra óptica.

El VDF Robicon MT Perfect Harmony es refrigerado por medio de aire, por medio de ventiladores que producen un flujo de presión de aire positivo.

Figura N°23. Celda de potencia.

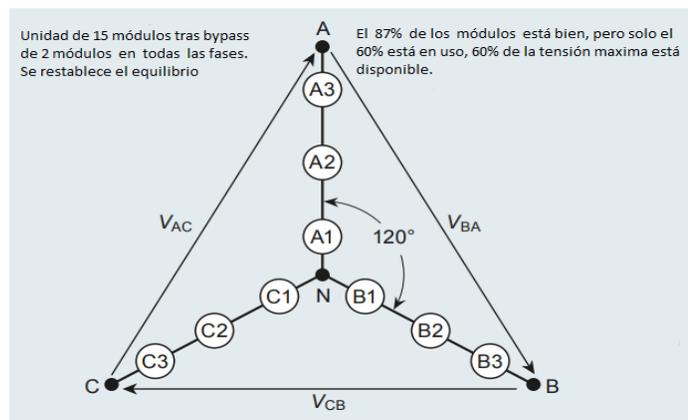


(Fuente: Imagen propia)

3.2.4 DIAGRAMA DE SISTEMA DE BYPASS EN CELDAS DE POTENCIA

El sistema de bypass permite dar continuidad y confiabilidad al proceso ante una falla imprevista, con esto se puede asegurar producción ante un problema mayor, pero esto va a depender de varios factores operacionales y de variables a controlar los cuales no vienen diseñados en el equipo.

Figura N°24. Salida de la unidad reequilibrada al pasar por alto la celda funcional.



(Siemens Energy & Automation, Inc., 2008, págs. 5-26)

3.3 DESCRIPCIÓN DE SWITCHGEAR SIMOPRIME SIEMENS

SIMOPRIME es una tecnología de Switchgear de media tensión (equipo eléctrico de maniobras) aislado en aire y con características de diseño modular. Características de Switchgear Simoprime:

- Enclavamientos entre puerta de alto voltaje y dispositivos de conmutación
- Rack-in, operaciones de rack-out del interruptor automático con puerta cerrada de alto voltaje
- Persianas y particiones metálicas, aterrizadas, partición clase: PM (partición metálica)
- Diseño probado de arco interno según IEC 62271-200, 17.5 [KV] hasta 40 [KA], 1 s
- Diseño probado de arco interno según IEC 62271-200, 24 [KV], hasta 25 [KA], 1 s
- Uso de interruptores automáticos de vacío sin mantenimiento
- Flexibilidad debido a dos tipos de diseño de unidades extraíbles:
 - Tipo extraíble (Cassette) y Truck type
- Operación segura debido a la puerta de alto voltaje cerrada durante todas las operaciones de conmutación, incluidas operaciones manuales de emergencia, solo disponible hasta 17.5 [KV]

Figura N°25. Vista de Celdas Switchgear Simoprime Siemens.



(assets.new.siemens.com, pág. 9)

Figura N°26. Interruptor de Media Tensión de Switchgear Simoprime de 5,7 [Kv], vista frontal y lateral respectivamente



(Fuente: Imagen propia)

Dentro de los beneficios que aporta el uso de este tipo de Switchgear Simoprime están:

- Salva vidas, por la alta seguridad que ofrece por la robustez del diseño
- Rápido retorno de la inversión
- Tranquilidad gracias a la operación a prueba de fallos
- Producto Siemens DNA
- Soluciones tecnológicamente sofisticadas pueden ser implementadas con el Interruptor Simoprime

Para mayor información de este equipo remitirse al Anexo C.

3.4 CABLE MINERO

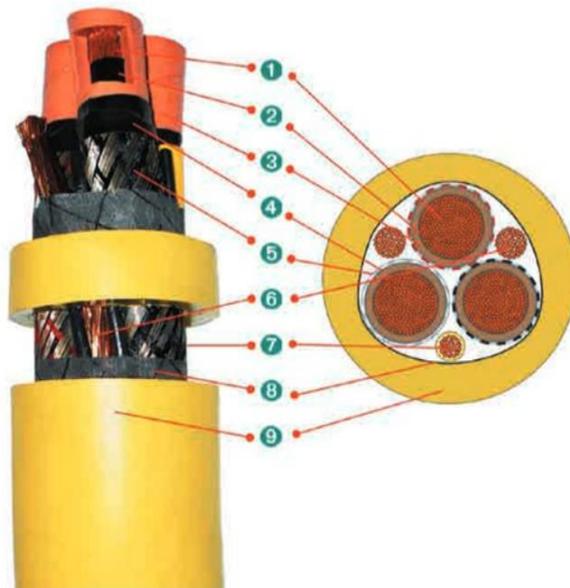
El Cable minero, es un conductor armado, compuesto por varios conductores contenidos en un solo cuerpo. La particularidad que tiene este tipo de conductor es que permite poder realizar el conexionado, por lo general del tipo trifásico, muy utilizado en el campo de la minería o de la industria, el cual utiliza muy poco espacio donde este puede ser instalado. Para la implementación y como parte de la solución del problema se utilizó este conductor para poder interconectar las celdas Switchgear Simoprime de media tensión con el VDF Robicon y a su vez con el motor principal del tren “A y del tren “B”. Sobre sus características técnicas, podemos mencionar que es del tipo SHD, Triconductor de cobre extra flexible, aislación de EPR, 3 tierras desnudas y cubierta de TPU. Los hay para tensiones de: 2 [Kv], 5 [Kv], 8 [Kv], 15 [Kv] y 25 [Kv].

Figura N°27. Estructura de Cable Minero.



(imcoex, s.f.)

Figura N°28. Disposición de conductores en Cable Minero.



(imcoex, s.f.)

1. **Conductores de Fase:** cables de cobre blando extra flexibles, clase 1.
2. **Cinta Semiconductora:** aplicada helicoidalmente sobre el conductor.
3. **Aislación:** goma de Etileno Propileno (EPR).
4. **Cinta Semiconductora:** aplicada helicoidalmente sobre la aislación.
5. **Pantalla** metálica de hilos de cobre estañados entretreídos con hilos de poliéster coloreados (rojo-negro-blanco) para la identificación de las fases, 60% mínimo de recubrimiento.
6. **Conductores de tierra:** 2 o 3 conductores de cobre flexibles desnudo. 3 conductores en el SHD-GC.
7. **Conductor de control (Piloto):** conductor de cobre flexible, aislado con HDPE de color amarillo. Disponible solo en el SHD-GC.

8. **Cinta separadora** sobre el conjunto cableado, más un refuerzo textil formado por hebras de poliéster de altísima resistencia a la tracción, aplicadas en forma entrecruzada.
9. **Cubierta:** polietileno clorosulfonado (Hypalon TM) coloreado (colores o materiales de la cubierta disponibles a pedido).

Las cualidades del cable minero SHG son variadas dentro de las cuales podemos nombrar; su flexibilidad, resistencia al aceite, resistente al agua, resistencia a la intemperie, resistencia a impactos, retardante a la llama, trabaja muy bien a bajas temperaturas y reducido radio de curvatura lo que permite poder ser utilizado en instalaciones con espacios estrechos como banco-ductos o sobre escalerillas eléctricas con curvas muy cerradas.

3.5 TERMINAL DE OJO 2/0 AWG

Parte de los materiales utilizados para poder realizar las conexiones eléctricas en media tensión en el proyecto del Bypass eléctrico fueron los terminales de ojo, el cual posee las siguientes características:

- El terminal de Ojo 2/0 AWG es un conector de cobre estañado con una perforación, para trabajo pesado, de alta conductividad.
- Resistente a la corrosión.
- Existen dos tipos de terminales para terminaciones de cables en baja tensión (BT) y media tensión (MT) hasta 35 [Kv].
- Cuenta con una certificación **CE** que representa la conformidad de un producto y que cuenta con los requisitos esenciales de seguridad y salud impuestos por la unión europea.

- También posee certificación **UL** (Underwriters Laboratories) relacionada con la seguridad, validación de pruebas, inspección, auditoría.
- Sus dimensiones son: Sección 11 [mm], ancho 21 [mm], largo 67 [mm], alto 2,5[mm].

Figura N°29. Terminal de Ojo 2/0 AWG.

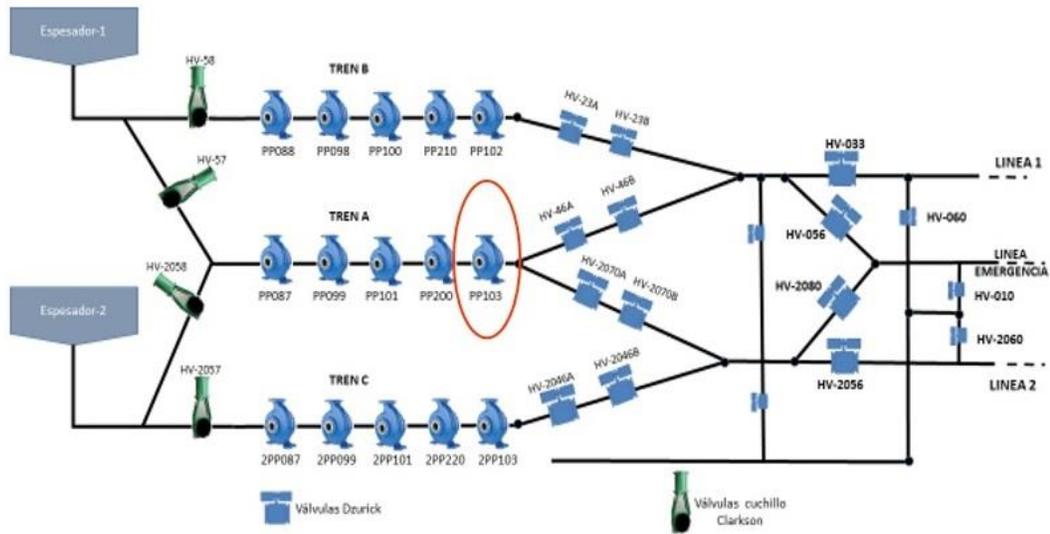


(vitel, s.f.)

CAPÍTULO 4: CONTEXTO DEL PROBLEMA

Para poder lograr una continuidad operacional de estos equipos, durante el proceso dos de estos trenes están en servicio y el tercero se mantiene detenido, siendo este último utilizado en caso de que uno de los trenes en servicio falle, por mantención programada a uno de estos trenes o por cambio en la operación de uno de ellos por motivos de mejora en el proceso.

Figura N°30. Circuito de Trenes de Bombas y válvulas asociadas a cada una de las líneas de descarga de relaves.



(Fuente: Imagen propia)

Conocido el contexto operacional del área de Relaves en el capítulo anterior, a continuación, se describe la falla producida en una de las celdas de potencia del VDF del Tren A correspondiente a la bomba PP103, destacada en la figura N°30 y como consecuencia de esto su destrucción total. La importancia de la continuidad operacional

de estos equipos y el impacto que este evento significativo tuvo en la producción también serán explicados.

El trabajo de Titulación nace a raíz de esta problemática real ocurrida en terreno. Para el análisis del trabajo efectuado y las consecuencias de estos sobre la producción, serán explicados más adelante los cuales expondrán la metodología utilizada, materiales o elementos de apoyo y los resultados finales.

Para concluir, se presentarán los resultados obtenidos y como estos hasta el día de hoy permiten mejorar la continuidad del proceso y dar confiabilidad en la operación de los equipos involucrados en la producción.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a los datos recopilados el día 13 de enero del 2015 en Área Relaves se produce de forma imprevista la detención de la bomba principal del Tren A, posteriormente el equipo pierde comunicación con Sala de Control producto de lo cual se solicita la asistencia de personal electricista para atender la falla.

