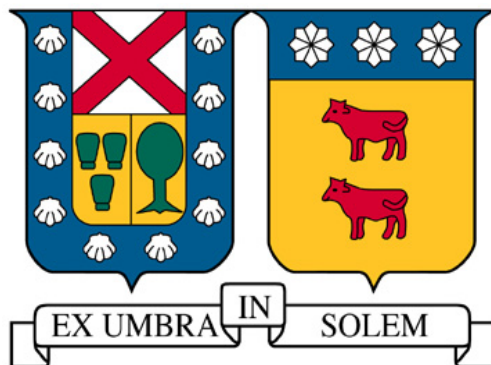


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAISO – CHILE



PROPUESTA DE CAMBIO DE MATERIALIDAD DE EQUIPOS
DEL CIRCUITO DE IMPULSION DE PLS Y REFINO PARA
AUMENTAR LA PRODUCCION DE COBRE DE UNA MINERA
DEL NORTE DE CHILE

RAMON EDGARDO BURGOS CUEVAS

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO

PROFESOR GUÍA

: SR. WERNER KRISTJANPOLLER RODRIGUEZ

AGOSTO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Propuesta de cambio de materialidad de equipos del circuito de impulsión de PLS y refino para aumentar la producción de cobre de una minera del norte de Chile

Nombre del candidato(a): Ramón Burgos Cuevas

Carrera / Grado: Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Werner Kristjanpoller Rodríguez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha:

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06-10-25

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Indice

1 Resumen	4
2 Introducción.....	5
2.1 Generalidades.....	5
3 Objetivos	7
3.1 Objetivo General.....	7
4 Descripción Y Justificación Del Tema	7
5 Marco Teórico.....	8
5.1 Descripción Del Proceso De Lixiviación De Minerales.....	8
5.1.1 Proceso De Lixiviación	8
5.2 Propiedades De Los Materiales	10
5.2.1 Propiedades Físicas.....	10
5.2.2 Propiedades Mecánicas.....	11
5.2.3 Propiedades Fisicoquímicas	11
5.3 El Problema De La Corrosión Y Los Costos Económicos	11
5.3.1 Costos Directos.....	12
5.3.2 Costos Indirectos	12
5.4 Sal	13
5.5 Equipamiento Industrial De Impulsión.....	13
5.5.1 Bombas	13
5.6 Mantenimiento	14
5.6.1 Misión Del Mantenimiento	15
5.6.2 Objetivos Del Mantenimiento	15

5.6.3 Variables Del Mantenimiento	16
5.6.3.1 Confiabilidad.....	16
5.6.3.2 Disponibilidad.....	17
5.6.3.3 Mantenibilidad	17
6 Desarrollo Del Tema.....	17
6.1 Metodología Propuesta.....	17
6.2 Diagnóstico De La Situación Actual	18
6.2.1 Evaluación De Los Equipos Actuales De La Planta.....	19
6.2.2 Análisis De La Información	20
6.3 Determinación De Factores Críticos	23
6.3.1 Factores Favorables	23
6.3.2 Factores Desfavorables Y Problemáticas.....	23
6.4 Evaluación Técnica De Materiales	28
6.4.1 Guía Para La Selección De Materiales	30
6.4.2 Selección Técnica De Materiales	35
6.5 Evaluación Económica De Materiales	36
6.5.1 Análisis Del Impacto Financiero	36
6.5.2 <i>Tablas De Evaluación De Costos De Las Propuestas</i>	38
6.5.3 Análisis De Las Propuestas En Los Distintos Materiales	41
6.6 Selección De La Propuesta	42
6.6.1 Análisis De La Propuesta Seleccionada	44
7 Conclusiones Y Recomendaciones.....	46
8 Referencias	49

1 Resumen

El presente trabajo hace una propuesta de mantenimiento para el reemplazo definitivo de equipos del área de lixiviación, en la planta de óxido de la Compañía Minera Cerro Colorado.

El tema se justifica producto de la nueva estrategia de producción y la innovación de extracción de mineral, al incorporar sal (Cloruro de Sodio) para el aprovechamiento de los sulfuros secundarios.

La propuesta estará enfocada en el área de lixiviación, en los circuitos de PLS y Refino.

Durante el desarrollo se dará a conocer el diagnóstico de la situación actual en base a la información recopilada, al levantamiento de equipos y concentraciones de los fluidos de la planta.

Se determinarán los factores críticos, analizando las concentraciones de los fluidos y equipos más afectados por la nueva condición de operación.

La evaluación técnica de materiales se basará en aquellos que posean la capacidad de soportar la incorporación de cloruro en el proceso.

La evaluación económica de materiales se llevará a cabo, una vez consolidada la información proponiendo así, la solución de reemplazo definitivo.

Dando cumplimiento al objetivo general de esta propuesta.

2 Introducción

2.1 Generalidades

El tema para desarrollar consiste en una “Propuesta de reemplazo de equipos del circuito de impulsión de PLS y REFINO” de forma definitiva, producto de la adición de cloruro de sodio como nuevo agente lixivante, el cual aprovecha los sulfuros de cobre insertos en el mineral chancado.

Durante este trabajo, se dará a conocer la situación actual de los equipos de impulsión sometidos a un nuevo flujo oxidante, dicho flujo desgasta de forma acelerada los circuitos de impulsión del PLS y REFINO. Además, se presentará el monitoreo de los equipos, justificando su reemplazo. También se investigarán los materiales industriales disponibles en el mercado para entregar la mejor propuesta de reemplazo de equipos y uso con altas concentración de cloruro.

2.2 Antecedentes Generales de la empresa

El proyecto minero Cerro Colorado es propiedad de la Compañía Minera Cerro Colorado, una empresa chilena cuya propiedad total pertenece a la multinacional BHP.

Compañía Minera Cerro Colorado se ubica en Chile, Primera Región de Tarapacá, Provincia del Tamarugal, Comuna de Pozo Almonte, a 12 kilómetros al Noroeste de Mamiña, a 120 kilómetros al Noreste de la Ciudad de Iquique y a 1,800 kilómetros al Norte de la Ciudad de Santiago. Cerro Colorado se encuentra a una altura de 2,600 m.s.n.m.

El proceso productivo en Compañía Minera Cerro Colorado contempla las siguientes etapas:

- Extracción del mineral
- Chancado, aglomeración

-
- Diagrama de flujo detallado del proceso de refinación de cobre en la planta de Chuquibambilla:
- MINA**: Fuente inicial de mineral.
 - Stockpile 10.000 Ton**: Almacén de mineral.
 - Hammero**: Molino de bolas para la reducción de tamaño.
 - Clasadores Hidroclásicos y Terciarios**: Equipos para la clasificación por tamaño.
 - Fuller y Svedala**: Equipos de cribado.
 - Tolvas de Alimentación**: Puntos de transferencia de material.
 - EXTRACCIÓN POR SOLVENTES**: Proceso principal de lixiviación y extracción.
 - Piscina PLS**: Piscina de Lixiviación y Solución.
 - Celdas**: Celdas de extracción por solventes.
 - ELECTROOBTENCIÓN**: Proceso de refinación electrolítica.
 - Cátodos 99,99% Cu**: Producto final de la refinación.
 - Poolero Refino**: Equipo para el refinado adicional.
 - AGLOMERACIÓN**: Proceso de aglomeración de concentrado.
 - AGLOMERACIÓN**: Proceso de aglomeración.
 - APILAMIENTO**: Apilamiento de concentrado.
 - LIXIVIACIÓN**: Lixiviación de concentrado.
 - Piscina PLS**: Piscina de Lixiviación y Solución.
 - Stocking**: Almacenamiento de concentrado.
 - Stocker Portátil 110 m x 500 m x 8 m**: Equipo de almacenamiento.
 - Piscina PLS**: Piscina de Lixiviación y Solución.
 - A Botadero de Ripios**: Disposición final de los residuos.

6

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Elaborar una propuesta de cambio de materialidad en los equipos del sistema de impulsión de PLS y REFINO de la planta 1, buscando la mejor alternativa existente en el mercado, que sea capaz de soportar la concentración de 15.000 PPM de cloruro, para aumentar la producción anual en 10.000 T de 38 KT a 48 KT para el año 2023.

3.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual de los equipos del sistema de impulsión de PLS y REFINO.
- Determinar los equipos más afectados por la innovación debido a la incorporación de cloruro de sodio en el proceso de lixiviación.
- Identificar y evaluar las alternativas de materiales de reemplazo para los equipos afectados.
- Proponer la solución de reemplazo definitivo de equipos.

4 Descripción y Justificación del Tema

En la Compañía Minera Cerro Colorado nace la necesidad de aumentar los niveles de producción para el cumplimiento de metas de producción del año 2023. Una de las alternativas es lixiviar los minerales sulfuros secundarios, para ello se debe modificar el proceso actual de lixiviación de cobre, mediante la adición de sal industrial (cloruro de sodio, NaCl) con el fin de mejorar la recuperación de cobre en pilas de la planta.

En el diseño original de la planta fue construida para la lixiviación de los óxidos de cobre. La nueva estrategia, consiste en incorporar la lixiviación de los sulfuros secundarios de cobre, agregando el cloruro de sodio como una nueva variable a considerar en el proceso de lixiviación, aumentando la recuperación, producción y vida útil del yacimiento.

Producto de esta nueva variable en el proceso de lixiviación, aumentan significativamente las concentraciones de cloruro en los distintos fluidos del proceso de PLS y REFINO. Este aumento de concentración de cloruro en los fluidos del proceso genera corrosión en los equipos actuales de la compañía, lo que implica buscar una nueva materialidad que sea capaz de operar sin daño a los equipos.

Por lo siguiente, se presentará una propuesta de cambio de materialidad para el sistema de impulsión de PLS, y REFINO del proceso de lixiviación, con el fin de aumentar la producción y disminuir el costo unitario de la compañía, para lograr que sea sostenible.

5 Marco Teórico

5.1 Descripción del Proceso de lixiviación de Minerales

5.1.1 Proceso de Lixiviación

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico, agua y agentes oxidantes. Este proceso se basa en que los minerales son sensibles al ataque de fluidos ácidos y oxidantes.

El área de Lixiviación es una sección funcional del proceso global de LIX SX EW, el cual es un proceso continuo y dinámico donde se recibe el mineral proveniente del Área de Aglomerado, para luego ser apilado en las pilas de lixiviación e irrigado con una solución de ácido sulfúrico, para obtener la solución cargada con cobre (PLS), la cual es entregada al cliente interno que es el Área de Extracción por Solventes.