El Variador de Frecuencia asociado al Tren A se incendia lo cual genera la detención del equipo, las causas que provocaron esta falla catastrófica serán analizadas más adelante.

Esta falla del VDF trajo como consecuencia el dejar fuera de servicio el Tren A, producto de lo cual se debió restringir la producción, debido a que el Tren C, que se encontraba en reparación, no era posible el poder habilitarlo para controlar la emergencia.

Figura N°31. Variador de Frecuencia TREN A siniestrado.



(Fuente: Imagen propia)

- Como se mencionó en la definición del problema, se entrega un breve análisis de la falla en VDF Robicon Siemens asociado a la bomba principal PP103 correspondiente al TREN A.

Cabe señalar que los Trenes A y B se encontraban en servicio y que el TREN C estaba fuera de servicio por mantención programada, por lo cual no se contaba con la disponibilidad inmediata de este equipo para ponerlo en servicio y poder controlar la emergencia.

En la Planta de Molienda se procede a la detención del Molino SAG 1 junto con toda la Línea 1 de producción, esto debido a que la cantidad de flujo y la concentración de sólidos producidos en cada una de las líneas de producción no permite poder operar ambas líneas de producción con un solo TREN en servicio en el área de relaves.

4.2 ANÁLISIS DE FALLA DE VDF ROBICON SIEMENS

Se detalla el análisis de la falla producida en el VDF Robicon Siemens, cabe señalar que para este análisis se contó con el asesoramiento de Ingeniero de campo del fabricante Siemens, quien, en conjunto con personal Electricista de la Compañía, realizaron la investigación que arrojó los siguientes antecedentes que se detallan a continuación:

- No es posible recuperar los datos relacionados con la falla desde el mismo VDF siniestrado ya que este se destruyó completamente.
- De acuerdo a informes de falla recopilados desde el VDF con anterioridad a este evento, se encontraba con una celda de potencia en modo Bypass desde hace 11 meses, ya que no se contaba con el repuesto en stock para su reemplazo, el VDF estaba trabajando al 85% de su capacidad total de potencia eléctrica casi de manera permanente, por los requerimientos de la operación.
- La Sala Eléctrica no estaba con su presurización óptima, razón por la cual, la atmosfera se encontraba con contaminación de polvo, lo cual produjo la saturación de los filtros de aire del VDF, acumulación de polvo al interior del mismo, en especial en las celdas de potencia y con esto el aumento de la temperatura al interior de equipo. Cabe recordar que estos VDF disipan la alta temperatura generada al interior de los mismos por medio de circulación de aire forzado.
- La mantención inadecuada (ya que no se contaba con las recomendaciones de mantención por parte del fabricante) y con la falta de periodicidad debido a una deficiente planificación de las mantenciones del equipo (entre el departamento de mantención y el departamento de operaciones) fue uno más de los factores que se sumaron al evento.

Finalmente, producto del análisis y resultado de la investigación concluyó que la falla y posterior incendio del VDF se debió a la alta Temperatura generada al interior del equipo, sumado a las condiciones ambientales y de operación.

4.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Como propuesta de solución a continuación se desarrollarán los objetivos específicos planteados en la introducción de este trabajo:

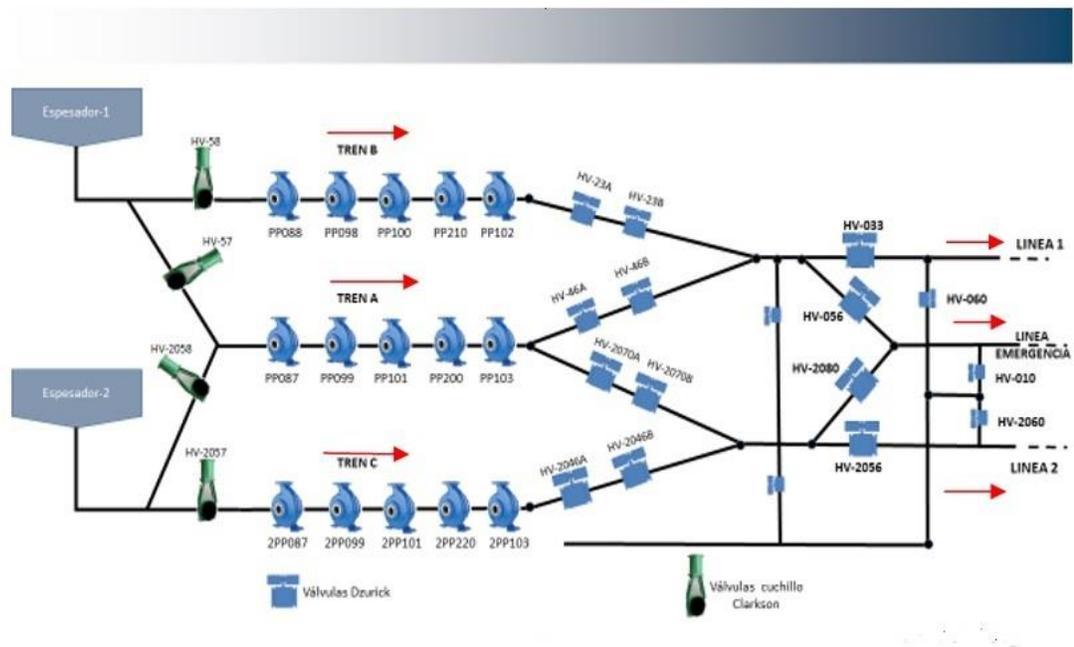
- a) Análisis de operación de trenes de bombas y funcionamiento de VDF MT Robicon Siemens.
- b) Propuesta y metodología de trabajo e implementación de Bypass eléctrico para lograr la continuidad y estabilidad del tren de bombas.
- c) Optimización de operatividad de tren de bombas de área relaves, ante futuras fallas.
- d) Análisis de resultados operacionales y económico.

4.4.1 ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE TRENES DE BOMBAS

Los trenes de bombas ya descritos tanto en su composición como también de los equipos auxiliares que interactúan con estos durante su funcionamiento están descritos en el Marco Teórico, por lo que en este apartado solo nos referiremos a su operación como tal.

Tanto para la puesta en servicio como para la detención de un Tren de Bombas, se debe considerar una secuencia de operación y esta consiste en poner en servicio de manera secuencial las bombas y para ello se comienza desde la primera bomba ubicada en la entrada del Tren (Succión) y así sucesivamente hasta poner en servicio la bomba principal que es controlada por el VDF. (Descarga)

Figura N°32. Distribución y configuración de los trenes de bombas A, B y C.



(Fuente: Imagen propia)

En la figura N°32, se observa la configuración de cada uno de los trenes de bombas A, B y C. Haciendo un análisis de la secuencia de partida, tomando como ejemplo el Tren B, esta sería la siguiente: Entra en servicio PP088, luego PP098, le sigue PP100, posteriormente PP210 y por último la bomba principal PP102 que como bien mencionamos esta bomba es controlada por un VDF. Para la detención del tren de Bombas se aplica la misma secuencia, pero en forma inversa. La configuración para cada tren de estar conectadas las bombas en serie, es decir, la salida de una bomba alimenta la entrada de la siguiente, es para poder transportar el gran caudal de relave generado en el proceso de la obtención del concentrado de cobre y el uso del VDF en la bomba principal no es otro que el de poder controlar el flujo total del Tren de bombas en servicio, recordemos que deben estar dos trenes de bombas en servicio, uno para cada espesador de relaves.

Se puede observar también en la Figura N°32 las distintas combinaciones que se pueden realizar con las líneas de descarga, a través del juego de válvulas que están dispuestas en el circuito hidráulico, así por ejemplo se pueden realizar descargas tanto por la línea 1, 2 o de emergencia, dependiendo con que trenes se esté operando en el momento. La línea de emergencia cumple la función de que, si se produce una falla en la descarga de la línea 1 o la línea 2, ésta entra en servicio, para lo cual es de suma importancia el poder contar con la operatividad del Tren que se encuentra Stanby, por la probabilidad de tener que hacer algún cambio de tren para poder seguir operando de forma normal y dar respuesta a la emergencia.

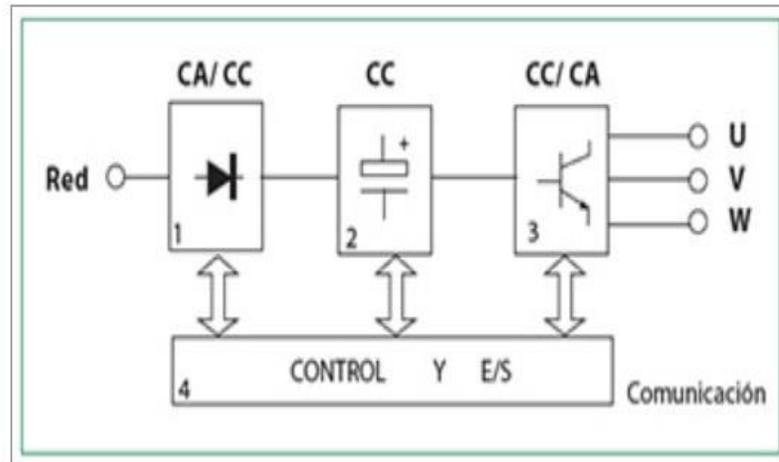
Dentro del uso de los trenes de bombas y de acuerdo a las necesidades que demande el proceso, se pueden realizar distintas operaciones o maniobras con los equipos, como puede ser, por ejemplo, la limpieza de la línea de descarga, sea esta la línea 1, la línea 2 o la línea de emergencia, hay otras operaciones más las cuales están descritas en el Protocolo de Operación de trenes de Bombas. (Anexo B)

4.4.2 ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO VDF ROBICON SIEMENS

Se comenzará con el análisis de funcionamiento, puesto que esto es el punto principal de la falla, ya que estos equipos, conocidos como VDF, son dispositivos electrónicos que permiten el control de la velocidad de rotación de motores eléctricos de inducción, en especial motores trifásicos de inducción y rotor sin bobinar (motores de jaula de ardilla) y que en la configuración de operación aplicada, cumple una función muy importante, que es la de poder controlar el flujo total resultante del Tren de bombas.

El funcionamiento de este VDF Rodicon se puede esquematizar como se muestra en la figura siguiente:

Figura N°33. Diagrama en bloques de un VDF.



(Revista ElectroIndustria, s.f.)

Para poder comprender de mejor manera la importancia de este equipo en particular en la operación del tren de bombas, se necesita profundizar de manera muy breve como este equipo logra controlar la rotación del motor que está conectado eléctricamente a él, ya que uno de los componentes de la etapa de potencia fue el que falló y provocó la emergencia descrita en la introducción de este documento.

En el diagrama de la figura N°33 podemos reconocer los diversos componentes de estos dispositivos:

El Rectificador (CA / CC) realiza la función de transformar la corriente alterna, sea esta monofásica o trifásica, en una corriente continua mediante diodos rectificadores. **El Bus de continua** (CC) constituido por condensadores de gran capacidad y a veces también bobinas, almacenan y filtran la corriente alterna rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad (corriente) requerida por el motor. **Etapa de salida** (CC / CA) desde la tensión del bus de continua, un ondulator convierte esta energía en una salida trifásica con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salidas variables. Como elementos de conmutación,

se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO, entre otros y es en esta etapa donde se produce la falla, con consecuencias catastróficas para el VDF.

Lo más destacable del funcionamiento de este equipo, es el hecho que permite controlar el arranque del motor y evitar el estrés mecánico que esto significa, tanto para el eje del motor, sus descansos o rodamientos, la bomba acoplada al eje del motor, también controla la velocidad de giro del motor y con esto el flujo del tren que es lo más importante en la operación de estos equipos, y así también al momento de realizar la detención del motor, lo que demanda su disponibilidad por la operación continua que tiene el proceso.

4.5 PROPUESTA DE TRABAJO

La propuesta de trabajo está dividida en Metodología de trabajo e Implementación del Bypass eléctrico.

Este trabajo de titulación nace de la necesidad de dar continuidad a la operación. Como consecuencia de la falla del VDF y su posterior destrucción se necesita buscar una solución inmediata al problema, después de realizar un análisis del conexionado del equipo afectado se decide implementar un Bypass eléctrico en Media Tensión que permita poder operar en forma alternada el Tren de bombas A o el Tren de bombas B, con el Variador de Frecuencia dedicado que posee hasta ese momento el Tren B.

Se plantea la idea del Proyecto a la Gerencia de Mantenimiento, la cual autoriza su implementación, asignando los recursos materiales como humanos.

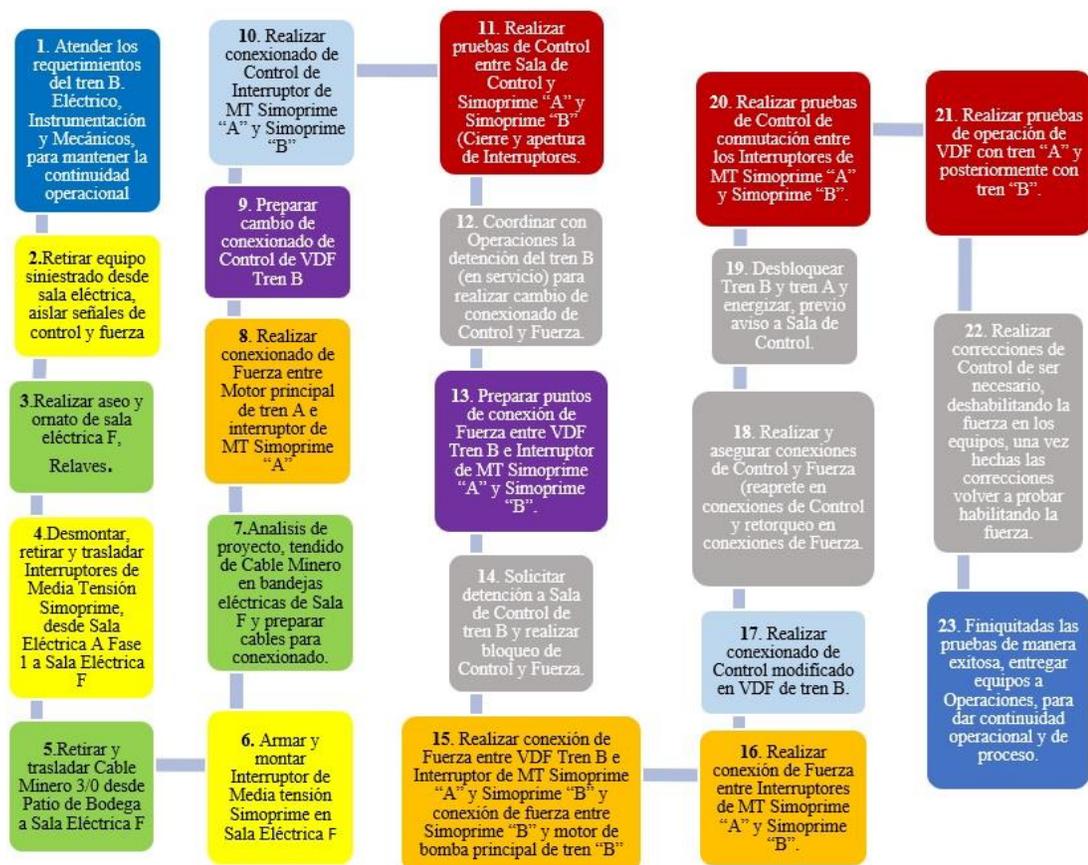
La ejecución del proyecto implica la realización del mismo en etapas, producto que se encontraba en operación la línea 2 de producción, por lo cual el Tren B que está asignado a esa línea también se encuentra en servicio.

4.5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo implementada se realiza en varios pasos, porque en una primera instancia se necesita poder dar continuidad a las operaciones y por lo mismo a la producción, a pesar de no contar con la disponibilidad de uno de los trenes de bomba por parte del departamento de operaciones, por lo tanto, el departamento de mantención, encargado de realizar los trabajos de mejora debió en reiteradas ocasiones coordinar los trabajos a ejecutar con operaciones, para no afectar la continuidad del proceso (Línea 2).

A continuación, se describe el paso a paso del desarrollo de la metodología de trabajo, a través de un flujo de cronología de actividades.

Figura N°34. Flujo de cronología de Trabajo.



(Fuente: Imagen propia)

Nota: Estas actividades están destacadas en colores de acuerdo a las distintas actividades en cada una de las etapas, los cuales se describen a continuación.

Azul: Asegurar y dar continuidad operacional.	
Amarillo: Retiro, desarme y armado de equipos.	
Verde: Actividades varias: aseo, traslado, montaje.	
Naranja: Conexionado de cables de fuerza.	
Purpura: Preparación de conexionado.	
Agua marina: Conexionado de Control.	
Rojo oscuro: Pruebas de operación.	
Canela: Coordinaciones y acciones.	

A continuación, se describe paso a paso las distintas actividades que se ejecutaron para poder desarrollar e implementar el proyecto del Bypass eléctrico:

Etapa 1. Se coordina personal de Mantenimiento de Turno, para atender los requerimientos y mantener la continuidad del servicio de los equipos del área de Relaves por la criticidad operacional, esto implica en atender las posibles fallas o detenciones de equipos, minimizar los tiempos de respuesta y con esto lograr mayor eficiencia y disponibilidad de equipos.

Etapa 2. Se realiza bloqueo de tren A y se realiza desconexión de control y fuerza, para el retiro del equipo siniestrado desde la sala eléctrica.

Etapa 3. Se coordina la limpieza y ornato del lugar, para poder realizar los trabajos de mejor manera y con seguridad.

Paralelamente mientras se realizan estos trabajos, se reúnen los materiales y equipos a utilizar para el proyecto.

Para llevar a efecto la implementación y desarrollo del trabajo, este se realiza en un tiempo de 18 horas continuas, con dos grupos de trabajo de 12 horas cada uno, compuestos por personal electricista administrativo y personal electricista de turno.

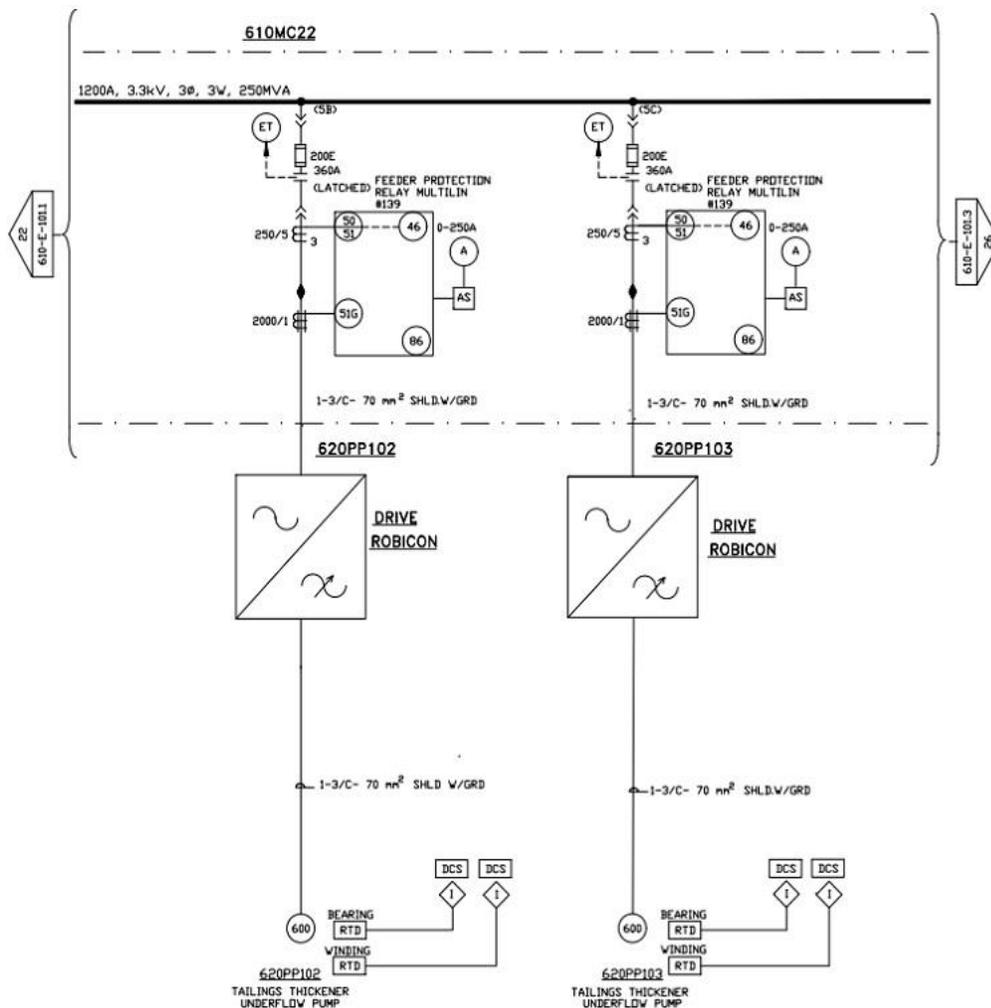
El contar con los recursos tanto humanos, con personal calificado, como con los recursos materiales fue crucial ya que con esto no se presentaron demoras en la ejecución de los trabajos asignados en las distintas etapas que esta requería.

4.5.2 IMPLEMENTACIÓN DE BYPASS ELÉCTRICO

Para la implementación del proyecto fue necesario realizar un análisis del accionamiento eléctrico original dispuesto para el cada tren y en particular para el tren A. En la **Etapa 7** de la cronología de trabajo, se realizó este análisis que permitió poder comprender donde sería desarrollado e instalado el Bypass eléctrico.

Se coordinaron los grupos de trabajo, se asignaron las tareas que se debían realizar, con la finalidad de no producir interferencias en el desarrollo de estas, esto fue muy importante ya que se debía realizar el proyecto en el menor tiempo posible, respetando las normas de seguridad eléctricas, protocolos diseñados para salvaguardar la integridad y seguridad de las personas involucradas en los trabajos eléctricos.

Figura N°35. Plano eléctrico con la configuración original del accionamiento de las bombas principales del TREN A PP102 como del TREN B PP103.



(Candelaria P. L., 1992)

Para la implementación del Bypass eléctrico entre el VDF del TREN B con respecto a los motores de las bombas principales de los Trenes A y B, como se mencionó en la **Propuesta de Solución** se muestra a través de la figura N°35 cómo estaba configurado

el accionamiento de cada bomba principal de los trenes A y B. En ella podemos observar la configuración original implementada de cada tren con su respectivo VDF.

El desarrollo de un Bypass eléctrico logra poder operar de manera alternada la bomba principal del Tren A o del Tren B con el VDF dedicado hasta ese momento que posee el tren B, cabe mencionar que para poder realizar este nuevo accionamiento eléctrico se considera el uso de Celdas Switchgear SIMOPRIME, equipos de media tensión encargados de realizar la conmutación o Bypass eléctrico entre ambos motores.