El área de Lixiviación produce una solución cargada de cobre (PLS) para el área de Extracción por Solventes. El tratamiento del mineral en el Área de Lixiviación se realiza en 2 etapas conocidas como:

- Sistema de Pilas de Lixiviación
- Sistema de piscinas y bombeo.

Usa como flujos auxiliares la energía eléctrica, agua y aire para los equipos.

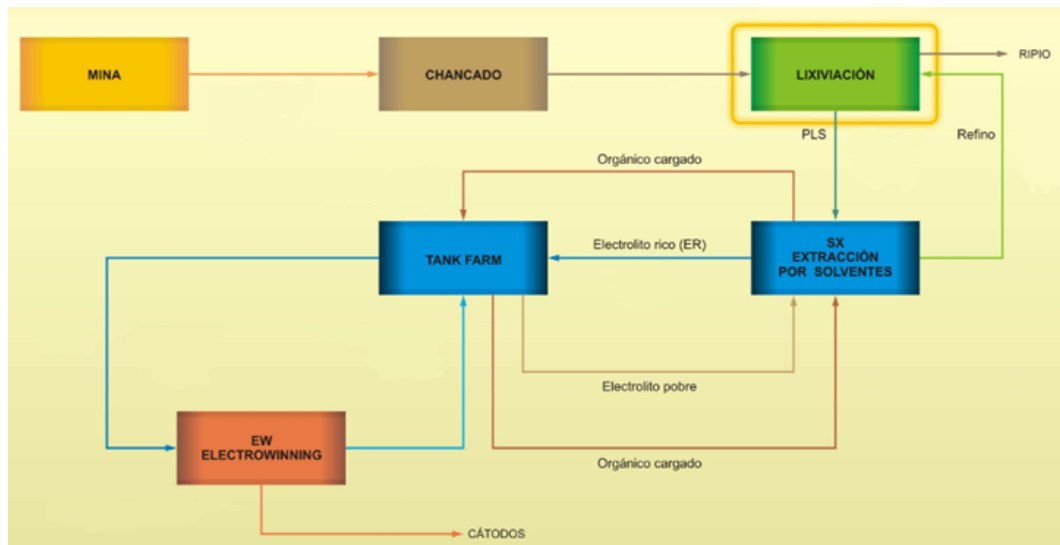


Figura n°2: Diagrama de ubicación del área de Lixiviación en el proceso productivo Compañía Minera Cerro Colorado

5.1.2 Sistema de Pilas de Lixiviación

El sistema de Lixiviación se encarga de la disolución del cobre presente en el mineral y comprende la colocación de tuberías, mangueras e irrigación de las pilas.

El Sistema de Lixiviación disuelve el cobre contenido en el mineral regándolo con ácido, produciendo una solución cargada con cobre llamada PLS (Pregnant Leaching Solution), la cual es recolectada por las tuberías colocadas en la parte inferior de las pilas antes del apilamiento. Esta solución es enviada al sistema piscinas para luego ser impulsada a la extracción por solventes. Las pilas usadas son dinámicas, ya una vez terminado un ciclo de lixiviación, el mineral es retirado y una nueva pila es acopiada sobre el revestimiento. La pila tiene un ciclo de lixiviación de aproximadamente 300 días

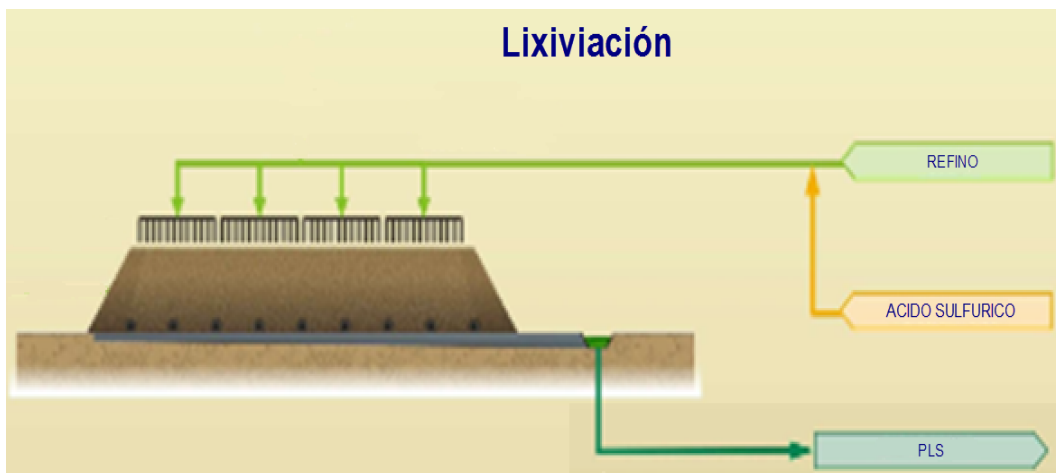


Figura n°3: Diagrama del sistema de lixiviación

5.2 Propiedades de los Materiales

5.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son aquellas que logran cambiar la materia sin alterar su composición, dichas propiedades se ponen de manifiesto ante estímulos como la electricidad, la luz, el calor o la aplicación de fuerzas a un material, producto de éstas,

los materiales pueden variar en tres estados distintos como: Estado Sólido, Líquido y Gaseoso.

5.2.2 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades de los sólidos que se manifiestan cuando aplicamos una fuerza. Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de estos de resistir acciones de cargas, las cargas o fuerzas actúan momentáneamente y tienen carácter de choque.

Las propiedades mecánicas principales son: dureza, resistencia, elasticidad, plasticidad y resiliencia.

5.2.3 Propiedades Fisicoquímicas

Resistencia a la Corrosión: La corrosión es definida como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión. La corrosión puede ser mediante una reacción química (oxido reducción) en la que intervienen dos factores: la pieza manufacturada y/o el ambiente, o por medio de una reacción electroquímica.

5.3 El Problema de la Corrosión y los Costos Económicos

La inadecuada selección de un material con resistencia a la corrosión, puede ser un error de alto costo. Los perjuicios directos o indirectos son:

Sustitución del equipo corroído.

Super dimensionado para soportar la corrosión.

- Interrupción del proceso productivo debido a pérdidas.
- Contaminación del producto y medio ambiente.
- Pérdida de eficiencia del proceso

En el caso de los aceros inoxidable, la resistencia a la corrosión se debe fundamentalmente a la capacidad que poseen de formar una película protectora (película pasiva) sobre su superficie, en ambientes oxidantes. La película pasiva es resistente a procesos de oxidación posteriores a su formación y a otras formas de ataques químicos. Su espesor puede estar a nivel molecular; la película es invisible y generalmente tiene la capacidad protectora en ambientes oxidantes, por ejemplo, al aire y en ácido nítrico. La película pasiva de los aceros inoxidable se debe a la presencia de cromo en la aleación, cuando el contenido de cromo libre en la aleación es superior a 11%, el acero no se oxida y es llamado “stainless”, Inoxidable.

5.3.1 Costos Directos

Costos de remplazar estructuras o maquinaria corroída o de sus componentes. También se incluyen los costos de prevención y de protección, de uso de materiales resistentes a la corrosión en lugar de acero inoxidable. Se estima que son alrededor de un 3 a un 4 % del PIB. Un 15 % de esta cantidad podría ser ahorrada con un adecuado conocimiento y aplicación de la tecnología de la corrosión.

5.3.2 Costos Indirectos

- Tiempo de Parada de la Planta: durante la reparación; en el caso de centrales nucleares, puede llegar a ser de cientos de millones de dólares por día.
- Pérdida de producto: Fugas en contenedores, tanques, tuberías.
- Pérdidas de eficiencia: Intercambiadores de calor → disminución de la eficiencia de la transferencia de calor, reducción de la capacidad de bombeo. Corrosión de pistón y cilindro en los motores de los automóviles.

- Contaminación: Productos químicos preparados: jabones (cobre); tintas (metales); compuestos farmacéuticos; agua (antiguas tuberías de plomo).

5.4 Sal

La sal común, conocida popularmente como sal, corresponde a la sal denominada cloruro sódico (o cloruro de sodio), cuya fórmula química es NaCl. Existen cuatro tipos de sal, según su procedencia.

La sal marina y la de manantial, que se obtienen por evaporación; la sal gema, que procede de la extracción minera de una roca mineral denominada halita, y la sal vegetal que se obtiene por concentración, al hervir una planta gramínea.

La halita, sal gema o sal de roca es un mineral sedimentario, el cual se puede formar por la evaporación de agua salada, en depósitos sedimentarios y domos salinos. Está asociada con silvita, carnalita y otros minerales. Su composición química es cloruro de sodio (NaCl).

Se utiliza para la alimentación del ser humano, animales domésticos y ganados; se emplea, además, en la industria para la fabricación de soda, ácido clorhídrico, cloro, lejía y otros productos, en los que destaca el PVC. En invierno se usa como anticongelante en las carreteras.

5.5 Equipamiento Industrial de Impulsión

5.5.1 Bombas

Una bomba es un dispositivo empleado para elevar, transferir o comprimir líquidos y gases, en definitiva, son máquinas que realizan un trabajo para mantener un líquido en movimiento. Consiguiendo así aumentar la presión o energía cinética del fluido.

Existen infinidad de formas de clasificación de bombas, pero, fundamentalmente se pueden dividir en dos grandes grupos:

Bombas volumétricas o de desplazamiento positivo: entre las que se encuentran por ejemplo las alternativas, rotativas y las neumáticas, pudiendo decir a modo de síntesis que son bombas de pistón, cuyo funcionamiento básico consiste en recorrer un cilindro con un vástago.

Bombas dinámicas o de energía cinética: fundamentalmente, consisten en un rodete que gira acoplado a un motor. Entre ellas se sitúan las regenerativas, las especiales, las periféricas o de turbinas y una de las más importantes, las centrífugas.

Los parámetros principales que identifican una bomba son.

- Presión.
- Caudal.
- Líquido Para Bombear.
- Potencia necesaria.