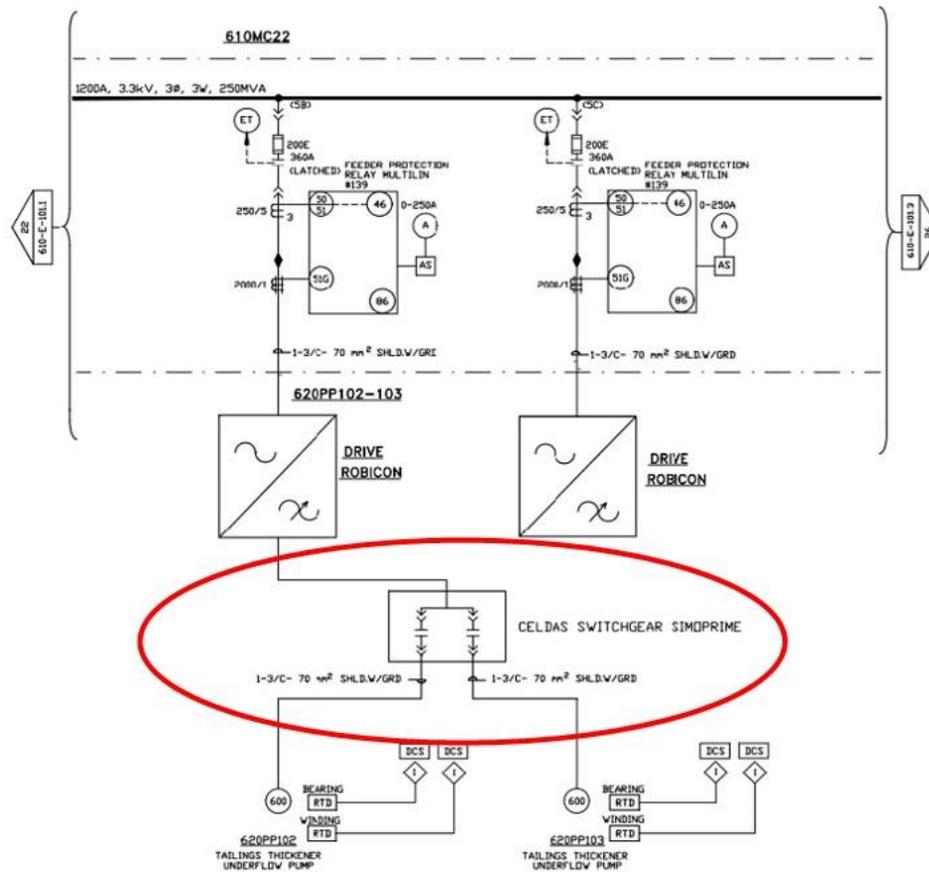
Para la implementación de este proyecto se contaba con los materiales a ser utilizados, ya que estos se mantienen como stock permanente de la compañía, con respecto a los equipos de accionamiento, que en este caso son las celdas de media tensión Switchgear SIMOPRIME del fabricante SIEMENS, estas se encontraban en una de las salas eléctricas de la planta Concentradora, para un proyecto a futuro, puntualmente en la sala eléctrica A.

Etapa 4. Se procede a desanclar del piso y desmontar las celdas Simoprime y retirarlas desde la sala eléctrica A para ser trasladadas a la sala eléctrica F. Personal mecánico apoyó este proceso debido a las maniobras de retiro desde sala eléctrica A de las celdas, así como por el izaje de estas y traslado en camión pluma a la sala eléctrica F y su posterior instalación.

Etapa 5. Se retira desde patio bodega y es trasladado a la sala eléctrica F, para esto también se contó con la colaboración de personal mecánico por el uso de equipos de izaje, por el peso del cable, aproximadamente 680 [Kg] (60 [m]).

A través de la figura N°36 se puede apreciar el plano con el nuevo accionamiento eléctrico implementado para los motores de las bombas principales del Tren A y del Tren B, por medio de las Celdas Switchgear Simoprime, y controlando el funcionamiento de los motores a través del VDF antes dedicado exclusivamente para el tren B (PP102).

Figura N°36. Plano eléctrico con accionamiento modificado de las bombas principales del TREN A PP102 como del TREN B PP103, utilizando Celdas Switchgear Simoprime.



(Candelaria P. L., 2015)

Para el desarrollo del Bypass eléctrico, se debió coordinar junto con el departamento de Operaciones, las detenciones, desenergizaciones y bloqueos de equipos, en ciertas etapas del trabajo, recordemos que mientras estos se ejecutaban, se continúa operando la línea 2 de producción, por lo que fue crucial el poder tener una buena comunicación y coordinación al momento de solicitar los equipos.

Etapa 6. Ingresadas en la sala F, las celdas Simoprime, son posicionadas, ancladas al piso y armadas por personal del departamento eléctrico. Posteriormente se realizan las adaptaciones en las celdas para la canalización de fuerza y control.

Etapa 7. Se realiza un análisis de la configuración original del accionamiento del tren A, por medio de planos eléctricos para poder comprender de mejor manera dónde y cómo será implementado el Bypass eléctrico. Para el conexionado de los equipos se utiliza cable minero 6 AWG de 8[Kv] tanto de los motores hacia las celdas Simoprime, así como de estas hacia el VDF del TREN B, este es tendido e instalado sobre las escalerillas eléctricas dispuestas en la Sala eléctrica lo que facilita su conexionado y disposición, no así por su peso, ya que su instalación demandó esfuerzo físico y maniobras para evitar dañarlo por roce o fricción en su montaje.

Dentro de la ferretería que se utiliza están los terminales de ojo, que en este caso son de medida 6 AWG, pernos, tuercas y golillas. Materiales para confeccionar mufas (aislación en el punto de unión entre el conductor y el terminar de Ojo), para las conexiones eléctricas de media tensión, además de algunos elementos aislantes para revestir algunos puntos de roce por donde el cable minero es instalado.

Etapa 8. Se realiza conexionado de fuerza entre la Celda Simoprime “A” y el motor de la bomba principal PP103 TREN A.

Etapa 9. Se prepara el cambio de conexionado de control tanto para el VDF del Tren B así como el control nuevo para las celdas Simoprime “A” y celda Simoprime “B”.

Etapa 10. Se realiza el conexionado de control de las celdas Simoprime” A” y Simoprime “B”. Cabe señalar que los cables de control también son dispuestos por escalerillas dedicadas, ya que sus señales son calificadas como corrientes débiles.

Etapa 11. Se realizan pruebas de control desde DCS con las celdas Simoprime “A” y “B”, comandos de cierre y de apertura, en ambos equipos, para verificar la conmutación entre ambos.

Etapa 12. Se coordina con sala de Control la detención del Tren B para realizar cambio de conexión de fuerza y de control del VDF Tren B.

Etapa 13. Se preparan los puntos de conexión de fuerza entre el VDF del tren B y las celdas Simoprime “A” y Simoprime “B”.

Etapa 14. Se solicita detención de Tren B y se realiza bloqueo de Fuerza y control, esto con la finalidad de poder realizar los trabajos con todos los protocolos de seguridad.

Etapa 15. Se realiza conexión de fuerza entre el VDF tren B y celdas Simoprime “A” y celda Simoprime “B” y se realiza conexión de fuerza entre celda Simoprime B y motor principal de tren B.

Etapa 17. Se realiza conexión de” control modificado” en VDF, a contar de este momento el VDF pasa a ser un equipo “independiente” y no dedicado, como lo era antes solo con el tren B.

Etapa 18. Se procede a chequear y verificar las conexiones tanto de fuerza como de control, en el caso de las conexiones de fuerza esto consiste en repasar el aprete de uniones eléctricas de los terminales de ojo en las barras de fuerza por medio de llave dinamométrica (llave de Torque) cuyo torque debe ser no mayor a 60 [Lb/Pie] para pernos de acero grado 5, utilizados en este proyecto. Para las conexiones de control, esto consiste en revisar punto a punto la conexión, ejerciendo un leve tirón del conductor de control, para verificar que se encuentra bien conectado.

Etapa 19. Se da aviso a la Sala de control para posteriormente desbloquear y energizar equipos de Tren A y Tren B.

Etapa 20. Se realizan posteriormente pruebas de control del Bypass eléctrico, por medio del accionamiento de conmutación entre las celdas Simoprime A y Simoprime B, las cuales son exitosas.

Etapa 21. A continuación, se realizan pruebas de operación con el VDF y la celda Simoprime A y en conjunto con todas las bombas del Tren A, cuyo resultado fue positivo, estas pruebas consistieron en realizar la secuencia de partida del tren A, regular flujo del tren a través del VDF y su detención total. Una vez detenido el tren A se procede a realizar la misma prueba de accionamiento, pero con el tren B, para esto, se selecciona, realizándose la conmutación de las celdas “A” y “B” y procediendo con las pruebas, obteniéndose los mismos resultados satisfactorios.

Etapa 22. No se debió realizar ninguna corrección en el control del accionamiento del Bypass eléctrico, debido al buen trabajo realizado por parte del departamento eléctrico de mantenimiento de la Compañía.

Etapa 23. Una vez finiquitadas las pruebas de accionamiento y de operación de los trenes, se procede a entregar los equipos a la sala de control, para que dispongan de ellos para la operación del proceso.

Cabe señalar que aparte del control eléctrico habilitado para el accionamiento alternado de las celdas Simoprime, también el departamento de Ingeniería realizó modificaciones en los programas de control de los trenes de bombas, implementando una lógica segura para los comandos de selección de las Celdas Simoprime, así como para la conmutación de las mismas.

Figura N°37. Celdas Simoprime “A” y “B” instaladas y habilitadas.



(Fuente: Imagen propia)

No solo el conexionado de fuerza es necesario para poder implementar el Bypass eléctrico, también se debe considerar el control asociado para el accionamiento de las celdas Simoprime, del VDF y del TREN que se va a utilizar en el proceso, sea este el TREN B o el TREN A de manera alternada.

Parte del desarrollo del proyecto del Bypass eléctrico fue también realizar la modificación del control existente hasta ese momento, por lo cual se entrega una breve descripción del control del Bypass eléctrico, con la finalidad de poder comprender de mejor manera como se realiza la selección y conmutación de las celdas Simoprime.

Las celdas Simoprime son accionadas alternadamente por medio de una señal (comando) que es entregada por el VDF, previo comando enviado desde la Sala de Control, dependiendo con que Tren se quiere operar, sea este el Tren A o el Tren B, una vez enviado el comando desde el VDF a la celda Simoprime, esta se cierra y envía una señal al VDF para indicar su estado de “cierre”, una vez confirmado su cierre da la permisidad al VDF para comenzar con la secuencia de partida del motor (rampa de aceleración programada en el VDF) y tomar la velocidad de acuerdo a la referencia o Setpoint que le asigne la Sala de Control al VDF.

Las celdas Simoprime se encuentran conmutadas tanto para el cierre como para la apertura de las mismas por medio del control implementado, lo que significa que cuando una de ellas se cierra, la otra queda inhabilitada para cerrarse a fin de evitar que se produzca un cierre no deseado de la misma y esto se logra a través de contactos auxiliares que posee cada uno de estos equipos, provistos en el gabinete de control de cada una de las celdas (relés, contactores, borneras de conexión, temporizadores).

El conexionado del gabinete de control y el interruptor de media tensión de la celda se logra a través de un block de conexión que posee el interruptor, en la descripción del Switchgear Simoprime se menciona los dos tipos de diseño de unidades extraíbles; Cassette y Truck Type, lo que significa que al momento de ser retiradas del gabinete Simoprime, el interruptor se pueda desconectar o conectar con total facilidad del control, para una revisión, mantención o reemplazo. El block de conexión se puede apreciar en la figura siguiente.

Figura N°38. Block de contactos de Control en Interruptor celda Simoprime.



(Fuente: Imagen propia)

Figura N°39. Gabinete de Control en Switchgear Simoprime.



(Fuente: Imagen propia)

4.5.3 OPTIMIZACIÓN DEL ÁREA DE RELAVES

Con la implementación del Bypass en respuesta a la falla destructiva del VDF del Tren A y junto con el análisis de falla que se obtuvo, se concluye que el valor agregado que significa la implementación de este bypass al área de relaves es el hecho de no entorpecer la operación, así como tampoco la producción en el caso de una eventual falla o querer realizar una mantención “no programada” de alta necesidad, ya que solo tomará unos minutos realizar dicho cambio del VDF requerido o afectado.

El poder contar con una respuesta más rápida a este tipo de fallos y de la criticidad que esta área significa para la continuidad operacional y de producción es que se toma la decisión de implementar otro Bypass entre el Tren C y el Tren B, lo que permitirá tener otra opción para alternar entre variadores, pensando en la disponibilidad de poder operar un tren con un VDF alternado, mientras su VDF dedicado puede ser intervenido para una mantención en el mejor de los casos o para ser sustituido en caso de una falla mayor.

La adquisición de un nuevo VDF para el Tren A siempre fue la primera opción en respuesta a la falla ocurrida, pero por tiempo de respuesta del fabricante Siemens resulta imposible satisfacer el requerimiento, ya que este tipo de equipos se construyen a pedido, su desarrollo, fabricación y envío demora aproximadamente 1 año, por lo cual era inviable esa solución en ese momento, no obstante, se realizó dicha compra y una vez recibido por la Compañía, este fue instalado.

El Bypass eléctrico continúa implementado en la sala eléctrica del área de relaves para facilitar las mantenciones de los VDF en caso de ser altamente necesario y acotar los tiempos de interrupción de operación y producción, por lo cual se continúa utilizando para los casos descritos anteriormente.

La simpleza de su accionamiento es otra de las ventajas que tiene este tipo de accionamiento, ya que los equipos involucrados como lo son las Celdas Switchgear Simoprime, son equipos totalmente análogos, sin electrónica asociada, lo que los hace mucho más estables y robustos, lo que permite obtener una alta confiabilidad de su funcionamiento.

Figura N°40. Celdas Switchgear Simoprime instaladas para nuevo Bypass.



(Fuente: Imagen propia)

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Finalmente, una vez terminados los trabajos de habilitación del Bypass y realizadas las pruebas de accionamiento de las celdas Simoprime con el VDF en forma exitosa, se entregan los equipos a Operaciones, quienes ponen en servicio la Línea 1, normalizando la operación y producción. Cabe señalar que mientras se trabajaba en la habilitación del Bypass, paralelamente se continuó con los trabajos de reparación del Tren C, el cual fue entregado a operaciones dentro del tiempo en que se ejecutaron los trabajos del Bypass. Las operaciones de los Trenes de Bombas del área Relaves si bien se vieron afectadas por la falla descrita anteriormente, una vez habilitado el Bypass entre los trenes A y B, esto permitió dar una continuidad operacional al área y a la producción de la Compañía.

Como se mencionó en la descripción de la falla, esta tuvo un impacto muy significativo en la producción ya que se debió detener una línea de producción por un tiempo de 18 horas.

Como análisis de resultados estos los dividiremos en:

- Cálculo de impacto económico
- Plan de Operaciones.

5.1.1 CÁLCULO DE IMPACTO ECONÓMICO

La valorización del tiempo de detención de la línea 1 se calcula utilizando el valor de producción del Molino SAG, ya que es este el equipo principal del área seca de la Planta Concentradora, el que alimenta a la línea de proceso con el material. Recordemos que hay dispuestos un molino SAG para cada una de las líneas de producción.

Para este cálculo se utilizan datos duros como capacidad de procesamiento de la planta por día, rendimiento de procesamiento del Molino SAG por hora, así como datos de ley de cabeza (que es la concentración de cobre que hay en el material que está ingresando al molino SAG), factor de recuperación; que es el porcentaje entre la concentración de cobre del material que entra a la planta versus la concentración de cobre que se logra obtener al final de la línea de producción, también se debe considerar el factor de pérdida, que es el material que por condiciones del proceso se pierde y va a dar junto a los desechos a los espesadores de relaves.

Otro dato que se debe considerar es el valor en el mercado de la libra de cobre al momento se realizar el cálculo.

Datos de referencia para el cálculo:

- Precio de libra de Cu en el mercado internacional USD\$2,80 (15 de enero 2015, fuente Banco central de Chile)
- 18 horas de detención

Para el cálculo de producción se utiliza la siguiente fórmula:

Fórmula N°1. Cálculo de producción de 1 hora de Molino SAG.

$$\text{Fino Cu} = \frac{(\text{Ton} \times \text{Hora Molino SAG}) \times \text{ley de cabeza \%} \times \text{recuperación \%} \times \text{pérdida \%}}{100}$$
$$\text{Fino Cu} = \mathbf{8.004 \text{ [ton] Cu}}$$

Transformando las toneladas a libras se tiene: 1 [ton] = 2204.62 [lb]

$$8.004 \text{ [ton]} = 17.645,799 \text{ [lb]}$$

En una hora de Molino SAG se pueden llegar a producir 17.645,799 libras de Cu.

Con todos estos datos se logra obtener el valor final de una hora de detención del molino SAG, que para nuestro análisis es de aproximadamente US\$49.408,23. El valor final de detención del Molino SAG por 18 horas fue de US\$889.348,27. (15/01/2015)

La falla del VDF del tren de bombas A, el cual afectó directamente la línea 1 de producción, ha provocado una pérdida de recursos económicos para la Compañía, recordemos que la primera opción fue la de reemplazar el VDF siniestrado por uno nuevo, pero el tiempo que significaría su construcción, importación y esperar la llegada de este nuevo equipo (aproximadamente 1 año) no era una opción viable de poder realizar, una solución temporal que pudiera amortiguar la pérdida de producción y poder seguir operando en el transcurso de un año, era la solución más factible.

La solución temporal del proyecto fue realizar un bypass eléctrico que reemplace el variador siniestrado. Ya que, sin el bypass eléctrico la Compañía hubiera tenido que parar la línea 1 de producción, generando una pérdida total por hora de US\$49.408,23.

Si contabilizamos la pérdida por día, sería de US\$1.185.797,52 y si lo llevamos a un mes, sería una pérdida de US\$35.573.925,6.

Por lo tanto, la solución temporal del bypass eléctrico está evaluado como una solución eficiente en el caso de fallo completo del VDF.

5.1.2 PLAN DE OPERACIONES

A continuación, se detalla los costos asociados, tanto de inversión en equipo nuevo, como de los costos de la implementación de bypass eléctrico: equipos, materiales, horas hombre, horas de detención.

Si bien, se realizó el bypass eléctrico como una solución temporal, la Compañía decidió invertir en el nuevo VDF, cuyo valor es de **US\$180.000**.

Según la información aportada por la Compañía, la planta funciona las 24 horas, los 7 días de la semana de manera ininterrumpida. El molino SAG en 1 hora funcionamiento produce US\$49.408,23.

Para implementar el bypass eléctrico se necesitaron los siguientes recursos:

- Costos directos de operación: Son todos los recursos que se necesitaron para fabricar el bypass eléctrico. Materiales y mano de obra. Cabe destacar que estos materiales y la mano de obra especializada se encontraban disponibles al momento de la falla del VDF, lo que permitió una solución en 18 horas.
- Para realizar este bypass eléctrico se necesitaron 6 trabajadores y los siguientes materiales:
 - Celda Switchgear Simoprime Siemens
 - Cable minero
 - Terminales de Ojo
 - Pernos de acero con su tuerca, golillas de presión, golillas planas.

Tabla N°1. Materiales para el Bypass Eléctrico.

MATERIALES	UNIDADES	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Celda Switchgear Simoprime Siemens	2	US\$65.000	US\$130.000,0
Cable Minero	60 metros	US\$76,6 / m	US\$4.596,0
Terminal de ojo	21	US\$2.8	US\$58,8
Perno/Tuerca/golilla de presión/golilla plana	21	US\$2,1	US\$44,1
Total			US\$135.542,38

COSTO TOTAL DE MATERIALES: US\$135.542,38

Tabla N°2. Mano de obra.

CANTIDAD DE TRABAJADORES	COSTO HORA HOMBRE	HORAS TRABAJADAS	COSTO TOTAL
6	US\$7.81	18	US\$843,48

COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA: US\$843,48

Costos de producción: Es el costo que la Compañía asume por la detención del Molino SAG de la línea 1 de producción. La producción estuvo detenida por 18 horas.

Tabla N°3. Costos de producción.

HORAS DE INSTALACION Y DE IMPLEMENTACION DEL BYPASS	PRODUCCIÓN POR HORA DEL MOLINO SAG DETENIDO	COSTO TOTAL
18 HORAS	US\$49.408,23.	US\$889.348,14

COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN: US\$889.348,14

Costo Total: Es el valor obtenido de la suma de los costos asociados por la falla del VDF, expresado en la siguiente fórmula:

Fórmula N°2. Costo total por falla de VDF.

Costo Total = Valor VDF nuevo + Valor total de materiales + Valor mano de obra + Costo de producción
COSTO TOTAL = US\$180.000 + US\$135.542,38 + US\$843,48 + US\$889.348,14 = US\$1.205.734
COSTO TOTAL POR FALLA DE VDF: US\$1.205.734

Fórmula N°3. Porcentaje de pérdida con respecto al total sin fallas en un mes.

$\text{PORCENTAJE DE PÉRDIDA} = \frac{\text{Valor pérdida mensual de producción}}{\text{Valor costo total por falla de VDF}} = \frac{100}{X}$
$\text{PORCENTAJE DE PÉRDIDA} = = \frac{\text{US\$35.573.925,6}}{\text{US\$1.205.734}} = \frac{100}{X}$
$\text{PORCENTAJE DE PÉRDIDA} = 3,38\%$

En el caso si la Compañía hubiera detenido la línea 1 de producción del Molino SAG, el porcentaje de pérdida hubiera sido del 100%

Lo que se invirtió en 18 horas en implementar el Bypass eléctrico para reemplazar el VDF siniestrado es significativamente menor al lucro cesante más la inversión de un VDF nuevo.

La solución del Bypass eléctrico no solamente brindó una solución económica para la situación crítica que presentaba la Compañía en ese momento, sino que, para posibles futuras fallas de un VDF en cualquiera de los trenes de bombas, se puede seguir utilizando el Bypass eléctrico, otorgando un beneficio para la operación o para la mantención.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En este capítulo se presentará, las conclusiones obtenidas en este trabajo de Titulación.

- **Respecto al objetivo general:**

La propuesta y el desarrollo del Bypass para el Tren de bombas fue concebido en respuesta a una falla catastrófica con consecuencias negativas para la operación y para la producción de la Compañía, cuyo resultado como objetivo general fue exitoso, ya que se logró recuperar la disponibilidad y estabilidad del tren de bombas del área de relaves y por consiguiente la continuidad de producción de la planta.

- **Respecto de la solución:**

La propuesta de la solución que fue la de implementar un Bypass eléctrico y cuyo resultado fue una solución efectiva, porque el resultado del proyecto y lo que se buscaba se logró, pero también fue una solución económica, ya que los costos de su implementación, sumado a los costos que significó detener la línea 1 por 18 horas, tuvo como resultado un costo del 2.88% (US\$1.025.734) con respecto a la producción de un mes sin fallas en la línea de producción 1 (UD\$35.573.925,6) lo cual es un costo muy bajo, comparando estos valores.