5.6 Mantenimiento

La exigencia de una planta minera para el cumplimiento de la rentabilidad para su visión de producción es una tarea difícil de cumplir sin una buena disciplina operacional y mantenimiento. En décadas anteriores, el mantenimiento fue visto como un problema, puesto que, al tener la necesidad de operar equipos en forma continua, desde ese momento el mantenimiento fue visto como un mal necesario, una función subordinada a la producción, cuya finalidad era reparar defectos en forma rápida y barata. Una vez integrada la filosofía de la calidad total, trajo como evidencia un compromiso y esfuerzo de todas las unidades de negocio, a tal punto, que una de las actividades de la empresa como es el mantenimiento, depende el éxito o el fracaso de ésta, una vez realizada esta analogía el mantenimiento se desprende como una función miscelánea, ya que, a través de él, se produce un bien real que puede resumirse en:

- Capacidad de producir con calidad
- Seguridad
- Rentabilidad

5.6.1 Misión del Mantenimiento

Actuar durante todo el ciclo de vida de un bien desde el proyecto hasta su desactivación, con el objeto de mejorar continuamente la disponibilidad operativa y los costos globales de mantenimiento.

- Asegurar que las instalaciones brinden las prestaciones esperadas durante el tiempo operativo
- Garantizar la conservación del patrimonio de la planta
- Mantener los costos de mantenimiento respecto del mercado

5.6.2 Objetivos del Mantenimiento

Maximizar la Producción:

- Asegurar la óptima disponibilidad y mantener la confiabilidad de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos
- Reparar las averías en el menor tiempo posible

Mínimo Costo:

- Reducir las fallas a su mínima expresión
- Aumentar la vida útil de las máquinas e instalaciones
- Manejo óptimo del stock de repuestos

- Lograr desenvolverse dentro de los costos presupuestados

5.6.3 Variables del mantenimiento

5.6.3.1 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que las instalaciones, máquinas o equipos, se desempeñen satisfactoriamente sin fallar, durante un período determinado, bajo condiciones específicas.

La probabilidad puede variar entre 0 (indica la certeza de falla) y 1 (indica la certeza de buen desempeño). Por lo tanto, la probabilidad de falla está necesariamente unida a la confiabilidad.

Indicadores que se utilizan para medir la confiabilidad de un equipo:

MTBF: Es el tiempo promedio de buen funcionamiento para un periodo dado de la vida de un dispositivo, se obtiene dividiendo el tiempo total de operación entre el número total de fallas.

$$\text{MTBF} = \text{TBF} / F$$

TBF: Tiempo total de operación

F: Número de fallas

MTTR: Es el tiempo promedio para reparar la función de un dispositivo después de una falla funcional, se obtiene dividiendo el tiempo total de las reparaciones entre el número total de fallas.

$$\text{MTTF} = \text{TTR} / F$$

TTR: Tiempo total de reparación

F: Número de fallas

5.6.3.2 Disponibilidad

La disponibilidad es la proporción de tiempo durante el cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado.

Vemos entonces que la disponibilidad depende de:

- La frecuencia de las fallas
- El tiempo que nos demande reanudar el servicio

La disponibilidad se puede medir de la siguiente fórmula:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = (\text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})) \times 100$$

5.6.3.3 Mantenibilidad

La mantenibilidad es la probabilidad de que una máquina, equipo o sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un período de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad.

La mantenibilidad es la cualidad que caracteriza una máquina, equipo o sistema en cuanto a la facilidad de éste para realizar el mantenimiento, depende del diseño y pueden ser expresados en términos de frecuencia, duración y costo.

6 Desarrollo del Tema

6.1 Metodología Propuesta

La metodología aplicada es la siguiente:

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL: en base a la información recopilada y considerando las concentraciones de cloruro en los circuitos de la planta, se identificarán los equipos y materiales que están actualmente instalados.

DETERMINACIÓN DE FACTORES CRÍTICOS: Se realizará el análisis de las concentraciones de los circuitos, condiciones de operación y diagramas de flujo, determinando así, los equipos más afectados por la nueva condición de operación.

EVALUACIÓN TÉCNICA DE MATERIALES: se analizarán y se evaluarán técnicamente los materiales, a través de los datos e información estudiada. Dichos materiales deben tener la capacidad de resistencia a las condiciones de operación y diseño definidas por la nueva operación.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MATERIALES: se realizarán análisis de mercado y evaluación de propuestas según los materiales seleccionados en la evaluación técnica. Una vez revisadas todas las propuestas, se planteará una estimación de costo asociado al reemplazo definitivo.

SELECCIÓN DE LA PROPUESTA: una vez analizada la evaluación técnica y económica de todas las propuestas, se desarrollará la evaluación de criticidad y confiabilidad de los equipos dentro del proceso productivo.

6.2 Diagnóstico de la situación actual

Compañía Minera Cerro Colorado Ltda. (CMCC) introducirá a su proceso de lixiviación en pilas la adición de sal común (NaCl) para incrementar su producción de cobre. Ésta mejora en el proceso productivo, trae consigo un aumento de las concentraciones de cloruro en PLS y otros fluidos subsecuentes del proceso. Este aumento en los niveles de cloruro en los fluidos del proceso, implican necesariamente una revisión de los materiales presentes en la planta, tales como cañerías, válvulas, bombas, estanques y otros equipos y dispositivos, los cuales son necesarios evaluar para asegurar la continuidad operacional.

Actualmente se incorpora sal (cloruro de sodio NaCl) en el proceso a razón de 7 kg/T esto a llevado a operar con niveles de cloro en PLS a 3,5 gr/L

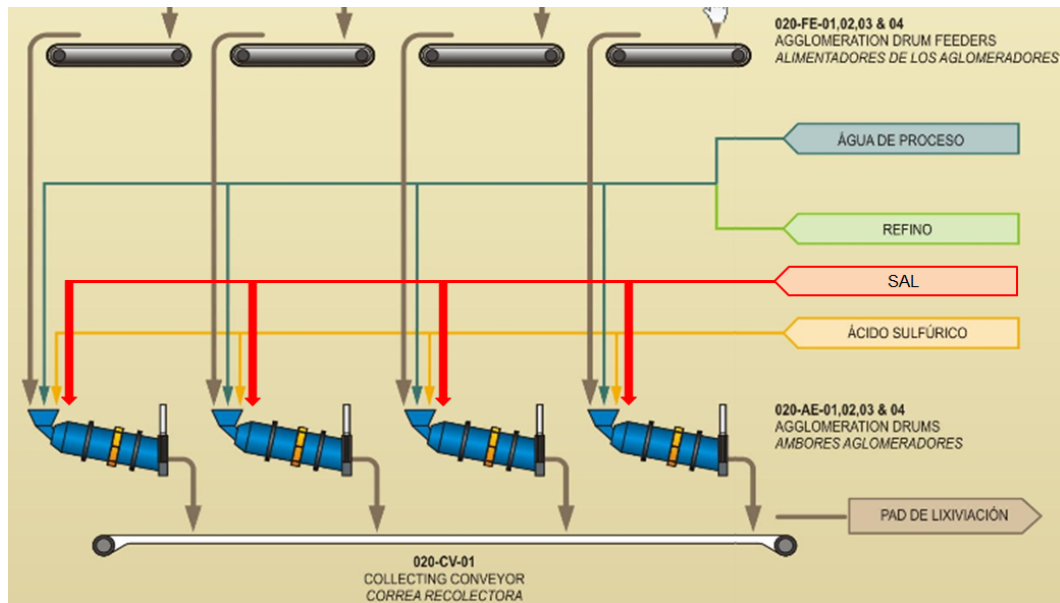


Figura n°4: “Diagrama de incorporación de cloruro de sodio, en aglomeración, Compañía Minera Cerro Colorado”

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Evaluación de los equipos actuales de la planta

Los materiales de la Planta de Cerro Colorado que actualmente y por diseño original tiene contacto con los fluidos descritos, corresponden a las series de aceros inoxidable 316 y 317. Bajo las condiciones actuales de operación en CMCC, estos aceros poseen una adecuada resistencia, con una velocidad de corrosión menor o igual a 0,1 mm/año cuando se enfrentan a bajas concentraciones de cloruros.

Según las condiciones identificadas para los fluidos del proceso y para los aceros en contacto, se puede estimar que las condiciones límites o aconsejables de resistencia a la corrosión por cloruros, son las siguientes:

- Los aceros 316 toleran hasta 3 000 ppm de cloruro en agua (límite de referencia de fabricantes de aceros),

- Los aceros 317 son capaces de tolerar hasta 5 000 ppm de cloruros en agua (límite de referencia de fabricantes de aceros)

En resumen los materiales de los equipos actuales de la planta son en un 90% de 316L y un 10% de 317L.

6.2.2 Análisis de la información

A continuación, se realizará una descripción de circuitos y levantamiento de equipos insertos en el área de lixiviación.

- Equipos circuito PLS
- Equipos circuito Refino

Equipos PLS

Los equipos principales del sistema de impulsión de PLS son bombas, válvulas y manifold. Las bombas de PLS planta 1, es un sistema compuesto por 3 bombas centrífugas verticales con una potencia de 350 HP, las que poseen un caudal de 920 m³/hora y una altura dinámica TDH de 70 m con un cuerpo de acero de 317L SS.

Las bombas de PLS envían el PLS a la planta de SX, donde la solución cargada ingresa a los trenes de extracción por solvente.

UBICACIÓN	COMPONENTE	TIPO	MARCA	MODELO	TAMAÑO	MATERIAL	CANT
PLS PT1	VALVULA DESCARGA	MARIPOSA	DURCO	WAFFER	16"	316L SS	3
PLS PT1	VALVULA CHECK	DOBLE CHAPAleta	MUELLER	CF8M	16"	316L SS	3
PLS PT1	BOMBA	CENTRIFUGA VERTICAL	FLOWAY	FKM/MKH	19/18	317L SS	3
PLS PT1	MANIFOLD					316L SS	1

Figura n°5: “Tabla con equipos principales del circuito PLS”, Compañía Minera Cerro Colorado” Fuente: Elaboración propia.