Además, hay que concluir que este Bypass eléctrico se puede seguir utilizando en caso de fallas futuras por lo que el beneficio que representa en poder dar respuesta en un tiempo muy acotado, es muy beneficioso para la continuidad operacional y de producción, por lo que su implementación, tiene un valor agregado.

- **Respecto al desafío personal como Profesional:**

El haber participado en este proyecto, me permitió poder conocer y comprender de mejor manera el funcionamiento del área de relaves y la importancia que esta área tiene dentro del proceso. Los conocimientos aplicados en los accionamientos eléctricos y de automatización, como lo fue el VDF y las celdas Switchgear Simoprime, me permitió ampliar más mis conocimientos adquiridos en mis años de experiencia laboral y también el poder aplicar conceptos adquiridos en mis estudios en la Universidad. Pude complementar ambas experiencias lo que me permitió poder enfrentarme de mejor manera en las tareas encomendadas durante el desarrollo del proyecto del Bypass eléctrico.

El conocer y analizar de mejor manera cómo funciona el VDF Robicon, me significó el tener que estudiar su arquitectura, su funcionamiento y su configuración, por las distintas etapas que este equipo posee, lo cual me permitió poder ampliar mis conocimientos.

- **Respecto a la continuidad de la solución y desafíos futuros:**

El análisis de la falla del VDF del tren B hizo referencia a la deficiente mantención del mismo, debido a la falta de competencia y al desconocimiento de las recomendaciones sugeridas por el fabricante, razón por la cual se realizó una capacitación integral al personal mantenedor electricista administrativo y de turno, a cargo de especialista Siemens para internalizar este nuevo método de mantención en este tipo de equipos, con lo cual se desarrolló un protocolo de Mantención para los VDF Robicon Siemens, el cual se ejecuta en las mantenciones actualmente.

Además de los puntos mencionados anteriormente, se mejoró el stock de repuestos críticos de estos VDF, a fin de poder realizar cambios de componentes de manera oportuna sin que signifique un tiempo prolongado para su reemplazo, junto con esto, también se desarrolló un nuevo plan de mantención, a fin de minimizar o eliminar del todo, las descoordinaciones en las planificaciones de mantención entre la Gerencia de Mantención y la Gerencia de Operaciones.

Otro punto a destacar sobre la solución y desafíos futuros es el hecho de la toma de decisión de implementar otro Bypass entre el Tren C y el Tren B, lo que demuestra que proyecto es totalmente funcional, confiable y versátil y con esto fortalecer el área de relaves ante una falla de alto impacto a la operación y a la producción.

BIBLIOGRAFÍA

- 911 Metallurgist. (28 de Junio de 2016). *911 Metallurgist*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/tipo-de-espesadores/assets.new.siemens.com>. (s.f.). *assets.new.siemens.com*. Obtenido de [assets.new.siemens.com:
//assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:584dbc3a-ef44-442c-9810-57c374e5fd15/simoprime.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:584dbc3a-ef44-442c-9810-57c374e5fd15/simoprime.pdf)
- Candelaria, P. L. (19 de Diciembre de 1992). 3.3 KV Motor Control Center 610MC22 Metering and Relaying Diagram, SH.2 of 3. *La Candelaria Projet*. Copiapó, Copiapó, Atacama.
- Candelaria, P. L. (28 de Enero de 2015). 3.3 KV Motor Control Center 610MC22 Metering and Relaying Diagram, SH 2 of 3. *La Candelaria Project*. Copiapó, Copiapó, Atacama, Chile.
- Compañía Contractual Minera Candelaria y Compañía Contractual Ojos del Salado. (20 de Febrero de 2018). Obtenido de <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/01/Candelaria.pdf>
- Google Maps. (15 de Noviembre de 2021). *Google Maps*. Obtenido de Fuente:<https://www.google.cl/maps/search/minera+candelaria/@-27.5282962,-70.312192,4883m/data=!3m1!1e3!5m1!1e1?hl=es>
- imcoex. (s.f.). *imcoex.cl*. Obtenido de imcoex.cl: <http://imcoex.cl/producto/cable-triconductor-shd-shd-gc/>
- Reporteminero. (13 de Junio de 2021). Lundin Mining ajusta expectativas de producción de Candelaria. Obtenido de <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2021/06/lundin-mining-produccion-candelaria>
- Revista ElectroIndustria. (s.f.). *Revista ElectroIndustria*. Obtenido de Revista ElectroIndustria: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000&tip=7&xit=principio-de-funcionamiento-y-ventajas-de-los-vdf>
- Siemens. (s.f.). *assets.new.siemens.com*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2021, de [assets.new.siemens.com:
assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:584dbc3a-ef44-442c-9810-57c374e5fd15/simoprime.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:584dbc3a-ef44-442c-9810-57c374e5fd15/simoprime.pdf)

Siemens Energy & Automation, Inc. (2008). Manual de Puesta en Marcha y Temas Avanzados para Variadores AC de Velocidad. En I. Siemens Energy & Automation, *Manual de Puesta en Marcha y Temas Avanzados para Variadores AC de Velocidad* (Versión 1.2 ed., Vol. Numero de Manual: A1A119000404). New Kensington, EE.UU: Siemens LDA.

vitel. (s.f.). *vitel.cl*. Obtenido de vitel.cl: <https://www.vitel.cl/terminal-de-cobre-esta%C3%B1ado-2/0awg-largo/>

ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

Para poder comprender de mejor manera el contenido de este trabajo se entregarán algunas definiciones de los acrónimos y términos técnicos, utilizados en este trabajo.

- **Agua de sello:** Sello utilizado en las bombas centrifugas y que consiste en aplicar agua limpia a presión a través de una línea o cañería en la zona de la empaquetadura, la función es mantener húmeda la empaquetadura para reducir la fricción y el excesivo desgaste en la camisa del eje de la bomba.
- **Armónicos (Harmony):** Los armónicos son corrientes o tensiones AC no deseables que aparecen a frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, (en Chile son 50 Hz). La frecuencia fundamental es la frecuencia más baja de la forma de onda (generalmente, la frecuencia de repetición). Los armónicos están presentes en cualquier forma de onda no senoidal y en promedio, no pueden transmitir potencia.
- **Bit:** Bit es un acrónimo de Binary digit (dígito binario). Generalmente se utilizan para indicar un estado verdadero (true) (1) o falso (False) (0) dentro de la programación del Variador.
- **Bypass eléctrico:** es una desviación de un circuito eléctrico que permite la comunicación directa entre dos puntos.
- **CE:** Conformidad Europea, implica una declaración emitida por el fabricante, que indica que el producto cumple con los criterios básicos de la unión europea, normas vigentes, directivas, estándares europeos.
- **Celda:** Unidad rectificadora modular que aumenta o disminuye la capacidad nominal del equipo según diseño.
- **Chancadores:** Es una máquina que procesa un material de forma que produce dicho material con trozos de un tamaño menor al tamaño original.

- **Conmutación:** Acción entre dispositivos eléctricos o electrónicos que permite alternar entre uno u otro para su funcionamiento.
- **DCS:** (Distributed Control System) o Sistema de Control Distribuido es un sistema de control aplicado a procesos industriales complejos en las grandes industrias, las capacidades actuales de un DCS pueden llegar hasta las 250.000 señales.
- **Diferencial de presión:** Valor diferencial entre dos presiones. En procesos industriales este valor es fundamental para entender determinadas circunstancias de un circuito.
- **Enclavamiento:** Conexión que impide la operatividad o movimientos muy peligrosos de las maquinarias o dispositivos eléctricos cuando el resguardo de esta no permanezca cerrado.
- **Estop:** Parada de emergencia.
- **Espesadores:** Son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos formando una pulpa, se alimenta a un estanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del estanque.
- **Flujómetro:** Es un dispositivo creado con el objeto de medir el caudal o gasto volumétrico de un fluido. Son empleados en tuberías que transportan fluido.
- **Harnero:** Dispositivo mecánico para separar rocas, minerales y otros materiales por tamaño, u otras características.
- **Hidrociclones:** Equipo de clasificación de partículas el cual es utilizado en operación continua, para la clasificación se hace necesario el uso de la fuerza centrífuga que acelera la velocidad de asentamiento de las partículas.
- **IEC:** Comisión Electrotécnica Internacional, también conocida por su sigla en inglés IEC, es una organización de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.

- **IOC:** Sobre corriente instantánea.
- **NXg:** Controlador principal o CPU, donde se realiza la programación y configuración del VDF Robicon.
- **Pulpa:** Son mezclas de sólidos y líquidos en forma de suspensiones de tal forma que sus características y comportamiento se pueden estudiar; fluido homogéneo. Fluido formado por la suspensión de uno o varios minerales en agua.
- **Robicon:** Modelo de variador de frecuencia de la línea Siemens
- **RPM:** Las revoluciones por minuto son una unidad de medida utilizada para expresar frecuencia o velocidad angular e indican la cantidad de rotaciones por minuto que completa un cuerpo que gira.
- **Setpoint:** Punto en que una señal se establece bajo ciertos parámetros deseados. Es un punto de consigna para valor de señal de la variable.
- **Switchgear:** Equipo eléctrico de maniobra, que permite las acciones para energizar o desenergizar o segregar un circuito o red eléctrica.
- **Torque:** Fuerza aplicada para que algo gire, también se denomina momento dinámico o sencillamente momento.
- **UL:** Underwriters Laboratories; símbolo de la certificación con mayor reconocimiento de que un producto cumple con la garantía los estándares de seguridad y calidad de los productos en EEUU y de Canadá.
- **VDF:** Variador de Frecuencia. Es un dispositivo que toma una fuente de entrada alterna (AC) de tensión y frecuencia fijas y la convierte en una salida de tensión y frecuencia variables que puede controlar la velocidad de un motor [RPM], corriente [A], Torque [T], Temperatura [T°].

ANEXO B: PROTOCOLO DE OPERACIÓN DE TRENE DE BOMBAS

Detención y puesta en servicio Tren de Bombas para mantenimiento programada, incluido espesador de relaves.

Detención Tren de Bomba.

- Sala de Control debe avisar con anticipación al operador del área, la detención del tren que entrará en mantención.
- Verificar que PP104 y PP105 más bomba de piscina de contención se encuentren en servicio, con el fin de evitar su embancamiento y anegamiento del piso de los trenes de bombas.
- El operador de terreno debe solicitar la presencia en el área de personal mecánico, electricista e instrumentista para prestar apoyo en caso que sea necesario durante la detención y puesta en servicio del tren de bombas.
- El tren de bombas a detener se debe operar con las cinco bombas al inicio de la maniobra o el máximo de bombas que se encuentren disponibles, para maximizar el bombeo y lograr bajar el porcentaje de sólidos de descarga alrededor de 10% para evitar embanque de la línea de descarga y además el control continuo de las potencias de las rastras del espesador. En esta maniobra se debe adicionar agua a la línea para realizar un previo lavado de la tubería de descarga del tren de bomba que estuviese en servicio, abriendo las válvulas de agua que corresponden a la línea por donde se está descargando el espesador.
- Una vez que ha bajado el % de sólido a un 10%, Sala de Control, solicitará al operador del área que tome un control en terreno del % de sólido, el cual será comparado con el valor indicado en DCS, si los dos valores de sólido coinciden, se solicitará al operador del área que se dirija al sector de los espesadores para proceder a detener la rastra del espesador que entrará a mantención, la cual debe

quedar detenida en el sector frente a las bombas Booster o donde sea solicitada por personal de mantención, una vez detenida y posicionada la rastra, Sala de Control, solicitará al operador que se dirija al sector de los trenes de bomba para comenzar con la maniobra de detención del tren que se encuentre en servicio.