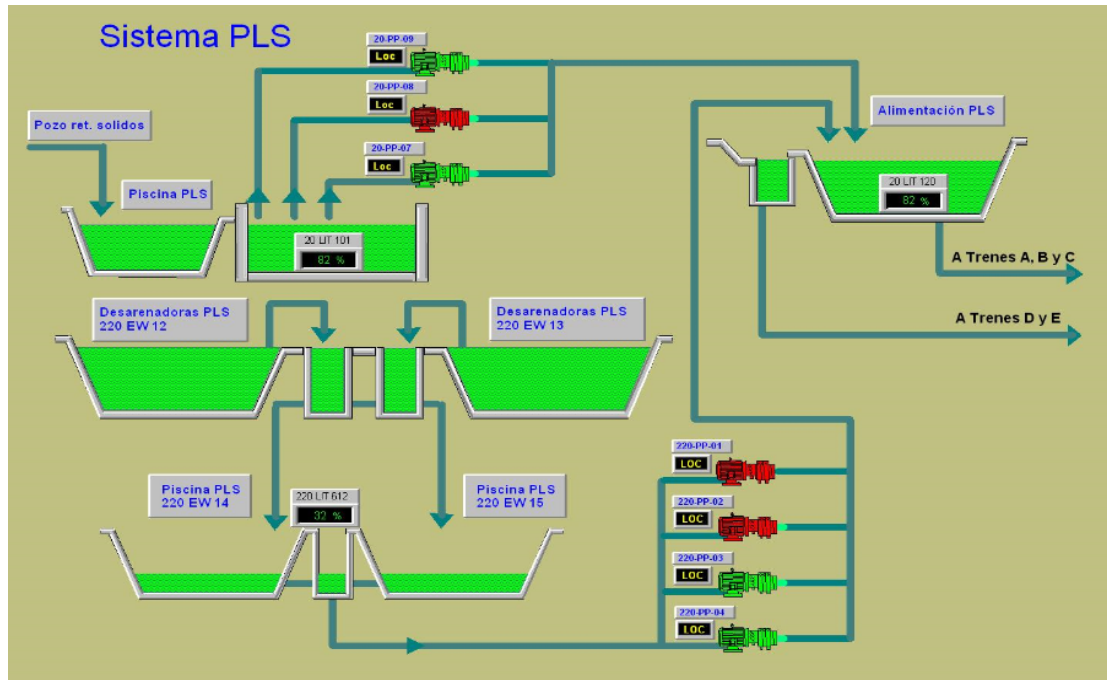


Figura n°6: “Diagrama con equipos principales del circuito PLS”, Compañía Minera Cerro Colorado” Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico

Equipos refinos

Los equipos principales del sistema de impulsión de Refino son bombas, válvulas y manifold.

Las bombas de Refino planta 1, son un sistema compuesto por 4 bombas centrífugas verticales con una potencia de 350 HP; poseen un caudal de 920 m³/hora y una altura dinámica TDH de 70 m con un cuerpo de acero de 317L SS.

Las bombas de Refino envían el Refino a las piscinas de cabeza de refino, por gravedad utilizarlas para regar las pilas.

UBICACIÓN	COMPONENTE	TIPO	MARCA	MODELO	TAMAÑO	MATERIAL	CANT
REFINO PT1	VALVULA DESCARGA	MARIPOSA	DURCO	WAFER	16"	316L SS	4
REFINO PT1	VALVULA CHECK	DOBLE CHAPALETA	MUELLER	CF8M	16"	316L SS	4
REFINO PT1	BOMBA	CENTRIFUGA VERTICAL	FLOWAY	FKM/MKH	19/18	317L SS	4
REFINO PT1	MANIFOLD					316L SS	1

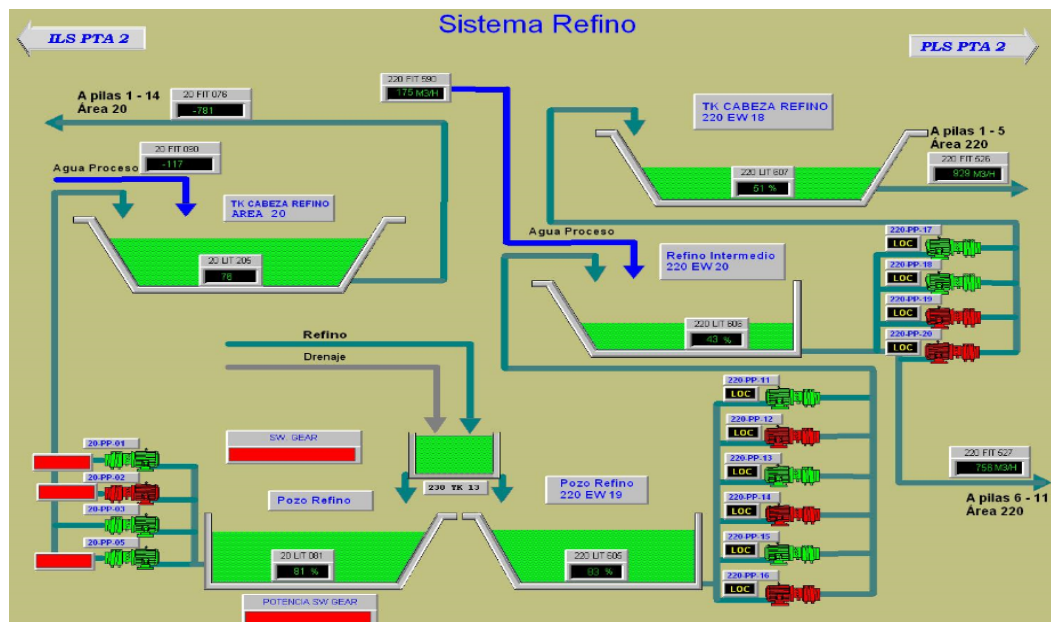


Figura n°7: “Tabla con equipos principales del circuito REFINO”, Compañía Minera Cerro Colorado” Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico

6.3 Determinación de factores críticos

6.3.1 Factores favorables

Con la incorporación de sal “cloruro de sodio” como nuevo método productivo se consideran las siguientes variables:

- Aumenta la recuperación y asegura la producción de cátodos de cobre de alta pureza.
- Aumenta la vida útil del yacimiento.
- No cambiaría el proceso, continuando así la extracción por solvente.
- No es necesaria la variación o cambio del diseño original flujos, equipos y circuitos de la planta.

Denotando así, solo la característica de cambio y reemplazo de equipos por materiales que resistan el nuevo ambiente corrosivo, sobre todo los cuales se exponen a altas concentraciones y temperaturas. Los materiales definitivos de los equipos críticos serán estudiados y evaluados en el estudio de materiales.

6.3.2 Factores desfavorables y problemáticas

Se identificaron los eventos de peligro que podrían ocurrir en los materiales expuestos a las futuras condiciones de concentración de cloruros, las cuales pudieran causar daño o lesión a las personas, equipos o medio ambiente.

Este análisis de factores de riesgo se desarrolló con la siguiente metodología:

- Identificar los peligros.
- Qué o quién puede ser dañado. (posible daño de material o de personal a cargo de la operación o mantenimiento)
- Evaluar los riesgos y decidir las precauciones.

- Registrar sus hallazgos y controlar/monitorear el riesgo

Para identificar los posibles peligros que pudiesen existir en los materiales existentes en las operaciones de CMCC por efecto del aumento en la concentración de cloruros, se realizó un barrido de las distintas operaciones unitarias del proceso, las cuales se indican a continuación:

impulsión de PLS y Refino:

- Identificar los peligros
 - Se identifica un potencial deterioro en las bombas de impulsión de PLS/ILS/Refino, por corrosión, en la condición actual, no así con la solución para la condición de diseño.
 - Se identifica un peligro crítico en los spools de cañerías metálicas (soldaduras, por corrosión intergranular), las cuales se encuentran distribuidas en el área.
- Qué o quién puede ser dañado (posible daño de material o de personal a cargo del proceso o procedimiento)
 - La ruptura de una tubería provocaría un derrame, el cual podría afectar a personas y/o medio ambiente, dependiendo del tamaño de la ruptura y la existencia de presión en la tubería.
- Evaluar los riesgos y decidir la toma de las precauciones
 - Este riesgo está presente en todos los spools de cañerías. Como medida de precaución, se recomienda la instalación de señalética indicando el peligro y/o cercar los puntos críticos con cinta de peligro durante el período transitorio hacia la condición de operación futura.
- Registrar sus hallazgos y controlar/monitorear el riesgo

- Registrar los eventos para cuantificar su frecuencia, además de mantener un monitoreo visual constante de los spools de cañerías.
- Disponer en las cercanías de cada punto crítico, el material de absorción correspondiente (vermiculita, arena seca, tierra o ceniza) en el período transitorio.

Problemáticas:

Se observa que las condiciones de mayor criticidad para la operación en el cual se proyecta un aumento en la concentración de cloruros en los fluidos son:

- El sector de los sistemas de bombeo del área de lixiviación, ya que existe el riesgo de que puede provocar pitting en las líneas de descarga (manifold), las cuales estarían expuestas a una posterior pérdida de masa que, sumado a las condiciones de presión en la operación a las que se ven expuestas, puede afectar su integridad.

Los riesgos principales son:

- Ruptura de tuberías, lo cual podría causar, desde un pequeño derrame, hasta salpicadura de una solución ácida, con riesgo a la operación, personas y medio ambiente.
- Falla en bombas, lo cual podría aumentar, desde la frecuencia de mantención, hasta una falla del equipo, con riesgo a la operación, personas y medio ambiente.
- Filtración en soldaduras por corrosión localizada (intergranular), con riesgo a la operación, personas y medio ambiente.

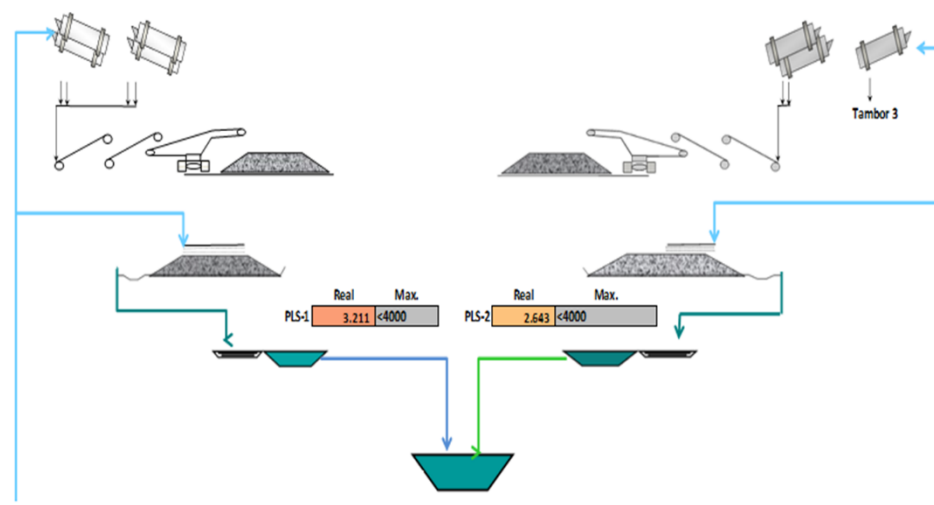


Figura n°8: “Diagrama de flujo de planta” Compañía Minera Cerro Colorado.

Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico.

Características de los flujos para condición futura

N°	DESCRIPCIÓN FLUIDOS	H+(G/L)	CL-(PPM)	PH	TEMPERATURA (°C)
1	FLUJO A AGLOMERADOR N°1	15,45	15.000	1,27	21,00
2	FLUJO A AGLOMERADOR N°2	15,45	15.000	1,27	21,00
3	PLANTA 1 (PILA)	9,20	15.000	1,53	20,90
4	PLANTA 2 (PILA)	9,20	15.000	1,53	20,90
5	PLS	9,20	15.000	1,53	20,90
6	REFINO	15,45	15.000	1,27	21,00
7	ER	167,50	30	1,00	22,80
8	ECC	181,00	25	1,00	49,00

Figura n°9: “Tabla con la concentración de flujo en su condición futura” Compañía Minera Cerro Colorado

Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico.

Para la condición futura la compañía declara la incorporación de sal a razón de 13 kg/T, esto llevaría un aumento en forma gradual del cloro en las soluciones de PLS y refino de 3,5 gr/L hasta llegar a los 15 gr/l (15.000 ppm Cl por litro).

Con esta condición la compañía estima un aumento de cobre en el PLS de 1 gr/L, ya que los minerales a lixiviar tienen mejor ley, condición a evaluar en los resultados de la propuesta con los Flujos de PLS de 2300 m³/h y una eficiencia de la planta SX de un 92%, se estima aumentar en 18.200 T de cobre la producción del año.

Características de los flujos en condiciones de diseño

N°	DESCRIPCIÓN FLUIDOS	H+(G/L)	CL-(PPM)	PH	TEMPERATURA (°C)
1	FLUJO A AGLOMERADOR N°1	15,45	232	1,27	21
2	FLUJO A AGLOMERADOR N°2	15,45	232	1,27	21
3	PLANTA 1 (PILA)	9,2	185	1,53	20,9
4	PLANTA 2 (PILA)	9,2	185	1,53	20,9
5	PLS	9,2	185	1,53	20,9
6	REFINO	15,45	232	1,27	21
7	ER	167,5	47,5	1	22,8
8	ECC	181	24	1	49

Figura n°10: “Tabla con condiciones de servicio” Compañía Minera Cerro Colorado

Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico.

Se observa que la diferencia básica entre las condiciones actuales y de operación a futuro, es la concentración de cloruros en los fluidos asociados a las etapas de lixiviación y extracción de SX.

CMCC ha definido 2 tipos de fluidos a los que los materiales estarán expuestos:

- Fluidos de lixiviación de alto contenido en cloruros, con PH cercano a 1, y alta acidez sulfúrica, (entre 9 y 15 g/L de ácido sulfúrico), operando a temperatura ambiente, (aprox. 21 °C). Son los fluidos correspondientes a PLS y Refino.
- Fluidos con menor concentración de cloruros, pero mayor contenido en ácido sulfúrico, (hasta 180 g/L), operando a temperaturas de hasta 49 °C). Son los fluidos correspondientes a electrolito ER y ECC.

Para los fluidos de ER y ECC se ha considerado que las condiciones futuras de operación son similares a las actuales, por lo que no se consideran cambios en los materiales.

6.4 Evaluación técnica de materiales

La principal diferencia entre la condición de operación actual y condición de operación en el futuro es la concentración de cloruro en los fluidos asociadas a la etapa de lixiviación.

Las consideraciones que se manejan para la determinación de las condiciones corrosivas de los fluidos son las siguientes:

- Acidez (concentración de H⁺)
- Cloruro (concentración de Cl⁻)
- pH
- Temperatura

Se pueden identificar áreas en las cuales se tienen diferentes condiciones de operación y diferentes factores predominantes en la corrosividad de los fluidos:

En el área de la lixiviación y extracción SX se encuentra una elevada concentración de cloruro en comparación con el resto de la planta y donde la temperatura no es un factor importante en la corrosividad del fluido.

Se analizarán los materiales de los equipos insertos en los circuitos de PLS y Refino, los que pertenecen al área de lixiviación. Los materiales que se contemplan son los austeníticos, súper austeníticos (de alto rendimiento), los superduplex, y el hastelloy, ya que, técnicamente, presentan una resistencia a la corrosión de los nuevos fluidos.

En concreto:

- Austenítico tipo 904L UNS N08825
- Austenítico tipo 254 SMO UNS S32254
- Austenítico tipo 654 SMO UNS S32654
- Duplex tipo 2205 UNS
- Super-Duplex tipo 2507 UNS S32750
- Hastelloy tipo C 276 UNS N10276
- Titanio G2

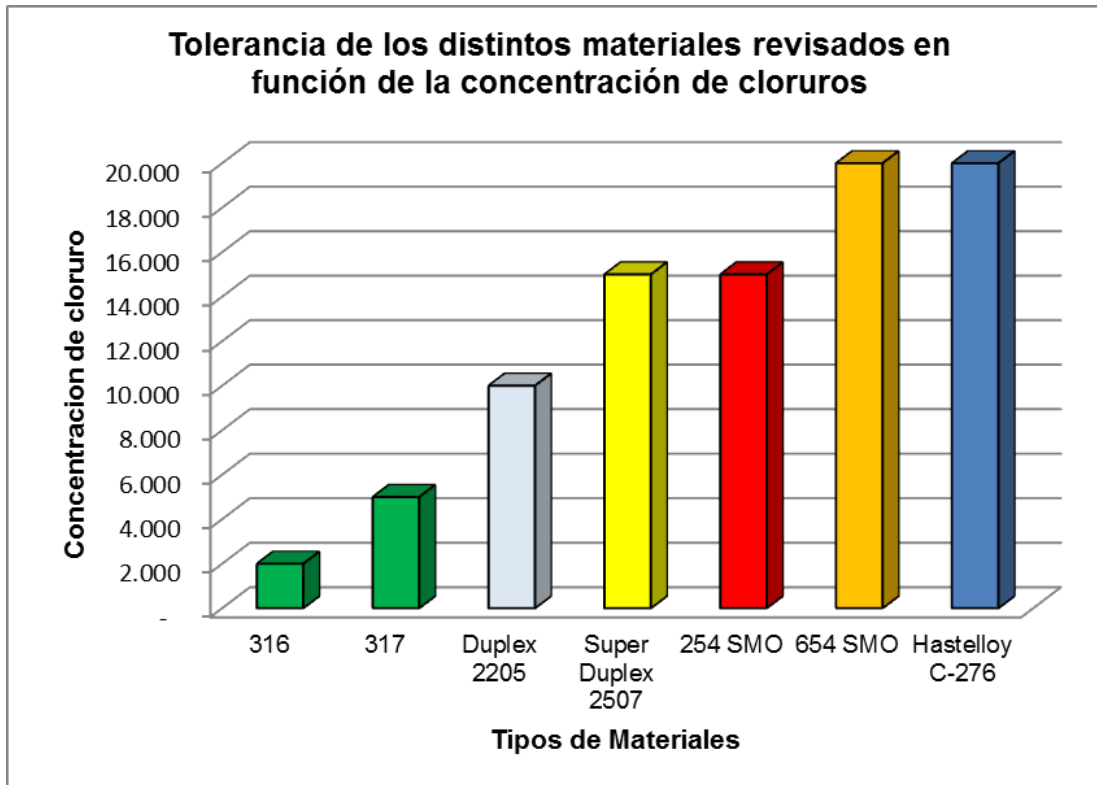


Figura n°11: “Grafico de materiales v/s concentraciones”

Fuente: Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico.

6.4.1 Guía para la selección de materiales

Norma

La norma **ASTM G-48**, ampliamente utilizada, establece los métodos de ensayo para cuantificar las CCT y CPT, siendo:

- CCT: Temperatura crítica de inicio de Corrosión por grieta
- CPT: Temperatura crítica de inicio de Corrosión por Pitting.

Outokumpu grade	ASTM G48	
	Metodo E	Metodo F
	CPT	CCT
	°C	°C
Duplex		
2205	40	20
2507	65	35
Austeníticos		
Type 316L (4401/4404)	20	<0
Type 317L (4438)	25	<0
904L	40	10
254 SMO	65	35
654 SMO	>90	60
HASTELLOY C-276	110	95
TITANIO G2		

Figura n°12: “Tabla con los valores típicos del CPT y CCT para algunos tipos de acero inoxidable según norma ASTM G48”

Fuente: Handbook of Stainless Steel (2013).

La norma **ASTM G-150**, establece el método de ensayo donde proporciona una predicción de la resistencia a la propagación estable de la corrosión por picadura de los aceros inoxidables y aleaciones relacionadas en un medio estándar.

Temperatura °C

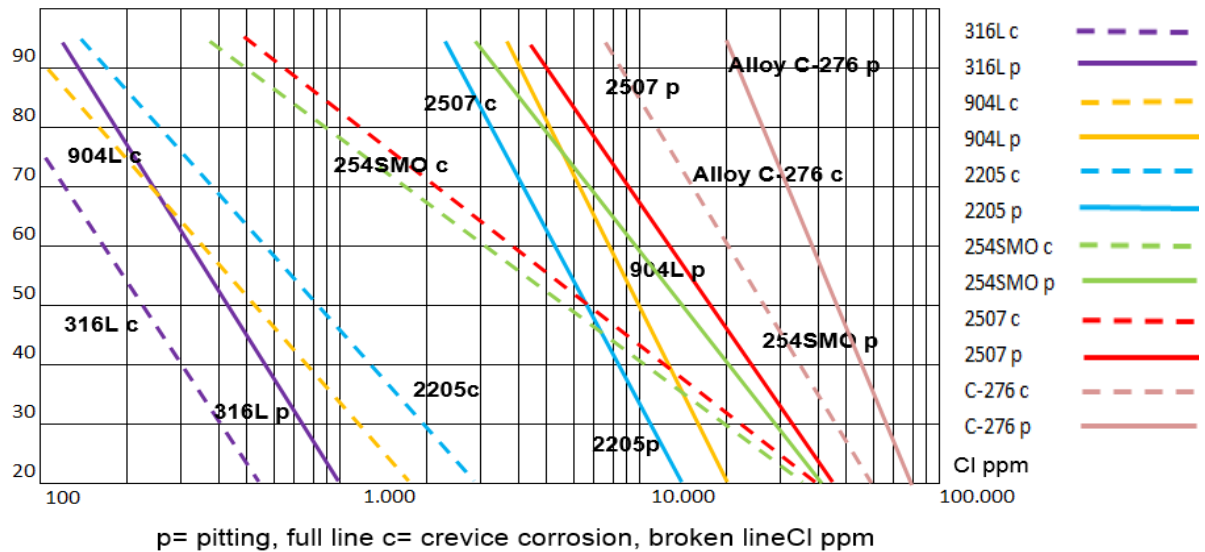


Figura n°13: “Diagrama de ingeniería ilustra el riesgo de picaduras y grietas de corrosión en acero inoxidable de alto rendimiento, expuesto a distintas concentraciones de cloruro y a distintas temperaturas.