- Disminuir gradualmente el flujo de bombeo hacia el cajón gravimétrico o tranque relaves variando la velocidad de la última bomba en forma suave; una vez que la velocidad de la bomba se encuentre al mínimo se procederá con la detención de una bomba y en un lapso de tres minutos se dejara fuera de servicio una segunda bomba hasta que el flujo llegue al mínimo ($600 M^3 / Hr$) para evitar los golpes de ariete en la línea y la presión antes y después de la válvula Dezurik, finalizando con la detención total del tren de bombas. En resumen:
 - Como mínimo, 3 bombas en servicio (2 de velocidad fija y la de velocidad variable)
 - Bomba de velocidad variable a mínima velocidad.
 - Flujo al mínimo y presiones iguales.
 - Detención de secuencia del tren (Esto significa primero que todo el cierre de la válvula y de inmediato la detención de bombas).

Si la válvula no cierra, no se debe continuar deteniendo las bombas y se debe realizar lo siguiente:

- Intento de cierre en local.
- Si la válvula no cierra y se decide continuar operando el tren, se debe dejar la válvula en modo “local abierto” y retomar la operación de las bombas detenidas.
- En el caso que la situación ocurra estando en faena personal de Control de Proceso, se le debe solicitar resetear la secuencia de detención.

- Verificar la detención de las bombas de agua sello, si no se detuvieron en forma automática después de 2 minutos de detenido el tren, detener pasando el control a modo manual y dar el Stop.
- El operador del área debe abrir válvulas manuales de despiche del tren dejado fuera de servicio para liberación de la presión de la línea.
- Una vez que el operador de terreno haya avisado a la Sala de Control que los despiches manuales drenaron, cerrar válvula de descarga del espesador de acuerdo al tren que se encontraba en operación, se es en el espesador 1 se deben cerrar las válvulas de descarga correspondiente (HV05, HV07) Tren B y (HV06, HV08) tren A, si es en el espesador 2 las válvulas (2HV06, 2HV08) corresponden al Tren C, y las válvulas (2HV05, 2HV07) corresponden al Tren A, si existe una presión mayor a 100 PSI se debe abrir la válvula de alimentación a la PP108 y el drenaje de esta para ayudar a liberar presión de la línea.
- Luego se debe proceder a drenar la línea al tranque de relave, (abrir válvula de drenaje HV050 o HV2050 según corresponda). En esta tarea el operador debe verificar que no haya personal en el sector de las válvulas de drenaje. Una vez drenada la línea hacia el tranque el operador del área, Sala de Control debe asegurarse que la línea no tenga presión antes y después de la válvula DeZurik para ser entregada a mantención.
- El operador durante el periodo que dura la mantención debe estar chequeando cada cierto intervalo de tiempo (cada una hora) el porcentaje de sólido del espesador que está fuera de servicio y recircular (cada 3 horas) utilizando la PP108 respectiva para evitar embancamiento del espesador.

Puesta en servicio Tren de Bomba Después de una Mantención

- El operador debe realizar una inspección pre operacional al Tren entregado por personal de mantención verificando que se encuentre en condiciones de operar dicho tren, esta inspección involucra los distintos componentes del Tren, así como también las válvulas que estén instrumentalmente habilitadas como

también verificar que cada una de las bombas del tren se encuentren energizadas y la válvula de drenaje de la línea hacia el tranque cerrada según la línea del tren que se encontraba en mantención.

- El operador debe abrir las válvulas manuales de las líneas de agua sello del tren que se pondrá en servicio y en conjunto con mecánico e instrumentista deben verificar que cada bomba del tren que entrara en servicio tenga flujo y presión de agua suficiente (350 a 400 psi), el flujo de agua sello debe ser mayor que $3.5 M^3 / \text{hrs}$. Para contra restar la presión de la pulpa antes de dar la autorización a Sala de Control para que abra las Válvulas de descarga del espesador correspondiente al tren que se colocará en servicio.
- Si el flujo y la presión no son lo suficiente para contra restar la presión de la pulpa y no tienen los valores antes mencionados, no se debe colocar en servicio la secuencia del tren de bombas hasta que mecánico en conjunto con instrumentista solucionen el problema de agua de sello para la o las bombas del tren que entrara en servicio.
- El operador debe abrir válvula de despiche manual y habilitar agua de sello a la PP-108.
- Cerrar válvulas de despiche manual de las bombas del tren, dejando abiertos dos despiches que se encuentren habilitados, para verificación la presencia de pulpa una vez abiertas las válvulas de descarga del espesador.
- Abrir válvula de recirculación hacia PP-108 (HV055, HV056, 2HV055 y 2HV056) según corresponda.
- Abrir válvula de alimentación al tren que se pondrá en servicio (puede ser HV057 para el Tren B, HV058 para el Tren A, 2HV057 para el Tren C y 2HV058 para el tren A).
- Abrir válvulas de descarga del espesador correspondiente al tren que entrara en operación Tren B (HV05, HV07), Tren A (HV06, HV08) de la línea 1, Tren C (2HV06, 2HV08), Tren A (2HV05, 2HV07) línea 2.

- Verificar la presencia de pulpa en los despiches abiertos, y proceder a cerrarlos e informar a sala de control que los despiches se encuentran cerrados.
- Cerrar válvula de recirculación hacia PP-108 (HV055, HV056, 2HV055 y 2HV056), según corresponda.
- Sala de Control debe verificar la presión de la línea antes de la válvula Dezurik la cual debe estar como mínimo en 10 psi antes de darle partida a la secuencia del tren que entrará en servicio.
- E operador debe indicar que se encuentra ubicado en la zona de seguridad o resguardado y fuera de la línea de fuego, dando el pase para la puesta en servicio del tren.
- Sala de Control antes de dar el comando de partida al tren debe verificar el Output de salida sea entre 10 y 15, para la partida de la bomba de velocidad variable.
- Una vez que se a dado partida al tren de bomba, si por algún motivo una de las bombas se detiene por falta de agua sello o por alguna otra falla no debe darle partida a la bomba hasta que se haya completado el ciclo de partida de la secuencia del tren de bomba, una vez completada la secuencia intente colocar en servicio la bomba que se había detenido.
- En conjunto con la puesta en servicio del tren de bomba se debe adicionar agua a la línea para diluir el % de sólido, acumulado en la parte inferior del espesador de relaves, abriendo las válvulas (HV09, HV10, HV11, HV12, 2HV09, 2HV10, 2HV11, 2HV12) según corresponda.
- Avisar al operador del tranque y al operador del enlace hidráulico para la verificación de la llegada de flujo al sector de los cajones del enlace o tranque de relaves en caso que el flujo se estuviese enviando directo al tranque a través de la válvula HV035 para la línea N°1 y HV037 para la línea N°2.

- Una vez confirmada la llegada de flujo en forma normal al cajón del enlace hidráulico o al tranque de relaves se debe lujo de normalizar la operación del tren, regulando flujo de bombeo y cerrando válvulas de adición de aguas, si estas hubiesen sido abiertas.

Detención Tren de Bomba (Cambio Tren)

Sala de Control debe avisar al operador del área la puesta en servicio o cambio de tren de bombas.

- Sala de Control o a su vez el operador de terreno debe solicitar, la presencia en el área de personal electricista, mecánico e instrumentista, para el apoyo correspondiente en caso que sea necesario, además se debe informar al operador del tranque, operador del Enlace Hidráulico y al operador de Sala de Control de Minera Hierro Atacama del cambio de tren de bombas.
- El tren de bombas a detener se debe operar con las cinco bombas al inicio de la maniobra o el máximo de bombas que se encuentren disponibles, para maximizar el bombeo y lograr bajar el porcentaje de solidos de descarga, tan bajo como sea posible asegurado que no exista posibilidad de embancamiento de la línea. Verificar con el operador del área que no se encuentre ninguna persona al interior del túnel del espesador de relaves antes de abrir las válvulas de adición de agua.
- Abrir válvulas de agua de la línea de descarga al tren en servicio, para bajar el porcentaje de sólidos y realizar un previo lavado de la línea hacia el tranque (10 a 15 minutos). Siempre y cuando el cambio se realice en condiciones normales, en caso de una emergencia el tiempo que se dará para bajar el % de sólido y lavado de la línea deberá ser en mínimo tiempo posible.
- Operar la bomba de velocidad variable con el Output en forma manual para controlar el flujo máximo de bombeo durante el lavado de la línea para realizar

esta maniobra se debe dejar de servicio el sistema experto (SCEA) con el objeto de controlar el agua de sello, se selecciona el control manual de la bomba de velocidad variable.

- A) Verificar que las bombas del tren que se colocará en servicio se encuentren en modo automático, al igual que la válvula de descarga del tren. Para el caso de poner en servicio el tren A se debe seleccionar la válvula de descarga que corresponda a la línea del tren a reemplazar (HV046 para reemplazar al Tren B, HV2070 para reemplazar al Tren C).
- B) Verificar que las bombas de agua de sello del tren que entrará en servicio se encuentren en modo automático.
- El operador del área debe abrir válvula de despiche manual y habilitar agua de sello en la PP108.
- El operador del área debe abrir válvula de despiche manual y habilitar agua de sello en la PP108.
- Proceder de acuerdo a los puntos A y B.
- Cerrar válvulas de agua de la descarga del espesador (HV09, HV10, HV11, HV12, 2HV09, 2HV10, 2HV11, 2HV12) según corresponda, verificar que estas válvulas indiquen la posición cerrada completamente.
- Verificar la detención de las bombas de agua de sello, si no se detuvieron en forma automática después de 2 minutos, detener pasando el control a modo manual y dar el Stop.
- Abrir válvulas manuales de despiche del tren dejado fuera de servicio.
- Luego que el operador de terreno haya avisado a la sala que los despiches manuales drenaron, cerrar válvula de descarga del espesador (HV05, HV06, HV07, HV08, 2HV05, 2HV06, 2HV07, 2HV08)
- Abrir válvula de recirculación hacia PP108 (HV055, HV056, 2HV055, 2HV056) del Tren dejado fuera de servicio.

- Una vez drenado el Tren cerrar válvulas de alimentación del tren que se ha dejado fuera de servicio (HV057 para el tren B), (HV058 para el tren A), (2HV057 para el Tren C), (2HV058 para el tren A).

Puesta en Servicio del Tren de Bombas (Cambio de Tren)

- El operador debe abrir las válvulas manuales de las líneas de agua de sello del tren que se pondrá en servicio, Sala de Control abrirá las electro válvulas correspondientes al Tren que entrará en servicio, además el operador, en conjunto con mecánicos e instrumentistas deberán verificar visualmente la presencia de flujo y de agua de sello en cada una de las bombas (350 a 40 PSI), el flujo de agua de sello debe ser mayor que $3.5 M^3 / Hrs$ antes que el Tren entre en servicio, si el operador detecta que no tiene el flujo y presión suficiente deberá solicitar asistencia mecánica y/o instrumental para solucionar el problema antes de dar el pase para la puesta en servicio del Tren.
- El operador debe abrir válvula de despiche manual y habilitar agua de sello para PP108.
- El operador debe cerrar las válvulas manuales de despiche de las bombas del Tren, dejando abierto el primer y cuarto despiche o aquellos que se encuentren habilitados, previa verificación de la presencia de agua de sello.
- Abrir válvula de recirculación hacia PP108 (HV055, HV056, 2HV055, 2HV056), según corresponda.
- Abrir válvula de alimentación al Tren que entrará en servicio (HV057, HV058, 2HV057, 2HV058).
- Abrir válvulas de descarga del espesador correspondiente al Tren que entrará en operación (HV05, HV06, HV07, HV08, 2HV05, 2HV06, 2HV07, 2HV08).

- Una vez que el operador del área ha verificado la presencia de pulpa en los despiches abiertos, procederá a cerrarlos e informará a Sala de Control.
- Cerrar válvula de recirculación hacia PP108, (HV055, HV056, 2HV055, 2HV056) según corresponda.
- El operador debe informar que se encuentra ubicado en la zona de seguridad o resguardo y fuera de la línea de fuego, dando el pase para la puesta en servicio del Tren.
- Sala de Control dará el comando de partida al Tren con un Output de 10 a 15% para la bomba de velocidad variable.
- El conjunto con la puesta en servicio del Tren de bomba se debe adicionar agua a la línea para diluir el % de sólido, acumulado en la parte inferior del espesador de relaves, abriendo las válvulas (HV09, HV10, HV11, HV12, 2HV09, 2HV10, 2HV11, 2HV12) según corresponda.
- Una vez que se a dado partida al Tren de Bomba, si por algún motivo una de las bombas se detiene por falta de agua sello o por alguna otra falla no debe dar partida a la bomba hasta que haya completado el ciclo de partida de la secuencia del Tren, una vez completada la secuencia se intentará colocar en servicio la bomba que se había detenido en coordinación con el operador del área.
- Avisar al operador del enlace hidráulico, tranque de relaves para la constatación de la llegada de flujo al sector, además se debe informar al operador de la Sala de Control de Minera Hierro Atacama.
- Una vez confirmada la llegada de flujo en forma normal al cajón del enlace hidráulico o tranque de relaves se debe normalizar la operación del Tren, regulando flujo y cerrando válvulas de agua.

Emergencias Operacionales

Detención imprevista del Molino SAG por más de 4 Horas.

- Se aísla o corta carga a un espesador de relaves previa coordinación con operador de área flotación para saber cuándo dejan de enviar flujos al cajón distribuidor.
- Una vez aislado el espesador se detiene la rastra, Tren de bombas y bomba floculante, asegurando un porcentaje de sólido, no conviene detener con sólidos bajos.
- Se opera con un solo tren de bombas, se prioriza aumentar % de sólidos, sobre 54%.
- El tiempo de recirculación es entre 30 a 40 minutos y puede ser cada 2 horas, esto se realiza para remover la carga asentada, esto con la bomba PP108, bomba de floculante y rastra en servicio.
- Se va consultando el horario de la puesta en servicio para colocar en servicio el Tren y así no desperdiciar agua con puesta en servicio anticipada (hay que tener en consideración que baja el nivel del espesador de relaves).
- Los parámetros fluctúan de acuerdo al tratamiento total planta, puede variar entre: Flujo mínimo $1865 \text{ Mt}^3/\text{H}$, % solido 50 – 58%, tiempo de recirculación 30 a 40 minutos de acuerdo al % solido tomado por el operador en terreno, es importante verificar la llegada de flujo de recirculación al cajón alimentador de relaves.

Detención de un Tren sin posibilidad del Tren Stand-By

- (A1). Aislar el espesador o bajar al mínimo permitido el flujo de alimentación, dependiendo del nivel del cajón distribuidor, mientras en molienda se deja fuera de servicio un molino de bolas en cada fase.

- Detener la Fase 3 (línea de producción adicional).
- Contar con el apoyo permanente de un segundo operador que este vigilando el nivel del cajón distribuidor.
- Recircular el espesador que no cuenta con Tren de bombas disponible, hasta que baje el % de sólidos.
- Sala de control debe monitorear el comportamiento de potencias de las rastras (con esto se puede detectar un posible embancamiento del espesador).
- Restringir al máximo el consumo de agua en flotación, regular aberturas de tapones de traspaso en las celdas de flotación, controlar velocidad de bombas con menos caudal en los circuitos, eliminar lavado de pisos y todo flujo que sea imprescindible durante el evento de la emergencia.
- En caso extremo y que el espesador disponible no tenga más capacidad, dejar fuera de servicio una línea de producción.
- Informar a Minera Hierro Atacama y operador de Enlace Hidráulico de la situación.
- En el caso que existiese rotura en válvula Zúrich o embancamiento en la línea de descarga, estas causas son sin flujo de impulsión y se tomaran las mismas acciones a seguir, desde el punto A1 en adelante.

Cuidado del Medio Ambiente

Dentro de los procesos de Producción o de Mantenimiento se debe tener especial cuidado del medio ambiente y es por eso que se deben considerar los siguientes puntos:

- Se debe mantener una actitud proactiva respecto a la protección del medio ambiente.
- Conservar el espacio de trabajo limpio y depositar la basura en los lugares habilitados para tal efecto.
- Se debe reportar los incidentes ambientales que puedan ocurrir con ocasión de la puesta en servicio y cambio de Tren de bombas, como el provocado por terceros que efectúen trabajos en el área.
- Durante la operación de puesta en servicio y/o cambio de Tren de bombas, se debe considerar en todo momento el uso eficiente del agua, con el objetivo de evitar su derroche y procurar su recuperación. Todo lo anterior en pos de optimizar el uso del recurso hídrico.

(Fuente: Lundin Mining)

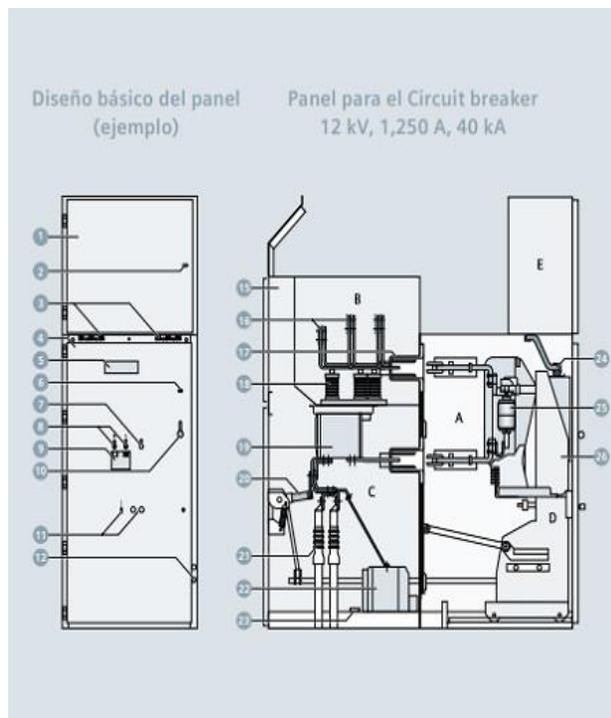
**ANEXO C: FICHAS TECNICAS DE CELDA SWITCHGEAR SIMOPRIME
SIEMENS**

Especificaciones técnicas

SIMOPRIME switchgear					
Tensión nominal	kV	7.2	12	17.5	24
Frecuencia nominal	Hz	50/60	50/60	50/60	50/60
Corriente asignada de cierre	kV	20 ¹⁾	28 ¹⁾	38	50
Tensión nominal soportada al impulso de rayo	kV	60	75 ³⁾	95	125
Corriente nominal de corta duración en 3 s	kA	40	40	40	25
Corriente nominal pico soportada a 50/60 Hz	kA	100/104	100/104	100/104	63
Corriente nominal de ruptura soportada	kA	40	40	40	25
Corriente nominal de corto circuito a 50/60 Hz	kA	100/104	100/104	100/104	63
Corriente nominal normal del busbar	A	3.600	3.600	3.600	2.500
Corriente nominal normal de los alimentadores					
• con circuit breaker	A	3.600	3.600	3.600	2.500
• con contactor de vacío	A	400 ²⁾	400 ²⁾	–	–
• con disyuntor de interrupción de carga		por fusible	por fusible	por fusible	por fusible

¹⁾ Opción: Valores más altos de acuerdo con el estándar GOST
²⁾ Dependiendo de la corriente nominal del HV se instalan los fusibles HRC
³⁾ 60 kV para el contactor de vacío

(assets.new.siemens.com, pág. 11)



Leyendas para el diseño del panel

- 1 Puerta del compartimento de bajo voltaje
 - 2 Abertura para bloquear o desbloquear la puerta del compartimento de bajo voltaje
 - 3 Opción: Sistema de detección de voltaje capacitivo para el alimentador y la barra colectora
 - 4 Puertas de alto voltaje
 - 5 Ventana de inspección para revisar el switching device truck
 - 6 Abertura para bloquear o desbloquear la puerta de alto voltaje
 - 7 Abertura para carga mecánica del resorte de cierre del disyuntor
 - 8 Aberturas para el funcionamiento manual (ON / OFF) del disyuntor
 - 9 Ventana de inspección para leer los indicadores
 - 10 Manija de la puerta
 - 11 Aberturas para el funcionamiento del switching device truck
 - 12 Abertura para la operación del interruptor de puesta a tierra
 - 13 Palanca de apertura de operación de VT extraíble
 - 14 Puerta extraíble del compartimento VT
 - 15 Conducto de alivio de presión
 - 16 Barras de distribución
 - 17 Bujes
 - 18 Aisladores de poste
 - 19 Transformador de corriente tipo bloque
 - 20 Opcional: interruptor de puesta a tierra
 - 21 Extremos de sellado del cable
 - 22 Opcional: transformador de tensión
 - 23 Barra colectora de puesta a tierra
 - 24 Conector de bajo voltaje
 - 25 Interruptores de vacío
 - 26 Switching device truck
 - 27 Elemento extraíble del elemento de conmutación
 - 28 VT extraíble
-
- A Compartimento del dispositivo de conmutación
 B Compartimento del Busbar
 C Compartimento de conexión
 D Circuit breaker truck de vacío / parte extraíble
 E Compartimento de bajo voltaje

(assets.new.siemens.com, pág. 14)

Rigidez dieléctrica	kV	7.2	12	15	17.5	24
Corriente asignada de cierre						
Distancias transversales de aislamiento	kV	23	32	39	45	60
Entre fases y hacia tierra	kV	20	28	35	38	50
Voltaje nominal de soporte a impulso de rayo (valor pico)						
Distancias transversales de aislamiento	kV	70	85	105	110	145
Entre fases y hacia tierra	kV	60	75	95	95	125
Rigidez dieléctrica						
La rigidez dieléctrica se verifica probando el interruptor con valores nominales de tensión soportada de frecuencia industrial de corta duración y la tensión soportada de impulso de rayo según IEC 62271-1 / VDE 0671-1 (consulte la tabla "Resistencia dieléctrica").						
Los valores nominales están referenciados a nivel del mar y a condiciones atmosféricas normales (1013 hPa, 20 °C, 11 g/m ³ humedad de acuerdo a IEC 60071 / VDE 0111).						
La rigidez dieléctrica disminuye con el incremento de la altura. Para altitudes en sitio mayores de 1000m (sobre el nivel del mar) el estándar no provee de ningún lineamiento para la tasa de aislamiento. En su lugar, arreglos especiales aplican a estas altitudes.						
Altitud del sitio: <ul style="list-style-type: none"> - A medida que aumenta la altitud, la resistencia dieléctrica en el aire disminuye debido a la disminución de la densidad del aire. Esta reducción está permitida hasta una altitud del sitio de 1000 m según IEC y VDE. - Para altitudes de sitio superiores a 1000 m, se debe seleccionar un nivel de aislamiento más alto. Es el resultado de la multiplicación del aislamiento nominal nivel de 0 a 1000 m con el factor de corrección de altitud Ka. 						

(assets.new.siemens.com, pág. 13)