Fuente: Handbook of Stainless Steel (2013).

Se ilustra que a diversas temperaturas entre 20°C y 100°C, el acero inoxidable se puede utilizar en diferentes concentraciones de cloruro.

Se puede observar que:

A 20 °C, tanto el tipo 904L, como el 254 SMO superarían los 15.000 ppm de ion cloro para que se pudiera dar la corrosión por pitting. El tipo 654SMO, tendría un mejor comportamiento.

A 20° C, el 254 SMO supera ampliamente los 15.000 ppm en relación con la corrosión por grieta, con un límite aproximado de 35.000 ppm. No así el tipo 904L, cuyo límite estaría en torno a los 2.000 ppm.

A 40 °C, y también en relación a la corrosión por pitting, el tipo 254 SMO soportaría una concentración máxima de aprox. 15.000 ppm.

T°	316L		904L		2205		254SMO		2507		C-276	
	C	p	c	p	C	p	C	P	c	p	c	p
20	550	1.000	1.700	20.000	2.900	14.500	35.000	40.000	40.000	45.000	60.000	80.000
30	400	780	1.200	17.000	1.950	12.500	21.000	31.000	25.000	35.000	45.000	65.000
40	300	600	760	14.000	1.350	9.300	13.000	24.000	17.000	22.700	35.000	56.000
50	220	490	630	12.000	820	7.800	7.800	17.000	9.700	22.000	25.000	45.000
60	180	380	360	9.500	560	6.300	4.900	14.000	6.000	13.650	20.000	39.000
70	120	300	240	7.800	370	5.250	2.900	9.800	3.800	13.500	15.000	32.000
80		240	170	6.700	250	4.350	1.700	7.300	2.600	9.500	12.000	28.000
90		180	100	5.600	170	3.700	1.100	5.600	1.700	7.500	8.500	20.000

Figura n°14: “Diagrama muestra la concentración de cloro en PPM a diferente temperatura de los materiales en evaluación”

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla de la figura 13

La tabla de la figura 14, nos muestra las concentraciones de cloro que pueden soportar los materiales en evaluación a distintas temperaturas. También se realiza una separación de los valores tanto para pitting (p) como para grieta (c).

De esta tabla también se puede realizar una comparación en algunos de ellos y se puede observar que el super dúplex 2507 estaría por sobre el 254 SMO, pero se puede considerar que se comportan similar en todas las evaluaciones.

El mejor comportamiento fue, como era de esperar, el del Hastelloy C276. Éste, (Hastelloy C276) tiene las óptimas propiedades de resistencia a la corrosión por pitting y grieta, como se puede ver en las tablas.

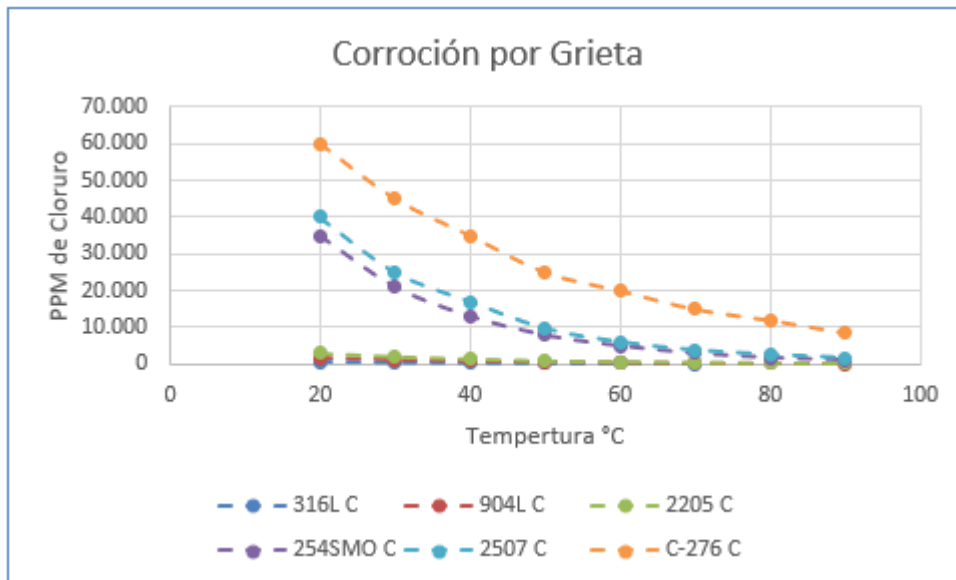


Figura n°15: “Diagrama crevice corrosión”

Fuente: Elaboración propia.

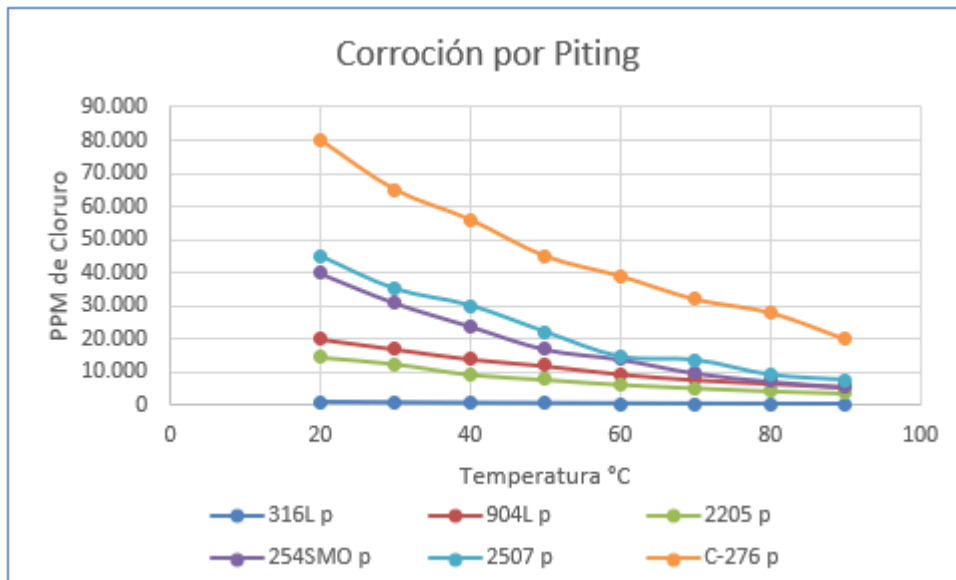


Figura n°16: “Diagrama pitting corrosión”

Fuente: Elaboración propia.

Si bien el Hastelloy C276 es el que mejor se comporta de los materiales en evaluación con respecto a la corrosión en fluidos con alto nivel de cloro, un aspecto a evaluar en el siguiente capítulo será el costo en comparación con los otros materiales.

6.4.2 Selección técnica de materiales

La elección de materiales se realizará bajo dos conceptos:

- Concentración de Cloruro v/s Temperatura de operación
- CCP y CCT

Considerando los siguientes datos entregados por la compañía, en las áreas donde se está desarrollando la propuesta, se realizará la primera selección de materiales que pasarán a la evaluación económica:

- Una concentración de cloruro de 15 g/L
- Una acidez de 9,20 a 15,45 g/L, con un pH de 1,27 a 1,53
- Una temperatura promedio de 21°C

Con la concentración de cloruro en 15.000 PPM o 15 g/l y la temperatura de operación de 21 °C, más los ensayos estudiados, se pueden seleccionar los materiales que pasarán a la evaluación económica.

Los materiales seleccionados son:

- 254SMO
- Super Duplex 2507
- Hastelloy C276

Del total de siete materiales en estudio, se seleccionaron tres para la evaluación económica. El 2205 y el 904L no soportan los 15.000 PPM de cloro, por lo tanto, quedarían fuera de la selección.

El titanio G2, si bien esta por sobre las concentraciones en estudio, no es seleccionado, ya que estaría sobredimensionado para lo que se necesita.

El 654SMO soporta concentraciones similares al Hastelloy C276, pero, una de las variables, es que es un material poco utilizado en el mercado, no así el Hastelloy C276 que tiene aplicaciones en minería en similares condiciones.

Técnicamente, éstos materiales soportarían las condiciones propuestas por la compañía. En el siguiente capítulo, se evaluará si, económicamente, son compatibles para la propuesta.

6.5 Evaluación económica de materiales

En la evaluación técnica, se analizaron siete tipos de materiales que pueden soportar las concentraciones de cloro que corresponde a la gama de aceros austeníticos y aleaciones duplex. De éstos, se seleccionaron tres para la propuesta económica, debido a sus capacidades para soportar concentraciones de cloruro de 15.000 y hasta 20.000 PPM.

- 254 SMO UNS S32254
- SUPER DUPLEX 2507 UNS S32750
- HASTELLOY C276 UNS N10276

Más adelante, se analizarán unas tablas con los valores de los componentes en evaluación, cotizados en los tres materiales seleccionados, con distintos proveedores.

Además, se presentará una propuesta, la que puede ser una combinación de ellas, y que está analizada desde la criticidad de cada equipo y componente en el proceso.

El costo financiero del impacto que genera la detención del proceso se obtiene en el siguiente punto a evaluar.

6.5.1 Análisis del impacto financiero

A continuación, se presenta una tabla donde se analiza el impacto financiero que genera una detención de una hora de producción.

ANALISIS EW		
Rendimiento Producción	Ton / hr	10,42
Precio Venta Cátodos año 2023	USD/lb	3,85
Costo Variable Producción Cátodos	USD/lb	1,6
Libra/Tonelada	Lb/Ton	2.204,62
Impacto Financiero de Detención Producción	USD/hr	51.687,31

Figura n°17: “Tabla con impacto financiero cuando es detenido el proceso”

Fuente: “Gerencia de Mantenimiento de Compañía Minera Cerro Colorado”

El rendimiento de producción corresponde a la producción promedio día de 250 toneladas de cobre fino, el que, dividido por 24 horas de producción, da un promedio de 10,42 Ton/hr.

El precio de venta del cobre es el precio promedio del año 2023 según información de Cochilco, que fue de 3,85 US\$/lb.

El costo variable de producción de cátodos corresponde al costo de producir una libra de cobre, que es 1,6 US\$/lb

La última línea de la tabla corresponde a un factor de conversión de unidad de medida.

En resumen, el impacto financiero que provoca la detención del proceso productivo es de 51.687,31 US\$/hora. Ya que, para realizar el cambio de los equipos en estudio, se debe detener el proceso productivo.

Este valor se utilizará en las tablas de análisis de costo de los distintos materiales y escenarios de evaluación, de acuerdo con las cotizaciones presentadas por los distintos proveedores.

También, es incorporado el costo que significa realizar el cambio de los equipos y componentes analizados en la propuesta desde la ejecución del mantenimiento; este costo es el servicio externo promedio que significará realizar el cambio de los equipos involucrados.

6.5.2 Tablas de evaluación de costos de las propuestas

TABLA DE VALORES MATERIALES ACTUALES EN 316L Y 317L							
TAG EQUIPO	TIPO EQUIPO	UBICACIÓN	MATERIAL	COSTO UNITARIO US\$	CANTIDAD	COSTO TOTAL US\$	PLAZO ENTREGA
020PP001-004	BOMBA VERTICAL	REFINO PLANTA 1	317L	149.585	4	598.340	18 SEMANAS
020PP007-009	BOMBA VERTICAL	PLS PLANTA 1	317L	149.585	3	448.755	18 SEMANAS
VALVULAS			316L	8.890	24	213.360	24 SEMANAS
MANIFOLD			316L	55.000	2	110.000	24 SEMANAS
						1.370.455	
COSTO MTTO	Costo de Mantenimiento para realizar el cambio de los componentes es de US\$ 250.000 con 4 detenciones en el año					1.000.000	
COSTO PROD.	Considerando un costo de detención de la producción de 51.687 US\$/hora y una detención de 48 horas 4 veces en el año					9.923.904	
					TOTAL US\$	12.294.359	

Figura n°18: “Tabla resumen de estimación de costo por reemplazo de equipos sin considerar cambio en los materiales” Fuente: Elaboración propia

TABLA DE VALORES EN EL MATERIAL HASTELOY C276							
TAG EQUIPO	TIPO EQUIPO	UBICACIÓN	MATERIAL	COSTO UNITARIO US\$	CANTIDAD	COSTO TOTAL US\$	PLAZO ENTREGA
020PP001-004	BOMBA VERTICAL	REFINO PLANTA 1	HASTELLO Y C276	299.300	4	1.197.200	24 SEMANAS
020PP007-009	BOMBA VERTICAL	PLS PLANTA 1	HASTELLO Y C276	299.300	3	897.900	24 SEMANAS
VALVULAS			HASTELLO Y C276	18.396	24	441.504	28 SEMANAS
MANIFOLD			HASTELLO Y C276	243.045	2	486.090	32 SEMANAS
						3.022.694	
COSTO MTTO	Costo de Mantenimiento para realizar el cambio de los componentes es de US\$ 250.000 con una sola detención					250.000	
COSTO PROD.	Considerando un costo de detención de la producción de 51.687 US\$/hora y una detención de 48 horas por única vez					2.480.976	
					TOTAL US\$	5.753.670	

Figura n°19: Tabla resumen de estimación de costo por reemplazo de equipos en material HASTELLO Y C276” Fuente: Elaboración propia

TABLA DE VALORES EN EL MATERIAL SUPER DUPLEX 2507							
TAG EQUIPO	TIPO EQUIPO	UBICACIÓN	MATERIAL	COSTO UNITARIO US\$	CANTIDAD	COSTO TOTAL US\$	PLAZO ENTREGA
020PP001-004	BOMBA VERTICAL	REFINO PLANTA 1	SUPER DUPLEX	204.165	4	816.660	43 SEMANAS
020PP007-009	BOMBA VERTICAL	PLS PLANTA 1	SUPER DUPLEX	204.165	3	612.495	43 SEMANAS
VALVULAS			SUPER DUPLEX	12.534	24	300.816	32 SEMANAS
MANIFOLD			SUPER DUPLEX	102.255	2	204.510	24 SEMANAS
						1.934.481	
COSTO MTTO	Costo de Mantenimiento para realizar el cambio de los componentes es de US\$ 250.000 con una sola detención					250.000	
COSTO PROD.	Considerando un costo de detención de la producción de 51.687 US\$/hora y una detención de 48 horas por única vez					2.480.976	
					TOTAL US\$	4.665.457	

Figura n°20: “Tabla resumen de estimación de costo por reemplazo de equipos en material Súper Duplex 2507” Fuente: Elaboración propia

TABLA DE VALORES EN EL MATERIAL 254 SMO							
TAG EQUIPO	TIPO EQUIPO	UBICACIÓN	MATERIAL	COSTO UNITARIO US\$	CANTIDAD	COSTO TOTAL US\$	PLAZO ENTREGA
020PP001-004	BOMBA VERTICAL	REFINO PLANTA 1	254 SMO	198.760	4	795.040	18 SEMANAS
020PP007-009	BOMBA VERTICAL	PLS PLANTA 1	254 SMO	198.760	3	596.280	18 SEMANAS
VALVULAS			254 SMO	10.250	24	246.000	24 SEMANAS
MANIFOLD			254 SMO	149.122	2	298.244	32 SEMANAS
						1.935.564	
COSTO MTTO	Costo de Mantenimiento para realizar el cambio de los componentes es de US\$ 250.000 con una sola detención					250.000	
COSTO PROD.	Considerando un costo de detención de la producción de 51.687 US\$/hora y una detención de 48 horas por única vez					2.480.976	
					TOTAL US\$	4.666.540	

Figura n°21: “Tabla resumen de estimación de costo por reemplazo de equipos en material 254 SMO” Fuente: Elaboración propia

Las tablas, son un resumen valorizado con plazos estimados de entrega de las propuestas en los distintos materiales seleccionados en la propuesta técnica. Los valores son estimados con cotizaciones referenciales de proveedores y vendor de los equipos.

6.5.3 Análisis de las propuestas en los distintos materiales

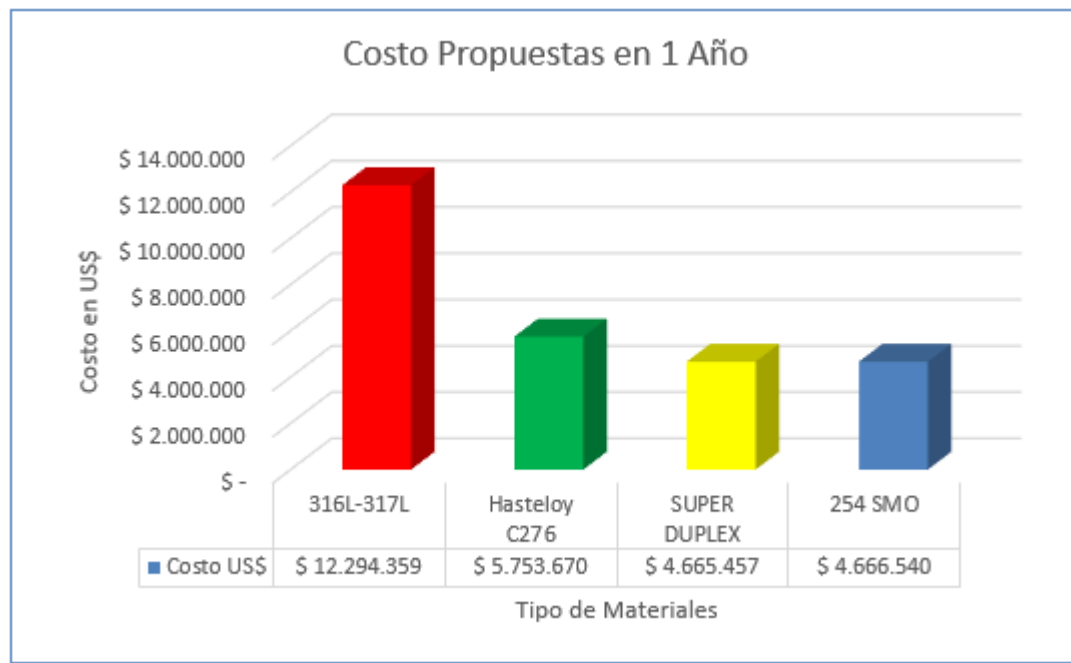


Figura n°22: “Grafico de costos de los materiales evaluados”

Fuente: Elaboración propia

El gráfico, es un resumen de los materiales estudiados, la interpretación de las tablas y del gráfico es la siguiente:

- La primera tabla que se muestra en la figura 18, muestra el costo del cambio de equipos, pero sin cambiar de materialidad, manteniendo el mismo material existente, pero, realizando el cambio en un período de 3 meses, debido al desgaste provocado por el alto porcentaje de cloro en el PLS y Refino. Esto, si es analizado en un período de 1 año, significan cuatro detenciones del proceso para realizar los cambios de los equipos estudiados en esta propuesta, por eso, el alto costo que significa.
- En la tabla de la figura 19, se muestra el costo de cambio de componentes en el material Hasteloy C276, material que soporta los 20.000 PPM de cloro. Si

bien este material está por sobre lo requerido, es un muy buen material, pero el costo es bastante elevado más del doble que los demás materiales.

- En la tabla de la figura 20, se evalúa el material Súper Duplex 2507, material que soporta los 15.000 PPM de cloro. La dificultad es el extenso plazo de entrega de las bombas.
- En la tabla de la figura 21, se analiza la propuesta del material 254 SMO. Es el material con mejor plazo de entrega que soportan los 15.000 PPM de cloro, este material es uno de los más cotizados por los proveedores de los equipos instalados.

6.6 Selección de la propuesta

La propuesta seleccionada a continuación es en base a la evaluación técnica y económica ya realizada, luego es agregada una tercera variable para elegir la mejor propuesta que es tomar en cuenta la criticidad de los equipos dentro del proceso y la temperatura de trabajo.

La temperatura de trabajo en las bombas tiene un nivel de criticidad mayor que en las válvulas y los manifold, por tener componentes en movimiento y roce que puede provocar temperatura variable muy peligrosa, todo esto, si tenemos concentraciones altas de cloro en el proceso.

Las válvulas tienen un impacto menor en el proceso por el tiempo en promedio de reparación y/o cambio, además de soportar con mejor performance la corrosión en comparación de los manifold (cañerías de descarga de bombas), Las cañerías por su espesor de pared y soldaduras que es por donde comienza la corrosión por pitting y grietas.

TABLA DE VALORES CON MATERIALES SELECCIONADOS PARA LA PROPUESTA							
TAG EQUIPO	TIPO EQUIPO	UBICACIÓN	MATERIA L	COSTO UNITARIO US\$	CANTIDA D	COSTO TOTAL US\$	PLAZO ENTREGA
020PP001-004	BOMBA VERTICAL	REFINO PLANTA 1	HASTELL OY C276	299.300	4	1.197.200	18 SEMANAS
020PP007-009	BOMBA VERTICAL	PLS PLANTA 1	HASTELL OY C276	299.300	3	897.900	18 SEMANAS
VALVULAS			254 SMO	10.250	24	246.000	24 SEMANAS
MANIFOLD			SUPER DUPLEX	102.255	2	204.510	24 SEMANAS
						2.545.610	
COSTO MTTO	Costo de Mantenimiento para realizar el cambio de los componentes es de US\$ 250.000 con una sola detención					250.000	
COSTO PROD.	Considerando un costo de detención de la producción de 51.687 US\$/hora y una detención de 48 horas por única vez					2.480.976	
					TOTAL US\$	5.276.586	

Figura n°23: “Tabla resumen de estimación de costo por reemplazo de equipos propuesta seleccionada”

Fuente: Elaboración propia

6.6.1 Análisis de la propuesta seleccionada



Figura n°24: “Gráfico de costos incorporada la propuesta”

Fuente: Elaboración propia

El gráfico, es un resumen de los materiales estudiados e incorpora la última tabla con la propuesta creada según el análisis de criticidad. La interpretación de la tabla y del gráfico es la siguiente:

- La propuesta seleccionada, es una mezcla de distintos materiales en base a la variable de criticidad de los equipos, precio y plazos de entrega, con esto se optimizan los recursos y disminuye el costo de la propuesta.

El análisis de criticidad de los equipos declarados por la compañía es el siguiente:

Equipos	Impacto	Criticidad	MTTR
Bombas	Alto	Alto	Alto
Manifold (Spool y cañerías)	Medio	Medio	Medio
Válvulas	Bajo	Bajo	Bajo

- Las bombas alta criticidad por el tema de temperatura por roce que se podría generar y eso conlleva corrosión por cloruro de forma acelerada.
- Los manifold (spool) cañerías de acero se consideran de mediana criticidad ya su espesor de pared y soldaduras van a estar expuestos a la corrosión por pitting y grietas.
- Las válvulas se consideran de baja criticidad ya que al ser atacadas por la corrosión el tiempo de cambio es menor que los demás componentes

Para las bombas de PLS, ILS y Refino, se recomienda utilizar el material Hastelloy C276, ya que este material soporta hasta 20.000 PPM de cloro. Esto, permite tener un rango de seguridad por si se genera temperatura en los equipos o se sobrepasa el límite declarado por la compañía que son 15.000 PPM en forma permanente.

Para las válvulas se considera el material 254 SMO, debido a que en estos componentes no existe la posibilidad de que se genere temperatura, también una variable a considerar es en precio y plazo entrega.

Para los manifold, se considera el material SUPER DUPLEX, considerando el precio y plazo de entrega con respecto al 254SMO, ambos compatibles.

Aumento Producción 2023		
Rendimiento Producción	Ton	10.000
Precio Venta Cátodos año 2023	USD/lb	3,85
Costo Variable Producción Cátodos	USD/lb	2,4
Libra/Tonelada	Lb/Ton	2.204,62
Ingresos Aumento de producción de 10KT	USD	84.877.870
Costos variable Aumento de producción de 10KT	USD	52.910.880
Utilidad	USD	31.966.990

Figura n°25: “Tabla con impacto de las 10KT al realizar la propuesta”

Fuente: “Gerencia de Mantenimiento de Compañía Minera Cerro Colorado”

Realizando un análisis del impacto que genera el aumento de 10.000T de cobre, esto genera como utilidad para la compañía de MUSD 32,2 por lo que la inversión de MUSD 5,2 equivale a un 16,5% de la utilidad proyectada.

7 Conclusiones y Recomendaciones

Al realizar el levantamiento y recopilación de datos, se logró identificar que el 90% de equipos existentes en la planta, están contruidos del material inoxidables 316L y un 10% en 317L, los cuales resisten entre 3.000 y 5.000 PPM de cloro en los fluidos, este antecedente es el punto de partida para el desarrollo de la propuesta.

Una vez identificados los equipos expuestos a evaluación, debido al aumento de la concentración de cloruro, se toman en consideración los circuitos de PLS y REFINO.

Posteriormente fueron seleccionados los siguientes materiales compatibles a las necesidades operacionales futuras, que deben soportan concentraciones de cloruro hasta los 15.000 PPM y a temperatura ambiente, encontrando así las alternativas de materiales que son:

- Austenítico tipo 904L UNS N08825
- Austenítico tipo 254 SMO UNS S32254
- Austenítico tipo 654 SMO UNS S32654
- Duplex tipo 2205
- Super-duplex tipo 2507 UNS S32750
- Hastelloy tipo C 276 UNS N10276
- Titanio G2

La selección técnica de los materiales fue basada según los ensayos de la Norma ASTM G48 evaluando la corrosión por pitting y grieta. Otro elemento a considerar fue el comportamiento de los materiales expuestos a concentraciones de cloruro a distintas temperaturas.

Con las concentraciones de cloruro declaradas por la compañía, se seleccionan tres materiales para la evaluación económica.

- Austenítico tipo 254 SMO UNS S32254
- Super-duplex tipo 2507 UNS S32750
- Hastelloy tipo C 276 UNS N10276.

Para poder realizar la evaluación económica, se realizó el análisis de impacto financiero con la importancia de la detención de la producción.

Se tomaron cotizaciones referenciales del área de Ingeniería de todos los equipos instalados actualmente en la planta con los materiales de construcción originales como también los tres materiales seleccionados en la evaluación técnica.

Para la evaluación financiera de la propuesta de reemplazo, se realizaron los siguientes ejercicios:

- **Ejercicio N°1:** figura 18 Cambio de los equipos actuales en material 316 y 317L, con una frecuencia de 3 meses, proyectado a 1 año.
- **Ejercicio N°2:** Figura 19 Cambio de los equipos actuales en material Hastelloy tipo C 276, considerando únicamente una detención, para el reemplazo definitivo.
- **Ejercicio N°3:** Figura 20 Cambio de los equipos actuales en material Súper Duplex tipo 2507, considerando únicamente una detención, para el reemplazo definitivo.
- **Ejercicio N°4:** Figura 21 Cambio de los equipos actuales en material 254 SMO, considerando únicamente una detención, para el reemplazo definitivo.

Una vez evaluadas las cuatro propuestas, es incorporada una tercera variable, que es la criticidad de los equipos en el proceso productivo.

El análisis de criticidad de los equipos es el siguiente:

- Alta criticidad: Bombas de PLS y Refino, por la detención total del proceso productivo.

- Mediana criticidad: todos los manifold (spool y cañerías), por su espesor y soldaduras que van a estar expuestas.
- Baja criticidad: Las válvulas ya que el impacto por detención es menor que los demás componentes

Para las bombas de PLS y Refino se recomienda utilizar el material Hastelloy C276, ya que este material soporta hasta 20.000 PPM de cloruro. Esto permite tener un rango de seguridad, por si se genera temperatura en los equipos o se sobrepasa el límite declarado por la compañía, que es 15.000 PPM, en forma permanente.

Para las válvulas se recomienda el material 254 SMO, el que puede operar a 15.000 PPM de cloruro. La decisión de elegir este material es por precio y plazo de entrega menor que el material super dúplex.

Para los manifold spool y cañerías) se recomienda el material SUPER DUPLEX, de buen comportamiento a 15.000 PPM de cloruro, tiene un mejor plazo y precio que los otros materiales seleccionados.

La propuesta seleccionada Figura 23 es una mezcla de distintos materiales, optimizando así los recursos y disminuyendo el costo de la propuesta la cual equivale a un 43% del costo de evaluación financiera del Ejercicio N°1 figura 18, considerando solo un año en evaluación.

Una vez realizada la evaluación económica, con el análisis financiero de la detención de la producción y la variable de criticidad, se logró determinar la solución de reemplazo definitivo de los equipos.

El objetivo buscado era encontrar el material optimo, que cumpla con las condiciones de cada fluido y equipo, y que, económicamente, sea rentable para las proyecciones de la compañía.

La propuesta elaborada aumentará la confiabilidad y disponibilidad de los equipos estudiados, a su vez, se asegurará el cumplimiento de la producción proyectada por la compañía.

Por lo tanto, se da cumplimiento al objetivo general de **“Elaborar una propuesta de cambio de materialidad en los equipos del sistema de impulsión de PLS y REFINO**

de la planta 1, buscando la mejor alternativa existente en el mercado, que sea capaz de soportar la concentración de 15.000 PPM de cloruro, para aumentar la producción anual en 10.000 T de 38 KT a 48 KT para el año 2023”.

8 Referencias

- Apunte de Ingeniería de Confiabilidad MGM313 RSB RCM Base Conceptual, Raul Stegmaier Bravo
- Compañía Minera Cerro Colorado, Pampa Norte, BHP “*Manual de Operaciones*” Iquique, Chile
- Handbook of Stainless Steel (2013).
- Practical Guidelines for the fabrication of duplex stainless steel (2009)
- Informe anual Gerencia de Mantenimiento de Compañía Minera Cerro Colorado
- Datos aportados por la Superintendencia de Ingeniería, Soporte Técnico
- ASTM International /2012/ ASTM A48 / A48M-03 /2012/ “*Standard Specification for Gray Iron Castings*”/ West Conshohocken, PA, USA
- Callister, W. /1997/ “*Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*” Reverté, S.A. 84-291-7253X/ Barcelona, España.
- Gómez, R. /2008/” *Corrosión*” / Universidad de Alicante/_Alicante, España